POTENCIAL DE REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PELA CAPTURA E SEQUESTRO DE CO_2 DE DESTILARIAS DE ETANOL DO CENTRO SUL DO BRASIL PARA UTILIZAÇÃO EM RECUPERAÇÃO AVANÇADA DE PETRÓLEO

Thaís de Moraes Mattos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético.

Orientadores: Roberto Schaeffer

David Alves Castelo Branco

Rio de Janeiro

Março de 2018

POTENCIAL DE REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PELA CAPTURA E SEQUESTRO DE CO_2 DE DESTILARIAS DE ETANOL DO CENTRO SUL DO BRASIL PARA UTILIZAÇÃO EM RECUPERAÇÃO AVANÇADA DE PETRÓLEO

Thaís de Moraes Mattos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:

_____

Prof. Roberto Schaeffer, Ph.D.

_____

Prof. David Alves Castelo Branco, D.Sc.

_____

Prof. Bettina Susanne Hoffmann, D.Sc.

_____

Prof. Paulo Roberto de Campos Merschmann, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2018

Mattos, Thaís de Moraes

Potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa pela captura e sequestro de CO_2 de destilarias de etanol do Centro Sul do Brasil para utilização em recuperação avançada de petróleo/ Thaís de Moraes Mattos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XII, 186 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Roberto Schaeffer

David Alves Castelo Branco

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 153-161

1. BIOCCS. 2. CO_2 evitado. 3. ACV. I. Schaeffer, Roberto *et al*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus orientadores Roberto Schaeffer e David Alves Castelo Branco, por todos os ensinamentos passados antes e durante a elaboração desta dissertação. Foi um grande aprendizado desenvolver este trabalho sob a orientação de vocês.

Também gostaria de agradecer à Bettina Hoffmann por aceitar participar da banca de avaliação desta dissertação e ao Paulo Roberto Merschmann, por sua presença na banca e por todos os ensinamentos ao longo deste processo.

Aos meus colegas do PPE, em especial ao Fábio Texeira, que sempre esteve disponível para tirar diversas dúvidas durante a elaboração desta dissertação, que foram fundamentais para a aplicação da metodologia de transportes utilizada neste estudo; e a Renata, sempre carinhosa e prestativa. Obrigada também ao Paulo e Sandra pela ajuda em toda a burocracia.

Aos meus colegas de trabalho da FBDS, que sempre me apoiaram quando desejei fazer mestrado e por toda a troca de idéias, em especial ao Walfredo Schindler, Israel Klabin, Luis Saporta, Fábio Scarano, Chris Maroun e Aliny Pires.

Aos amigos de longa data que também contribuíram muito neste processo, enviando arquivos, ensinando a mexer em programas novos ou trocando idéias, em especial aos meus queridos amigos Chico, Karen, Lilian e minha prima Nanda. E a minha querida amiga-irmã Licia, que me ajudou muito sendo a primeira a ler toda essa dissertação. Agradeço também aos amigos Juliane e Fabio, por me manterem saudável nessa jornada.

A todos os amigos e familiares que torciam por mim e desejavam sempre que o melhor acontecesse. Em especial, gostaria de agradecer à minha mãe (e melhor amiga) e ao tio Dinei, que me apoiam incondicionalmente e são os maiores torcedores da minha vida. Amo muito vocês e obrigada por tudo o que sempre fizeram por mim. E ao meu pai, que não está aqui para me ver mestre, mas também faz parte desta conquista.

E ao meu amor, meu companheiro e parceiro da vida, Bruno Alvarez, que aguentou minhas noites viradas, meu cansaço e minha falta de tempo, me dando todo o seu carinho, apoio, lanchinhos e seu abraço para me confortar.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

POTENCIAL DE REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PELA CAPTURA E SEQUESTRO DE CO_2 DE DESTILARIAS DE ETANOL DO CENTRO SUL DO BRASIL PARA UTILIZAÇÃO EM RECUPERAÇÃO AVANÇADA DE PETRÓLEO

Thaís de Moraes Mattos

Março/2018

Orientadores: Roberto Schaeffer
David Alves Castelo Branco

Programa: Planejamento Energético

Este trabalho desenvolveu uma análise de ciclo de vida com o principal objetivo de avaliar as emissões de GEE de um projeto de bionergia com captura e armazenamento de carbono (BIOCCS) que utiliza o CO_2 de fermentação em destilarias de etanol do Centro-Sul brasileiro para utilização em atividades de Recuperação Avançada de Petróleo (EOR) na Bacia de Campos, investigando o saldo de armazenamento líquido de CO_2 que pode ser obtido com esse projeto após se descontar as emissões na implementação e operação do mesmo, que geralmente não são contabilizadas. Foram utilizadas três opções de transporte para o CO_2 propostas em outro estudo, que avaliou a opção tecnológica de mínimo custo de transporte do CO_2, considerando dutos e caminhões. O presente estudo mostrou que, diferentemente dos resultados obtidos pela avaliação econômica, onde pequenas destilarias se mostraram favoráveis ao transporte rodoviário, pela ótica das emissões essa opção era favorável apenas para uma destilaria. O transporte por dutos a múltiplos Hubs se apresentou como a melhor opção pelas emissões. A etapa que contribui com a maior parte das emissões em todo o ciclo de vida é a de transportes, com a fabricação dos dutos se apresentando como a maior contribuidora das emissões. Os resultados deste estudo mostraram que dos 444,7 $MtCO_2$ produzidos pela fermentação das destilarias, ainda é possível considerar que o armazenamento líquido de CO_2 é de 94,9% a 96,1% deste valor, já que as emissões do ciclo de vida do projeto nas três configurações variam entre 3,9% e 5,4% do total.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EVALUATION OF THE REAL POTENTIAL TO REDUCE GREENHOUSE GAS EMISSIONS BY CAPTURING CO_2 FROM ETHANOL DISTILLERIES´ EMISSION FROM THE CENTER-SOUTH REGION OF BRAZIL TO BE USED IN EOR ACTIVITIES

Thaís de Moraes Mattos

March/2018

Advisors: Roberto Schaeffer

David Alves Castelo Branco

Department: Energy Planning

This study has developed a life cycle analysis (LCA) with the main objective to assess the GHG emissions of a project of bioenergy with carbon capture and storage (BIOCCS) that uses CO_2 from the fermentation of ethanol distilleries from the Center-South of Brazil for use in Enhanced Oil Recovery (EOR) activities in the Campos Basin, showing the net emissions of CO_2 storage after the subtraction of the emissions from the project´s implementation and operation, which are not usually considered. Three transportation options for CO_2 were used, which were proposed in another study where the main purpose was an evaluation of the techonology with the minimum cost for different CO_2 transportation networks, considering pipelines and trucks. This study showed that, differently from a financial point of view, where small distilleries showed to be favorable to road transport, this modal is a good choice for just one distillery when the full life cycle emissions are considered. The pipeline transportation to multiple Hubs showed to be the best option in terms of emissions. The phase that most contribute for emissions in the LCA is the transportation phase and the pipe manufacturing has the highest emission contribution in the LCA. The results from this study show that 444.7 $MtCO_2$ are produced by the distilleries, but that it is still possible to achieve a net storage of 94.6% to 96.1% of that, since the emissions from this project´s life cycle analysis represent some 3.9% - 5.4% of that total in the three case studies considered.

Sumário

1. Introdução 1
1.1. Motivação 7
1.2. Objetivo 9
1.3. Estrutura do trabalho 10
2. BIOCCS e emissões negativas 11
2.1. BIOCCS na cadeia produtiva do etanol 13
2.1.1. Captura 16
2.1.2. Transporte 21
2.1.3. Armazenamento 26
2.1.3.1. Recuperação Avançada de Petróleo (EOR) 27
2.1.4. Projetos existentes 34
3. Análise de Ciclo de Vida: estado da arte e aspectos metodológicos 37
3.1. Histórico da ACV 38
3.2. Metodologia e fases de uma ACV 38
3.2.1. Fases de uma ACV 38
3.2.1.1. Definição de objetivo e escopo 39
3.2.1.2. Inventário de Ciclo de Vida 41
3.2.1.3. Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida 42
3.2.1.4. Interpretação, Comunicação e revisão crítica 45
3.2.2. Obtenção de dados 45
3.2.3. Barreiras e limitações 46
3.3. Proposta metodológica: Análise do Ciclo de Vida para CCS 47
4. Aplicação metodológica: análise do potencial de redução de emissão de GEE pela utilização do CO_2 da fermentação do etanol das destilarias do Centro-Sul do Brasil para recuperação avançada de petróleo 49
4.1. Descrição do caso 49
4.2. Definição de objetivo e escopo 52
4.2.1. Objetivo da Análise de Ciclo de Vida 52
4.2.2. Unidade funcional 53
4.2.3. Definição do sistema 53
4.3. Inventário de Ciclo de Vida 54
4.3.1. Produção de CO_2 pela fermentação das destilarias 54
4.3.2. Captura 60
4.3.3. Transporte 64
4.3.3.1. Dimensionamento dos dutos 65
4.3.3.2. Caso 1: Destilarias ligadas a um único Hub por dutos 77

4.3.3.3. Caso 2: Destilarias ligadas a um único Hub por dutos e caminhões 82
4.3.3.4. Caso 3: Destilarias ligadas a múltiplos Hubs por dutos..... 101
4.3.4. Cálculo do saldo de emissões 106
5. Resultados – Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida..... 108
5.1. Apresentação dos resultados 108
5.1.1. Caso 1 – Destilarias ligadas a um único Hub por dutos 108
5.1.2. Caso 2 - Destilarias ligadas a um único Hub por dutos e caminhões..... 117
5.1.3. Caso 3 - Destilarias ligadas a múltiplos Hubs por dutos 127
5.2. Discussões..... 145
6. Considerações Finais..... 149
7. Referências Bibliográficas 153
Anexo 1 – Dados obtidos para o Caso de único Hub de dutos compartilhados..... 162
Anexo 2 - Dados obtidos para o Caso de único Hub de dutos unitários 167
Anexo 3 - Dados obtidos para o Caso Intermodal..... 171
Anexo 4 - Dados obtidos para o Caso múltiplos Hubs de dutos compartilhados..... 175
Anexo 5 - Dados obtidos para o Caso múltiplos Hubs de dutos unitários 181

Lista de Figuras

Figura 1: Média da concentração global dos principais gases de efeito estufa ao longo do tempo. 1
Figura 2: Emissões antropogênicas de GEE entre 1970 e 2010 2
Figura 3: Conceito de BIOCCS 6
Figura 4: Balanço de carbono de diferentes sistemas energéticos 11
Figura 5: Destilarias de etanol no Brasil 15
Figura 6: Volume ocupado por 1 tCO_2 a 40ºC em função da variação de sua pressão 19
Figura 7: Diagrama de fases do CO_2 em função de sua temperatura e pressão 20
Figura 8: Métodos de armazenamento do CO_2 em formações geológicas 27
Figura 9: Localização da Bacia de Campos e seus campos de petróleo 32
Figura 10: Etapas de uma Análise de Ciclo de Vida 39
Figura 11: Representação do conceito de ACV 43
Figura 12: Representação de uma avaliação de impacto ambiental 43
Figura 13: Esquema metodológico da localização das redes de transporte 51
Figura 14: Escopo do presente estudo 53
Figura 15: Produção de etanol por região na safra de 2015/2016 58
Figura 16: Parâmetros considerados em um corte transversal de um duto de seção circular 66
Figura 17: Destilarias do Centro-Sul e localização do Hub 78
Figura 18: Dutos entre destilarias e o único Hub 79
Figura 19: Fluxograma das emissões de GEE consideradas consideradas na Análise do Ciclo de Vida do Caso 1 80
Figura 20: Caminhão semirreboque com eixos espaçados, escolhido para o transporte rodoviário de CO_2 90
Figura 21: Fluxograma das emissões de GEE consideradas na Análise do Ciclo de Vida do Caso 2. 100
Figura 22: Localização dos Clusters de destilarias e dos 8 Hubs 102
Figura 23: Dutos ligando as destilarias a seu Hub correspondente 103
Figura 24: Localização dos hubs para transporte do CO_2 das destilarias do Centro Sul à Bacia de Campos. 104
Figura 25: Fluxograma das emissões de GEE consideradas na Análise do Ciclo de Vida do caso 3. 105
Figura 26: Participação de cada fonte na ACV do transporte no caso de único Hub 113
Figura 27: Participação de cada etapa no caso de único Hub. 114
Figura 28: Participação de cada fonte na ACV no caso de único Hub. 114
Figura 29: Distribuição da emissão da ACV de cada destilaria pela distância ao Hub no caso de único Hub. 116
Figura 30: Distribuição da emissão da ACV de cada destilaria pela quantidade de CO_2 produzida por cada destilaria no caso de único Hub. 116
Figura 31: Participação de cada fonte na ACV do transporte no caso intermodal 122
Figura 32: Participação de cada etapa no caso intermodal. 123

Figura 33: Participação de cada fonte na ACV do transporte considerando apenas o transporte rodoviário. _____ 124
Figura 34: Participação de cada fonte na ACV no caso intermodal._____ 125
Figura 35: Distribuição da emissão de cada destilaria pela distância ao Hub no intermodal. _____ 126
Figura 36: Distribuição da emissão de cada destilaria pela quantidade de CO_2 armazenada no projeto no intermodal. _____ 126
Figura 37: Participação de cada fonte na ACV do transporte no caso de múltiplos Hubs. _____ 133
Figura 38: Participação de cada etapa no caso de múltiplos Hubs._____ 133
Figura 39: Participação de cada fonte na ACV no caso intermodal._____ 134
Figura 40: Distribuição da média de emissão anual de cada destilaria pela distância a um dos Hubs no caso de múltiplos Hubs._____ 135
Figura 41: Distribuição da emissão da ACV de cada destilaria pela quantidade de CO_2 produzida por cada destilaria no caso de múltiplos Hub._____ 136

Lista de Tabelas

Tabela 1: Capacidade instalada de produção de etanol, produção efetiva e fator de utilização da capacidade instalada por Estado _____ 56
Tabela 2 - Produção total de etanol no Brasil em 2015_____ 59
Tabela 3: Quadro resumo dos parâmetros utilizados no cálculo da emissão total da captura _____ 64
Tabela 4: Parâmetros usados no cálculo do diâmetro dos dutos _____ 66
Tabela 5: Quadro resumo dos parâmetros utilizados no cálculo da fabricação dos dutos _____ 75
Tabela 6: Quadro resumo dos parâmetros utilizados no cálculo da emissão das estações de recompressão _____ 77
Tabela 7: Parâmetros utilizados para cálculo do consumo energético do compressor para liquefação _____ 85
Tabela 8: Parâmetros utilizados para o cálculo da compressão para liquefação do CO_2 variáveis em cada estágio _____ 86
Tabela 9: Parâmetros para cálculo da bomba de compressão para elevação da pressão do CO_2 para o Hub _____ 89
Tabela 10: Quadro resumo com os parâmetros utilizados no cálculo da ACV dos tanques de armazenamento _____ 92
Tabela 11: Quadro resumo com os parâmetros utilizados na ACV dos caminhões __ 95
Tabela 12: Quadro resumo para o cálculo da ACV dos pneus _____ 97
Tabela 13: Parâmetros para o cálculo da emissão do transporte rodoviário pelo consumo de combustível pelos caminhões _____ 99
Tabela 14: Características gerais do transporte por único Hub _____ 109
Tabela 15: Resultado da Análise de Ciclo de Vida para a configuração de dutos compartilhados para o caso de único Hub _____ 110
Tabela 16: Resultado da Análise de Ciclo de Vida para a configuração de dutos individuais para o caso de único Hub_____ 110
Tabela 17: Características gerais do transporte intermodal_____ 118
Tabela 18: Resultado da Análise de Ciclo de Vida para o caso intermodal _____ 119
Tabela 19: Características gerais da configuração de múltiplos hubs – dutos de grande capacidade _____ 128
Tabela 20: Características gerais da configuração de múltiplos hubs – dutos entre destilarias e Hubs _____ 128
Tabela 21: Resultado da Análise de Ciclo de Vida para a configuração de dutos compartilhados para o caso de múltiplos Hubs _____ 129
Tabela 22: Resultado da Análise de Ciclo de Vida para a configuração de dutos individuais para o caso de múltiplos Hubs_____ 129
Tabela 23: Quadro resumo dos resultados da ACV das três configurações _____ 137
Tabela 24: Emissão por 1.000 tCO_2 armazenadas para cada destilaria e cada caso considerado 139

Abreviações e siglas

ACV – Análise de Ciclo de Vida

ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BIOCCS – *Bioenergy with Carbon Capture and Storage*

CCS – *Carbon Capture and Storage*

CCUS – *Carbon Capture Utilization and Storage*

EOR – *Enhanced Oil Recovery*

GEE – Gás de Efeito Estufa

GWP – *Global Warming Potential*

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

LCI – *Life Cycle Inventory*

LCIA – *Life Cycle Impact Assessment*

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

NDC – *Nationally Determined Contribution*

OOIP – *Original Oil in Place*

tCO_2e – toneladas de CO_2 equivalente

UNFCCC - United *Nations Framework Convention on Climate Change*

1. Introdução

As emissões antropogênicas de Gases de Efeito Estufa (GEE) vêm aumentando desde a era Pré-Industrial até os dias de hoje e as emissões históricas ao longo de todo este período levaram a um aumento de concentração na atmosfera do dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), em uma escala sem precedentes, como mostra a Figura 1 (IPCC, 2014).

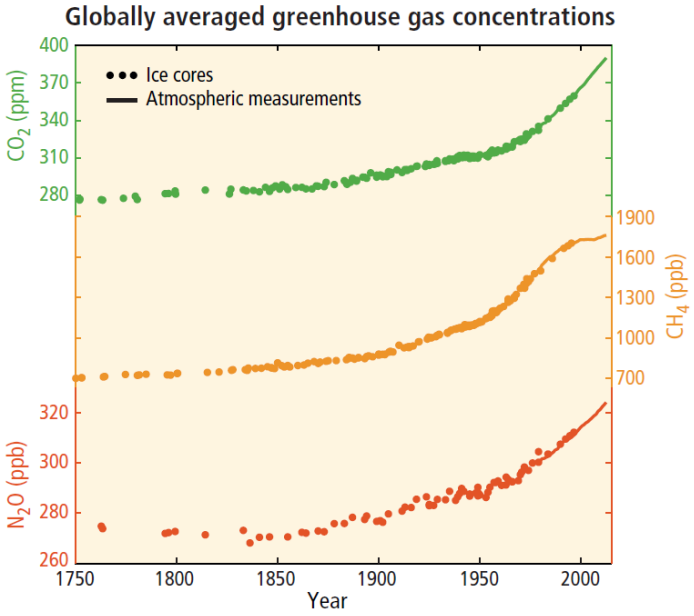

Figura 1: Média da concentração global dos principais gases de efeito estufa ao longo do tempo. A curva em verde representa a concentração do CO_2, a laranja representa a concentração do CH_4 e a vermelha, do N_2O. Fonte: IPCC (2014)

Cerca de metade das emissões antropogênicas acumuladas de CO_2 entre os anos de 1750 e 2011 ocorreram nos últimos 40 anos (IPCC, 2014). O principal contribuidor para o aumento do forçamento radiativo[1] do sistema climático nos últimos anos foi a concentração atmosférica do CO_2 (IPCC, 2014). Como pode ser visto na Figura 2, esse foi o gás de efeito estufa mais emitido pelas atividades humanas[2] no período de 1970 a 2010, com essas emissões representadas pela curva laranja do gráfico a seguir.

[1] O forçamento radiativo é definido pelo IPCC (da sigla em inglês *Intergorvernmental Panel on Climate Change* ou Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas) como uma mudança no fluxo energético causado por um agente e tem sua medida em Watts por metro quadrado (W/m^2) (IPCC, 2014).

[2] Principalmente pela combustão de combustíveis fósseis e processos industriais (IPCC, 2014).

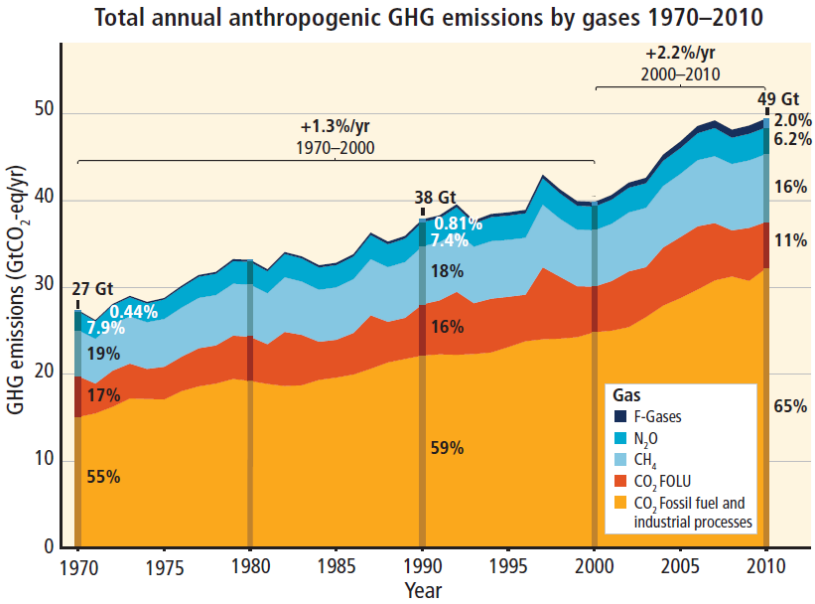

Figura 2: Emissões antropogênicas de GEE entre 1970 e 2010. Fonte: IPCC (2014)

As emissões de CO_2 vem aumentando a cada ano e se essa tendência de crescimento continuar, a variação da temperatura média do planeta pode chegar a 4,8ºC em 2100, de acordo com o cenário mais pessimista do *Fifth Assessment Report* do IPCC (IPCC, 2014). Quanto maior as emissões de GEE, maior a severidade das consequências associadas a essas emissões (IEA, 2013). Alguns aspectos e impactos associados a mudanças climáticas irão permanecer por séculos, mesmo se as emissões antropogênicas de GEE cessarem, como por exemplo o aumento do nível do mar e mudanças nos regimes de chuva (IPCC, 2014).

As principais propostas para limitar a concentração de CO_2 na atmosfera tem como objetivo não permitir que a variação da temperatura média do planeta ultrapasse 2ºC em relação à temperatura média da época pré-industrial e para isso é necessário um grande esforço de redução de emissão de CO_2 ao longo das próximas décadas (IPCC, 2014). Essa redução das emissões pode ocorrer tanto pela redução da emissão líquida de CO_2 lançada na atmosfera (como a redução do consumo de combustíveis fósseis), quanto pela captura de maiores quantidades de CO_2 antropogênico (GASSER *et al.*, 2015). De acordo com ZEP e EBTP (2012), existe uma grande urgência de tecnologias capazes de proporcionar emissões negativas de carbono como o BIOCCS, que será mais detalhado posteriormente neste estudo, que é a única tecnologia capaz de remover o CO_2 da atmosfera em grande escala segundo esta publicação.

Já foram feitos alguns esforços em direção a uma tentativa de redução global de emissões de gases de efeito estufa, como o Protocolo de Quioto, que foi um tratado resultante da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC da sigla em inglês), estabelecendo metas de redução de emissão de GEE para os países desenvolvidos, que são considerados os responsáveis históricos pelas atuais alterações do clima (MMA, 2017). O Protocolo foi criado em 1997, entrou em vigor em 2005 e cada país negociou sua própria meta de redução (MMA, 2017). Para o primeiro período do protocolo, os principais países industrializados (com exceção dos EUA), se comprometeram a reduzir suas emissões de GEE em uma média de 5% em relação às emissões de 1990 e no segundo período, os países se comprometeram em reduzir pelo menos 18% abaixo dos níveis de 1990 (MMA, 2017). Para auxiliar na redução das emissões de GEE dos países desenvolvidos, foram criados mecanismos como o MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo), que permitia que esses países comprassem créditos de carbono resultantes de projetos em países em desenvolvimento que tivessem ratificado o protocolo (MMA, 2017). Contudo, os mercados de carbono enfraqueceram e projetos como os de MDL praticamente não são mais desenvolvidos.

Mais recentemente, na 21ª Conferência das Partes (COP21) da UNFCCC que ocorreu em Paris em dezembro de 2015, foi estabelecido um novo acordo entre países, cujo principal objetivo era o fortalecimento de uma resposta global frente às mudanças climáticas (BRASIL, 2016). Este acordo, que ficou conhecido como Acordo de Paris, foi aprovado pelos 195 países da UNFCCC visando a redução global das suas emissões de GEE, na tentativa de manter o aumento da temperatura média do planeta bem menor que 2ºC acima dos níveis pré-industriais[3] (MMA, 2017) e buscar esforços para limitar essa variação a 1,5ºC (ROGELJ *et al.*, 2016). Sob este acordo, os países desenvolveram suas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC da sigla em inglês) contendo a contribuição de reduções de GEE para cada país, de acordo com o que cada governo considerava viável (MMA, 2017).

A NDC brasileira compromete-se em reduzir as emissões de GEE do país em 37% abaixo dos níveis de emissão de 2005 até o ano de 2025 e de 43% abaixo dos níveis de 2005 até 2030 (BRASIL, 2016). Uma das ações indicadas pelo Brasil para que este objetivo seja atingido é aumentar a participação de bioenergia na matriz energética brasileira para

[3] Esta meta representa o nível de variação do clima que os governos concordam que poderia prevenir interferências muito danosas ao clima e ainda garanta uma produção sustentável de alimentos e desenvolvimento econômico (ROGELJ et al, 2016).

aproximadamente 18% até 2030, com medidas como a expansão do consumo de biocombustíveis e aumento da oferta do etanol (BRASIL, 2016). Já os EUA se comprometeram em sua NDC em reduzir suas emissões de GEE ocasionadas por suas atividades econômicas em 26-28% abaixo nos níveis de emissão de 2005 em 2025 e a União Européia se comprometeu em reduzir suas emissões até 2030 em até 40% dos níveis de emissão de GEE referente ao ano de 1990 (IYER *et al*., 2015).

Contudo, de acordo com um estudo desenvolvido por ROGELJ *et al.* (2016), onde foram consideradas todas as ações propostas pelas iNDCs desenvolvidas pelos países (quando ainda eram uma intenção de contribuição pelos países, por isso a letra i na sigla) e a projeção deste cenário de emissões para o ano de 2100, considerando que todas as iNDCs seriam implementadas, verificou-se que as emissões calculadas para este cenário são maiores do que as emissões necessárias para que não se ultrapassasse a variação de 2ºC. Neste cenário, chegaria-se a uma média de aquecimento de 2,6ºC a 3,1ºC (ROGELJ *et al.*, 2016), que não atinge o objetivo do acordo de Paris, que é manter a variação da temperatura média do planeta bem abaixo dos 2ºC. Sendo assim, é necessário que sejam feitos cortes nas emissões além do estabelecido pelas NDCs até o ano de 2030, como a aceleração da substituição de tecnologias com base em combustíveis fósseis, aumento no investimento em tecnologias de baixo carbono e esforços na redução de emissão de GEE para os anos após 2030 também (IYER *et al.*, 2015).

Uma das estratégias em resposta às mudanças climáticas é a mitigação, que consiste no processo de reduzir as emissões de GEE ou aumentar o seu sequestro com o objetivo de limitar as mudanças climáticas futuras (IPCC, 2014). Uma das tecnologias de mitigação apontada como capaz reduzir as emissões de setores industriais em grande escala é o CCS (da sigla em inglês para *Carbon Capture and Storage*) (IEA, 2013). O CCS consiste em um processo onde o CO_2 é separado de outros gases presentes em um exausto (de origem industrial ou de fontes energéticas) através de um processo de captura e então esse CO_2 é comprimido e transportado até um local onde será armazenado por um longo período e assim, será isolado da atmosfera (IPCC, 2014). Com este processo, o CO_2 capturado e armazenado não contribui para o aumento da concentração deste gás na atmosfera. O CCS possui um valor estratégico na economia porque permite uma substituição tardia de cadeias de produção valiosas em um mundo onde a emissão do CO_2 pode ser mais restrita, sendo a única tecnologia disponível hoje que tem o potencial de proteger o clima e preservar o valor das reservas de combustíveis fósseis e sua infraestrutura existente (IEA, 2013). Além disso, a Agência Internacional de Energia (IEA) também apresenta o CCS

como a única tecnologia capaz de mitigar em larga escala emissões da indústria de cimento, ferro e aço, químicas e refinarias, que representam um quinto das emissões globais de CO_2, já que ações de eficiência energética nesses setores sozinhas possuem um potencial bastante limitado para reduzir as emissões de CO_2 (IEA, 2013).

Uma das tecnologias apontadas como importantes nessa trajetória em busca de uma variação na temperatura média do planeta de apenas 2ºC é o BIOCCS (ou BECCS da sigla em inglês *Bioenergy with Carbon Capture and Storage*), onde o CCS é aplicado a processos que utilizam bioenergia, que dependendo das emissões ao longo de todo o ciclo de vida desse processo, o BIOCCS tem o potencial de remover emissões líquidas[4] de CO_2 da atmosfera (McGLASHAN *et al*., 2012; IEA, 2013; IPCC, 2014; ROGELJ *et al*., 2016). O quão negativo podem ser essas emissões proporcionadas pelo BIOCCS dependem da emissão total ao longo do ciclo de vida do projeto, como as penalidades energéticas que ocorrem e a cadeia de produção da biomassa (KEMPER, 2015).

O BIOCCS combina os benefícios da utilização da biomassa com os benefícios do CCS, pois ambas tecnologias são mitigatórias para emissão de GEE e as emissões negativas podem ser obtidas através da captura do CO_2 que estava temporariamente armazenada na biomassa (do CO_2 que a planta utilizou em seu crescimento) e armazenar permanentemente em formações geológicas (McGLASHAN *et al*., 2012). Nesta tecnologia, a produção de energia é o produto principal, enquanto as emissões negativas são um coproduto (McGLASHAN *et al*., 2012). O CCS associado a combustíveis fósseis[5] não atinge emissões negativas, no máximo consegue proporcionar emissões próximas a neutras (IEAGHG, 2011). Diversos setores já foram identificados em outros estudos como sendo aptos ao BIOCCS, como o setor de celulose, de bioeletricidade e de biocombustíveis (LAUDE *et al*., 2011; FABBRI *et al*., 2011). Um esquema do conceito de BIOCCS pode ser visto na Figura 3 a seguir.

[4] A remoção de emissões líquidas de CO_2 da atmosfera também pode ser chamada de emissões negativas (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2017).

[5] A emissão gerada pela combustão dos combustíveis fósseis, que estavam armazenados geologicamente, acrescenta emissões ao ciclo de carbono natural da atmosfera, diferente das emissões oriundas da biomassa, que apenas devolvem o CO_2 que já fazia parte do ciclo de carbono natural e foi armazenado durante a fase de crescimento da planta.

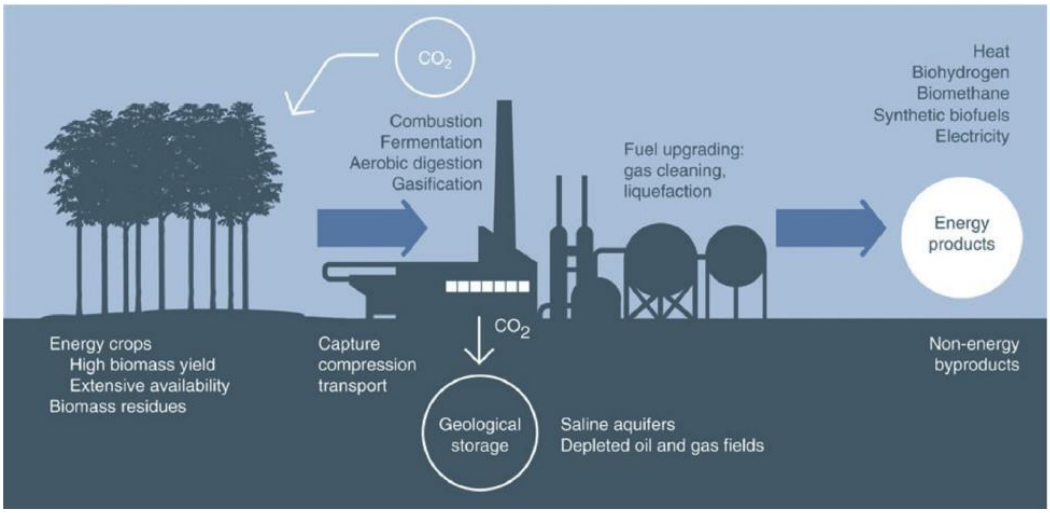

Figura 3: Conceito de BIOCCS. Fonte: KEMPER (2015)

Alguns estudos já foram desenvolvidos na tentativa de quantificar o quanto de emissão negativa seria necessário para que os objetivos climáticos fossem atingidos. Os estudos divergem quanto à quantidade, mas apontam que de alguma forma é necessário que realmente hajam esforços na direção de projetos que possibilitem um saldo negativo de emissões de GEE. De acordo com o estudo desenvolvido por GASSER *et al*. (2015), para que a variação de 2ºC na temperatura média do planeta não seja ultrapassada, é necessário um nível significante de emissões negativas, de cerca de 41 $GtCO_2$ por ano. Mas mesmo necessitando de altos níveis de emissões negativas para que essa variação na temperatura média do planeta não seja ultrapassada, este estudo afirma que apenas as emissões negativas não conseguem garantir o nível de emissão necessário (GASSER *et al*., 2015). Já um estudo mais recente afirma que é possível manter a variação de 2ºC sem a necessidade de projetos de emissões negativas em nenhum período, mas para que a variação seja de apenas 1,5ºC, esses projetos são necessários, atingindo cerca de 1,3 $GtCO_2$ de emissões negativas por ano (WIGLEY, 2018). O que outro estudo aponta é que mesmo que seja possível atingir os 2ºC sem tecnologias de emissão negativa, apenas com uma rápida descarbonização da economia e sua consequente redução de emissão de GEE, o período para apenas essas opções tenológicas sejam implementadas já está se esgotando e provavelmente as tecnologias que proporcionem emissões negativas serão necessárias no futuro (SMITH *et al*., 2016).

A utilização do CO_2 também é uma boa alternativa para complementar o armazenamento geológico deste gás, pois pode aumentar o valor econômico do CO_2 capturado (IEA,

2013). O CO_2 pode ser utilizado para diversos fins, como solvente químico, para descafeinização, carbonatação de refrigerantes ou fabricação de fertilizantes, mas alguns desses usos demandam quantidades bem pequenas do gás (como a indústria de bebidas que utiliza apenas 8 $MtCO_2$ por ano) (IEA, 2013). Grande parte da utilização do CO_2 é pela indústria de petróleo em atividades de recuperação avançada de petróleo (EOR) (IEA, 2013). No Brasil, o estudo de MERSCHMANN (2014) também demonstrou que esta atividade seria a maior demanda para utilização de CO_2 no país.

Um dos desafios da utilização do CO_2 é saber o que acontece com o gás após sua utilização, pois em diversos casos de sua utilização comercial, o CO_2 não fica permanentemente isolado da atmosfera e não auxilia na mitigação das mudanças do clima (IEA, 2013). Um exemplo disso é a utilização de combustíveis a base de carbono, que liberam o CO_2 quando queimado (IEA, 2013). Alguns estudos (como em ASSEN *et al*. (2013) e AZZOLINA *et al*., 2015) consideram a recuperação avançada de petróleo (EOR da sigla em inglês) utilizando CO_2 como CCUS (*Carbon Capture Utilization and Storage*) e não apenas CCS (*Carbon Capture and Storage*), ou seja, uma maneira de utilização desse CO_2, já que o CO_2 será utilizado em uma atividade[6] que produzirá unidades incrementais de petróleo e não será apenas armazenado como no caso de um armazenamento geológico em aquífero salino. Para as tecnologias de utilização do CO_2 que também permitem o isolamento do CO_2 da atmosfera (como é o caso do EOR), a IEA (2013) afirmou que vale a classificação como CCS e essa será a terminologia utilizada neste estudo.

1.1. Motivação

Uma das principais motivações para esse estudo é a urgência de ação para mitigação das mudanças climáticas a curto prazo, necessitando de tecnologias capazes de reduzir as emissões de GEE e a concentração principalmente do CO_2 da atmosfera, como foi visto no item anterior.

[6] A utilização do CO_2 em um projeto de CCU pode ser pela utilização direta do gás como um produto (como seu uso como solvente ou a conversão do CO_2 em outro produto (como em um combustível) (ASSEN et al, 2013).

De acordo com o IPCC (2005), a utilização do BIOCCS da fermentação do etanol tem potencial para desenvolver um papel importante até 2050 e produzir emissões negativas de GEE. Como o Brasil é o segundo maior produtor de etanol no mundo, produzindo 29,9 milhões de m^3 deste combustível em 2015 (ANP, 2016$_b$), quando a produção mundial neste ano foi de cerca de 97 milhões de m^3 de etanol (AFDC, 2018), esta é uma excelente opção para implementação de BIOCCS no Brasil. Os custos associados à captura do CO_2 da fermentação do etanol são baixos (TAGOMORI *et al*., 2018), já que o exausto da fermentação é composto por um CO_2 praticamente puro, como será visto posteriormente, sendo esta uma ótima tecnologia para iniciar o BIOCCS no país.

De acordo com KEMPER (2015), a utilização do CO_2 da fermentação do etanol em conjunto com o EOR é a melhor oportunidade atual para o BIOCCS. Em projetos de EOR, pode ser um grande desafio obter CO_2 em regiões sem acesso a fontes substanciais deste gás (XU *et al*., 2010). Segundo o estudo desenvolvido por FERREIRA (2016), atualmente não existe uma fonte abundante e disponível de CO_2 para a Bacia de Campos, o que desenvolve mais uma motivação para o presente estudo, visto que as destilarias analisadas poderiam suprir essa demanda de CO_2, sendo uma fonte garantida para sua utilização nas atividades de EOR da bacia. Uma das vantagens da utilização do CO_2 em EOR é que é gerado um valor de mercado para as emissões de CO_2 capturadas, além de permitir tanto o armazenamento de CO_2 que seria emitido, quanto aumentar a produção de petróleo (XU *et al*., 2010).

Pensando na viabilidade de um projeto envolvendo CO_2 da fermentação de etanol e utilização como EOR no Brasil, os autores SILVA *et al*. (2018) desenvolveram uma metodologia de otimização do transporte do CO_2 produzido pela fementação do etanol nas destilarias do Centro-Sul brasileiro para sua utilização em atividades de recuperação de petróleo na Bacia de Campos, visando quais configurações de transporte poderiam ser menos custosas. Complementando o estudo desenvolvido por este grupo de autores, visto o que foi apresentado aqui sobre a importância da mitigação das emissões de GEE no contexto global e nacional, o presente estudo visa analisar o saldo de armazenamento líquido que pode ser obtido com esse projeto após se descontar as emissões na implementação e operação de um projeto de grande escala de BIOCCS utilizando a fermentação de etanol do Centro-Sul do Brasil para utilização como EOR na Bacia de Campos, após se descontar as emissões pela implementação e operação deste projeto, que geralmente não são contabilizadas. Serão utilizadas as configurações de transportes

apresentada em SILVA *et al*. (2018) e foi uma recomendação dada pelos autores de deste estudo fazer esta análise, já que o foco do trabalho deles havia sido o aspecto econômico deste projeto, mas é muito importante também analisar pelo ponto de vista dos impactos ambientais nas mudanças climáticas, visto que o aumento da concentração de CO_2 na atmosfera é uma grande preocupação mundial e visa-se ter projetos com o maior saldo de emissão negativa possível.

1.2. Objetivo

O objetivo principal desta análise é quantificar o real potencial de redução de emissões de GEE pela implementação da infraestrutura requerida para toda a cadeia do BIOCCS nas destilarias de etanol do Centro Sul do país através da utilização do CO_2 da fermentação nessas destilarias na recuperação avançada de petróleo, visto que a implementação e operação deste projeto também emite gases de efeito estufa ao longo do seu ciclo de vida. Como o objetivo das tecnologias de CCS é reduzir as emissões de CO_2 lançadas na atmosfera, as tecnologias que permitam uma maior redução das emissões desse gás devem ser priorizadas. Por isso, o objetivo secundário deste estudo visa analisar qual a configuração de transporte do CO_2 das destilarias para o EOR é a melhor em termos de emissão de GEE, considerando toda a análise de ciclo de vida desta atividade.

Serão analisadas três configurações diferentes para a rede de transporte do CO_2 das destilarias do Centro-Sul até a Bacia de Campos, que foram desenvolvidas no estudo de SILVA *et al*. (2018), cujo objetivo era fazer o transporte do CO_2 neste percurso pelo menor custo possível. A contribuição do presente estudo é analisar pelo ponto de vista das emissões de GEE ao longo do ciclo de vida, qual configuração de transporte permite a menor emissão para sua construção e utilização e qual o o saldo de armazenamento líquido que pode ser obtido com esse projeto após se descontar as emissões na implementação e operação do mesmo. Para atingir este objetivo, serão analisadas as emissões de gases de efeito estufa de todo o consumo energético envolvido nesta cadeia, e na fabricação dos materiais constituintes das principais infraestruturas de transportes utilizadas. A metodologia empregada será a Análise de Ciclo de Vida (ACV), seguindo os padrões internacionais da ISO 14040 (2009).

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos além da introdução presente no primeiro capítulo. O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o conceito de BIOCCS, sua aplicação na cadeia produtiva do etanol e apresentação de alguns projetos existentes de BIOCCS e de recuperação avançada de petróleo.

O terceiro capítulo apresenta a proposta metodológica que será utilizada neste estudo sobre Análise de Ciclo de Vida (ACV), mostrando os principais conceitos e as suas fases necessárias. Também é feita uma análise sobre a aplicação de uma ACV para projetos de CCS, que é a metodologia proposta para análise desenvolvida neste estudo.

O quarto capítulo mostra a aplicação da ACV para o estudo de caso considerado, de acordo com as três diferentes configurações de transporte que serão analisadas. Neste capítulo estão presentes as duas primeiras fases da ACV: a definição do objetivo e escopo e toda a análise de inventário de ciclo de vida para a captura e transporte do CO_2 produzido através da fermentação das destilarias de etanol do Centro-Sul do Brasil para a Bacia de Campos.

O quinto capítulo apresenta as duas últimas fases da ACV: a análise de impacto ambiental e a interpretação da ACV desenvolvida, além de outros resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do estudo.

Por último, o sexto capítulo apresenta as principais conclusões obtidas com a análise de ciclo de vida desenvolvida neste estudo e algumas recomendações para estudos futuros.

2. BIOCCS e emissões negativas

A utilização de bioenergia associada ao CCS (BIOCCS) é capaz de proporcionar emissões negativas de CO_2 na atmosfera (MÖLLERSTEN *et al*., 2003; LAUDE *et al*., 2011) já que o CO_2 liberado durante a utilização da tecnologia e que será armazenado geologicamente tem origem biogênica, pois a biomassa havia absorvido esse CO_2 durante sua fase de crescimento (MÖLLERSTEN *et al*., 2003). A vantagem desses sistemas é que permitem uma remoção sustentável do CO_2 da atmosfera ao mesmo tempo em que permitem a produção de energia para atender a demanda (MÖLLERSTEN *et al*., 2003).

O BIOCCS pode ser aplicado em diversas tecnologias que utilizam biomassa, como plantas geradoras de energia (que utilizam apenas biomassa ou as que utilizam cogeração de biomassa e combustível fóssil), plantas combinadas de geração de energia e calor, diversos exaustos da indústria de celulose, fermentação da produção de etanol, processos de refino de biogás e de gaseificação da biomassa (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2010). A escala de produção dessas fontes de CO_2 biogênico varia consideravelmente, de algumas centenas de tCO_2 por ano em uma instalação de biogás a milhões de tCO_2 por ano de grandes plantas da indústria de celulose (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2010). A Figura 4 a seguir mostra o balanço de emissões para diversos tipos de tecnologias, incluindo o BIOCCS.

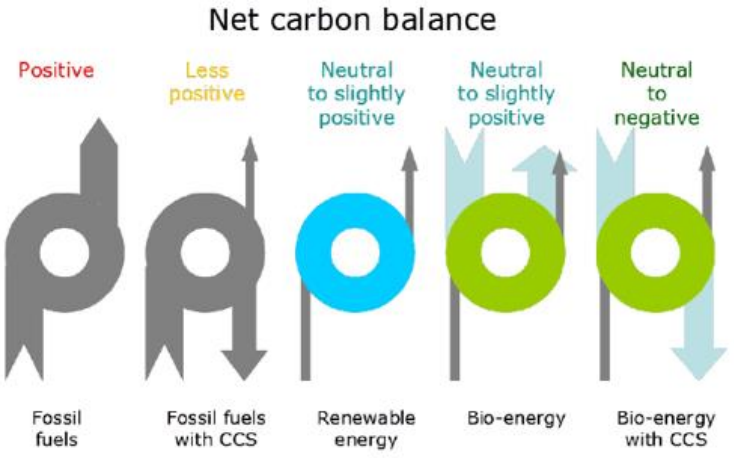

Figura 4: Balanço de carbono de diferentes sistemas energéticos. As setas cinzas representam o carbono de origem fóssil e as azuis, de origem biogênica. Fonte: IEAGHG (2011)

Na Figura 4, os fluxos em cinza representam as emissões por carbono de origem fóssil e os fluxos em azul representam o carbono de origem biogênica. Nos dois primeiros casos dessa figura, o combustível utilizado é fóssil. Na primeira, a geração de energia ocorre sem nenhuma tecnologia de CCS e toda emissão oriunda do combustível fóssil é liberado na atmosfera, gerando um saldo de emissões de CO_2 positivo para a atmosfera. Já no 2º caso, a geração de energia ocorre com captura e armazenamento de carbono, não deixando grande parte das emissões escaparem para a atmosfera, mas devido à penalidade energética da tecnologia e pelo fato das tecnologias de captura não possuírem uma eficiência de 100%, uma pequena parcela das emissões de CO_2 ainda escapam para a atmosfera, representado pela pequena seta para cima, com um saldo de emissões positivas menor do que no 1º caso. No 3º e 4º casos, a geração de energia é feita a partir de fontes renováveis sem CCS. A seta cinza representa o consumo de combustíveis fósseis consumidos por processos secundários da geração de energia (como o consumo de eletricidade na planta de produção do combustível) e a seta em azul representa o carbono de origem renovável que foi utilizado pela biomassa em sua fase de crescimento e posteriormente foi devolvido para a atmosfera, gerando um saldo de emissão de carbono para a atmosfera que varia de ligeiramente positivo a neutro. Já o último caso representa as tecnologias de BIOCCS, que não permitem que parte da emissão oriunda da biomassa que seria devolvida à atmosfera escape, gerando um saldo de emissão negativo para a atmosfera.

O preço do CO_2 em mercados de carbono, que é diretamente influenciado pela política climática vigente e pelo desenvolvimento e disponibilidade de outras opções de mitigação, pode ser tanto um facilitador quanto um obstáculo ao BIOCCS (IEAGHG, 2011). O principal obstáculo para a implementação do BIOCCS é a ausência de um valor econômico para o sequestro do CO_2 de origem biogênica, que também seria capaz de gerar um valor econômico para emissões negativas em mercados de carbono (IEAGHG, 2011). Em mercados de carbono (como o europeu EU-ETS), o armazenamento de CO_2 de origem biogênica não consegue gerar créditos de carbono, não existindo, portanto, um valor econômico para emissões negativas (IEAGHG, 2011; LAUDE *et al.*, 2011). Além disso, com o atual preço do CO_2 em mercados de carbono, é altamente improvável que se resulte um potencial econômico para o BIOCCS (IEAGHG, 2011). De acordo como Banco Mundial (2017), o preço atual da tonelada de CO_2 em mercados de carbono varia entre US$ 1 e US$ 140, sendo que cerca de ¾ das emissões cobertas por mercados de

carbono atualmente possuem valores menores que US$10. Este valor para a tonelada de CO_2 é muito baixo, visto que a faixa de preço deveria ser entre US$ 40-US$ 80 em 2020 para que fosse possível atingir a variação de temperatura proposta pelo acordo de Paris (BANCO MUNDIAL *et al*., 2017).

Para incentivar o desenvolvimento de projetos de BIOCCS, seria necessário a implementação de políticas climáticas mais restritivas para que o preço do CO_2 aumentasse ou que as emissões negativas do BIOCCS fossem integradas a um novo protocolo de GEE (pós Protocolo de Kyoto), para que esses projetos possam ser elegíveis a créditos de emissão (GRONENBERG e DIXON, 2010 in LAUDE *et al*., 2011). Esses facilitadores são relevantes para projetos de CCS em geral (IEAGHG, 2011), incluindo os projetos de BIOCCS.

2.1. BIOCCS na cadeia produtiva do etanol

O etanol, também conhecido como álcool etílico, é produzido no Brasil quase que unicamente pela fermentação e destilação do caldo de cana-de-açúcar e do melaço (UNICA, 2008), ambos sub-produtos da produção de açúcar. Sendo assim, muitas usinas da cana-de-açúcar são mistas, produzindo tanto etanol quanto açúcar, mas grande parte dessas usinas também produz exclusivamente um ou outro produto.

O Brasil é um pioneiro na utilização do etanol como combustível veicular (UNICA, 2008). O país utilizou o etanol em automóveis pela primeira vez na década de 1920, mas a indústria do etanol só ganhou força no Brasil como um combustível utilizado para combustão interna de veículos a partir de 1975 com o Proálcool. O Proálcool foi um programa desenvolvido pelo governo federal brasileiro em resposta à crise de petróleo mundial da década de 1970, inserindo o etanol como parte integrante da matriz energética brasileira (UNICA, 2008). O programa enfrentou diversas crises ao longo dos anos, principalmente da década de 1980, quando o preço do petróleo caiu bastante e o do açúcar estava em alta (UNICA, 2008), o que não dava incentivo à produção do etanol. O uso do etanol por veículos só voltou a crescer nos anos 2000, com o alto preço da gasolina, as crescentes preocupações ambientais e pela introdução dos veículos *flexfuel* no Brasil (que conseguem utilizar tanto a gasolina, quanto etanol ou qualquer fração de mistura entre esses dois combustíveis) (UNICA, 2008).

O Brasil produz dois tipos de etanol: o hidratado, que tem um teor de água de cerca de 5% em volume e é utilizado em veículos *flexfuel* ou que utilizam apenas o etanol; e o etanol anidro, que é virtualmente livre de água e é misturado à gasolina antes de sua distribuição (UNICA, 2008). Diversos países, assim como o Brasil, estão passando a misturar etanol na gasolina como uma medida para reduzir o consumo de petróleo e aumentar a octanagem do combustível (UNICA, 2008). No Brasil, toda gasolina comercializada atualmente no país possui uma fração de 27% de etanol anidro em sua composição (ANP, 2016$_b$).

Grande parte do etanol brasileiro é produzido na região Centro-Sul do país, que concentra cerca de 92%[7] da produção de etanol brasileira (CONAB, 2017). De acordo com MERSCHMANN (2014), nas destilarias do Centro-Sul do Brasil, as emissões pela fermentação do etanol representam mais de 1,5 vezes o total de emissões líquidas da produção do etanol, que são emissões que não são compensadas pelo crescimento da cana-de-açúcar (como as emissões dos combustíveis fósseis consumidos pelos equipamentos nos processos, pelo transporte e pelo uso de fertilizantes). Sendo assim, a captura e armazenamento de CO_2 da fermentação[8] nessa região poderia remover mais GEE da atmosfera do que emitiria a cadeia produtiva do etanol e seu uso como combustível (MERSCHMANN, 2014). A Figura 5 mostra a localização das destilarias de etanol brasileiras (representadas pelos círculos azuis no mapa), com um retângulo destacando a região centro-sul, onde a maior parte das destilarias está localizada.

[7] De acordo com a CONAB (2017), a região Centro-Sul do país foi responsável pela produção de 26,52 bilhões de litros de etanol na safra de 2014-2015, enquanto que a produção total do Brasil nesta mesma safra foi de 28,66 bilhões de litros.

[8] A emissão pela fermentação do etanol pode ser considerada como uma emissão de processo da destilaria que ocorre durante a produção do etanol, tendo como co-produto um exausto de CO_2 quase puro, como será melhor detalhado posteriormente neste trabalho.

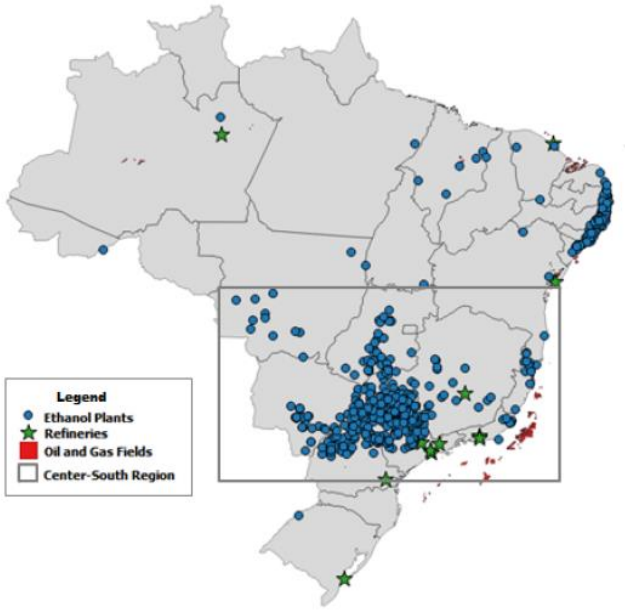

Figura 5: Destilarias de etanol no Brasil, marcadas em azul. Fonte: TAGOMORI *et al*. (2018)

Comparado com o volume de CO_2 produzido por grandes plantas de energia que utilizam combustíveis fósseis, a quantidade de CO_2 emitida pela fermentação do etanol nas destilarias pode ser significativamente menor (XU *et al*., 2010), mas as principais vantagens de utilizar o CO_2 da fermentação do etanol é sua origem biogênica, que pode permitir um saldo de emissões negativas que não é possível com o CO_2 de origem fóssil e a obtenção de um exausto com CO_2 praticamente puro, o que torna a captura desta tecnologia mais barata.

Caso exista uma regulação mais restritiva às destilarias, a emissão da fermentação do CO_2 pelas destilarias deve ser considerada (XU *et al*., 2010), já que a maioria das destilarias atualmente emitem o CO_2 produzido para a atmosfera (LINDFELDT e WESTERMARK, 2009), com exceção de poucas que capturam o gás e comercializam-no (XU *et al*., 2010). A captura do CO_2 oriunda da fermentação do etanol é uma tecnologia comercialmente viável, com baixo custo específico, tornando a indústria de etanol importante para o BIOCCS (KEMPER, 2015 e TAGOMORI *et al*., 2018). Essa opção parece bastante atrativa a curto e médio prazo e as oportunidades para essa tecnologia estão principalmente nos Estados Unidos e Brasil, que são os maiores produtores de etanol no mundo e possuem considerável potencial de armazenamento (IEAGHG, 2011). Essa capacidade de produção de etanol pode ser vista como uma oportunidade inicial para o

BIOCCS caso o local com capacidade de armazenamento esteja localizado na vizinhança próxima das usinas de produção do etanol (IEAGHG, 2011).

Uma das possibilidades da utilização do CO_2 das destilarias de etanol é em atividades de recuperação avançada de petróleo, que produz uma opção rentável para a utilização desse gás, beneficiando tanto a indústria do petróleo quanto a do etanol (XU *et al*., 2010). Já que não existe precificação pelas emissões de CO_2 atualmente, a maneira mais viável de que projetos de CO_2 aconteçam é se tiver algum retorno financeiro associado e um projeto de EOR permite isso.

A cadeia de um projeto de BIOCCS consiste em algumas etapas, que serão apresentadas e mais detalhadas a seguir (baseado em JAKOBSEN *et al*., 2008 e sua cadeia produtiva de CO_2):

- Fonte: processo industrial que produz um exausto contendo uma determinada fração de CO_2
- Captura: Processo de separação do CO_2 de outros gases contidos no exausto e entrega o CO_2 a uma determinada pureza e pressão
- Transporte: Transporte do CO_2 do ponto de captura até o local de armazenamento, usualmente por dutos ou navios. O armazenamento intermediário pode ser incluído, caso seja necessário.
- Armazenamento: Injeção do CO_2 em um reservatório geológico. Caso o CO_2 seja injetado em um campo de petróleo, o aumento e prolongação da produção também se inclui.

A seguir serão detalhados cada módulo pertencente à cadeia do CO_2. Neste estudo, a única fonte do CO_2 considerada é a da fermentação do etanol nas destilarias do Centro-Sul do Brasil e toda a cadeia subsequente é em função desta escolha inicial.

2.1.1. Captura

O objetivo da etapa da captura é a obtenção de um exausto concentrado de CO_2 com alta pressão, para que o mesmo possa ser transportado para o seu local de armazenamento (IPCC, 2005). Teoricamente, todo o fluxo de gás de uma atividade poderia ser transportado e armazenado, mesmo sem uma captura prévia do CO_2 (o que resultaria em

um exausto com baixas concentrações de CO_2), mas os custos de energia e custos totais do projeto para transportar todo esse volume a mais seriam impraticáveis, sendo necessária a produção de um exausto praticamente puro de CO_2 para o transporte e armazenamento (IPCC, 2005).

Geralmente a captura se refere à separação do CO_2 de exaustos de grandes fontes estacionárias e usualmente é a etapa mais cara do CCS, podendo representar de 80 a 90% dos custos totais (XU *et al*., 2010). Existem três rotas tecnológicas para a captura de CO_2 em projetos de CCS de acordo com o IPCC (2005): a rota de pré-combustão (onde através de reações químicas, o CO_2 consegue ser removido antes da combustão), a de pós-combustão (separação do CO_2 do exausto oriundo da combustão, geralmente utilizando um solvente líquido) e a de oxi-combustão (utilização de oxigênio substituindo o ar na combustão, para que o exausto produzido seja de praticamente vapor de água e CO_2). O estudo da IEA (2013) atribuiu mais uma categoria de captura além dessas três apresentadas pelo IPCC (2005), que é a da separação inerente, onde o CO_2 é gerado de forma já concentrada como parte do processo produtivo (como o caso da fermentação do etanol que será considerado neste estudo). Geralmente sem a captura do CO_2, esta emissão seria lançada na atmosfera (IEA, 2013). Para o caso da separação inerente, os processos da captura do CO_2 já são disponíveis comercialmente e são bastante comuns (IEA, 2013).

O CO_2 de origem biogênica na produção do etanol pode ser recuperado tanto na fermentação quanto na combustão do bagaço da cana utilizado nos processos industriais (MÖLLERSTEN *et al*., 2003), que é basicamente utilizado na cogeração da destilaria, produzindo energia para a mesma. Contudo, no caso da fermentação do etanol, as tecnologias de captura não se fazem necessárias (LAUDE *et al.*, 2011), pois a fermentação do etanol produz como coproduto o CO_2 praticamente puro, não sendo necessário nenhum procedimento de captura desse gás, devendo-se apenas desidratar e comprimir o CO_2 (BONIJOLI *et al*., 2009; XU *et al*., 2010; IEGHG, 2011; LAUDE *et al.*, 2011). O exausto de CO_2 deste processo pode ser considerado como sendo praticamente[9] CO_2 puro (IPCC, 2005; BONIJOLI *et al*., 2009; LINDFELDT a WESTERMARK, 2009; LAUDE *et al*., 2011), não sendo irreal considerar sua composição como sendo 100% de CO_2 (LAUDE *et al*., 2011). Uma pequena quantidade

[9] De acordo com LAUDE *et al.* (2011), o exausto da fermentação do etanol possui cerca de 85% de CO_2 (contendo também O_2 e N_2), mas chega-se a 95% de pureza de CO_2 facilmente, sem necessidade de grandes modificações nos processos já existentes.

de etanol e água se misturam ao fluxo do CO_2 e geralmente há uma remoção dos mesmos na destilaria, devido ao valor econômico do etanol (MOREIRA *et al*., 2016). Segundo LINDFELDT e WESTERMARK (2009), a maior impureza do exausto de CO_2 da fermentação de etanol é a água, que pode ser facilmente removida.

A captura do CO_2 de exaustos com baixa concentração do gás, é mais cara e necessita e mais energia do que capturar o CO_2 de exaustos com alta concentração deste gás (MERSHMANN, *et al.*, 2016). Portanto, o CO_2 da fermentação do etanol, por sua alta concentração, pode ser capturado[10] com custo bem baixo (LINDFELDT e WESTERMARK, 2009; XU *et al*., 2010; IEAGHG, 2011) e pode representar uma das atividades onde o CCS pode ser implementado inicialmente (LINDFELDT e WESTERMARK, 2009).

Seria possível capturar o CO_2 de outras atividades ao longo da cadeia de biocombustíveis sem ser apenas na fase da fermentação, mas esses exaustos não são tão puros e sua captura é bem mais cara (LINDFELDT e WESTERMARK, 2009). Caso todo o bagaço da cana fosse utilizado para fazer cogeração e todo o CO_2 gerado fosse capturado na cadeia de produção do etanol, possivelmente os resultados de emissão negativa em um projeto de BIOCCS atingidos seriam maiores que capturando apenas o que foi emitido na fermentação, como mostrou o resultado obtido no estudo de TAGOMORI *et al.* (2018). Contudo, estudos mostram que essa tecnologia ainda é bastante cara (BONIJOLI *et al*., 2009; MOREIRA *et al*., 2016), pois o CO_2 que sai na combustão da queima do bagaço sai em baixa concentração e diferente da fermentação, é necessária a utilização de alguma tecnologia para capturá-lo e isso aumenta muito o custo de abatimento. Portanto, o presente estudo irá focar na análise da captura do CO_2 da fermentação do etanol apenas, que é uma tecnologia apontada como uma excelente oportunidade inicial do BIOCCS no Brasil, contendo custos de abatimento mais baixos e, portanto, mais fácil de ser implementada futuramente.

As instalações para compressão do gás e desidratação para que o CO_2 fique em condições de ser injetado no duto geralmente são considerados como parte integrante da captura (IEAGHG, 2014_a), como será considerado neste estudo. É necessária a retirada da água antes do transporte do CO_2 pelos dutos para que se evite a formação de hidratos, a

[10] A captura do CO_2 da fermentação do etanol, como mencionado anteriormente, se refere apenas às atividades de desidratação e compressão do mesmo.

presença de duas fases no escoamento do fluido nos dutos (IEAGHG, 2011) ou até mesmo a corrosão dos dutos (IEAGHG, 2011; IEAGHG, 2014$_a$; MERSCHMANN *et al*., 2016), que pode ocorrer com a formação do ácido carbônico (WRI, 2008; MERSCHMANN *et al*., 2016), que é altamente corrosivo (WRI, 2008). De acordo com IEAGHG (2014$_b$), os níveis de umidade devem estar abaixo de 50 ppm para locais com alta temperatura ambiente.

A habilidade do CO_2 de reter água a diferentes temperaturas e pressões faz com que a desidratação geralmente seja implementada em um estágio intermediário do compressor principal para que o mínimo absoluto de água seja atingido antes do CO_2 entrar no duto (IEAGHG, 2014a). Dependendo da concentração de água permitida no exausto de CO_2, estágios adicionais de desidratação podem ser necessários (IEAGHG, 2014a).

A compressão de um gás pode ser definida como o aumento da pressão de uma determinada massa de gás com o objetivo da redução de seu volume final (EERC, 2011). Os dois objetivos principais da compressão do CO_2 é minimizar o volume que o gás ocupa para que a taxa de escoamento no duto seja maximizada e para que a pressão do CO_2 sobreponha a pressão do reservatório onde ele será injetado (EERC, 2011). A Figura 6 mostra a variação do volume do CO_2 (a uma temperatura de 40^{o}C) conforme a variação de sua pressão.

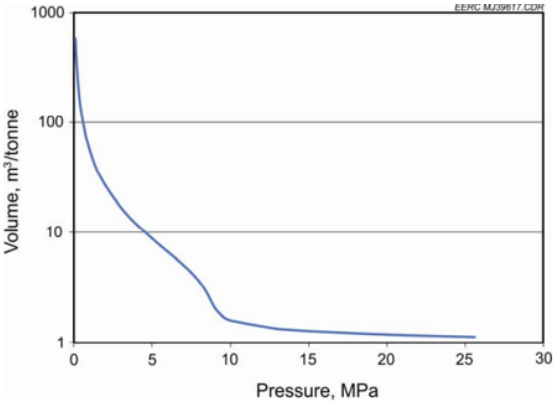

Figura 6: Volume ocupado por 1 tCO_2 a 40^{o}C em função da variação de sua pressão. Fonte: EERC (2011)

Pela Figura 6, pode-se perceber a importância da compressão para a redução de custos e de emissões de GEE no transporte do CO_2 em um projeto de CCS. A uma pressão de 0,1 MPa, uma tonelada de CO_2 ocupa 589 m^3 e quando comprimido a uma pressão típica para transporte de dutos (13,4 MPa), essa mesma quantidade de gás ocupa 1,32 m^3, o que

representa apenas 0,22% do volume inicial (EERC, 2011). Ocupando um volume menor, o dimensionamento dos dutos necessários nesse transporte reduz também, diminuindo os custos de investimento e o material necessário para sua construção.

A pressão de um gás aumenta quando ele é forçado a ocupar um espaço menor do que ocupava antes, o que força as moléculas desse gás a ficarem mais próximas e com isso, a temperatura do gás se eleva também (EERC, 2011). Geralmente, o gás é resfriado e comprimido mais uma vez (o que eleva a temperatura novamente) e esse processo é repetido algumas vezes, até o gás atingir a pressão desejada (EERC, 2011). Sendo assim, as compressões dos gases geralmente possuem mais de um estágio.

O diagrama de fases da Figura 7 mostra as fases do CO_2 (sólido, líquido, vapor e fluido supercrítico) em função de sua pressão e temperatura. Acima do chamado "ponto crítico" (marcado em laranja no gráfico), não existe mais uma fronteira entre os estados de vapor e fase líquida e o CO_2 se torna um fluido supercrítico, que não se comporta nem como líquido ou como gás, mas possui características de ambos (EERC, 2011). Fluidos supercríticos tendem a ter densidades similares aos líquidos, mas também são compressíveis como os gases (EERC, 2011). O CO_2 em estado supercrítico não consegue se liquefazer independentemente da pressão aplicada, caracterizando-se por um gás denso (XU *et al*., 2010). O CO_2 geralmente é transportado em seu estado supercrítico (WRI, 2008; EERC, 2011) e o ponto crítico onde ele chega nesta fase é com uma temperatura de 31,05ºC e a uma pressão de 7,37 MPa (XU *et al*., 2010; EERC, 2011).

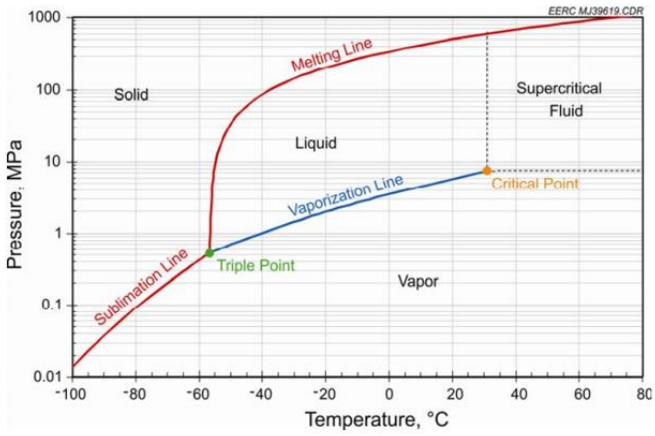

Figura 7: Diagrama de fases do CO_2 em função de sua temperatura e pressão. Fonte: EERC (2011)

O CO_2 é emitido pelas destilarias de etanol com pressão atmosférica (IPCC, 2005). Com a separação do CO_2, o gás deve ser comprimido para poder ser transportado. O estudo de MERSCHMANN *et al*. (2016) específica que a compressão deve ser feita até a pressão de 12 MPa para que o gás possa ser injetado na rede de transportes. Já em IPCC (2005) e em SILVA *et al*. (2018), a especificação é de que a pressão deveria ser mantida acima de 8 MPa para evitar a formação de duas fases no escoamento dos dutos e esta será a pressão considerada neste estudo como a pressão mínima que pode ser atingida nos dutos. A pressão máxima considerada em SILVA *et al.* (2018) é de 11 MPa, que também será considerada no presente estudo.

A preocupação do transporte do CO_2 nos dutos para que ocorra em apenas uma fase visa evitar quedas bruscas de pressão no interior do duto (WRI, 2008). Caso a pressão dos dutos esteja muito próxima da pressão do ponto crítico, uma pequena variação da temperatura ou pressão pode modificar a densidade do CO_2 e consequentemente, numa mudança de fase do fluido ou mudança de velocidade do mesmo (WRI, 2008). Para evitar isso, os operadores devem incluir uma margem de segurança acima da pressão crítica do CO_2 para evitar complicações no transporte do gás (WRI, 2008).

2.1.2. Transporte

Com exceção das plantas que produzem CO_2 e que estão localizadas bem em cima de um local de armazenamento geológico, o CO_2 capturado necessita ser transportado do local de captura até o local onde será armazenado (IPCC, 2005). O CO_2 pode ser transportado nos estados sólido, líquido e gasoso e como fluido supercrítico (IEAGHG, 2011). O melhor estado para o transporte depende da distância a ser percorrida e do modal que será utilizado no transporte (por duto, navio, trem ou caminhão) (IEAGHG, 2011). Dessas opções, o transporte por dutos é considerado o que possui o melhor custo-benefício (IEAGHG, 2011). O transporte por navios pode ser economicamente favorável quando grandes quantidades de CO_2 devem ser transportadas a grandes distâncias (>1000 km) e o transporte por trem ou caminhão não é considerado como tendo um bom custo-benefício quando comparado aos dutos e navios, exceto em uma escala muito pequena, mas não para um projeto de grande escala de CCS (IPCC, 2005).

Como foi dito anteriormente, o CO_2 é transportado por dutos em seu estado supercrítico, mas ele também pode ser transportado em seu estado líquido por navios, caminhões-tanque ou trens (IPCC, 2005). A liquefação do CO_2 é necessária para que ele ocupe menos volume no transporte, da mesma forma em que sua forma gasosa deve ser comprimida para o transporte por dutos pelo mesmo motivo (COSTA, 2014). As propriedades do CO_2 liquefeito não se diferem muito das propriedades de outros gases liquefeitos de petróleo (como o gás natural liquefeito ou o GLP) (IPCC, 2005). O transporte rodoviário de CO_2 geralmente é feito a uma temperatura de -20^{o}C e a uma pressão de 2MPa (IPCC, 2005).

O transporte por dutos é o principal método de transporte do CO_2 (IPCC, 2005; WRI, 2008; BONIJOLI *et al.*, 2009; IEAGHG, 2011; COSTA, 2014), principalmente pela indústria de petróleo para sua utilização na Recuperação Avançada de Petróleo (EOR) nos Estados Unidos (IEAGHG, 2011; COSTA, 2014). O transporte por dutos é uma tecnologia madura e bem conhecida (IPCC, 2005; BONIJOLI *et al*., 2009; IEAGHG, 2011; IEA, 2013). Nos EUA já existem cerca de 6.000 km de dutos para transportar CO_2 e o EOR foi o principal motivador do desenvolvimento da infraestrutura de dutos no país (IEAGHG, 2014a). Com exceção dos EUA, a maioria dos países tem pouca ou nenhuma experiência com dutos de CO_2 ou operações de EOR-CO_2 (IEAGHG, 2014a).

A maior parte dos projetos de dutos de CO_2 europeus são focados em armazenamento deste gás, como uma opção de redução de emissões de CO_2 (IEAGHG, 2014a). Neste caso, a justificativa para os projetos é por mandatos de redução de emissão de CO_2 ou por custo associado a emissões de CO_2, como por exemplo o *European Emission Trading System* (ETS) ou *Norway´s tax on carbon emissions* (IEAGHG, 2014a). O transporte e armazenamento de CO_2 como parte de projetos de CCS maiores só podem gerar receita se existir um esquema de suporte ou de precificação do CO_2 (IEAGHG, 2014a).

O Brasil iniciou a construção de gasodutos na década de 1970 e atualmente, a extensão total da rede de gasodutos no país de 9.244 km, sendo 8.583 km de malha integrada (EPE, 2014). Contudo, a infraestrutura de gasodutos no país ainda é muito modesta, quando comparada a de outros países (EPE, 2014). Além disso, esta malha de gasodutos transporta apenas gás natural, não existindo ainda uma rede de gasodutos para o transporte do CO_2.

A vantagem dos dutos é que com eles, é possível uma entrega do gás constante e estável, sem a necessidade de um armazenamento intermediário ao longo de sua rota (WRI, 2008).

Já a desvantagem dos dutos é a necessidade de criação de uma nova infraestrutura, o que acaba necessitando de grandes investimentos de capital (SVENSSON *et al*., 2004). A construção de dutos de CO_2 é motivada pela necessidade de transportar o gás até algum destino (IEAGHG, 2014a). Os dutos de CO_2 conectam diferentes fontes e locais de armazenamento, e esses principais locais são formações salinas profundas, campos de petróleo para EOR e campos de gás e óleo depletados, quando o objetivo é redução das emissões de GEE (IEAGHG, 2014a). Geralmente, existem quatro razões para transportar o CO_2 (que não são mutuamente excludentes) (IEAGHG, 2014a):

- Uso do CO_2 para produção avançada de hidrocarbonetos (recuperação terciária, conhecida como EOR);
- Armazenar o CO_2 para atingir uma meta de redução de GEE
- Uso do CO_2 para recuperação do metano em camadas de carvão
- Utilização do CO_2 para fins industriais

Os primeiros projetos de CCS podem envolver a construção de dutos individuais especificamente para o transporte do CO_2 da fonte até o local de injeção, mas à medida que a implementação desses projetos se espalhe, se faz necessária uma grande expansão do sistema de transporte por dutos e a abordagem mais eficiente para esse transporte ser feito é uma rede de dutos planejada (EERC, 2011), como foi desenvolvido por SILVA *et al.* (2018) em seu trabalho de elaboração de dutos para transportar o CO_2 de destilarias de etanol para utilização de EOR na Bacia e Campos.

Geralmente em projetos com destilarias de etanol, a etapa de transporte do CO_2 representa um alto peso dos custos do projeto, já que o volume de CO_2 a ser transportado está espalhado por uma região, necessitando de uma boa rede de transporte que seja capaz de coletar toda essa produção de CO_2 e que o volume transportado seja suficiente para gerar economia de escala e possa ser transportado para locais mais distantes, como nos campos da Bacia de Campos. As principais limitações dessas configurações de transporte aplicadas para o CO_2 proveniente de destilarias de etanol, apontadas por SILVA *et al*. (2018), são os baixos volumes capturados e o caráter sazonal da produção de etanol. Para os casos de projetos de CCS de fontes fósseis, geralmente se têm grandes volumes de CO_2 concentrados em um local, o que gera grande economia de escala na construção dos dutos e transporte de CO_2 (MERSCHMANN *et al*., 2016).

A economia de escala obtida com o transporte por dutos pode reduzir os custos para o transporte de uma grande quantidade de CO_2, mas para pequenas fontes emissoras deste

gás, o alto custo para a construção dos dutos pode prejudicar a viabilidade do transporte do CO_2 (SILVA *et al*., 2018). Para essas pequenas fontes emissoras, outros modais de transporte podem ser mais atrativos, como os caminhões (SILVA *et al*., 2018). Geralmente os caminhões-tanque e navios são mais encontrados no transporte de CO_2 para a indústria de alimentos e bebida (WRI, 2008).

O comprimento do duto de um projeto depende do número de obstáculos entre a fonte de CO_2 e o local de armazenamento, como cidades, estradas, ferrovias, áreas naturais sensíveis e que precisam ser evitadas (IEAGHG, 2014_a). O estudo de IEAGHG (2014_a) mostrou que existia uma correlação positiva entre o comprimento dos dutos considerados ao longo de seu estudo e suas capacidades de transporte, pois economicamente, os grandes dutos precisam transportar grandes volumes de CO_2 para serem economicamente viáveis (IEAGHG, 2014_a). O desenho da trajetória de dutos do CO_2 é governado principalmente por critérios de custos e segurança (IEAGHG, 2014_a). Por isso, neste estudo será considerada a opção da trajetória desenvolvida pelo estudo de SILVA *et al*. (2018), por ser uma rede de transporte elaborada para obter o ótimo econômico da trajetória dos dutos para transportar o CO_2 das destilarias do Centro-Sul para os campos de petróleo da Bacia de Campos para EOR, já que seria possivelmente a opção mais facilmente escolhida para ser implementada.

Os princípios básicos para selecionar a rota dos dutos de CO_2 não se diferem muito da seleção da trajetória de dutos de outros gases, sendo principalmente (IEAGHG, 2014_a):

- Minimizar a interferência ou proximidade com outras infraestruturas existentes ou potenciais e evitar habitações humanas sempre que possível;
- Evitar áreas de interesse arqueológico ou áreas sensíveis ecologicamente;
- Escolher o terreno de forma que seja relativamente fácil para a construção do duto;
- Seguir rotas de dutos já existentes ou outros corredores de transporte e aproveitar o direito de passagem já existente;
- Evitar difíceis cruzamentos com cursos d´água ou grandes estradas sempre que possível
- Evitar áreas reservadas para futuros empreendimentos que possam ser incompatíveis com a presença de dutos

Quando múltiplas fontes e locais de armazenamento de CO_2 existem, uma rede de coleta, transmissão e distribuição (também conhecido como Hub) pode ser desenvolvido

(IEAGHG, 2014_a). A maioria dos Hubs em operação estão localizados nos EUA (IEAGHG, 2014_a). Os Hubs de CO_2 não apresentam um conjunto de regras específicas ou lições que podem ser aprendidas de experiências anteriores porque os Hubs geralmente são desenvolvidos de acordo com a disponibilidade do CO_2 e/ou quando mercados viáveis existem (IEAGHG, 2014_a). Cada Hub tem o seu próprio padrão de pureza do CO_2, aceitação de impureza, pressão e temperatura (IEAGHG, 2014_a).

Os Hubs podem ser definidos como reservatórios intermediários de CO_2, capazes de otimizar o transporte de CO_2 até o local de armazenamento (COSTA, 2014). Após a rede principal estar instalada, é relativamente mais fácil adicionar novas fontes de CO_2 e locais de armazenamento (IEAGHG, 2014_a). A localização ótima de um Hub pode ter algumas variações, mas o objetivo geral é que, dentre as restrições físicas impostas, as rotas de dutos devem minimizar os custos unitários de transportar o CO_2 pelo sistema (IEAGHG, 2014_a).

A maneira utilizada para localizar os Hubs utilizados no presente estudo (obtidos nos resultados de SILVA *et al.*, 2018), foi a utilização da Análise de Kernel do *software* ArcMap, que permitiu verificar onde estavam localizadas as maiores densidades de produção do CO_2 (considerando a quantidade produzida de CO_2 pela fermentação do etanol). Essa metodologia de localização de Hub utilizando Análise de Kernel também foi utilizada nos trabalhos de COSTA (2014) e TAGOMORI *et al.* (2018).

Os dutos de CO_2 geralmente são feitos de aço carbono, já que esta é a opção mais vantajosa economicamente (IEAGHG, 2014_a). Contudo, este material é bastante suscetível à corrosão, quando o fluxo de CO_2 contém água e para prevenir isso, o conteúdo de água no fluxo de CO_2 deve realmenteser mantido o mais baixo possível (IEAGHG, 2014_a).

Geralmente os dutos possuem um tempo de serviço que excede seu tempo de vida (IEAGHG, 2014a). Se as especificações iniciais de projeto permitirem, na maioria dos casos o reuso dos dutos é benéfico, já que pode reduzir drasticamente os custos totais de projeto (IEAGHG, 2014a). Os dutos offshore são usualmente reaproveitados porque seus custos são bem mais altos que os dos dutos *onshore* (IEAGHG, 2014a).

2.1.3. Armazenamento

Os três principais tipos de formações geológicas que são consideradas para armazenamento geológico do CO_2 são: reservatórios de petróleo e gás, formações salinas profundas e camadas de carvão (IPCC, 2005). Para cada um desses reservatórios, o armazenamento é realizado através da injeção do CO_2 em sua forma densa, abaixo da superfície terrestre, nas formações rochosas e porosas que armazenavam (no caso dos reservatórios já depletados de óleo e gás) ou ainda armazenam fluidos como gás natural e petróleo (IPCC, 2005). Essas formações propícias ao armazenamento do CO_2 podem ocorrer em bacias sedimentares *onshore* e *offshore* (IPCC, 2005). O armazenamento geológico geralmente ocorre na profundidade de um a três quilômetros abaixo da superfície (IEA, 2013).

Locais comuns de armazenamento são campos de petróleo para EOR, mas também são usados os campos depletados de óleo e gás (IEAGHG, 2014_a). A vantagem desses locais é que já existe infraestrutura no local que podem ser reutilizadas para o transporte do CO_2 (IEAGHG, 2014_a). O presente estudo considera que o CO_2 no projeto proposto será transportado das destilarias para que esteja disponível para ser injetado em campos maduros de petróleo na Bacia de Campos, com o potencial de viabilizar a recuperação avançada do petróleo ali armazenado. Essa técnica será melhor detalhada no item a seguir.

A Figura 8 a seguir mostra diversas opções de armazenamento geológico, onde o item 2 representa a recuperação avançada de petróleo utilizando o CO_2, onde o fluxo de CO_2 é injetado em azul, parte fica armazenado no reservatório e parte sai com petróleo produzido (em vermelho).

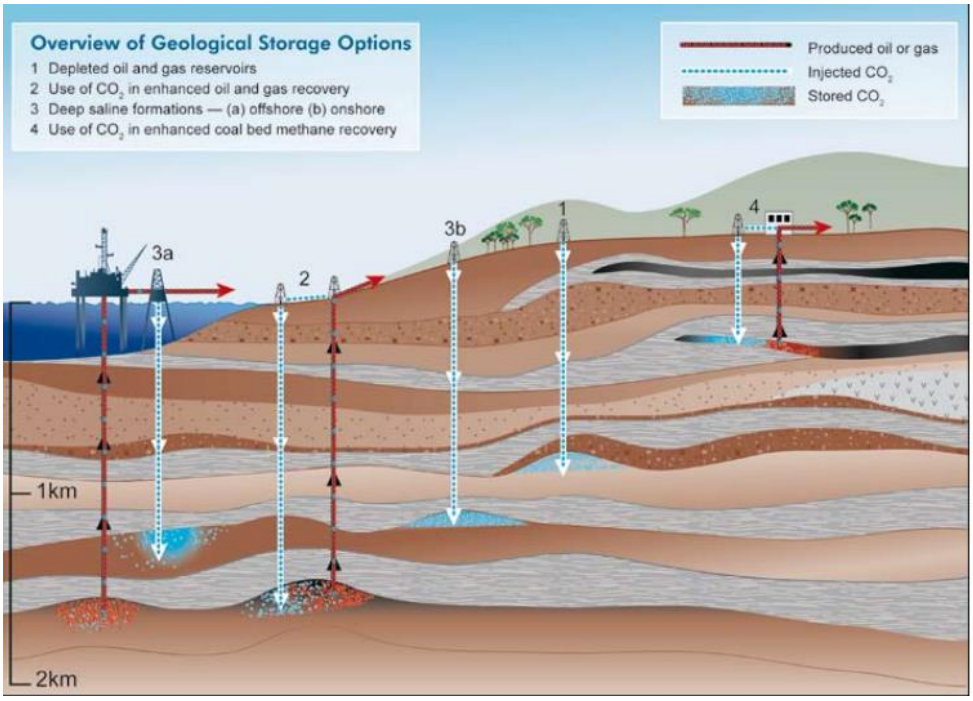

Figura 8: Métodos de armazenamento do CO_2 em formações geológicas. Fonte: IPCC (2005)

2.1.3.1. Recuperação Avançada de Petróleo (EOR)

Os métodos de recuperação foram desenvolvidos pela indústria de petróleo para que fosse possível obter uma produção maior do que aquela que se obteria utilizando-se apenas a energia natural do reservatório (THOMAS *et al*., 2004). A recuperação primária de petróleo se refere à produção de óleo resultante quando se utiliza a energia natural do reservatório (THOMAS *et al*., 2004). A energia natural do reservatório (expansão de gases dissolvidos, variação do volume da rocha, gravidade e influxo do aquífero) permite o deslocamento do óleo do reservatório aos poços de produção (VERMA, 2015). Contudo, a produção da recuperação primária varia entre 5% a 20% (STALKUP, 1983 in VERMA, 2015) do óleo original no reservatório (OOIP - da sigla inglês de *Original Oil in Place*). Essa baixa produção de óleo pela recuperação primária fez com que os produtores de petróleo melhorassem a sua produção pela utilização de métodos de recuperação secundária, que acrescentam energia adicional ao reservatório pela injeção de água e/ou gás natural (VERMA, 2015). As taxas de recuperação do óleo do reservatório da recuperação primária e secundária em conjunto podem chegar a 20-40% do OOIP (VERMA, 2015). Mas como ainda resta uma quantidade considerável de óleo

no reservatório após a recuperação secundária, aplica-se mais uma recuperação, chamada de terciária ou recuperação avançada de petróleo (EOR) (VERMA, 2015).

A recuperação avançada de petróleo utilizando CO_2 (também conhecida como CO_2-EOR) consiste na injeção de CO_2 em um campo de petróleo, onde ele irá se misturar ao óleo ali localizado, diminuindo a viscosidade do mesmo, tornando-o mais leve e separando-o mais facilmente das superfícies rochosas onde o óleo se encontra (AZZOLINA *et al*., 2015). Essa alteração faz com que o óleo flua mais facilmente no reservatório, facilitando sua exploração pelos poços de produção (XU *et al.*, 2010; AZZOLINA *et al*., 2015; MERSCHMANN *et al*., 2016). Para a operação de EOR, o usuário geralmente necessita de um grande volume de CO_2 para iniciar as atividades (IEAGHG, 2014_a) e o CO_2 deve ser praticamente puro (WRI, 2008).

Durante o processo de EOR, quase a totalidade de CO_2 comprado e utilizado no campo de petróleo consegue continuar armazenado seguramente em uma formação geológica (AZZOLINA *et al.*, 2015). Consequentemente, o EOR utilizando CO_2 proporciona uma maneira viável de mitigar as emissões de carbono da produção e combustão de petróleo pelo armazenamento geológico do CO_2 (AZZOLINA *et al*., 2015). Sendo assim, o EOR utilizando CO_2 possui duas grandes vantagens (VERMA, 2015): (i) recuperação adicional de petróleo e (ii) armazenamento do CO_2, permitindo a redução das emissões atmosféricas deste gás.

Após a injeção do CO_2, uma mistura de óleo, CO_2 e água[11] sai pelo poço de produção, sendo separados na superfície (HILL *et al*., 2013; AZZOLINA *et al*., 2015). O óleo é geralmente encaminhado para uma refinaria, enquanto que o CO_2 produzido é separado dos demais fluidos, seco, re-comprimido e reinjetado no reservatório, sendo um ciclo fechado para o CO_2 (AZZOLINA *et al*., 2015). A reutilização do CO_2 produzido previne que o gás seja emitido para a atmosfera e provê economias substanciais ao produtor de petróleo, visto que o mesmo teria que comprar mais CO_2 para continuar sua atividade (AZZOLINA *et al*., 2015).

Contudo, nem todo CO_2 injetado é produzido com o óleo, uma fração significante do gás fica retida no reservatório (AZZOLINA *et al*., 2015; MERSCHMANN *et al*., 2016). A

[11] Em alguns casos, mas não todos, o EOR com CO_2 pode utilizar o método WAG, onde estágios de injeção de gás (predominantemente CO_2) são sucedidos por injeção de apenas líquido (predominantemente água) (AZZOLINA *et al*., 2015).

quantidade de CO_2 estocada no reservatório é uma função de controle operacional, o que gera incertezas sobre a quantidade realmente armazenada em cada localização (AZZOLINA *et al*., 2015). O controle geológico é específico para cada reservatório, dependendo de sua litologia, permeabilidade e outras características físicas únicas de cada reservatório, enquanto que controles operacionais são específicos à operação, como por exemplo, a distância entre os poços injetores e produtores, o volume de CO_2 injetado e a taxa entre água e CO_2 injetados (AZZOLINA *et al*., 2015). De acordo com RAVAGNANI (2007), nas atividades de EOR utilizando CO_2 no Recôncavo Baiano, 50% do CO_2 que era injetado retornava misturado ao petróleo, resultando em uma taxa de armazenamento de 1,4 t CO_2 / t petróleo produzido.

A injeção do CO_2 em atividades de EOR possui perdas muito pequenas de CO_2 (FOX, 2009 in AZZOLINA *et al*., 2015). Metade dessas perdas ocorrem por atividades na superfície e metade delas são subterrâneas, fora do reservatório onde seriam armazenadas, mas que não chegam a ser uma perda de armazenamento subterrâneo (FOX, 2009 in AZZOLINA *et al*., 2015), o que leva a uma taxa de armazenamento total de CO_2 maior que 95% AZZOLINA *et al.* (2015). De acordo com (FOX, 2009 in AZZOLINA *et al*., 2015), mais de 97% do CO_2 comprado para EOR ficam retidos abaixo da superfície.

Historicamente, os gastos com o CO_2 são o maior custo em projetos de EOR, então diversos projetos em operação tentam minimizar a quantidade de CO_2 utilizada para recuperação de petróleo e consequentemente, reduz a quantidade armazenada (IEA, 2013). Outros problemas também foram apontados pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2013) de projetos de EOR utilizando CO_2, como: a falta de monitoramento suficiente para assegurar se o armazenamento do CO_2 é realmente permanente, a falta de seleção de locais com a verdadeira intenção do armazenamento permanente do gás e o aumento de emissão de CO_2 pelo consumo adicional de energia das atividades de EOR e pela combustão do petróleo incremental produzido, gerando um saldo menor de emissões negativas quando comparado ao armazenamento geológico. Apesar dessas incertezas, as políticas climáticas e regulações sobre armazenamento podem resolver estas questões, sendo necessário que se decida qual o papel que o EOR deve desempenhar no armazenamento a longo prazo do CO_2 (IEA, 2013).

Nos Estados Unidos a utilização desta tecnologia iniciou-se na década de 1970 (XU *et al*., 2010; AZZOLINA *et al*., 2015). Contudo, historicamente a fonte de CO_2 utilizada era de fontes naturais (KUUSKRAA e WALLACE, 2014), o que não contribui para a redução

das emissões antropogênicas de GEE (AZZOLINA *et al*., 2015). Contudo, com o aumento das preocupações da influência antropogênica nas mudanças climáticas, a falta de fornecimento de CO_2 para EOR e com centenas de campos de petróleo acessíveis ao EOR, diversas fontes antropogênicas de CO_2 estão fornecendo este gás para operações de EOR e resultando no armazenamento de CO_2 que seria facilmente emitido para a atmosfera (AZZOLINA *et al*., 2015). Isso ocorreria facilmente com o CO_2 oriundo da fermentação do etanol no Brasil, pois caso ele não seja vendido para alguma utilização, dificilmente haveria incentivos para capturá-lo sem uma política climática.

Para manter o mesmo volume de CO_2 injetado, o usuário pode reciclar o CO_2 que foi produzido com o óleo e reduzir sua necessidade de compra do gás vindo dos dutos (IEAGHG, 2014a; AZZOLINA *et al*., 2015). Enquanto isso pode ser satisfatório para o produtor de petróleo, pode não ser vantajoso economicamente para o responsável pelo duto e para quem capturou o CO_2, já que o volume das vendas e consequentemente, sua receita, diminuem e aumentam as emissões de CO_2 não capturadas na fonte de emissão (IEAGHG, 2014a). Em um projeto típico de CCS, tanto o produtor de CO_2 quanto o proprietário dos dutos precisam de volumes grandes e consistentes de CO_2 durante o tempo de vida esperado do projeto (IEAGHG, 2014a).

O custo de abatimento do CO_2-EOR depende da parte que está investindo no projeto (MERSCHMANN *et al.*, 2016). Quando a empresa de petróleo investe nos dutos, os custos de abatimento são aproximadamente 30-50% mais baixos do que quando a parte investidora[12] são as destilarias (MERSCHMANN *et al.*, 2016). Quando as destilarias são os investidores na rede de dutos, o custo de abatimento chega a US$ 350 por tCO_2 em EOR e quando as empresas de petróleo são os investidores, os custos são aproximadamente de US$ 200 por tonelada de CO_2 (MERSCHMANN *et al.*, 2016). Essa diferença de valores se dá porque o lucro das empresas de petróleo com a venda do petróleo extra produzido por EOR é maior do que o lucro das destilarias em vender o CO_2 nos pontos de injeção para estas empresas (MERSCHMANN *et al*., 2016). Se o investidor no projeto de CO_2-EOR for uma empresa de petróleo e o preço do barril de petróleo chegar a US$ 100, o uso de CO_2 das destilarias para este fim pode compensar os

[12] De acordo com o estudo de MERSCHMANN *et al*. (2016), essa diferença ocorre porque as empresas de petróleo lucram com a produção incremental do petróleo extra produzido por EOR com CO_2 e isso reduz o custo de abatimento da tecnologia para essas empresas, o que não ocorre para a parte das destilarias.

custos necessários para a captura, transporte e injeção do CO_2 de muitas das destilarias consideradas no estudo de MERSCHMANN *et al.* (2016).

Já no estudo feito posteriormente por SILVA *et al.* (2018), também foi analisado o custo de abatimento pelo transporte de CO_2 das destilarias para a Bacia de Campos, mas com algumas considerações diferentes do estudo de MERSCHMANN *et al.* (2016), visando a melhoria desses resultados. Em SILVA *et al.* (2018) foi considerado um número bem maior de destilarias (236 destilarias contra 57 do estudo anterior), foram considerados valores da realidade brasileira nos cálculos dos custos dos dutos (o que o estudo anterior não havia considerado) e foi utilizada uma ferramenta do ArcMap (Análise de Kernel) que auxiliou na localização das maiores densidades de produção de CO_2 pela fermentação do etanol para que os Hubs pudessem ser localizados nos locais onde o transporte do CO_2 fosse otimizado em relação aos custos. Contudo, o trabalho de MERSCHMANN *et al.* (2016) incluiu também custos da injeção e receita da produção extra do óleo por EOR no cálculo do custo de abatimento, que não foi considerado em SILVA *et al.* (2018).

Com isso, SILVA et al (2018) teve como resultado de custo de abatimento de US$ 68/tCO_2 para o caso de Único Hub (destilarias transportando o CO_2 por dutos até o Hub), US$ 65/tCO_2 para o intermodal (destilarias transportando o CO_2 por caminhões ou dutos ao Hub) e US$ 43/tCO_2 para a configuração de múltiplos Hubs (destilarias transportando o CO_2 por dutos até oito diferentes Hubs). Sendo assim, os resultados de SILVA *et al*. (2018) mostraram que a opção de transportar o CO_2 em uma configuração com múltiplos Hubs é a melhor escolha pelo ponto de vista econômico. Outro resultado apresentado por esse estudo é que a introdução de caminhões na rede de transportes na configuração intermodal permitiu que destilarias de pequeno porte tivessem menores custos de abatimento utilizando este modal do que se construísse um duto exclusivo para seu transporte ao Hub. Assim, a configuração de transporte que utiliza transporte intermodal obteve o segundo melhor custo de abatimento e o caso de único Hub utilizando apenas dutos apresentou o pior custo de abatimento.

Por estar localizada próximo a grandes fontes estacionárias de CO_2, a Bacia de Campos é considerada uma das maiores promessas para o armazenamento de CO_2 no Brasil (ROCKETT *et al.*, 2013). Segundo FERREIRA (2016), atualmente não existe uma fonte abundante e disponível de CO_2 para a Bacia de Campos. Este fato incentiva ainda mais a implementação do projeto analisado neste estudo, visto que as destilarias analisadas poderiam suprir essa demanda de CO_2, sendo uma fonte garantida para as atividades de

EOR da bacia e ainda poderiam proporcionar uma redução das emissões de GEE ou um saldo negativo das mesmas.

Além disso, a Bacia de Campos ainda é a bacia com a maior produção de petróleo do Brasil, responsável pela produção de cerca de 53% do petróleo brasileiro (dados de janeiro de 2017), com 47 campos de produção (ANP, 2017a). De acordo com a análise de FERREIRA (2016), os indicadores desta bacia indicam fortemente que grande parte da produção da bacia está associada a campos maduros. A fase madura é a fase mais indicada para o EOR para que seja possível aumentar a produção do campo com a injeção do CO_2, reforçando que a Bacia de Campos é a melhor opção para o armazenamento do CO_2 das destilarias de etanol do Centro-Sul do país, consideradas neste estudo, como já havia sido apontado por MERSCHMANN *et al.* (2016) e SILVA *et al.* (2018). A localização da Bacia de Campos e seus principais campos de petróleo podem ser vistos na Figura 9.

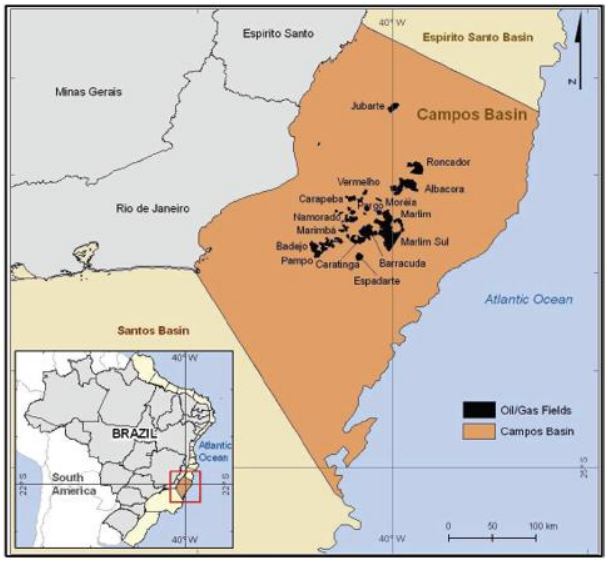

Figura 9: Localização da Bacia de Campos e seus campos de petróleo. Fonte: ROCKETT *et al.* (2013)

Além de sua localização e grande produção, outra vantagem da Bacia de Campos é que ela é uma estrutura bem conhecida, com armadilhas geológicas provadas e dados de reservatórios disponíveis (ROCKETT *et al.*, 2013). Mas muitos desses dados não estão disponíveis publicamente por motivos de confidencialidade (MERSCHMANN *et al.*, 2016), o que faz com que as características geológicas da Bacia de Campos e sua capacidade real de armazenamento de CO_2 sejam apenas estimadas. A maioria das

instalações na Bacia de Campos não possuem unidades de remoção de CO_2, pois o conteúdo de CO_2 misturado ao óleo já está abaixo do máximo recomendado pela ANP (MERSCHMANN *et al*., 2016). Portanto, as destilarias de etanol poderiam lucrar vendendo o CO_2 para esta atividade (MERSCHMANN *et al*., 2016).

Foram encontrados dois estudos que fizeram estimativas sobre a capacidade de armazenamento do CO_2 na Bacia de Campos, que serão apresentados a seguir. Contudo, ambos obtiveram apenas dados de produção e de petróleo no reservatório (OOIP) antigos e de menos da metade dos campos de petróleo da bacia. Um dos estudos que fez essa estimativa, considerando a capacidade de armazenamento de CO_2 por EOR nos campos da Bacia de Campos foi o de MERSCHMANN *et al.* (2016). De acordo com os resultados desse estudo, supondo uma taxa de injeção de CO_2 constante anualmente, os campos da Bacia de Campos conseguem armazenar por EOR 12,4 milhões de tCO_2. Mas a capacidade de armazenamento dos reservatórios da Bacia de Campos neste estudo pode ter sidosubestimada, pois dos 36 campos maduros da bacia, a capacidade de armazenamento do CO_2 calculada se baseou em apenas 13 campos que tinham dados disponíveis[13] de OOIP.

Outro estudo que também desenvolveu uma estimativa para a capacidade de armazenamento de CO_2 na Bacia de Campos foi ROCKETT *et al.* (2013). Neste estudo, não foi considerada especificamente o armazenamento por EOR como em MERSCHMANN *et al.* (2016), mas foi feito um estudo das características geológicas dos campos, de acordo com o tipo de rocha, profundidade, OOIP (também de anos antigos), entre outros parâmetros. De acordo com ROCKETT *et al.* (2013), foram analisados 17 campos dos 50 presentes na Bacia, pela falta de dados disponíveis, representando 36% da reserva de petróleo da Bacia de Campos (excluindo as novas reservas de pré-sal). De acordo com o resultado deste estudo, a bacia de campos tem uma capacidade de armazenamento de aproximadamente 950 milhões de tCO_2.

O presente estudo não irá analisar as emissões associadas à etapa de EOR, irá considerar apenas toda a infraestrutura de transporte necessária para coletar o CO_2 das destilarias do Centro-Sul do país e disponibilizar para essas atividades na Bacia de Campos.

[13] Em MERSCHMANN *et al*., 2016, foi considerado que 10% do OOIP dos campos da Bacia de Campos seriam produzidos com CO_2-EOR.

Recomenda-se que estudos futuros analisem as emissões de gases de efeito estufa que ocorrem pelas atividades de injeção do CO_2 nos campos de petróleo e de outras atividades necessárias para a utilização do CO_2 em EOR e aprofundem os estudos sobre a capacidade de armazenamento real de CO_2 na Bacia de Campos, de acordo com as características específicas do local e com dados mais recentes.

2.1.4. Projetos existentes

Desde a década de 1970, o CO_2 começou a ser usado para auxiliar a extração de campos de petróleo no Texas (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2010). Na década de 1990, o primeiro projeto de CCS com o objetivo explícito de reduzir as emissões de CO_2 foi iniciado pela companhia de petróleo norueguesa Statoil (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2010). Em 2010, existiam mais de 155 projetos de CCS em operação, em construção ou em planejamento, mas pouquíssimos eram de BIOCCS (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2010). De acordo com KEMPER (2015), em 2015 existiam 20 projetos de BIOCCS no mundo, considerando os projetos em todos os estágios (desde o planejamento, considerando até os cancelados), sendo cinco deles em operação, utilizando o CO_2 de uma destilaria de etanol e três deles utilizando esse CO_2 para EOR. Isso destaca a importância do EOR como uma oportunidade inicial não só para os projetos de CCS que utilizam combustíveis fósseis, como também para o BIOCCS (KEMPER, 2015).

O primeiro projeto que utilizou CO_2 oriundo da fermentação do etanol para EOR foi implementado em um campo de petróleo no Kansas (EUA), com duração de 10 anos, iniciando-se em 2000 (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2010). Neste projeto, o CO_2 da destilaria era liquefeito e transportado por caminhões até o campo de petróleo, que ficava a 11 km da destilaria (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2010). O foco do projeto era a recuperação de petróleo e não a mitigação das emissões de CO_2 (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2010). De 2003 a 2005 foram injetados 7.700 tCO_2, produzindo aproximadamente 27.900 barris de petróleo a mais, mas com o desempenho considerado fraco (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2010).

Outro projeto que utilizava o CO_2 da fermentação do etanol para EOR nos EUA foi desenvolvido no Texas, mas em uma escala maior que o citado anteriormente e com planos de um tempo de operação maior (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2010). O projeto

iniciou em 2009, utiliza 90 km de dutos para o transporte do CO_2 e cerca de 105.000 tCO_2/ano são injetados (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2010). Em 2010, outro projeto utilizando CO_2 da fermentação do etanol para EOR estava sendo construído em Kansas (EUA) e outro em Rotterdam (Holanda) (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2010). O projeto de BIOCCS de maior destaque até o momento é o projeto *Illinois Basin Decatur Project* (IBDP), localizado nos EUA e em operação desde novembro de 2011, sendo o primeiro projeto de BIOCCS em grande escala (KEMPER, 2015). O CO_2 deste projeto também vem de uma destilaria de etanol e é armazenado em um aquífero salino (KEMPER, 2015).

No Brasil, não existe ainda nenhum projeto em construção ou em andamento utilizando o CO_2 de destilarias para captura e armazenamento. Havia um projeto demonstrativo que aplicaria a tecnologia de CCS utilizando o CO_2 da fermentação de uma destilaria de etanol em São Paulo com o objetivo de capturar e injetar 1 $MtCO_2e$ em um aquífero salino, mas que não teve continuidade por falta de uma contrapartida financeira do governo brasileiro (MOREIRA *et al.*, 2016). Mas apesar de ainda não ter nenhum projeto no país, a tecnologia para isso está disponível (MOREIRA *et al.*, 2016).

Em relação aos projetos de EOR que utilizam CO_2 (de outras fontes), em 2012 existiam 123 projetos ativos nos EUA e 15 projetos fora dos EUA (VERMA, 2015). Um dos projetos fora dos EUA que se destacava era um projeto canadense que tinha como objetivo explícito, além da recuperação adicional do petróleo, sequestrar o CO_2 (VERMA, 2015).

De acordo com ROSA e MACHADO (2017), nas décadas de 1980 e 1990 foram desenvolvidos três projetos pilotos da Petrobrás de EOR utilizando CO_2 (de outra fonte que não a fermentação do etanol) e em apenas um deles foi registrado sucesso na produção incremental de petróleo. Contudo, um dos problemas apresentados para esta tecnologia foi a descontinuidade do fornecimento de CO_2 e sua disponibilidade para viabilização do projeto. Em 2013, a Petrobrás iniciou um projeto de CCS em escala comercial utilizando a injeção do CO_2 para EOR offshore próximo ao litoral de Santos (SP), para testar o comportamento do reservatório (MOREIRA *et al.*, 2016).

O fato de um dos problemas apresentados para utilização de EOR utilizando CO_2 no país ser a disponibilidade do CO_2 gera mais uma motivação para o desenvolvimento deste projeto, pois o CO_2 da fermentação do etanol seria uma fonte confiável de CO_2 para esta atividade, pois mesmo não sendo contínua ao longo do ano dada a sua sazonalidade, ela é contínua ao longo dos anos, pela robustez da indústria de etanol no país, com

perspectivas de manutenção deste cenário a médio prazo. Sendo assim, este projeto pode promover como principais benefícios a possibilidade de incremento da produção de petróleo da Bacia de Campos e a possibilidade de emissões negativas de GEE com o armazenamento geológico do CO_2 produzido pelas destilarias.

3. Análise de Ciclo de Vida: estado da arte e aspectos metodológicos

Todo produto possui uma "vida", iniciada na fase de concepção e *design*, seguida pela extração de recursos, por sua produção, seu uso e pelas atividades após o fim do seu uso (como reuso, reciclagem, disposição final), sendo que todos esses processos resultam em impactos ambientais pelo consumo de recursos e emissões de substâncias ao meio ambiente (REBITZER *et al*., 2004). A Análise de Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica de avaliação dos aspectos ambientais e dos impactos potenciais ao longo de toda essa vida de um produto ou serviço, considerando desde a aquisição da matéria-prima para este produto ou serviço, sua produção, seu uso e disposição final, comumente conhecida como uma análise que vai "do berço ao túmulo" (ABNT, 2009).

A ACV é uma das várias técnicas existentes de gestão ambiental (como por exemplo, auditoria ambiental e avaliação de impacto ambiental) e pode não ser a técnica mais apropriada a ser empregada em todas as situações (ABNT, 2009). Tipicamente, uma Análise de Ciclo de Vida não aborda os aspectos econômicos ou sociais de um produto (ABNT, 2009). Outro aspecto também relevante é que a ACV considera os impactos normais e anormais de operação dos processos ou produtos, mas não considera impactos de acidentes, vazamentos ou similares (ILCD, 2010).

A ACV pode ajudar a identificar oportunidades de melhoria nos aspectos ambientais em vários pontos ao longo do ciclo de vida de um produto ou serviço, ajudar na tomada de decisão de indústrias, organizações governamentais ou não governamentais (como planejamento estratégico, definição de prioridades, decisões sobre projetos ou reprojetos de produtos ou processos), entre outros (ABNT, 2009). Com isso, é possível identificar oportunidades que previnem a poluição que seria gerada e que reduzem o consumo de recursos através de análises sistemáticas (REBITZER *et al.*, 2004). Comparar resultados de diferentes estudos de ACV só é possível se as suposições e o contexto de cada estudo forem os mesmos (ABNT, 2009).

Para ser considerada uma análise de ciclo de vida, a avaliação deve conter: a definição do objetivo e escopo do estudo, análise de inventário de ciclo de vida contendo as entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto, avaliação de impactos ambientais potenciais associados a essas entradas e saídas e interpretação de resultados das fases de

análise de inventário e de avaliação de impactos em relação aos objetivos dos estudos (ABNT, 2009).

3.1. Histórico da ACV

Os primeiros estudos que abordavam um olhar sobre o ciclo de vida de produtos e materiais datam o final da década de 1960 e início de 1970 e tinham como principal foco aspectos como eficiência energética, consumo de matéria prima e disposição de resíduos (EEA, 1997). Em 1969 a Coca-Cola desenvolveu um estudo que associava o consumo de recursos com despejos ambientais para embalagens de bebidas (EEA, 1997). Nesta época, um estudo similar também foi desenvolvido na Europa, posteriormente conhecido como "*Ecobalance*" (EEA, 1997). Em 1972, Ian Boustead desenvolveu um estudo que calculava a energia total utilizada na produção de diversas embalagens para bebidas, incluindo vidro, plástico, aço e alumínio (EEA, 1997). Essa metodologia desenvolvida por Boustead foi posteriormente consolidada, podendo ser aplicada em diferentes materiais e em 1979 foi publicada como "*Handbook of Industrial Energy Analysis*" (EEA, 1997) (em tradução livre, "Manual para Análise de Energia Industrial").

Posteriormente, na década de 1990, a metodologia de Análise de Ciclo de Vida avançou, considerando também aspectos ambientais e impactos potenciais pelo ciclo de vida de um produto, desde a aquisição da matéria prima para a produção, uso, tratamento e disposição final após o uso (IEAGHG, 2010). A Análise de Ciclo de Vida se tornou um padrão ISO em 1996 (ASSEN *et al.*, 2014).

3.2. Metodologia e fases de uma ACV

3.2.1. Fases de uma ACV

A ACV de um produto geralmente é feita em quatro etapas, como mostra a Figura 10 a seguir (ABNT, 2009):

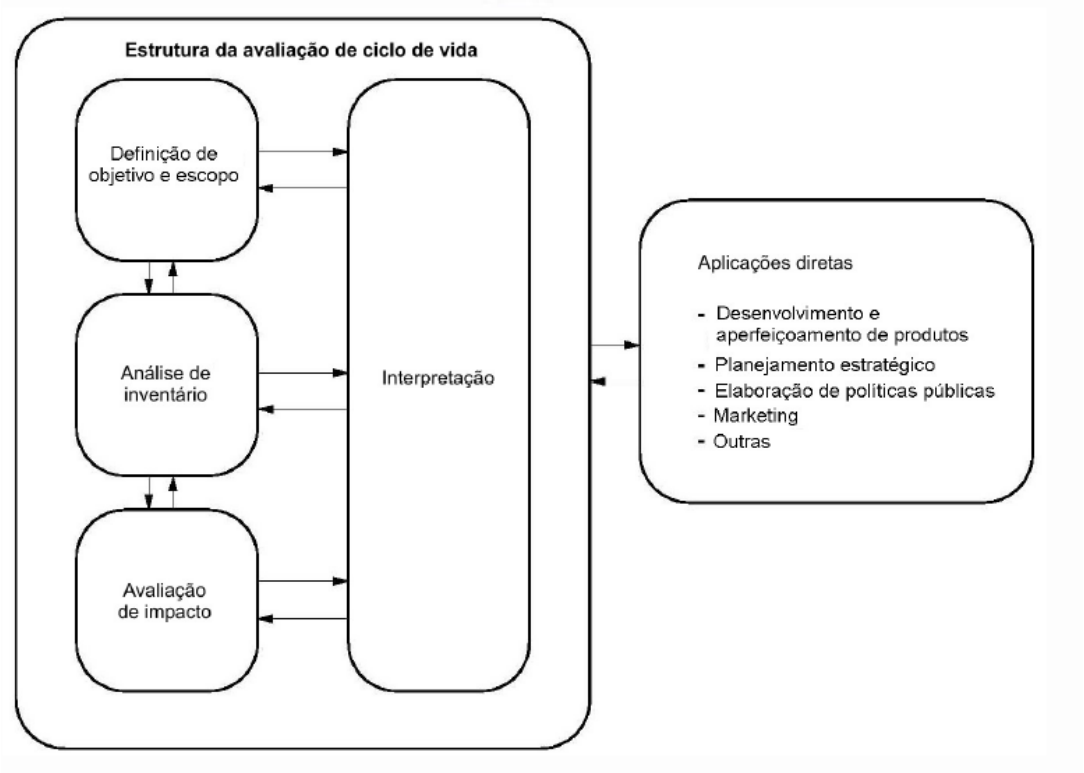

Figura 10: Etapas de uma Análise de Ciclo de Vida. Fonte: ISO 14040 (2009)

A primeira fase de uma ACV é a definição do objetivo a ser alcançado e o escopo do sistema que será considerado. A segunda fase é a elaboração do inventário de ciclo de vida, onde todos os dados são coletados e os cálculos são feitos. Após o inventário, é desenvolvida a avaliação de impacto de ciclo de vida da ACV, que quantifica o potencial impacto causado pelo ciclo de vida do produto ou serviço estudado. A fase de interpretação da ACV é transversal a todas as outras. Quando se vai atingindo um conhecimento maior sobre o processo, interpretando os resultados, pode-se voltar a etapas anteriores e fazer novas considerações ou reformulações, dados os novos resultados obtidos.

3.2.1.1. Definição de objetivo e escopo

A primeira fase de qualquer análise de ciclo de vida deve ser a definição do objetivo (ILCD, 2010). A seleção das entradas e saídas, o nível de agregação de dados de determinada categoria e a modelagem do sistema devem ser consistentes com o objetivo do estudo (ABNT, 2009). Nesta etapa, são definidos os objetivos a serem atingidos com a análise, a fronteira do produto ou do sistema que será considerado e a unidade funcional

que é a referência na qual todas as entradas e saídas dos sistemas do produto são relacionadas durante a análise (ABNT, 2009).

- Fronteira do sistema:

As fronteiras do sistema determinam quais unidades de processos serão incluídas na Análise do Ciclo de Vida (ABNT, 2009; ILCD, 2010). Essa definição do sistema também determina a fronteira onde os fluxos elementares ocorrem entre o sistema analisado e o ambiente (ILCD, 2010). Os fluxos elementares podem ser definidos como os processos de troca entre o meio ambiente e o sistema, e se acumulam ao longo do ciclo de vida, sendo agregados em seus impactos ambientais correspondentes no resultado da ACV (ASSEN *et al*., 2014). A lista desses fluxos é bastante extensa: no banco de dados EcoInvent, por exemplo, são considerados mais de 4.500 fluxos elementares diferentes (ASSEN *et al*., 2014).

A definição de fronteira não só define os processos relevantes do sistema e a cobertura geográfica e espacial, mas também define quais processos prévios e posteriores aos principais serão considerados na análise (IEAGHG, 2010). A definição da fronteira do sistema deve ser representada em um diagrama esquemático apresentando as etapas do ciclo de vida que serão consideradas e as que serão excluídas da análise (ILCD, 2010). No geral, todos os processos e fluxos que são relacionados ao sistema analisado devem ser considerados na fronteira do sistema, mas nem todos esses processos e fluxos são quantitativamente relevantes e estes podem ser excluídos da análise (ILCD, 2010). Na etapa da definição do escopo e posteriormente nas fases de inventário e de avaliação de impacto, deve-se buscar um alto grau de consistência sobre todos os aspectos importantes de metodologia e dados da ACV para todos os processos que tem alta contribuição no sistema (ILCD, 2010).

- Unidade Funcional:

A unidade funcional é uma medida do desempenho das saídas funcionais do sistema do produto, cujo principal propósito é servir como referência para as entradas e saídas da ACV (ABNT, 2009). Ela deve ser definida e mensurável (ABNT, 2009). Esta referência é necessária para que seja possível a comparação entre resultados da ACV, mas diferentes

sistemas devem ter uma base comum para que essa comparação seja possível (ABNT, 2009). Para quantificar a unidade funcional de diversos produtos, um importante aspecto a ser considerado é a duração de seus usos (ILCD, 2010).

3.2.1.2. Inventário de Ciclo de Vida

O inventário do ciclo de vida (LCI da sigla em inglês *Life Cycle Inventory*) é uma metodologia que permite estimar o consumo de recursos e quantificar os fluxos de resíduos e emissões atribuídas ao ciclo de vida de um produto (REBITZER *et al*., 2004). Esta fase da ACV envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes no sistema considerado ao longo de seu ciclo de vida (ABNT, 2009). Os dados resultantes serão utilizados na próxima etapa, de avaliação do impacto do ciclo de vida (ABNT, 2009). Geralmente esta é a fase da ACV que demanda maior esforço e recursos: para a coleta, aquisição e modelagem dos dados (ILCD, 2010). A condução de uma análise do inventário é um processo iterativo, pois à medida que se coletam dados e se conhece mais sobre o sistema estudado, podem ser identificados novos requisitos ou outras limitações dos dados, necessitando de mudanças nos procedimentos de coletas de dados para que o objetivo do estudo seja alcançado e por vezes, com essas novas informações, é necessário até mudança do objetivo ou escopo do estudo (ABNT, 2009). A fase de inventário envolve a coleta dos dados necessários para (ILCD, 2010):

- Fluxos elementares (como recursos e emissões, e também outras interações com o ambiente, como uso do solo)
- Fluxos de produtos (produtos e serviços que são entradas ou saídas dos processos) que conectam os processos analisados com outros processos
- Fluxos de resíduos (efluentes sólidos, líquidos e gasosos) que sejam conectados com a gestão de resíduos do processo estudado, para uma modelagem completa dos impactos ambientais.

Uma definição inicial que deve ser tomada no inventário de ciclo de vida é se a modelagem a ser feita será atribucional ou consequencial, sendo que o primeiro é o modelo mais comumente utilizado, por razões históricas e práticas (ILCD, 2010). O modelo atribucional descreve a cadeia de suprimentos, uso e descarte atuais ou previstos do sistema com uma tecnosfera estática, enquanto que o modelo consequencial retrata uma cadeia de suprimentos genérica esperada como consequência de decisões analisadas

com uma tecnosfera dinâmica (ILCD, 2010). A modelagem atribucional se baseia em dados históricos, mensuráveis e baseados em fatos, incluindo todos os processos que foram identificados como relevantes no sistema sendo considerado, modelando o sistema como ele era ou ainda é (ILCD, 2010). Já a modelagem consequencial objetiva identificar as consequências que uma decisão no sistema principal teria em outros processos e sistemas da economia e a análise é desenvolvida em cima dessas consequências, não refletindo a cadeia de suprimentos atual ou prevista do sistema, mas sim uma cadeia genérica e hipotética, baseada em mecanismos de mercado, interações políticas e a algumas vezes, até mudanças no comportamento do consumidor (ILCD, 2010). No presente estudo, a modelagem a ser utilizada será a atribucional.

A capacidade de um inventário de ciclo de vida representar os impactos ambientais de um sistema se dá caso os dados sejam suficientemente representativos e apropriados (ILCD, 2010). A representatividade mostra o quanto os dados do inventário representam o verdadeiro sistema, considerando os aspectos de tecnologia, geográficos e temporais (ILCD, 2010). Já o segundo aspecto se refere ao grau em que os dados de um processo utilizados no modelo realmente representam o processo verdadeiro do sistema analisado (ILCD, 2010).

O cálculo do resultado do inventário de ciclo de vida é a soma de todas as entradas e saídas de todos os processos dentro da fronteira do sistema (ILCD, 2010), respeitando a unidade funcional estabelecida anteriormente.

3.2.1.3. Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida

A fase de avaliação do impacto da ACV (LCIA da sigla em inglês para *Life Cycle Impact Assessment*) é a fase onde os fluxos elementares de entrada e saída do sistema que foram coletados e reportados na fase anterior (do inventário) são transformados em um indicador de impacto relacionado à saúde humana, meio ambiente ou depleção de recursos (ILCD, 2010). Ou seja, nesta fase os dados do inventário são convertidos em indicadores de impacto ambiental (IEAGHG, 2010). Os elementos essenciais para a LCIA são: seleção das categorias de impacto, dos modelos e categorias de indicadores, a atribuição dos resultados do LCI para as categorias de impacto (classificação) e o cálculo do resultado do indicador de cada categoria considerada (caracterização) (IEAGHG, 2010). O resultado desta etapa é uma avaliação do ciclo de vida do produto, de acordo com a

unidade funcional estabelecida e de acordo com as diversas categorias de impactos (REBITZER *et al*., 2004).

A Figura 11 mostra uma representação do conceito de ACV, onde é considerado todo o ciclo de vida do produto (no círculo), depois eles são transformados em fluxos trocados com ambiente (centro) e posteriormente, esses fluxos são transformados em impactos ambientais (retângulo final) (ASSEN *et al.*, 2014). A LCIA representa o terceiro retângulo da figura, ocorrendo após as outras duas fases anteriores.

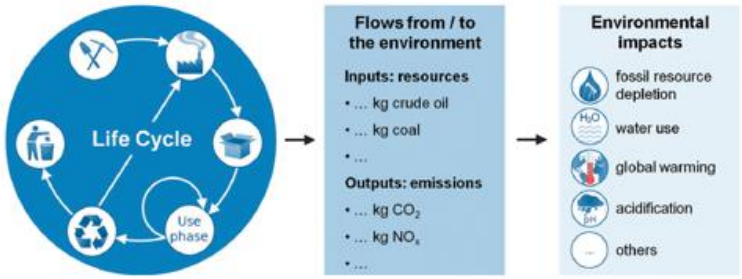

Figura 11: Representação do conceito de ACV. Fonte: ASSEN *et al.* (2014)

O resultado obtido pela LCIA geralmente é expresso em valores equivalentes se é um indicador a nível de *Midpoint* (como toneladas de CO_2 equivalentes no para a categoria de mudanças climáticas) ou valores de danos para indicadores a nível *Endpoint* para cada categoria individual de impacto (ILCD, 2010). Os resultados desta fase devem ser calculados para cada categoria de impacto separadamente. Os indicadores de *Midpoint* e *Endpoint* podem ser vistos na Figura 12 a seguir.

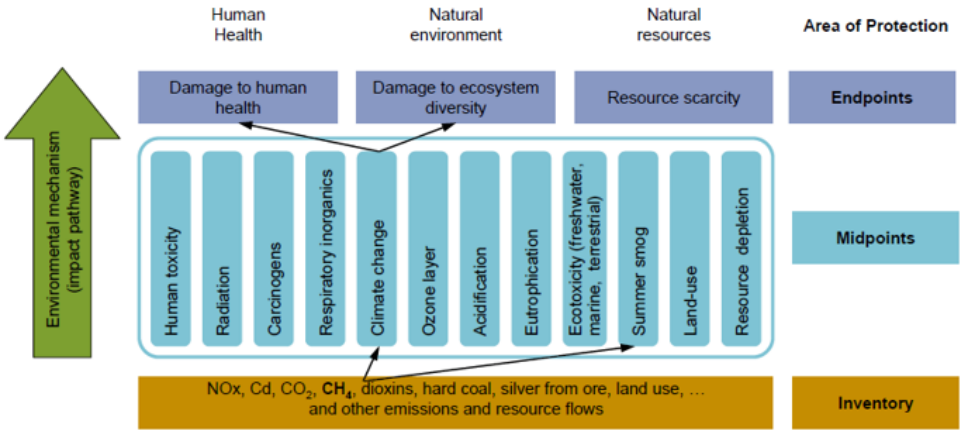

Figura 12: Representação de uma avaliação de impacto ambiental. FONTE: ILCD (2010)

No geral, o nível *Midpoint* possui maior número de categorias de impacto e os resultados são mais precisos quando comparado ao *Endpoint* (ILCD, 2010). As categorias de *Endpoint* se dividem em três grandes categorias: danos à saúde humana, danos à biodiversidade e escassez de recursos. Já os principais aspectos de *Midpoint* são: mudanças climáticas, depleção da camada de ozônio, toxicidade humana, acidificação, eutrofização, uso do solo, escassez de recursos (incluindo energia fóssil e renovável e água), etc. O nível de detalhamento, a metodologia a ser usada e a escolha dos impactos que serão avaliados dependem do objetivo e do escopo da análise (ABNT, 2009).

A atribuição dos impactos ambientais não é uma tarefa simples, visto que muitas cadeias complexas de causa e efeito estão envolvidas (ASSEN *et al*., 2014). Geralmente, muitos bancos de dados e softwares sobre o assunto auxiliam na atribuição a respeito da contribuição referente a cada impacto. Em uma análise do ciclo de vida, geralmente os impactos ambientais são expressos em indicadores do nível *Midpoint*, já que a incerteza aumenta consideravelmente para os indicadores de *Endpoint* (ASSEN *et al*., 2014). Um exemplo sobre isso é no caso das mudanças climáticas, onde o indicador de *Midpoint* quantifica a contribuição de cada gás de efeito estufa pelo potencial de aquecimento global, que é uma técnica comumente feita, com fatores bem estabelecidos por órgãos internacionais, enquanto que o indicador de *Endpoint* para este impacto seria a consideração dos efeitos do aquecimento global nos ecossistemas e na saúde humana (como extinção de espécies que desapareceriam com um aumento de temperatura), que é algo muito mais difícil de estimar.

Para o caso da categoria de mudanças climáticas, por exemplo, toda a emissão de gases de efeito estufa calculada na fase de inventário (como CO_2, CH_4 e N_2O) é traduzida em uma única métrica na fase de LCIA, de acordo com o peso da absorção de radiação por cada tipo de gás, conhecidos como potencial de aquecimento global de cada gás (GWP da sigla em inglês *Global Warming Potential*) (ASSEN *et al*., 2014), sendo essa métrica geralmente o CO_2e. Esses fatores que atribuem um peso são chamados fatores de caracterização e o resultado final para determinado impacto ambiental é calculado pela multiplicação do resultado obtido no inventário pelos fatores de caracterização correspondentes (ASSEN *et al*., 2014).

A seleção das categorias de impacto que serão utilizadas devem ser consistentes com o objetivo do inventário e da análise do inventário do ciclo de vida e deve cobrir todos os aspectos ambientais relevantes ao sistema analisado (ILCD, 2010). Isso só não é válido

no caso específico de estudos definidos a estudar um aspecto limitado como os estudos de pegada de carbono, onde apenas as intervenções às mudanças climáticas são consideradas (ILCD, 2010). A exclusão de impactos relevantes deve estar bem documentada e considerada na interpretação dos resultados, potencialmente limitando as conclusões e recomendações do estudo (ILCD, 2010).

Em estudos comparativos, os modelos de inventário de ciclo de vida devem ser construídos analogamente, aplicando as mesmas regras para as fronteiras do sistema, suas premissas, métodos e qualidade dos dados (ILCD, 2010). O presente estudo fará uma comparação de três estudos de caso e esses cuidados serão considerados.

3.2.1.4. Interpretação, Comunicação e revisão crítica

A interpretação da ACV é a etapa onde são feitas as constatações da análise do inventário e da avaliação de impacto em conjunto, visando alcançar conclusões e recomendações (ABNT, 2009) e responder as questões definidas no objetivo (ILCD, 2010). As constatações da interpretação feita podem se tornar conclusões e recomendações para os tomadores de decisão, considerando o objetivo e o escopo da análise (ABNT, 2009).
A reprodutibilidade é uma questão importante para a credibilidade de um estudo de ACV e isto é possível com um guia bem fundamentado e transparente, com uma boa documentação no relatório sobre o estudo (ILCD, 2010).
A fase de interpretação tem dois grandes objetivos: durante os processos interativos que podem ocorrer durante o desenvolvimento da ACV, a interpretação serve para melhorar o modelo de inventário de ciclo de vida para que se atinja o objetivo estabelecido, ou caso já se tenha chegado à modelagem final e aos últimos resultados do inventário, a interpretação serve para prover as conclusões e recomendações (ILCD, 2010).

3.2.2. Obtenção de dados

Os dados podem ser divididos em primários e secundários. As fontes de dados primárias são dos fabricantes de produtos e operadores de processos e serviços, bem como suas associações (ILCD, 2010). As fontes de dados secundárias dão acesso a dados primários (possivelmente após alguma modificação ou modelagem) e a dados genéricos, como banco de dados nacionais, pesquisadores e grupos de pesquisa (ILCD, 2010). Alguns

dados secundários podem ser obtidos em bancos de dados de projetos de ACV nacionais ou regionais, grupos de pesquisa e consultorias (ILCD, 2010).

As principais bases de dados para um estudo de análise de impacto de mudanças climáticas e que serão utilizados no presente estudo são: IPCC 2006 (Fatores de emissão de GEE para diversas atividades), IPCC 2007 (GWP para os principais GEE) e banco de dados de análise de ciclo de vida como o EcoInvent, que será o banco de dados utilizado neste estudo.

Na etapa da elaboração do inventário deste estudo, a base de dados EcoInvent 3.4 (2017) foi utilizada para obter alguns dados necessários para a completude dos processos estudados. Contudo, esta base possui, na maioria das vezes, dados aplicados à realidade de países como Estados Unidos ou da Europa. O EcoInvent é um banco de dados muito utilizado em ACV, que disponibiliza todas as quantidades de entradas necessárias e saídas subsequentes para um dado processo, para uma dada unidade funcional. Os dados que refletem a realidade brasileira são mais difíceis de serem encontrados em bancos de dados internacionais como o EcoInvent e até mesmo na literatura em geral, mas o presente estudo tentou utilizar dados aplicados a atividades brasileiras sempre que os mesmos estavam disponíveis.

3.2.3. Barreiras e limitações

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2009), as principais limitações da técnica de ACV são:

- Subjetividade das escolhas e suposições feitas na ACV (como o estabelecimento das fronteiras do sistema e seleção de fontes de dados)
- Os modelos que analisam o inventário ou os impactos ambientais são limitados pelas suposições feitas e podem não estar disponíveis para todos os impactos potenciais
- Os resultados de uma ACV que considera questões globais ou regionais podem não ser apropriados para analisar questões locais
- A exatidão dos resultados da ACV pode ser limitada pela acessibilidade, disponibilidade e pela qualidade dos dados

- A falta de dimensões espaciais e temporais para avaliar o impacto introduz incerteza nos resultados dos impactos

Uma outra limitação apontada pelo ILCD (2010) é que a ACV apenas relata os impactos que ocorrem durante condições normais ou anormais de operação, mas não consideram acidentes ou vazamentos que podem ocorrer.

3.3. Proposta metodológica: Análise do Ciclo de Vida para CCS

A proposta metodológica para o presente estudo é a aplicação da metodologia de Análise de Ciclo de Vida para a Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) para utilização do CO_2 da fermentação das destilarias de etanol do Centro-Sul do Brasil para utilização na recuperação avançada de petróleo na Bacia de Campos. De acordo com ASSEN[14] *et al.* (2014), a ACV é uma métrica considerada apropriada para avaliação dos benefícios ambientais do CCS. Outro estudo que reforça isso é o IEAGHG (2010), que afirma que a maneira mais compreensiva de avaliar as consequências ambientais de CCS é através de uma análise de ciclo de vida, já que apesar da redução de emissão na planta proporcionada pelo armazenamento de CO_2, existem novas emissões na cadeia de produção com o CCS que geralmente não são contabilizadas sem uma ACV.

Apesar do conceito geral da ACV ser facilmente compreendido, a aplicação da metodologia para CCS pode ser difícil pela ampla gama de possibilidades que os padrões ISO permitem (ASSEN *et al*., 2014). Além disso, apesar de existirem diversos guias para utilização da metodologia, não existe nenhum específico para sequestro e utilização do CO_2 (ASSEN *et al*., 2014).

No presente estudo, será feita uma análise comparativa das emissões de GEE de três opções diferentes do transporte do CO_2 das destilarias até a Bacia de Campos, onde o gás será utilizado e armazenado. De acordo com ASSEN *et al.* (2014), estudos comparativos são os tipos mais comuns de estudos de ACV, principalmente porque é um problema frequente ter que escolher diferentes opções e a análise comparativa das opções permite escolher aquela que possui menor impacto ambiental. Contudo, é necessário garantir que a comparação entre elas seja justa (ASSEN *et al*., 2014).

[14] ASSEN *et al.* (2014) considera atividades de EOR como CCU (Carbono Capture and Utilization) – Captura e utilização de Carbono -, mas como foi dito no capítulo 1, o presente estudo irá considerar a terminologia de CCS para a utilização do CO_2 em EOR, mas irá aplicar a metodologia que ASSEN *et al.* (2014) descreveu para CCU.

Outro ponto apontado por ASSEN *et al*. (2014) é que a definição da questão a ser respondida durante a definição do escopo da ACV é essencial, pois muitas questões não são razoáveis para o resultado esperado de uma ACV aplicada ao contexto de CCS. De acordo com IEAGHG (2010), a maioria dos estudos de ACV de CCS possuem maior ênfase na etapa da captura do que no transporte e armazenamento. O presente estudo não ocorrerá desta forma, visto que grande parte do processo de comparação da ACV acontece na etapa do transporte e para o caso específico do CO_2 da fermentação do etanol (que é o objeto deste estudo), a etapa de captura é bem mais simples do que no caso de outros projetos que realmente precisam retirar o CO_2 de um exausto onde esse gás está com baixa concentração.

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2013), é necessário um entendimento sólido a respeito das emissões evitadas que podem ser atingidas com o BIOCCS, considerando todo o seu ciclo de vida e este é um pré-requisito essencial para apoiar o BIOCCS de forma bastante calibrada.

Para uma análise de emissões de GEE ao longo do ciclo de vida de um produto ou serviço, é necessário considerar todas as emissões de GEE envolvidas na sua produção e uso, considerando desde a aquisição de matéria-prima ou sua extração, passando pela fabricação, distribuição, uso e até o seu descarte final, quando existente. É necessário que seja definida a unidade funcional que será estudada e quais as fronteiras do estudo (até onde se vai chegar na análise do ciclo de vida dos produtos e insumos de toda a cadeia). Também é imprescindível fazer um mapa com todos os processos, produtos e insumos envolvidos, para assim identificar todas as fontes de emissão de GEE que precisam ser contabilizadas. Com a identificação de todas as emissões que são geradas para a produção de uma unidade funcional, consegue-se perceber quais os combustíveis/produtos ou produções utilizadas que contribuem com uma maior parcela dessas emissões e onde se pode agir mais efetivamente buscando a redução de emissões.

4. Aplicação metodológica: análise do potencial de redução de emissão de GEE pela utilização do CO_2 da fermentação do etanol das destilarias do Centro-Sul do Brasil para recuperação avançada de petróleo

O presente estudo irá analisar o potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa associadas à utilização do CO_2 da fermentação das destilarias do Centro-Sul do Brasil na recuperação avançada de petróleo na Bacia de Campos. As três configurações de transporte do CO_2 consideradas neste estudo foram obtidas nos resultados de SILVA *et al*. (2018), tanto para a localização de Hubs, dutos e destilarias consideradas, quanto para grande parte das premissas iniciais de projeto. Contudo, o estudo de SILVA *et al*. (2018) teve como objetivo apresentar as configurações menos custosas para o transporte do CO_2 das destilarias do Centro-Sul à Bacia de Campos, enquanto no presente estudo o objetivo é analisar o quanto das emissões de CO_2 produzidas pela destilaria pode ser armazenada após se descontar as emissões pela implementação e operação do projeto e qual configuração de transporte contribui com menores emissões de gases de efeito estufa ao longo de seu ciclo de vida, já que em um projeto de BIOCCS um dos objetivos mais importantes é reduzir as emissões de GEE globais. E como já foi dito anteriormente, essa foi até uma recomendação dada pelos autores de SILVA *et al*. (2018), já que o foco do trabalho deles havia sido apenas o aspecto econômico deste projeto

4.1. Descrição do caso

A região escolhida para o estudo de caso foi o Centro-Sul brasileiro, onde está localizada mais de 90% da produção de etanol do Brasil. O principal objetivo deste estudo é analisar os consumos energéticos e emissões de GEE envolvidos em toda a cadeia produtiva que envolve a implementação e operação do BIOCCS nas destilarias consideradas, dadas as configurações de transporte do CO_2 das destilarias do Centro-Sul do Brasil até a Bacia de Campos apresentadas em SILVA *et al*. (2018).

A utilização do CO_2 de destilarias de etanol para recuperação avançada de petróleo produz uma opção rentável para a utilização do CO_2, o que permite o aumento do interesse para desenvolvimento de projetos de redução de GEE, já que atualmente não existe um

mecanismo que precifique as emissões de GEE e não haveria incentivo financeiro para o desenvolvimento de um projeto de BIOCCS onde o CO_2 fosse armazenado geologicamente no contexto das políticas climáticas atuais.

A análise de inventário deste estudo se divide em duas grandes etapas: a análise do ciclo de vida da captura e do transporte. Serão consideradas para esta análise apenas a produção de CO_2 da fermentação do etanol nas destilarias, pois já se mostrou ser a melhor opção econômica, já que o CO_2 do exausto sai praticamente puro, com custos de abatimento mais baixos do que o BIOCCS utilizando o CO_2 da cogeração do bagaço de cana também (como mostrou o resultado de TAGOMORI *et al*., 2018).

Serão consideradas neste estudo as emissões diretas de GEE pela implementação e operação das três configurações de transportes que serão analisadas, incluindo a fabricação dos dutos e caminhões necessários no transporte direto do CO_2. Não serão consideradas as emissões por uma eventual mudança do uso de solo na implementação do projeto, nem pela fabricação do maquinário utilizado no projeto (como os compressores e secadores). Também não será considerada a emissão pela implementação de novas estradas que já não sejam existentes.

O presente estudo utiliza como base as três configurações de transporte resultadas do estudo de SILVA *et al*. (2018) e devido a isso, grande parte do dimensionamento e das considerações utilizadas em SILVA *et al.* (2018) foram usados neste estudo, para que o seu resultado pudesse ser replicado na análise de ciclo de vida que será realizada neste trabalho. Serão considerados três estudos de caso para o transporte, de acordo com os resultados do estudo citado: o caso 1 irá considerar a captura da fermentação do etanol nas destilarias do Centro-Sul, sendo transportado por dutos a um único Hub e depois, encaminhado para o EOR na Bacia de Campos; o caso 2 considera a opção de captura da fermentação do etanol nas destilarias do Centro-Sul, com transporte por dutos ou por caminhões até um único Hub, e posteriormente, para a Bacia de Campos e o caso 3 considera a captura da fermentação do etanol nas destilarias do Centro-Sul, sendo transportado por dutos até diferentes Hubs para poder ser utilizado em atividades de EOR na Bacia de Campos.

A Figura 13 a seguir apresenta o esquema metodológico de SILVA *et al*. (2018) para o desenvolvimento de três diferentes configurações de rede de transportes, que são o resultado de seu estudo.

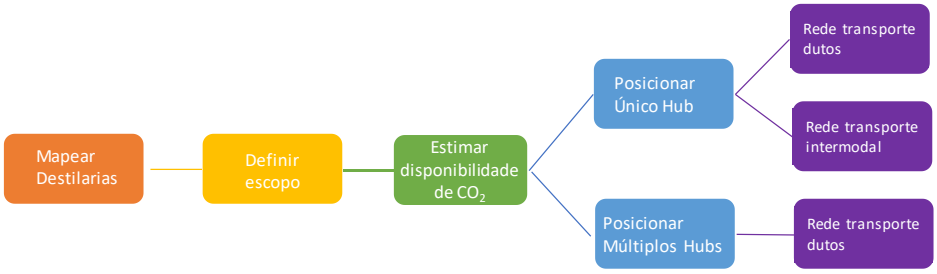

Figura 13: Esquema metodológico da localização das redes de transporte desenvolvidas por SILVA *et al.* (2018). Fonte: Adaptado de SILVA *et al.* (2018)

O presente estudo considerou o máximo possível das premissas adotadas em SILVA *et al.* (2018), apenas fazendo modificações e inserindo novas informações onde eram necessárias, principalmente na aplicação das duas primeiras etapas do esquema metodológico da Figura 13 (etapa de mapeamento de destilarias e definição de escopo).

Assim como SILVA *et al.* (2018), o presente estudo também tem como escopo não considerar as destilarias do Centro-Sul que não possuíam outras 10 ao seu redor em um raio de 100 km. Contudo, diferença é que ao atualizar as destilarias que estavam em operação de acordo com a ANP, três destilarias consideradas em SILVA *et al.* (2018) não foram identificadas, então optou-se por não as considerar[15] neste estudo. Enquanto que SILVA *et al.* (2018) considera 236 destilarias, o presente estudo considera 233. Na terceira etapa (estimar a disponibilidade de CO_2), algumas considerações no presente estudo foram diferentes de SILVA *et al.* (2018), como a consideração de dados de uma safra de cana-de-açúcar mais recente que o estudo citado, mas que não impossibilita a utilização dos resultados de SILVA *et al.* (2018). Já a etapa 4 e 5 da metodologia de SILVA *et al.* (2018) (posicionamento do(s) Hub(s) e as três configurações ótimas para o transporte do CO_2) foram integralmente considerados os resultados obtidos em SILVA *et al.* (2018), considerando a localização dos Hubs e dutos apresentada no estudo citado, assim como o comprimento de cada trecho de duto.

O presente estudo também precisou considerar diversos parâmetros novos, que não haviam sido considerados em SILVA *et al.* (2018) por não serem relevantes no ponto de

[15] Essas três destilarias também não foram consideradas na etapa de transporte. Portanto, todos os cálculos desenvolvidos em todas as etapas deste estudo consideram apenas as 233 destilarias.

vista econômico, mas que são imprescindíveis no cálculo da ACV considerando impactos de mudanças climáticas.

O presente estudo se baseia na metodologia de análise de ciclo de vida, de acordo com os padrões ISO 14.040. A avaliação do inventário do ciclo de vida e dos impactos associados foi feita através de uma modelagem própria, desenvolvida exclusivamente para este estudo, utilizando-se dados do banco de dados EcoInvent 3.4, dados de bibliografia e do *software* Microsoft Excel.

4.2. Definição de objetivo e escopo

O presente estudo irá desenvolver uma análise de ciclo de vida para um projeto de BIOCCS utilizando o CO_2 da fermentação do etanol das destilarias do Centro Sul do Brasil para sua utilização em EOR na Bacia de Campos, considerando três configurações diferentes de transporte, buscando o real potencial de redução de emissões de GEE por projetos desse tipo após se descontar as emissões que ocorrem para implementação e operação do projeto e qual a configuração permite maior redução de emissão de Gases de Efeito Estufa. Sendo assim, a única categoria de impacto analisada neste estudo será a categoria de mudanças climáticas até o indicador de *Midpoint* de tCO_2e, que é o necessário para quantificar todas as emissões de GEE ao longo do ciclo de vida e comparar as diferentes configurações.

4.2.1. Objetivo da Análise de Ciclo de Vida

O objetivo desta análise é quantificar os reais benefícios ambientais da implementação da infraestrutura requerida para toda a cadeia do BIOCCS nas destilarias de etanol do Centro Sul do país e sua utilização na recuperação avançada de petróleo, já que com a implementação do projeto, novas emissões de GEE ocorrem, que geralmente não são contabilizadas. Como o objetivo das tecnologias de CCS é não permitir o aumento da concentração de CO_2 na atmosfera, as tecnologias que permitam uma redução maior das emissões desse gás que seriam liberadas para atmosfera devem ser priorizadas. Por isso, esse estudo visa analisar qual a configuração de transporte do CO_2 das destilarias para o EOR é a melhor em termos de emissão de GEE, considerando toda a análise de ciclo de

vida desta atividade. Para atingir este objetivo, serão analisadas as emissões de gases de efeito estufa associadas ao consumo energético da captura e do transporte e à fabricação dos materiais constituintes dos meios de transportes utilizados.

4.2.2. Unidade funcional

A unidade funcional considerada neste estudo é **1.000 tCO_2 armazenadas**, já que o objetivo principal desta análise é verificar o saldo de armazenamento líquido que pode ser obtido com esse projeto após se descontar as emissões na implementação e operação do mesmo, que geralmente não são contabilizadas, analisando também qual a opção de transporte do CO_2 que apresenta menores emissões de GEE associadas para que o armazenamento de CO_2 seja feito com o maior saldo possível de emissões negativas.

4.2.3. Definição do sistema

A Figura 14 apresenta o fluxo geral mostrando os limites do sistema. Os fluxos que estão inclusos na linha pontilhada são aqueles que serão considerados.

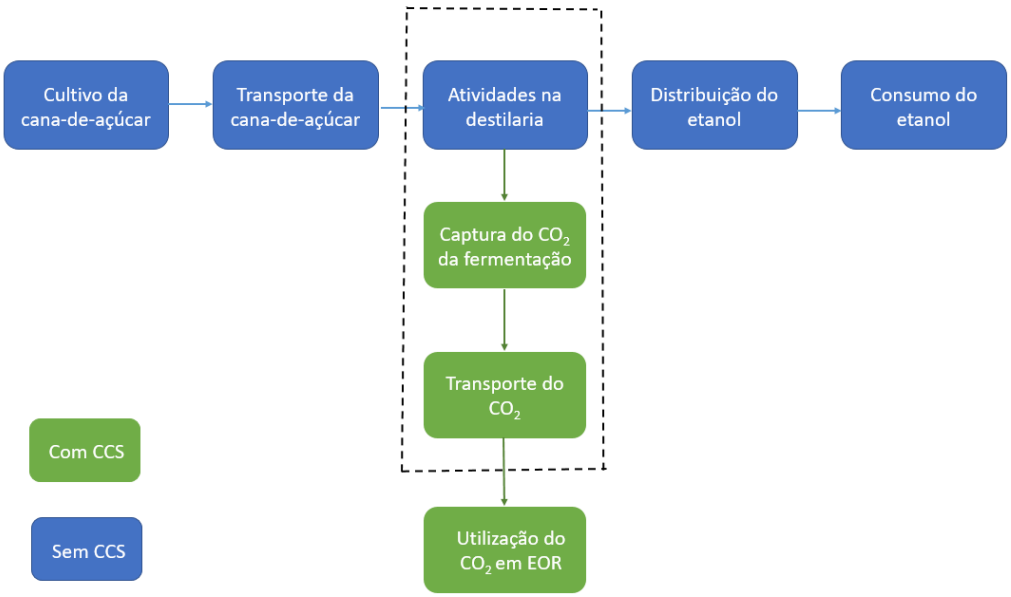

Figura 14: Escopo do presente estudo. Fonte: Elaboração própria, baseado em LAUDE *et al.* (2011)

Para cada atividade considerada nesta análise de ciclo de vida, serão calculadas as emissões de GEE desta etapa, além das emissões que também foram contabilizadas em fases anteriores e que servem como entrada para a etapa atual. Serão considerados os seguintes GEE no inventário de ciclo de vida: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O). O Potencial de Aquecimento Global (GWP da sigla em inglês para *Global Warming Potential*) considerado para cada um desses gases foi obtido no relatório *Fourth Assessment Report* do IPCC de 2007[16] para um horizonte de tempo de 100 anos, onde o CO_2 tem o GWP de 1, o CH_4 de 25 e o N_2O de 298.

A vida útil do projeto considerada neste estudo é de 30 anos, que é o prazo proposto para concessão para novos gasodutos conforme o Decreto nº 7.382/2010, da lei 11.909/2009 (EPE, 2014). Esse período também foi considerado no estudo de LAUDE *et al*. (2011), mas é diferente do estudo de SILVA *et al.* (2018), de onde o presente estudo retirou várias considerações, mas que considerou 40 anos como o tempo de vida do projeto.

4.3. Inventário de Ciclo de Vida

4.3.1. Produção de CO_2 pela fermentação das destilarias

Para o dimensionamento da quantidade de CO_2 gerado pelas destilarias no presente estudo, foi utilizada a mesma metodologia aplicada no estudo anteriormente citado de SILVA *et al*. (2018), para que fosse possível utilizar os resultados obtidos no estudo desenvolvido por esse grupo de autores. Foram consideradas as mesmas destilarias de SILVA *et al.* (2018), seguindo o mesmo critério de seleção já citado anteriormente, de que seriam descartadas as destilarias do Centro-Sul que não estivessem cercadas por 10 outras em um raio de 100 km, para que se evitasse a construção de dutos de longa distância com baixa capacidade de transporte. Conforme citado anteriormente, o presente estudo considera 233 destilarias das que foram analisadas em SILVA *et al.* (2018), sendo três a menos que o estudo citado.

[16] Usualmente os inventários corporativos de GEE utilizam os valores de potencial de aquecimento global (GWP) do *Fourth Assessment Report do IPCC*, publicado em 2007. O *GHG Protocol*, programa internacional que desenvolveu o método que é mais utilizado mundialmente para o cálculo de inventários de GEE por empresas e governos, também considera os valores de GWP deste mesmo relatório do IPCC (2007) em sua ferramenta de cálculo, que está disponível no site do programa brasileiro (GHG PROTOCOLBRASIL, 2016).

Para cada uma das 233 destilarias consideradas, foi calculada a produção de etanol anual de cada uma. As destilarias consideradas estão localizadas nos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Paraná. A Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2017_b) disponibiliza a capacidade de produção diária de etanol das destilarias ratificadas e em operação definitiva no Brasil. Esta capacidade de produção diária foi multiplicada por 365 para que se chegasse à capacidade de produção anual de etanol hidratado[17] de cada destilaria considerada neste estudo.

Após o cálculo da capacidade anual de produção de etanol de cada destilaria, utilizou-se um fator de produtividade para ajustar esses valores. Esta correção é necessária, já que nem toda capacidade de produção das usinas é realmente utilizada. Essa correção também foi proposta por SILVA *et al*. (2018). De acordo com a CONAB (2017), na safra de 2014/2015 a média da capacidade de produção de etanol anidro e hidratado utilizada foi de 61,17% no Brasil e 59,57% das destilarias do Centro Sul. Esses valores são diferentes dos obtidos pela metodologia de SILVA *et al.* (2018), mas como deseja-se utilizar o resultado deste estudo, optou-se por seguir a metodologia do mesmo, com uma pequena diferença que será explicitada a seguir.

A utilização nos cálculos da capacidade total de produção de etanol ao invés da produção real acarretaria em uma superestimação do sistema como um todo. Sendo assim, foi estimada a produção anual de cada destilaria (que será denominada neste estudo como produção anual ajustada), considerando a capacidade máxima de produção de cada destilaria e a real produção anual do seu estado de origem, através da Equação 1 (SILVA *et al.*, 2018).

$$P_i = C_i \; x \; \frac{P_{E(i)}}{C_{E(i)}} \qquad (1)$$

- P_i = Produção anual ajustada de etanol da destilaria i (litros / ano)
- C_i = capacidade máxima anual de produção de etanol da destilaria i (litros / ano)
- $P_{E(i)}$= Produção anual de etanol do Estado da destilaria i (litros / ano)

[17] De acordo com ANP (2017_b), a capacidade máxima de produção de etanol hidratado de uma destilaria considera tanto a produção do etanol hidratado quanto aquele que será desidratado para comercialização como etanol anidro. Sendo assim, neste estudo a capacidade de produção considerada para cada destilaria é apenas a de etanol hidratado que foi apresentada pela ANP (2016).

- $C_{E(i)}$ = Capacidade máxima anual de produção de etanol do Estado da destilaria i (litros / ano)

A Tabela 1 mostra a relação da capacidade de produção de etanol hidratado[18] para o ano de 2016 dos Estados onde as destilarias que foram consideradas neste estudo estão localizadas (ANP, 2016_a) e a produção[19] de etanol no ano de 2016 (UDOP, 2016). A relação entre essas duas grandezas gera um fator de utilização da capacidade instalada que permite a adaptar os dados disponíveis sobre a a capacidade de produção anual de etanol para cada destilaria e assim, chegar a um valor mais próximo da realidade da produção de etanol de cada destilaria.

Tabela 1: Capacidade instalada de produção de etanol, produção efetiva e fator de utilização da capacidade instalada por Estado

UF	Capacidade instalada de produção Etanol por Estado (m^3/ano) [1]	Produção de Etanol por Estado (m^3/ano) [2]	Fator de utilização da capacidade instalada por Estado
SP	36.050.685	13.702.767	0,380
GO	11.077.750	4.400.950	0,397
MS	7.268.975	2.709.300	0,373
MG	7.689.820	2.657.455	0,346
PR	4.828.950	1.401.270	0,290

1 - Fonte: ANP (2016).

2 - Fonte: UDOP (2016).

Fonte: Elaboração própria baseada em SILVA *et al.* (2018), ANP (2016a) e UDOP (2016)

Sendo assim, para cada destilaria, a capacidade instalada anual já calculada foi multiplicada pelo fator de produtividade correspondente a cada Estado de origem de cada

[18] No trabalho de SILVA *et al.* (2018), foi considerada a capacidade de produção de etanol total e não apenas o hidratado. Mas conforme a observação da nota de rodapé 17, optou-se neste estudo por considerar apenas a capacidade de etanol hidratado nesta etapa, o que diferencia a quantidade de CO_2 produzido calculado pelos dois estudos.

[19] Em SILVA et al. (2018) esse mesmo cálculo foi feito, mas considerou os dados da safra de 2015/2016. Portanto, a quantidade de etanol produzida por ano e consequentemente, a quantidade de CO_2 gerado podem se diferenciar um pouco do estudo citado. Contudo, optou-se neste estudo por considerar a safra que melhor representasse o ano de 2016, já que a safra de 2016/2017 correspondente ao período de 01/04/2016 a 31/03/2017.

destilaria, utilizando a Equação 1. O resultado desta equação é o valor da produção anual ajustada para cada destilaria.

A Equação 2 a seguir mostra a relação estequiométrica da fermentação da glicose, que ocorre durante a produção do etanol. Esta equação foi utilizada para calcular a quantidade de CO_2 produzida pela fermentação do etanol para cada destilaria considerada, pois relaciona uma dada quantidade de etanol com sua respectiva produção de CO_2. Neste estudo, cujo o escopo é apenas analisar a produção de CO_2 pela fermentação, essa será a única fonte de emissão desse gás pela produção de etanol.

$$C_6H_{12}O_6 \xrightarrow{yields} 2C_2H_5OH + 2CO_2 \qquad (2)$$

Considerando as massas atômicas (A) do Carbono (A = 12), Hidrogênio (A = 1) e Oxigênio (A = 16) na Equação 2, chega-se ao resultado que para cada molécula de etanol (C_2H_5OH) de peso molecular 46 g/mol, produzida durante a fermentação da glicose ($C_6H_{12}O_6$), são produzidos também 44 g/mol de CO_2. Considerando a densidade do etanol hidratado como 809 kg/m^3 (BEN, 2017), obtém-se, por uma regra de três simples, que para cada metro cúbico de etanol produzido, são gerados 0,77 toneladas de CO_2 durante a fermentação da glicose. O mesmo valor de produção de CO_2 na fermentação do etanol foi considerado nos cálculos do estudo de BONIJOLY *et al.* (2009). Como já havia sido calculado anteriormente a produção efetiva de etanol de cada destilaria, com esta relação, é possível calcular a quantidade de CO_2 gerado pelo processo de fermentação de cada uma anualmente, através da Equação 3 a seguir.

$$m_i = \frac{P_i}{1000} * 0{,}77 \quad (3)$$

Onde:

- m_i = Produção anual de CO_2 da destilaria i (tCO_2 / ano)
- P_i = Produção anual ajustada de etanol da destilaria i (litros/ ano)

Para o dimensionamento da rede de transportes do CO_2, após a estimativa da produção anual de CO_2 de cada destilaria que foi calculada pela Equação 3, outro cálculo que se faz necessário é a vazão diária de CO_2 de cada destilaria, para que os dutos sejam dimensionados de modo que sejam suficientes para escoar essa vazão diária de CO_2 produzida pelas destilarias e que também não sejam superestimados para que não ocorra o desperdício de recursos naturais e financeiros.

Para iniciar o cálculo da vazão diária de CO_2 produzido por cada destilaria, optou-se por utilizar a metodologia de SILVA *et al.* (2018) e MERSCHMANN *et al.* (2016). Por esta metodologia, era necessária a identificação do mês de maior produção de cana-de-açúcar, que também seria o mês de maior produção de etanol e dimensionar os dutos de forma que eles sejam capazes de escoar essa produção máxima mensal. A cana-de-açúcar não é um produto que pode ser estocado e o tempo útil do seu aproveitamento pode ser medido em horas (CONAB, 2011). Sendo assim, uma vez cortada, a cana deve ser processada imediatamente (CONAB, 2011), o que faz com que o fluxo de CO_2 das destilarias não seja contínuo ao longo do ano, já que a colheita da cana é sazonal (MERSCHMANN *et al.*, 2016), como pode ser visto na Figura 15.

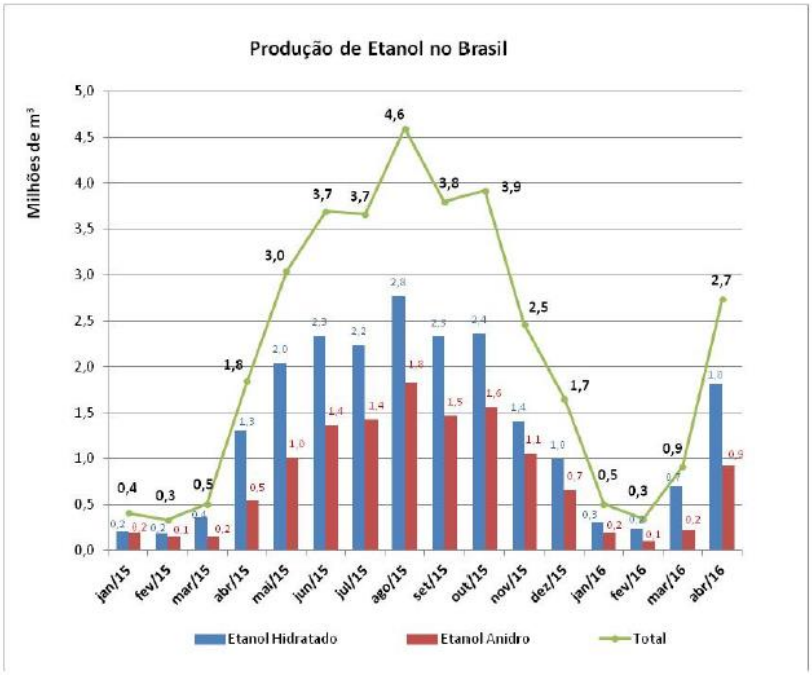

Figura 15: Produção de etanol por região na safra de 2015/2016. Fonte: ANP (2016a)

Na Figura 15, a linha verde representa a produção total de etanol (anidro e hidratado) produzido no Brasil no ano de 2015. Coletando esses dados, chega-se à Tabela 2

apresentada a seguir. Nela, é possível ver que o mês de maior produção de etanol é o mês de agosto, com 4,6 milhões de m^3 de etanol produzidos no mês.

Tabela 2 - Produção total de etanol no Brasil em 2015

Produção total de etanol no Brasil (milhões de m^3)												
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	**Total**
0,4	0,3	0,5	1,8	3,0	3,7	3,7	4,6	3,8	3,9	2,5	1,7	**29,9**

Fonte: Adaptado de ANP (2016a)

Dividindo o valor da produção de etanol para o mês de agosto pelo total de etanol produzido no ano (29,9 milhões de m^3 de etanol), chega-se ao resultado de que em agosto foram produzidos 15% da produção anual de etanol. Essa fração será usada para dimensionar a rede de dutos, para que eles sejam capazes de transportar o escoamento do mês de maior produção do ano. Os estudos que foram citados no início deste item, que serviram como base para esta abordagem, também chegaram a esta mesma fração da produção anual para o mês de agosto (15% da produção anual). Sendo assim, a produção anual de cada destilaria (calculada anteriormente) deve ser multiplicada por esta fração.

Para calcular a capacidade de vazão dos dutos neste estudo (expressa em kg/s), considerou-se que as usinas operariam 24 horas ininterruptas em produção contínua durante o período de safra, como foi considerado em MERSCHMANN (2014). De acordo com MOREIRA *et al.* (2016), o período de colheita de cana de açúcar corresponde a 208 dias por ano, sendo que apenas 90% deles são efetivos, devido a alguns dias a precipitação intensa que prejudicar o transporte da matéria prima, por falha de equipamento de moagem ou da cogeração, entre outros (MOREIRA *et al.*, 2016). Já a CONAB (2017) mostra que as destilarias do Centro-Sul do Brasil têm em média 214 dias corridos de atividade na safra, com um tempo médio de moagem de 20,4 horas, enquanto que a média de atividade das destilarias brasileiras é de 204 dias corridos, com um tempo médio de moagem parecido com a do Centro-Sul, de 20,5 horas. Mas o período de safra a ser considerado não será relevante para este estudo, visto que a vazão de projeto para dimensionamento dos dutos será correspondente à vazão do mês com o pico de produção, que neste caso é agosto.

4.3.2. Captura

Como o CO_2 gerado na fermentação do etanol é praticamente puro, como já foi visto anteriormente, na etapa de captura do BIOCCS em destilarias de etanol, os únicos processos necessários são a desidratação do gás e sua compressão. A eficiência da captura da fermentação neste estudo foi considerada como sendo 100%[20], ou seja, todo CO_2 produzido durante a fermentação do etanol nas destilarias seguiu para o transporte e posterior injeção.

De acordo com a bibliografia estudada, o valor mais comum[21] considerado como penalidade energética para a captura do CO_2 da fermentação do etanol é de 0,12 kWh/kgCO_2 (MÖLLERSTEN *et al*., 2003). Este fator foi apresentado no estudo de MÖLLERSTEN *et al.* (2003), para a penalidade energética da captura do CO_2 da fermentação do etanol considerando o processo de compressão em 5 estágios para uma pressão final de 100 bar.

Muitos estudos consideram a desidratação como um subprocesso da compressão (HENDRIKS e GRAUS, 2004; MERSCHMANN, 2014). Contudo, de acordo com MOREIRA (2017), um dos coautores do estudo MÖLLERSTEN *et al.* (2003), o fator de consumo da compressão apresentado neste estudo não considerava o gasto energético da desidratação da captura da fermentação do etanol. Sendo assim, este fator de consumo será considerado no presente estudo apenas para o cálculo da energia consumida pela compressão do CO_2 na captura. Sendo assim, optou-se por encontrar um outro fator de consumo que representasse o consumo energético da desidratação, para ser o mais conservador possível e não deixar de considerar um consumo energético que pode ser relevante na ACV. Contudo, não é fácil achar um fator de consumo apenas para a desidratação, visto que geralmente ela está inclusa na compressão em muitas análises (ou não fica explícito se ela está inclusa ou não). Além disso, diferentes processos de desidratação, dependendo da tecnologia utilizada, possuem diferentes demandas energéticas (IEAGHG, 2014b) e a escolha da tecnologia considerada pode influenciar os resultados.

[20] Como também foi considerado nos estudos de MÖLLERSTEN *et al.* (2003); LAUDE *et al.*, (2011) e FABBRI *et al.* (2011).

[21] Esse fator foi considerado também em estudos como LINDFELDT e WESTERMARK (2009) e MOREIRA *et al.* (2016). Já LAUDE *et al.* (2011), não considerou nenhuma penalidade energética para a etapa da captura da fermentação do etanol em sua ACV.

Um fatores de consumo para a etapa de desidratação do CO_2 que foi encontrado na literatura, foi o de FARLA *et al.* (1995), onde foi feita uma estimativa de consumo de 8 kJ/ $kgCO_2$ (o equivalente a 0,002 kWh/ $kgCO_2$) para a desidratação do CO_2 utilizando uma torre de secagem. Outro estudo que também dispõe do consumo da etapa de desidratação separadamente é do projeto de BIOCCS de etanol de Illinois (EUA), onde o consumo do equipamento para retirar umidade (*dryer*) do CO_2 após sua captura é de 30 kWh (valor da média diária), para um fluxo de 75 toneladas de CO_2/dia (ILLINOIS STATE GEOLOGICAL SURVEY, 2006). Isso corresponde a um consumo de 0,0004 kWh / $kgCO_2$. Apesar do consumo energético da desidratação variar com a tecnologia utilizada e com a umidade presente no fluxo de CO_2, como foi visto na literatura estudada, o consumo energético ainda é bastante baixo nesta etapa. Contudo, optou-se no presente estudo de não desprezar este consumo energético e será considerado nas contas do inventário de ciclo de vida o fator de consumo apresentado em FARLA *et al.* (1995), de 0,002 kWh/$kgCO_2$, já que este estudo apresentou a maior penalidade energética para esta etapa dentre os dois estudos encontrados na literatura sobre este tema.

A etapa de captura de um projeto de CCS e BIOCCS é realizada no local onde também ocorre a emissão de CO_2 e no caso deste projeto, a etapa de captura ocorre ainda nas destilarias. Uma outra consideração que precisou ser feita foi sobre qual seria a origem da energia elétrica consumida pela desidratação e compressão do CO_2 produzido pelas destilarias. Algumas publicações apontam que as destilarias de etanol são autossuficientes na produção de energia elétrica através da cogeração da queima do bagaço (UNICA, 2007, 2008). Mesmo a cogeração das destilarias sendo uma tecnologia madura e comercialmente disponível, pouca eletricidade ainda é vendida ao grid pelas mesmas (LEAL *et al.*, 2013). Tradicionalmente a autossuficiência das usinas de açúcar e etanol provinha de processos de eficiência muito baixa, que se limitavam a gerar apenas o necessário para as atividades das usinas (UNICA, 2010). Alguns fatores contribuíam para que isso ocorresse, como: a tentativa de maximizar a queima do bagaço de cana-de-açúcar pela dificuldade de sua estocagem e pela pouca relevância no mercado para sua venda *in natura* (DANTAS, 2008 in UNICA 2010). Além disso, ainda havia a falta de interesse comercial no investimento de plantas mais eficientes na geração da energia elétrica, já que não havia interesse comercial na geração excedente de eletricidade para o grid, pois na década de 1990 o setor elétrico brasileiro era muito centralizado e estruturado em monopólios integrados verticalmente, com regras que não permitiam a

comercialização de energia por atores que não fossem as concessionárias de energia elétrica (UNICA, 2010). As condições para que as destilarias investissem em plantas de cogeração mais eficientes surgiram também nesta década, quando surgiu o papel do produtor independente de eletricidade, com um marco legal que permitia a exportação de eletricidade para o sistema elétrico brasileiro (UNICA, 2010). Mesmo com as destilarias possuindo potencial técnico para exportar energia elétrica para o grid, somente em um período relativamente recente que isso se tornou economicamente possível (UNICA, 2010). Atualmente, as unidades de cogeração estão sendo aprimoradas para produzir um excedente de energia elétrica na indústria de cana-de-açúcar (KHATIWADA *et al.*, 2016).

Sendo assim, o presente estudo considerou que existem basicamente duas opções de como o consumo extra de eletricidade necessário para suprir a penalidade energética da etapa de captura pode ocorrer nas destilarias:

(1) A destilaria é capaz de produzir toda a energia necessária para as suas atividades atualmente e opera no máximo de sua capacidade de cogeração do bagaço. Para o consumo extra de energia que a captura demandaria, seria necessário comprar eletricidade do grid;
(2) A destilaria é capaz de produzir eletricidade além do necessário para suas atividades atuais e exporta o excedente para o grid. Mas com o consumo extra que a captura demandaria, deixaria de exportar para o grid essa quantidade utilizada pela captura e seria necessário que outras fontes do grid gerassem essa mesma quantidade de energia elétrica para conseguir atender toda a demanda de eletricidade do país.

Sendo assim, optou-se por considerar que a emissão de GEE produzida pelo consumo de eletricidade na etapa de captura teria o fator de emissão do grid ao invés de ter uma emissão nula (caso essa energia elétrica fosse gerada pelas destilarias por cogeração), por ser o que aconteceria nos dois casos, já que ou a destilaria importaria essa eletricidade do grid ou outras fontes do grid teriam que gerar essa eletricidade que não seria mais exportada pelas destilarias. Sendo assim, fator de emissão considerado em todas os cálculos de emissão pelo consumo de energia na etapa de captura (e que envolviam a eletricidade do grid) foi de 0,0817 tCO_2/MWh, que foi a média anual de emissão do grid para o ano de 2016, divulgado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e

Comunicações (MCTI, 2017). O fator médio anual de emissão do grid varia de ano para ano, dependendo se é um ano seco, onde as termoelétricas do país precisaram gerar mais eletricidade ou se é um ano mais chuvoso, onde as hidroelétricas puderam gerar mais eletricidade e as termoelétricas geraram menos. Sendo assim, a utilização deste fator pode gerar uma limitação ao cálculo da ACV, pois em anos diferentes essas emissões podem ser mais altas ou mais baixas, dependendo da quantidade de energia de origem fóssil que foi utilizada pelo grid no ano.

Considerando todos esses fatores, a emissão da etapa de captura para cada destilaria pode ser calculada pela Equação 4 a seguir:

$$E_{i,total\ captura} = (Q_{i,ano} \times \left(W_{desidratação} + W_{compressão}\right) \times FE_{eletricidade}) \quad (4)$$

- $E_{i,\ total\ captura}$ = Emissão de GEE total anual pela etapa de captura para a destilaria i (tCO_2e/ano)
- $Q_{i,\ ano}$ = Vazão anual de CO_2 da destilaria i (t CO_2/ano)
- $W_{desidratação}$ = Fator de consumo da desidratação (MWh/tCO_2)
- $W_{compressão}$ = Fator de consumo da compressão (MWh/tCO_2)
- $FE_{eletricidade}$ = Fator de emissão da eletricidade (tCO_2e/MWh)

O trabalho realizado por um compressor de CO_2 provavelmente varia com a quantidade de CO_2 a ser comprimido. Uma outra limitação deste estudo é considerar que o trabalho realizando por esse equipamento ($W_{compressor}$) era constante, como se o fluxo de CO_2 a ser comprimido também fosse constante ao longo do tempo de projeto, o que é uma idealização.

A Tabela 3 a seguir apresenta os valores dos principais parâmetros necessários para o cálculo das emissões da etapa da captura, apresentados ao longo desta seção.

Tabela 3: Quadro resumo dos parâmetros utilizados no cálculo da emissão total da captura

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade	Fonte
$E_{i,total\ captura}$	Emissão de GEE total anual pela etapa de captura para a destilaria i	Calculado	tCO_2e/ano	-
$Q_{i,ano}$	Vazão anual de CO_2 da destilaria i	Calculado	t CO_2/ano	-
$W_{desidratação}$	Fator de consumo da desidratação	0,002	MWh/tCO_2	FARLA *et al*. (1995)
$W_{compressão}$	Fator de consumo da compressão	0,12	MWh/tCO_2	MÖLLERSTEN *et al*. (2003)
$FE_{eletricidade}$	Fator de emissão da eletricidade	0,0817	tCO_2e/MWh	MCTI (2017)

A Equação 4 calcula a emissão da etapa da captura em um ano. Para o cálculo da emissão do ciclo de vida do projeto, essa emissão será multiplicada por 30, por ser periódica ao longo de todo o projeto.

4.3.3. Transporte

Um dos problemas de um projeto de BIOCCS utilizando-se CO_2 da fermentação do etanol é que as destilarias são dispersas geograficamente. Por isso que se optou pela utilização das configurações de transporte desenvolvidas por SILVA *et al*. (2018), que foram elaboradas visando um ótimo econômico para este escoamento. O estudo citado, apresentou três configurações para o transporte de CO2 das destilarias do Centro-Sul à Bacia de Campos: (1) transporte exclusivo por dutos utilizando das destilarias a um único Hub, (2) transporte de dutos e caminhões das destilarias a um único Hub e (3) transporte exclusivamente por dutos das destilarias a múltiplos Hubs.

A seguir serão apresentadas as principais considerações para o dimensionamento dos dutos (que são comuns aos três estudos de caso analisados) e do transporte rodoviário, presente no estudo de caso que considera a opção intermodal de transporte.

4.3.3.1. Dimensionamento dos dutos

Para estimar a quantidade de material necessária à construção da rede de dutos e suas respectivas emissões de GEE correspondentes, os principais parâmetros necessários e que serão considerados neste estudo são: tipo de material a ser utilizado, diâmetro do duto, espessura, comprimento de cada trecho da rede de dutos e consumo das estações de recompressão ao longo dos dutos que são necessárias para que o escoamento não perca a pressão ideal.

Como já foi dito anteriormente, os dutos de CO_2 geralmente são feitos de aço carbono, que é a opção de material mais vantajosa economicamente (IEAGHG, 2014a). Este material que será considerado em todos os dutos deste estudo.

Para o cálculo do diâmetro dos dutos, a Equação 5 a seguir foi utilizada, de acordo com a metodologia aplicada também por MERSCHMANN *et al*. (2016) e SILVA *et al.* (2018). Foi calculado o diâmetro de cada seção de duto neste estudo, considerando a quantidade de CO_2 transportada naquele trecho, que dependem das destilarias que estavam a montante. Neste estudo, o diâmetro calculado por esta equação será referenciado como diâmetro interno (D_i).

$$D_i = \left(\frac{32 \times f \times m^2 \times L}{\pi^2 \times \rho \times \Delta p}\right)^{\frac{1}{5}} \qquad (5)$$

- D_i = Diâmetro interno do duto (m)
- f = Fator de atrito de Fanning (adimensional)
- m = Taxa de fluxo de massa (kg/s)
- $\frac{\Delta p}{L}$ = Queda de pressão no duto (Pa/m)
- ρ = Densidade do CO_2 (kg/m^3)

O fator de atrito de Fanning (f) é utilizado em cálculos de escoamento (TAGOMORI *et al*., 2018) e vale 0,003751 para o transporte do CO_2 puro (KNOOPE *et al.,* 2013; MERSCHMANN *et al.*, 2016). O estudo de KNOOPE *et al.* (2013) também mostrou que a queda de pressão dentro do duto deveria ser de 20 Pa/m[22], que será o valor utilizado neste estudo também. O fluxo de massa (m) foi considerado por MERSCHMANN *et al*.

[22] Esse valor também foi considerado nos estudos de MERSCHMANN *et al.* (2016); TAGOMORI *et al.* (2018) e SILVA *et al.* (2018), já que as premissas iniciais destes estudos são bastante parecidas, servindo como base para o presente estudo.

(2016) como sendo a oferta máxima de CO_2 para a colheita de cana na safra anual. Como foi dito no item anterior, a produção mensal máxima ocorre em agosto, onde são produzidas 15% da produção anual e os dutos devem ser dimensionados para atender a este escoamento máximo anual, supondo que as destilarias trabalham 24 horas por dia durante o período da colheita (MERSCHMANN *et al*., 2016). A

Tabela **4** apresenta um resumo dos valores dos parâmetros que devem ser utilizados no cálculo do diâmetro dos dutos, na Equação 5. Esses valores são aplicáveis para um fluxo de CO_2 puro, como o considerado neste estudo.

Tabela 4: Parâmetros usados no cálculo do diâmetro dos dutos

Parâmetro	**Valor**	**Unidade**
f	$3{,}75 \times 10^{-3}$	-
ΔP/L	20	Pa/m
ρ*	800	kg/m³
*Considerando a densidade média do CO_2 em uma pressão entre 8 and 11 MPa		

Fonte: Adaptado de MERSCHMANN *et al.* (2016), TAGOMORI *et al.* (2018) e SILVA *et al.* (2018)

O diâmetro calculado pela Equação 5 representa o diâmetro teórico, ou diâmetro mínimo necessário para transportar o fluxo de CO_2 determinado para cada seção (TAGOMORI *et al.*, 2018), que foi denominado neste estudo como diâmetro interno. As dimensões que devem ser consideradas na Equação 6, podem ser vistas na Figura 16 a seguir:

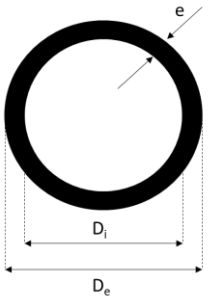

Figura 16: Parâmetros considerados em um corte transversal de um duto de seção circular.
Fonte: Adaptado de INMETRO (2004)

Para que o cálculo da massa de aço carbono necessária para a construção dos dutos seja feito posteriormente, é necessário saber o diâmetro externo e a espessura dos dutos, mostrados na Figura 16. A Equação 5 foi utilizada para calcular o diâmetro interno de cada duto, portanto, deve-se somar a estes resultados a espessura dos dutos e chegar ao valor do diâmetro externo (D_e) dos mesmos, necessário na Equação 6, que calcula a espessura[23] dos dutos.

De acordo com duas das principais normas que ditam sobre rede de dutos para transmissão e distribuição de gás combustível[24], a norma brasileira ABNT NBR 12.712 ("Projeto de sistemas de transmissão e distribuição de gás combustível") e a americana ASME B31.8 ("*Gas Transmission and Distribution Ðiping Systems*"), a espessura de dutos deste tipo pode ser calculada pela Equação 6 a seguir. De acordo com a norma brasileira anteriormente citada, a mesma dispõe dos requisitos essenciais de projeto e padrões mínimos de segurança, não sendo exatamente um manual de projeto (ABNT NBR 12.712, 2002) e também não é especificamente para dutos de CO_2, mas no presente estudo, optou-se por utilizar esta fonte para o cálculo da espessura desta rede de dutos, visto que o cálculo deste parâmetro não é encontrado facilmente na literatura. A Equação 6 calcula a espessura necessária das parede dos dutos para que os mesmos sejam capazes de resistir à pressão interna de escoamento (ABNT NBR 12.712, 2002 e ASME B31.8, 2004).

$$e = \frac{P \times D_e}{2 \times S_y \times F \times E \times T} \qquad (6)$$

- e = Espessura requerida de parede do duto (mm)
- P = Pressão do projeto (kPa)
- D_e = Diâmetro externo (mm)
- S_y = Tensão mínima de escoamento especificada para o material (kPa)
- F = Fator de projeto (adimensional)
- E = Fator de eficiência de junta (adimensional)
- T = Fator de temperatura (adimensional)

[23] Esta etapa foi incluída no presente estudo, não havia sido considerada em SILVA *et al.* (2018).

[24] Esta norma não é especificamente sobre o CO_2, mas engloba outros gases combustíveis, como o gás natural. De acordo com IEAGHG (2014) não existe muita diferença no ponto de vista técnico no transporte de dutos de gás natural e CO_2.

O cálculo da espessura dos dutos utilizando-se a Equação 6 apresenta uma grande limitação, visto que na Equação 5, anteriormente apresentada, foi calculado apenas o diâmetro interno necessário para o escoamento da vazão de CO_2 de cada destilaria e na equação 6 é necessário o diâmetro externo dos dutos, que, como mostra a Figura 16, é a soma do diâmetro interno já calculado, com a espessura. Sendo assim, para calcular a espessura dos dutos deste projeto, é necessário arbitrar um valor para a espessura a ser adicionada ao diâmetro interno e assim, obter o diâmetro externo necessário para o cálculo da espessura do duto que seja resistente à pressão do projeto. A pressão do projeto considerada neste cálculo foi a pressão máxima do escoamento já mencionada anteriormente, de 11 MPa.

Ainda para calcular a espessura pela Equação 6, os demais parâmetros serão escolhidos de acordo com a norma da ABNT NBR 12.712 (2002). A tensão mínima de escoamento especificada (S_y) é a tensão de escoamento mínima prescrita pela especificação do fabricante, obtida em ensaios padronizados. A norma dispõe uma tabela com diversos modelos de tubos e respectivos valores para S_y. Para isso, deve-se especificar o modelo de duto que deseja utilizar, mas de acordo com a norma, quando o tubo tem especificação desconhecida, o valor de S_y deve ser no máximo 165 MPa e esse será o valor utilizado para o cálculo na Equação 6 neste estudo.

Já o parâmetro F é um coeficiente que traduz o grau de segurança estrutural que o gasoduto deve ter para suportar possíveis danos externos e é uma função do que a norma chama de classe de locação, definida como um critério para classificar uma área geográfica de acordo com a densidade populacional aproximada, de acordo com a quantidade de construções para ocupação humana nesta área, traduzindo o grau que essa atividade humana é capaz de expor a danos o sistema de dutos (NBR 12.712, 2002). De acordo com a norma, os valores de F variam em 4 classes de locação, com valores de 0,40 a 0,72. O valor que será utilizado para o parâmetro F neste estudo será 0,6 para todos os dutos, correspondente a uma classe de locação 2, que de acordo com a NBR 12.712 (2002), corresponde a uma região onde existam de 10 a 46 edificações unifamiliares de ocupação humana dentro da unidade de classe de locação[25]. Esse valor foi escolhido neste estudo por considerar que grande parte do sistema de dutos (que estão mais próximos das destilarias do Centro-Sul) está localizado em áreas de baixa densidade populacional. Mas

[25] De acordo com a NBR 12.712 (2002), uma unidade de classe de locação é uma área que se estende por 200 m de cada lado da linha de centro do gasoduto em um trecho de 1600 m.

em um projeto real, essa análise deve ser mais detalhada para cada trecho de duto, considerando a ocupação do uso do solo na faixa de passagem dos mesmos. Como o valor de escolha deste fator foi uma escolha única para todo o sistema e a escolha de uma outra classe poderia interferir nos resultados, essa é uma outra limitação do estudo.

O parâmetro E da Equação 6 deve ser considerado unitário para todos os tubos cujas normas de fabricação são aceitas pela NBR 12.712 (2002) e será o valor considerado neste estudo, visto que as grandes empresas de dutos seguem os padrões estabelecidos pela ABNT. O fator da temperatura (T) também é unitário para temperaturas de projeto até 120 ºC, o que é o caso deste estudo.

Os maiores diâmetros internos calculados pela Equação 5 para as vazões das destilarias do presente estudo foram de 300 mm para os dutos entre as destilaras e o Hub e de 900 mm para os dutos entre Hubs e Hub-Bacia de Campos, que são dutos de grande capacidade de transporte de CO_2.

Para calcular a espessura, como era necessário arbitrar um valor de espessura para se obter o diâmetro externo e então poder calcular a espessura requerida nos dutos deste projeto pela Equação 6, foram feitas duas análises de como o diâmetro externo poderia ser arbitrado e verificou-se se os resultados dessas duas análises eram próximos ou não. Na primeira análise, para arbitrar um valor de espessura e obter o diâmetro externo dos dutos, optou-se por utilizar a espessura de dutos de CO_2 de projetos já existentes, apresentados em IEAGHG (2014). Esta publicação mostrou que a espessura de dutos de baixa capacidade varia de 5,2 a 9,5 mm; de 10 a 13 mm em dutos de média capacidade e de 19 a 27 mm em dutos de alta capacidade (IEAGHG, 2014). Sendo assim, optou-se por utilizar os valores de espessura para o cálculo do diâmetro externo de 5,2 mm para os dutos entre destilarias e Hubs (considerando que esses dutos poderiam ser classificados como sendo de baixa capacidade e este valor é o menor valor de espessura para dutos desse tipo de acordo com o estudo analisado) e de 19 mm para os dutos de maior capacidade, que conectam os Hubs entre si ou o Hub a Bacia de Campos (já que este valor é o menor valor de espessura de dutos desse tipo de acordo com a publicação analisada). Optou-se por não utilizar os valores de espessura dos projetos da publicação IEAGHG (2014) como já sendo a espessura considerada nos dutos do presente estudo, por verificar que a espessura do duto depende de vários parâmetros apresentados na Equação 6, como a pressão do projeto e a temperatura do fluido e estes podem ser bem diferentes dos parâmetros do presente estudo, sendo mais cauteloso apenas arbitrar o valor da espessura

para se obter o diâmetro externo necessário, mas calcular uma nova espessura considerando os parâmetros do projeto do presente estudo. Sendo assim, pela primeira análise, os diâmetros externos obtidos para o cálculo da espessura na Equação 6 foram 310,4 mm e 938,0 mm para os dois tipos de dutos considerados.

Considerando todos esses fatores já descritos na Equação 6, chegou-se a uma espessura recomendada de 17,2 mm para os dutos das destilarias aos Hubs e de 52,1 mm para os dutos entre Hubs e do Hub à Bacia de Campos, considerando a primeira análise de cálculo da espessura.

Para conferir se esses resultados de espessura não foram muito influenciados pelo valor arbitrado inicialmente para a espessura no cálculo do diâmetro externo, optou-se por fazer uma segunda análise, onde a Equação 6 seria replicada duas vezes. Inicialmente nesta segunda análise da espessura, foi considerado que o diâmetro externo era igual ao diâmetro interno que foi calculado pela Equação 5 (ou seja, não foi arbitrado nenhum valor de espessura previamente, utilizando como valores de diâmetro externos os maiores valores de diâmetro interno calculados de 300 mm e 900 mm) e todos os demais fatores mantiveram os mesmos valores descritos anteriormente. Com isso, foi obtido o resultado de espessura de 16,6 mm para os dutos entre destilarias e Hubs e 50 mm no caso dos dutos entre Hubs ou entre Hub e Bacia de Campos. Após esses dois resultados, foi feito um novo cálculo da Equação 6, considerando esses valores de espessura no cálculo de um novo diâmetro externo (resultando em diâmetros externos de 333,33 mm e 1000 mm para os dois tipos de dutos considerados) e chegou-se a um novo resultado de espessura de 18,51 mm para o caso dos dutos entre as destilarias e o Hub e de 55,6 mm entre os Hubs e entre o Hub e a Bacia de Campos.

Com o resultado dessa segunda análise do cálculo da espessura pela Equação 6, pôde-se perceber que o resultado de espessura obtido pela primeira análise, de 17,2 mm para o caso dos dutos entre destilarias e Hub e de 52,1 mm para os dutos de maior capacidade de transporte são próximos do valor médio obtido entre os dois valores da segunda análise, onde primeiro foi considerada que a espessura era nula e depois considerando esse primeiro resultado em uma nova aplicação da Equação 6. Sendo assim, os valores arbitrados de espessuras de projetos existentes na primeira análise do cálculo da espessura da Equação 6 neste estudo parecem uma boa escolha para este cálculo, dada a necessidade de uma espessura para calcular o diâmetro externo nesta equação. Sendo assim, os valores de espessura que serão utilizados no presente estudo para o cálculo de aço carbono

necessário para construir os dutos do projeto proposto são os valores obtidos na primeira análise desenvolvida, de 17,2 mm para os dutos entre destilarias e Hub e de 52,1 mm para os dutos entre Hubs e entre o Hub e a Bacia de Campos. Contudo, esses valores considerados são maiores que os valores de espessura apresentados na publicação IEAGHG (2014) para dutos de baixa e alta capacidade, o que pode acrescentar uma penalidade no cálculo de emissão de GEE na fabricação dos dutos do presente estudo.

A norma brasileira também recomenda que caso exista uma possibilidade de ação corrosiva do gás, deve-se prever um valor adicional de espessura (sobre espessura para corrosão), para compensar a perda de material que poderá ocorrer durante toda a vida útil do gasoduto e essa sobre espessura deve ser somada ao valor calculado pela equação 6. Contudo, como a norma não mostrava como poderia ser feito este cálculo, como não foram encontrados valores de referência na literatura sobre esse valor adicional da espessura para possíveis corrosões em projetos de dutos de CO_2 e como os valores de espessura dos dutos obtidos pela Equação 6 são maiores que os valores de espessura encontrados em projetos desse tipo, optou-se no presente estudo de não adicionar mais um valor arbitrário no cálculo da espessura para a sobre espessura para corrosão.

O comprimento de cada trecho de duto foi retirado do trabalho de SILVA *et al*. (2018), que apresentaram três configurações de rede de transporte para transportar o CO_2 das destilarias do Centro-Sul para a Bacia de Campos, considerando as opções que seriam ótimas do ponto de vista econômico. A rede de dutos foi desenhada no ArcMap 10.0, através da seleção dos caminhos que levavam a um menor custo para a construção dos dutos. Para que isto fosse possível, os autores dividiram o mapa da região em diversas células e atribuíram fatores para cada uma delas, de acordo com o uso do solo (como presença de áreas protegidas ou áreas indígenas), a presença ou não de rodovias e ferrovias, corpos hídricos, outros dutos e declividade do terreno. Essas características puderam ser observadas de acordo com mapas disponibilizados por órgãos como IBGE, ANEEL, MMA e EMBRAPA. Esses fatores funcionaram como "pesos", já que a presença das características citadas aumentaria o custo de construção do duto desejado e pretendia-se percorrer a trajetória que levaria ao menor custo. Considerando esses fatores, um mapa com essas informações em cada célula foi gerado. Além disso, foram utilizadas as ferramentas *Cost Distance*, *Cost Backlink* e *Cost Path* do ArcMap 10.1, para que o caminho de menor custo entre as destilarias e a Bacia de Campos fosse atingido. Para

melhor entendimento da metodologia da classificação do uso do solo e desenvolvimento das trajetórias dos dutos, recomenda-se o trabalho de SILVA *et al*. (2018).

Uma limitação apresentada por MERSCHMANN *et al.* (2016) durante a elaboração da rede de dutos em seu estud foi que em sua análise, o software utilizado (ArcMap) propunha a construção de dutos individuais para cada destilaria mesmo que passassem pela mesma localidade, não agrupando diversos escoamentos próximos em um único duto para que eles fossem em conjunto como um único escoamento para o campo de petróleo. O *software* apenas consegue construir o caminho de menor custo entre cada destilaria e o campo de petróleo (MERSCHMANN *et al*., 2016). Para que não fossem construídos dutos unitários entre cada destilaria e a Bacia de Campos, o grupo de autores conseguiu implementar um Hub em sua análise, para que o escoamento de todas as destilarias fosse até este ponto e a partir daí, fossem encaminhadas em um único duto até a Bacia de Campos.

No presente estudo, foi utilizado o ArcMap 10.5 com o resultado da rede de transportes apresentado por SILVA *et al*. (2018), verificando as destilarias correspondentes a cada localização e medindo o comprimento de cada trecho de duto de cada destilaria até o Hub correspondente e posteriormente, o comprimento dos dutos entre os Hubs (no caso de múltiplos Hub) e do Hub até a Bacia de Campos. Usando-se o software Microsoft Excel, contabilizou-se todos esses resultados, anotando cada destilaria a montante de cada trecho de duto, para que depois cada trecho pudesse ter seu diâmetro calculado, que é uma função da vazão de CO_2 do escoamento (que já havia sido calculada a produção de cada destilaria anteriormente).

Como essa medição do comprimento e vazão de cada trecho de duto foi feita uma a uma manualmente utilizando o software em questão, foi possível analisar cada trecho que estava exatamente coincidente e que poderia ser compartilhado com alguma outra destilaria que tinha um duto sobreposto a este, pois as configurações de transporte desenvolvidas em SILVA *et al*. (2018) e que foram utilizadas para este estudo consideravam dutos individuais da destilaria ao Hub, não conseguindo interpretar que diversos dutos estão passando no mesmo local e que poderiam ser um único duto.

Mesmo a rede de dutos de SILVA *et al*. (2018) não possuindo dutos compartilhados, o presente estudo optou por medir o comprimento dos dutos de duas maneiras: a primeira é considerando na íntegra o resultado de SILVA *et al.* (2018) com dutos transportando o

escoamento de cada destilaria ao Hub individualmente e a outra maneira foi considerando os dutos exatamente coincidentes como sendo um duto único compartilhado pelas destilarias a montante, de acordo com a análise desenvolvida no presente estudo. Isso resultou em um grande esforço extra, já que foi feito visualmente e manualmente em cima do trabalho de SILVA *et al*. (2018) e acabou aumentando muito o número de trechos de dutos a serem considerados, tendo-se que prestar atenção em todas as destilarias que compartilhavam aquele trecho para que o diâmetro pudesse ser calculado corretamente. Optou-se por também considerar esta opção já que é a mais próxima da realidade caso o projeto seja construído, por demandar uma quantidade bem menor de material para sua construção.

A limitação desta análise do compartilhamento dos dutos é que mesmo verificando os trechos com o maior rigor possível, podem ocorrer erros, como o caso de quando se tem diversos dutos que são coincidentes e alguns não coincidentes, mas que são próximos e se torna mais complicado verificar visualmente quais dutos são realmente coincidentes e que vazão transportam. Além disso, o compartilhamento dos dutos em um projeto real seria maior do que o aqui apresentado, já que dutos próximos não foram considerados como compartilhados neste estudo por fugir do escopo deste estudo analisar espacialmente a região, mas em um projeto real o compartilhamento entre os dutos de SILVA *et al*. (2018) poderia ser bem maior do que o apresentado aqui, onde só foram considerados como compartilhados os exatamente coincidentes espacialmente.

Com todas essas características dos dutos já analisada, o próximo passo é o cálculo de material necessário para a fabricação dos dutos em cada um dos três casos considerados. Como já foi dito anteriormente, os dutos que transportam CO_2 são geralmente feitos de aço carbono. Sendo assim, a Equação 7 calcula a massa teórica (em kg/m) necessária na construção de cada duto de seção circular de aço carbono (INMETRO, 2004).

$$M_i = 0{,}0246615 \times e \times (De - e) \qquad (7)$$

- M_i = Massa teórica do duto de aço carbono da destilaria i (kg/m)
- e = Espessura do duto (mm)
- D_e = Diâmetro externo do duto (mm)

Existem basicamente duas rotas tecnológicas para produção de aço fabricado no Brasil, com algumas possíveis variações e combinações: produção de aço usando majoritariamente minério de ferro e uma pequena proporção de sucata metálica (usinas integradas) e produção de aço que utiliza basicamente a sucata (usinas semi-integradas), que hoje representa 30% de todo aço produzido no país (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2016). Em 2015, foram emitidos 1,8 tCO_2 para cada tonelada de aço bruto fabricada no Brasil (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2016). Esse fator é uma média de todos os processos produtivos de produção do aço, mas não considera a produção dos dutos. Por falta de mais informações disponíveis sobre a fabricação dos dutos brasileiros, optou-se por considerar os fatores de emissão para a produção de um duto de aço cromado disponível no banco de dados da EcoInvent (2017), que inclui todas as emissões acumuladas desde os primeiros estágios de sua fabricação até esta etapa. O fator de emissão para 1 kg de duto constituído de aço, de acordo com a EcoInvent (2017), é de 5,2 kg de CO_2e. Esse será o valor considerado no cálculo da emissão pela fabricação de todos os dutos deste estudo, pois mesmo não representando a realidade brasileira nem sendo especificamente de aço carbono, é um valor mais conservador do que considerar apenas as emissões pela fabricação do aço[26] e não do duto. Para se chegar à emissão para a fabricação de cada duto deste projeto (incluindo o duto entre o Hub e a Bacia de Campos), foi utilizada a Equação 8 a seguir:

$$E_{duto,j} = M_j \times L_j \times FE_{duto} \qquad (8)$$

- $E_{duto,j}$ = Emissão da fabricação do duto j (tCO_2e)
- M_j = Massa teórica do duto j (t duto / km)
- L_j = Comprimento do duto j (km)
- FE_{duto} = Fator de emissão de fabricação do duto (tCO_2e / t duto)

[26] O fator de emissão da fabricação do aço brasileiro dado pelo Instituto Aço Brasil (1,8 tCO_2 / tonelada de aço bruto) não será usado no cálculo da emissão pela fabricação dos dutos, mas será utilizado no cálculo da emissão de GEE pela fabricação dos tanques de armazenamento de CO_2 liquefeito que serão considerados no Caso 2 deste estudo, que também são compostos de aço carbono.

Tabela 5: Quadro resumo dos parâmetros utilizados no cálculo da fabricação dos dutos

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade	Fonte
$\mathbf{E_{duto,j}}$	Emissão da fabricação do duto j	Calculado	tCO_2e	-
$\mathbf{M_j}$	Massa teórica do duto j	Calculado	t duto / km	-
$\mathbf{L_j}$	Comprimento do duto j	Calculado	km	Baseado em SILVA *et al*. (2018)
$\mathbf{FE_{duto}}$	Fator de emissão de fabricação do duto	5,2	tCO_2e / t duto	EcoInvent (2017)

A Equação 8, por ser referente à fabricação dos dutos, ocorre apenas uma vez ao longo de todo o ciclo de vida do projeto.

Em dutos de grande extensão, as estações de recompressão se fazem necessárias para que a perda de pressão do escoamento seja compensada (MERSCHMANN *et al*., 2016) e conforme a metodologia aplicada em MERSCHMANN *et al.* (2016) e SILVA *et al.* (2018), é necessário instalar uma estação de compressão a cada 150 km de duto *onshore*, que são os únicos dutos considerados neste estudo.

O número de estações de recompressão necessárias para cada seção dos dutos (n_c) é calculada pela Equação 9 a seguir, conforme a metodologia aplicada em SILVA *et al*. (2018), sendo um número inteiro resultante desta equação.

$$n_c = INT\left(\frac{L}{150}\right) + 1 \qquad (9)$$

- n_c = Número de estações de recompressão
- L = Comprimento da seção do duto (km)

Para calcular o consumo de energia das estações de recompressão, a Equação 10 a seguir pode ser utilizada (MERSCHMANN *et al*., 2016; SILVA *et al*., 2018). Este cálculo deve ser feito para cada estação de recompressão calculada na equação 9.

$$W_{recompressor} = \frac{1}{\rho} \times \frac{(P_{out} - P_{in})}{n_{compressor}} \times \frac{10^3}{3{,}6} \qquad (10)$$

- $W_{recompressor}$ = Consumo de energia nas estações de recompressão (kWh/tCO_2)
- ρ = Densidade do CO_2 (kg/m^3)
- P_{out} = Pressão de saída da estação de recompressão (MPa)
- P_{in} = Pressão de entrada da estação de recompressão (MPa)
- $n_{compressor}$ = Eficiência da estação de recompressão

Os valores considerados para as pressões necessárias nos dutos utilizados em MERSCHMANN *et al*. (2016) e SILVA *et al.* (2018) de acordo com a metodologia aplicada por esses estudos é de que pressão mínima deve ser de 8 MPa, a máxima de 11 MPa[27] (pois a queda máxima de pressão não pode ultrapassar 3 MPa) e a densidade do CO_2 deve corresponder ao valor referente a essa variação de pressão (ρ = 800 kg/m^3 foi o valor utilizado em ambos os estudos). Também foi considerado que a eficiência das estações de recompressão é de 75% nesses dois estudos citados. Esses valores estão presentes na Tabela 6.

Considerando todos esses valores na Equação 10, MERSCHMANN *et al.* (2016) e SILVA *et al.* (2018) chegaram ao valor de 1,39 kWh/tCO_2 para o consumo de energia nas estações de recompressão dos dutos *onshore*. Esse foi o fator utilizado no cálculo do consumo de eletricidade por cada estação de recompressão necessária ao longo dos dutos. Sendo assim, a emissão de GEE de cada estação de recompressão pode ser calculada pela Equação 11 a seguir:

$$E_{recompressor} = Q_r \times \frac{W_{recompressor}}{1000} \times FE_{eletricidade} \quad (11)$$

- $E_{recompressor}$ = Emissão anual de GEE pelo consumo de cada estação de recompressão (tCO_2e)
- Q_r = Vazão de CO_2 que passa pela estação de recompressão (tCO_2/ano)
- $W_{recompressor}$ = Consumo de eletricidade pela estação de recompressão (KWh/tCO_2)
- $FE_{eletricidade}$= Fator de emissão da eletricidade (tCO_2e/MWh)

[27] MERSCHMANN *et al.* (2016) e SILVA *et al. (*2018) também consideraram como 11 MPa a pressão após a saída das estações de recompressão.

Tabela 6: Quadro resumo dos parâmetros utilizados no cálculo da emissão das estações de recompressão

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade	Fonte
$\mathbf{E_{recompressor}}$	Emissão do consumo de eletricidade da estação de recompressão	Calculado	tCO_2e	-
$\mathbf{Q_r}$	Vazão de CO_2 que passa pela estação de recompressão	Calculado	tCO_2 / ano	-
$\mathbf{W_{recompressor}}$	Consumo de eletricidade pela estação de recompressão	1,39	kWh/tCO_2	MERSCHMANN *et al.* (2016); SILVA *et al* (2018)
$\mathbf{FE_{eletricidade}}$	Fator de emissão da eletricidade	0,0817	tCO_2e / MWh	MCTI (2017)

A emissão calculada pela Equação 11 foi utilizada em cada trecho dos dutos e deve ser multiplicada pelo número de estações de recompressão necessárias em cada trecho (dependendo do seu comprimento) em cada um dos três estudos de caso considerados. Além disso, essa equação representa a emissão anual das estações de recompressão e para o cálculo da emissão total desta categoria no ciclo de vida do projeto, essa emissão deve ser multiplicada por 30, pois é constante para cada ano do ciclo de vida deste projeto.

As equações apresentadas neste item serão utilizadas para o cálculo do dimensionamento e fabricação dos dutos e para o consumo das estações de recompressão para todos os três casos que serão apresentados a seguir, de acordo com a configuração apresentada por cada um, já que mudam os comprimentos dos dutos e as vazões dos dutos compartilhados, o que influencia no diâmetro dos dutos e consequentemente, na quantidade de material necessária, na quantidade e consumo de energia das estações de recompressão e em todas essas emissões associadas.

4.3.3.2. Caso 1: Destilarias ligadas a um único Hub por dutos

O primeiro caso de transporte considerado é um dos resultados de SILVA *et al.* (2018). Para este caso, considerou-se que o transporte do CO_2 é feito por dutos no subsolo conectando todas as destilarias a um único *Hub* e posteriormente, este *Hub* até a Bacia de Campos. No presente estudo, foi considerada a localização do *Hub* obtida no estudo de

SILVA *et al.* (2018), que foi instalado usando o centro de gravidade de emissões de CO_2 das destilarias de etanol do Centro-Sul, através da Análise de Kernel do ArcMap. A localização do Hub (círculo maior) e das destilarias consideradas neste estudo pode ser vista na Figura 17 a seguir.

Figura 17: Destilarias do Centro-Sul e localização do Hub. Fonte: SILVA *et al.* (2018)

Neste estudo de caso, serão analisadas duas configurações para os dutos propostos por SILVA *et al.* (2018) entre as destilarias e o Hub. A primeira é a configuração padrão proposta em seu estudo, onde cada destilaria se conecta ao Hub por um duto individual, como é o resultado obtido na análise feita por esses autores utilizando o software ArcMap, cuja análise considerava o menor custo na ligação entre o ponto de partida e o de chegada do duto, mas não considera a possibilidade de conexão com outros dutos de destilarias próximas para reduzir ainda mais os custos. Sendo assim, visando minimizar um pouco esse problema, o presente estudo buscou analisar cada trecho de duto das 233 destilarias consideradas no resultado de SILVA *et al.* (2018) e verificar quais os trechos eram exatamente coincidentes e que poderiam ser considerados como um único duto compartilhado. Sendo assim, as destilarias que estavam à montante daquele trecho compartilhariam suas vazões neste duto, e posteriormente algum outro trecho mais

jusante também poderia receber a vazão de mais alguma(s) destilaria(s), até chegar ao Hub.

Para conseguir separar esses dados foi feita uma análise bem detalhada considerando mais de 350 trechos diferentes e suas respectivas vazões transportadas. Mas isso também gerou algumas limitações ao estudo, que é de não considerar que trechos de dutos próximo, mas não coincidentes não sejam considerados como compartilhados e da real possibilidade de desviar um pouco este duto para que ele pudesse ser compartilhado com o próximo, mas isto estava fora do escopo do presente estudo. Além disso, como o cálculo do comprimento de cada trecho de duto foi feita manualmente utilizando-se o *software* ArcMap, podem ocorrer erros ocasionais, mesmo tentando-se minimizá-los o máximo possível com diversas conferências. Os dutos entre as destilarias e o Hub propostos por SILVA *et al.* (2018) podem ser vistos na Figura 18 a seguir, onde é possível perceber que diversos dutos passam exatamente pelo mesmo local.

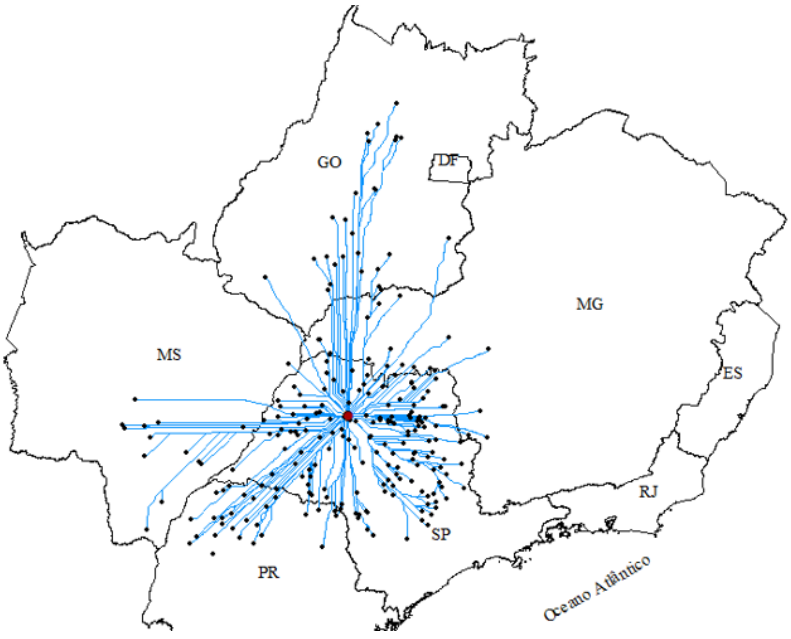

Figura 18: Dutos entre destilarias e o único Hub. Fonte: Baseado em SILVA *et al.* (2018)

As emissões da ACV para implementação deste projeto que serão consideradas neste estudo de caso são:

- Desidratação do CO_2 da fermentação de todas as destilarias

- Compressão do CO_2 dessas destilarias (da pressão atmosférica, que é a pressão onde o CO_2 da fermentação se encontra, até a pressão ótima para o transporte no duto)
- Fabricação dos dutos entre as destilarias e o Hub considerando a vazão de cada trecho e consequentemente, o diâmetro de cada trecho e a espessura calculada para estes dutos (para os casos de dutos compartilhados e individuais)
- Consumo energético das estações de recompressão nos dutos com comprimento maior que 150 km.

Para o caso dos dutos compartilhados, o cálculo da quantidade de estações de recompressão necessárias foi feito analisando os maiores comprimentos de trechos de dutos que necessitavam de estações de recompressão e verificava-se se estas estações cobriam a distância máxima de 150 km para todas as destilarias que estavam compartilhadas em suas trajetórias até o Hub. Se isso não acontecesse, somava-se a quantidade necessária de estações de recompressão para outras ramificações de dutos a montante do fluxo principal do duto compartilhado para as destilarias que estavam mais distantes do que 150 km desta última estação e precisariam recomprimir seus fluxos de CO_2 até chegar nesta estação que cobriria o fluxo principal.

A Figura 19 a seguir resume todos os consumos energéticos considerados neste estudo de caso e que serão considerados nos cálculos de cada destilaria de acordo com as equações apresentadas no item anterior.

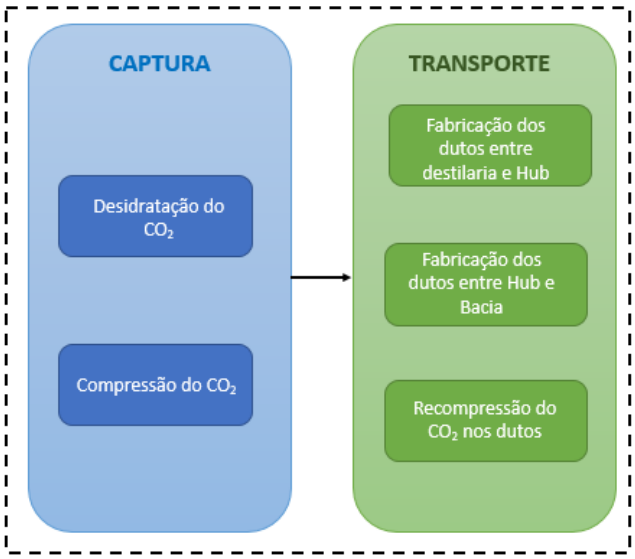

Figura 19: Fluxograma das emissões de GEE consideradas consideradas na Análise do Ciclo de Vida do Caso 1. Fonte: Elaboração própria

Para calcular a emissão de GEE associado ao transporte do CO_2 considerado neste estudo de caso, serão utilizadas as Equações 12 e 13 a seguir (a primeira equação representa a configuração para dutos compartilhados e a segunda, para os dutos individuais):

$$E_{i,transp\ 1,compartilhado} = E_{dutos\ dest\ i_Hub} + \sum(E_{dutos\ dest_Hub\ i,n} \times \frac{Q_i}{\sum Q_n}) + E_{recompressor\ i} + \sum E_{recompressor\ i,n} \times \frac{Q_i}{\sum Q_n}) + (E_{duto\ Hub_bacia} \times \frac{Q_i}{Q_{total}}) \quad (12)$$

$$E_{i,transp\ 1,individual} = E_{dutos\ dest\ i_Hub} + E_{recompressor\ i} + (E_{duto\ Hub_bacia} \times \frac{Q_i}{Q_{total}}) \quad (13)$$

- $E_{i,transp\ 1,\ compartilhado}$ = Emissão do transporte do caso 1 compartilhado para a destilaria i (tCO_2e/ano)
- $E_{dutos\ dest\ i_Hub}$ = Emissão pela fabricação do duto (ou trecho de duto, no caso compartilhado) que transporta apenas a vazão da destilaria i entre a destilaria e o Hub (tCO_2e)
- $E_{dutos\ dest_Hub\ i,n}$ = Emissão pela fabricação do trecho de duto que transporta a vazão da destilaria i compartilhado com n destilarias entre a destilaria e o Hub (tCO_2e)
- Q_i = Vazão de CO_2 da destilaria i (tCO_2/h)
- Q_n = Vazão de CO_2 das n destilarias que compartilham o trecho de duto (tCO_2/h)
- $E_{recompressor\ i}$ = Emissão do consumo de energia pelo recompressor de pressão do duto da destilaria i (tCO_2e)
- $E_{recompressor\ i,n}$ = Emissão do consumo de energia pelo recompressor de pressão do duto compartilhado pela destilaria i e outras n destilarias (tCO_2e)
- Q_{total} = Vazão de CO_2 total transportado (tCO_2/h)

Os resultados obtidos pelas equações citadas neste item podem ser vistos no Anexo 1 e Anexo 2 deste trabalho, para cada destilaria ou trecho de duto compartilhado por elas.

4.3.3.3. Caso 2: Destilarias ligadas a um único Hub por dutos e caminhões

Das 236 destilarias consideradas no estudo de SILVA *et al*. (2018), 72 mostravam vantagem econômica de se conectar ao Hub utilizando caminhões e não dutos, por serem destilarias de menor escala e mais distantes do Hub. Neste estudo, o custo de abatimento para essa opção de transporte ficou 7% mais barato que a opção de todas as destilarias serem ligadas apenas por dutos a um único Hub (mas mais cara que a outra opção). Essas pequenas destilarias também podem não ter capital para investir na construção de dutos ou pessoal para lidar com as questões burocráticas como licenças e direitos de passagem, enquanto o transporte rodoviário é mais comum e de simples operação (SILVA *et al*., 2018). A mesma estimativa para trabalhar com a sazonalidade da produção do etanol foi feita neste caso, estimando a quantidade de CO_2 máxima necessária para ser transportada por caminhões como sendo 15% do etanol produzido no ano por essas destilarias selecionadas no estudo de SILVA *et al.* (2018).

Como toda a metodologia para os cálculos dos dutos já foi apresentada, a seguir será apresentada a metodologia para calcular as emissões referentes ao transporte rodoviário, mas este estudo de caso utilizará ambas metodologias.

- **Dimensionamento para o transporte rodoviário**

Como foi dito anteriormente, três destilarias consideradas em SILVA *et al.* (2018) não foram consideradas neste estudo, sendo que duas delas estavam presentes na lista das 72 destilarias que mostraram que era mais viável economicamente o transporte por caminhões. Sendo assim, o presente estudo considera apenas 70 destilarias transportando o CO_2 por caminhões ao Hub, enquanto as outras 163 destilarias aqui consideradas fazem esse transporte por dutos.

Outra consideração para esse estudo é que este é o único caso que não foi feita também uma análise considerando a configuração de compartilhamento de dutos pelas destilarias. Com cerca de um terço das destilarias sendo consideradas como utilizando o modal rodoviário para transportar o CO_2, a diferença entre o caso compartilhado e individual dentre as demais destilarias que fazem o transporte por dutos não seria tão relevante, com

um número menor de destilarias utilizando esse transporte (em consideração aos outros dois casos) e com várias destilarias que compartilhavam dutos com as mesmas não podendo compartilhar. Sendo assim, para o caso intermodal foi considerado que todas as destilarias que utilizam o transporte dutoviário, possuem dutos individuais conectando cada destilaria ao Hub, conforme apresentado no resultado de SILVA *et al.* (2018).
Como o transporte rodoviário utiliza a infraestrutura já existente[28] de estradas e rodovias, não serão consideradas emissões referentes à fabricação das mesmas, assumindo-se que as estradas já existentes são suficientes para o transporte do CO_2 até o Hub.

Para o transporte rodoviário, o CO_2 deve estar em seu estado liquefeito, para poder ser transportado por caminhões da destilaria até o Hub mais próximo, como mostrou a literatura estudada. As considerações do presente estudo para a liquefação foram um pouco diferentes do que as consideradas em SILVA *et al*. (2018), visto que o estudo citado considerou uma simulação da liquefação no software Hysys e depois o resultado foi validado por duas equações presentes na literatura especializada, apresentadas no estudo de McCOLLUN e OGDEN (2006). O presente estudo optou-se por usar apenas essas equações validadoras do resultado de SILVA *et al*. (2018) nesta etapa de cálculo, por apresentarem os parâmetros necessários para o cálculo do consumo energético que são necessários neste estudo e como as mesmas foram validadoras do resultado de SILVA *et al.* (2018), não devem divergir muito do resultado obtido por sua simulação.
O processo de liquefação de SILVA *et al.* (2018) pode ser dividido em três grandes partes: o cálculo da compressão do CO_2 até a pressão ideal para o transporte no caminhão (onde a Equação 14 de McCOLLUN e OGDEN (2006) pode ser utilizada); a liquefação utilizando a amônia como fluido refrigerante para o CO_2 pode ser transportado por caminhões e a compressão do CO_2 até a pressão necessária para transporte no duto (após o CO_2 transportado por caminhão chegar ao Hub), onde a Equação 17 de MC COLLUN e OGDEN (2006) também pode ser utilizada. A única etapa que se distancia mais dos resultados de SILVA *et al.* (2018) é a etapa do consumo da liquefação do CO_2, onde este consumo foi estimado por um fator obtido na literatura.

[28] Em SILVA *et al*. (2018) também não foi considerado o custo associado à fabricação de novas rodovias, pelo mesmo princípio.

De acordo com a metodologia[29] de MC COLLUM e OGDEN (2006), o cálculo do trabalho realizado pelos compressores de CO_2, pode ser feito utilizando a Equação 14 apresentada a seguir. Considerando a simulação desenvolvida por SILVA *et al*. (2018), a compressão deve ser feita em 4 estágios, utilizando a Equação 14 para cada um desses estágios para se obter o consumo energético de cada estágio, de acordo com os parâmetros presentes na Tabela 7. O consumo energético de cada estágio de compressão pode ser calculado pela Equação 14 a seguir (MC COLLUM e OGDEN, 2006).

$$W_{s,i} = \left(\frac{1000}{24*3600}\right) * \left(\frac{m_d * Z_s * R * T_{in}}{M * \eta_{is}}\right) * \left(\frac{k_s}{k_s - 1}\right) * \left[(CR)^{\frac{k_s-1}{k_s}} - 1\right] \qquad (14)$$

- $W_{S,i}$ = Potência de compressão necessária no estágio i (KW)
- m_d = Fluxo de massa diário de CO_2 (tCO_2/dia)
- Zs= Média do fator de compressibilidade
- R = Constante universal dos gases ($kJ.mol^{-1}.K^{-1}$)
- T_{in} = Temperatura de entrada do compressor (K)
- M= Massa molar do CO_2 (kg/kmol)
- η_{is} = Eficiência do compressor isentrópico
- k_s = Taxa média de calor específico a pressão e volume constante de CO_2 em cada estágio
- CR = Taxa de compressão

[29] Metodologia proposta pelos autores que desenvolveram as equações que foram utilizadas por SILVA et al (2018) para validar os resultados obtidos pela simulação desenvolvida no HYSYS e que serão aplicadas (e adaptadas quando necessário) para o cálculo da liquefação no presente estudo.

Tabela 7: Parâmetros utilizados para cálculo do consumo energético do compressor para liquefação

Parâmetro		Valor	Unidade	Fonte
$W_{S,i}$	Potência de compressão necessária no estágio i	Calculado para cada destilaria	kW	Calculado
m_d	Fluxo de massa a ser transportado por dia	Variável para cada destilaria	tCO_2/dia	Calculado
Zs	Média do fator de compressibilidade	Variável em cada estágio	-	Calculado baseado em PEACE SOFTWARE (2017)
R	Constante universal dos gases	8,314	kJ / kmol.K	MC COLLUN and OGDEN (2006)
T_{in}	Temperatura de entrada do compressor	313,15	K	MC COLLUN and OGDEN (2006) e SILVA *et al*. (2018)
M	Massa molar do CO_2	44,01	Kg/kmol	MC COLLUN and OGDEN (2006)
η_{is}	Eficiência do compressor isentrópico	0,75	-	MC COLLUN and OGDEN (2006) e SILVA *et al.* (2018)
k_s	Taxa média dos calores específicos do CO_2 em cada estágio	Variável em cada estágio	-	Calculado baseado em PEACE SOFTWARE (2017)
CR	Taxa de compressão	2,1	-	SILVA *et al.* (2018)

O cálculo para o consumo energético do compressor, dado pela equação 14 foi feito quatro vezes para cada destilaria, uma vez para cada estágio. As pressões intermediárias dos estágios foram consideradas como as apresentadas no estudo de SILVA *et al.* (2018) e serão apresentadas na Tabela 8 a seguir.

A pressão de entrada no compressor é de 0,1 MPa, já que o CO_2 da fermentação está à pressão atmosférica e ele será comprimido até a pressão de 2 MPa, pois de acordo com o fornecedor escolhido para o transporte de caminhão do CO_2 liquefeito, a pressão máxima de operação para o transporte do CO_2 é de 24,6 bar (NITROTEC, 2017a e SILVA *et al.*, 2018), ou 2,46 MPa.

Tabela 8: Parâmetros utilizados para o cálculo da compressão para liquefação do CO_2 variáveis em cada estágio

Estágio	Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
1	Pi	0,1	MPa	SILVA et al (2018)
	Pf	0,21	MPa	SILVA et al (2018)
	Zs	0,993	-	PEACE SOFTWARE (2017)
	Ks	1,29	-	PEACE SOFTWARE (2017)
	CR	2,1	-	SILVA et al (2018)
2	Pi	0,21	MPa	SILVA et al (2018)
	Pf	0,45	MPa	SILVA et al (2018)
	Zs	0,986	-	PEACE SOFTWARE (2017)
	Ks	1,29	-	PEACE SOFTWARE (2017)
	CR	2,1	-	SILVA et al (2018)
3	Pi	0,45	MPa	SILVA et al (2018)
	Pf	0,96	MPa	SILVA et al (2018)
	Zs	0,97	-	PEACE SOFTWARE (2017)
	Ks	1,319	-	PEACE SOFTWARE (2017)
	CR	2,1	-	SILVA et al (2018)
4	Pi	0,96	MPa	SILVA et al (2018)
	Pf	2,05	MPa	SILVA et al (2018)
	Zs	0,933	-	PEACE SOFTWARE (2017)
	Ks	1,371	-	PEACE SOFTWARE (2017)
	CR	2,1	-	SILVA et al (2018)

Fonte: Elaboração própria baseado em SILVA *et al*. (2018) e Peace Software (2017)

O parâmetro K_s pode ser calculado pela Equação 15 (MC COLLUM and OGDEN, 2006). Este parâmetro representa a taxa média dos calores específicos do CO_2 em cada estágio. Para calcular o valor de K_s para cada estágio, utilizou-se a média dos valores de C_p (Calor específico a pressão constante) e C_v (Calor específico a volume constante), de acordo com a pressão inicial e final de cada estágio, apresentadas na Tabela 8.

$$K_s = \frac{C_p}{C_v} \qquad (15)$$

Para que se chegasse ao consumo total dos 4 estágios, adaptou-se uma outra equação proposta por MC COLLUM and OGDEN (2006) (Equação 16), já o estudo desses autores considerou a compressão em cinco estágios e o presente estudo se baseia nas considerações apresentadas em SILVA *et al.* (2018), que elaborou sua análise com a compressão do CO_2 com um estágio a menos.

$$W_{S\,total} = W_{S1} + W_{S2} + W_{S3} + W_{S4} \qquad (16)$$

Essa equação com a potência total necessária para o trabalho do compressor apresenta o resultado em kW e para que seja obtido o resultado em kWh, deve-se multiplicar os valores obtidos para o consumo de cada destilaria por 24 horas e 365 dias, obtendo-se o consumo de eletricidade para cada compressor em kWh em um ano.

Após a compressão do gás para a liquefação, SILVA *et al*. (2018) simulou o processo de liquefação com uma refrigeração externa da amônia como fluido refrigerante. A refrigeração é considerada externa quando o fluido refrigerante (amônia) não se mistura com o gás principal (Øi *et al*., 2016), que neste caso, é o CO_2. A escolha da amônia em SILVA *et al.* (2018) se deu porque em ALABDULKAREM *et al*. (2012) o ciclo de liquefação que a usava como fluido refrigerante apresentou o menor consumo de energia. O presente estudo não irá considerar o ciclo de vida da amônia, dada a não obtenção de dados sobre a quantidade necessária para este processo, o que é mais uma limitação deste estudo.

A pressão do CO_2 para a liquefação considerada em ALABDULKAREM *et al*. (2012) é diferente da considerada no presente estudo para a liquefação. Em ALABDULKAREM *et al.* (2012) o CO_2 foi comprimido até 0,6 MPa para que se iniciasse a liquefação e neste estudo a pressão considerada é de 2 MPa. O valor considerado neste estudo, como foi dito anteriormente, segue os passos da metodologia de SILVA *et al.* (2018). Mas de acordo com ALABDULKAREM *et al*. (2012), o CO_2 precisa ser comprimido a uma pressão maior que a pressão do ponto triplo do CO_2 de 5,17 bar (equivalente a 0,52 MPa) antes da liquefação, para que não surja também a fase sólida do CO_2 durante o resfriamento. O diagrama de fases do CO_2 pode ser visto na Figura 7 deste trabalho, onde a pressão e temperatura do ponto triplo para o CO_2 podem ser vistos.

De acordo com os resultados do estudo de ALABDULKAREM *et al*. (2012), a potência requerida na etapa do ciclo de liquefação utilizando amônia como fluido refrigerante foi de 6,34 MW para um fluxo[30] 65,90 tCO_2/hora. Sendo assim, o presente estudo irá fazer uma estimativa do consumo da liquefação do CO_2 adaptando esses resultados, o que

[30] O fluxo do fluido para captura considerado em ALABDULKAREM *et al*. (2012) era de 73,22 t/hora (80,47 ton/hora), considerando 65,90 t de CO_2 por hora e o restante como impurezas (água, oxigênio e nitrogênio). Como o presente estudo considera um fluxo de 100% de CO_2, optou-se por considerar para o cálculo deste fator de consumo apenas a parte do CO_2 do fluxo.

resulta em 0,096 MW de portência necessária para liquefazer um fluxo de 1 tCO_2/hora. Este valor será utilizado para calcular a potência necessária pela liquefação do CO_2 de cada destilaria, de acordo com o fluxo de CO_2 da fermentação produzido por cada uma, após a compressão para a pressão necessária para o transporte rodoviário. Com o CO_2 liquefeito e com a pressão adequada para os caminhões, ele está pronto para ser transportado.

Outro consumo que entrará na contabilização da liquefação do CO_2 é o consumo das bombas para que o CO_2, após já ter sido transportado por caminhões e chegar ao Hub, deve ser comprimido até a pressão de 11 MPa, que foi a pressão considerada como a pressão do Hub neste estudo, já que a pressão do CO_2 durante o transporte por caminhões é de apenas 2 MPa. A vantagem das bombas é que estas consomem menos energia que os compressores, já que o volume específico do CO_2 líquido é bem menor que o volume do CO_2 na fase gasosa (ALABDULKAREM *et al*., 2012). Mas de qualquer forma, a liquefação do CO_2 demanda uma quantia considerável de energia (ALABDULKAREM *et al*., 2012). O consumo de energia da bomba pode ser calculado pela Equação 17 a seguir (McCOLLUM e OGDEN, 2006). Esta etapa também foi considerada em SILVA *et al.* (2018).

$$W_b = \left(\frac{1000*10}{24*36}\right)\left[\frac{m*(P_{Hub}-P_{cut-off})}{\rho*\eta_p}\right] \qquad (17)$$

- W_b = Potência da bomba (kW)
- m_d = Fluxo de massa diário de CO_2 (tCO_2/dia)
- P_{comp} = Pressão final após a compressão da liquefação (MPa)
- P_{hub} = Pressão do duto após o hub (MPa)
- ρ = Densidade do CO_2 (kg/m^3)
- η_p = Eficiência da bomba (%)

Os parâmetros utilizados no cálculo do consumo energético pela bomba para elevar a pressão do CO_2 liquefeito após sua chegada ao local onde será injetado no Hub podem ser vistos na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9: Parâmetros para cálculo da bomba de compressão para elevação da pressão do CO_2 para o Hub

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade	Fonte
$\mathbf{W_b}$	Potência da bomba	Calculado	kW	-
$\mathbf{m_d}$	Fluxo de massa diário de CO_2	Calculado para cada destilaria	tCO_2/dia	-
$\mathbf{P_{comp}}$	Pressão final após a compressão da liquefação	2	MPa	SILVA *et al.* (2018)
$\mathbf{P_{hub}}$	Pressão do duto após o hub	11	MPa	SILVA *et al.* (2018)
$\boldsymbol{\rho_{liq}}$	Densidade do CO_2	630	kg/m³	McCOLLUM e OGDEN (2006)
$\boldsymbol{\eta_p}$	Eficiência da bomba	0,75	-	McCOLLUM e OGDEN (2006)

Após calcular todos esses parâmetros, emissão de GEE referente à liquefação do CO_2 pode ser calculada pela Equação 18 a seguir:

$$E_{liquefação} = (W_{S\,total} + W_{liq\,amônia} + W_b) \times 24 \times 365 \times EF_{eletricidade} \quad (18)$$

- $W_{s\,total}$ = Potência necessária para liquefação do CO_2 nos 4 estágios (MW)
- $W_{liq\,amônia}$= Potência necessária pela liquefação utilizando amônia (MW)
- W_b = Potência de compressão necessária para comprimir o CO_2 até a pressão do Hub pela bomba (MW)
- $EF_{eletricidade}$= Fator de emissão da eletricidade (tCO_2e/MWh)

Após o cálculo do consumo energético e de emissão referente à liquefação do CO_2, chega-se ao cálculo da logística necessária no transporte de CO_2 por caminhões, conforme mostrou o estudo de SILVA *et al.* (2018). Nesta etapa, foram feitas as muitas

considerações similares a este estudo, para que seu resultado pudesse ser utilizado: o modelo de caminhão para o transporte do CO_2 (Figura 20 a seguir), de uma empresa que atualmente já atua transportando CO_2 em caminhões no Brasil; a eficiência energética dos caminhões e toda a metodologia para o cálculo do número de viagens necessárias e os tanques necessários para armazenamento do CO_2 liquefeito. O modelo escolhido de caminhão, o semirreboque com eixos espaçados da Nitrotec tem a capacidade de transportar 30 m^3 de CO_2 liquefeito por viagem. O semirreboque é acoplado a um cavalo mecânico e peso bruto total do conjunto considerado em SILVA *et al.* (2018) foi de 53 toneladas.

Figura 20: Caminhão semirreboque com eixos espaçados, escolhido para o transporte rodoviário de CO_2.
Fonte: Nitrotec, 2017a

Outros fatores considerados por SILVA *et al*. (2018) e que serão considerados neste estudo nos cálculos desta etapa é a velocidade média dos caminhões como sendo 40 km/h e a densidade do CO_2 liquefeito como sendo 1,041 t/m^3, calculado na simulação desenvolvida em SILVA *et al.* (2018) no HYSYS. Outra consideração feita no estudo citado e também utilizado neste estudo foi que o tempo de carga e descarga dos caminhões seria de 5 horas, já que foi apontado por este grupo de autores que a Resolução da ANTT 420/2012 determina que gases liquefeitos refrigerados devem aguardar para que as condições iniciais de carregamento do gás sejam estabelecidas.

Após o CO_2 chegar ao Hub, é necessário que exista um tanque de armazenamento para estocar o gás antes da sua injeção ao Hub. Suas características foram definidas como as mesmas apresentadas em modelos da empresa Nitrotec (2017_b), citada como fornecedora

dos caminhões que serão considerados neste estudo. Para o armazenamento, optou-se por tanques verticais com isolamento a vácuo que também foi considerado em SILVA *et al*. (2018).

O modelo de operação logística desenvolvido por SILVA *et al.* (2018) considera armazenamento, manejo e transporte do CO_2 das destilarias ao Hub. Primeiramente, definiu-se a quantidade de tanques de armazenamento para que o CO_2 liquefeito pudesse ser armazenado na destilaria antes do transporte e quando chegasse próximo ao Hub, antes da sua injeção nele. O tanque de armazenamento, assim como no estudo citado, foi escolhido como sendo um modelo da Nitrotec de um tanque vertical com isolamento a vácuo, com capacidade de 30 m^3. De acordo com o fabricante (NITROTEC, 2018), o tanque é feito de aço carbono e pesa 18.100 kg. Como não há especificações sobre outros componentes do tanque, neste estudo será considerado que todo esse peso é de aço carbono, para que seja calculada a emissão referente à produção de cada tanque, considerando o fator de emissão do aço brasileiro mencionado na seção anterior (1,8 t CO_2e/t aço). Para calcular o número de tanques, SILVA *et al.* (2018) utilizou a Equação 19 a seguir:

$$N_{T,i} = \left(INT\left(\frac{Q_{v,i} * t_{cd}}{V_T}\right) + 1\right) * 2 \qquad (19)$$

- $N_{T,I}$ = Número de tanques intermediários de armazenamento na i-ésima destilaria e no hub
- $Q_{v,I}$ = Vazão volumétrica de CO_2 da i-ésima destilaria (m^3/h)
- $t_{c/d}$ = Duração de carga e descarga (h)
- V_T = Volume dos tanques intermediários de estocagem (m^3)

De acordo com a metodologia aplicada em SILVA *et al.* (2018), o cálculo do número de tanques prevê o mínimo necessário para que seja possível um tempo de armazenamento do gás superior ao tempo de carga e descarga do gás e o cálculo tem um fator multiplicativo por 2 para que exista um tanque recebendo o CO_2 da planta para cada tanque carregando um caminhão. Esse cálculo foi feito para cada destilaria. A emissão

pela fabricação de cada tanque de armazenamento pode ser calculada pela Equação 20 a seguir:

$$E_{tanque} = M_{aço} \times FE_{aço} \qquad (20)$$

- E_{tanque} = Emissão pela fabricação de um tanque de armazenamento do CO_2 líquido (tCO_2e)
- $M_{aço}$ = Massa de aço presente em um tanque (t aço)
- $FE_{aço}$ = Fator de emissão da fabricação do aço (t CO_2e/t aço)

Tabela 10: Quadro resumo com os parâmetros utilizados no cálculo da ACV dos tanques de armazenamento

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade	Fonte
E_{tanque}	Emissão pela fabricação de um tanque de armazenamento do CO_2 líquido	Calculado	tCO_2e	-
$M_{aço}$	Massa de aço presente em um tanque	18,1	t aço	NITROTEC (2017b)
$FE_{aço}$	Fator de emissão da fabricação do aço	1,8	tCO_2e / t aço	INSTITUTO AÇO BRASIL (2016)

Quanto ao seu tempo de vida útil, de acordo com o fabricante dos tanques (NITROTEC, 2018), os mesmos não possuem um tempo de vida útil definido, existindo tanques com até com 40 anos em operação, em uma média de 20 a 30 anos, mas como o CO_2 não é corrosivo sem a presença de água, a espessura do tanque não diminui com o tempo e com isso, não diminui o seu tempo de vida. Sendo assim, o presente estudo vai considerar que os tanques de armazenamento possuem uma vida útil de 30 anos, não sendo necessária sua reposição até o fim do tempo de vida do projeto. Sendo assim, a emissão calculada pela Equação 20 para cada tanque de armazenamento só ocorrerá uma vez ao longo de todo ciclo de vida do projeto.

A trajetória percorrida pelos caminhões nas rodovias se difere da trajetória dos dutos, visto que rodovias geralmente são mais sinuosas que as trajetórias de dutos, o que faz com que os caminhões tenham que percorrer caminhos mais longos que o caminho que o CO_2 faz nos dutos (SILVA *et al.*, 2018). Para que essa diferença da distância a mais percorrida pelos caminhões fosse calculada, SILVA *et al.* (2018) utilizou um fator de tortuosidade apresentado em SULTANA *et al.* (2014)[31], considerando o valor de 1,5 para representar esse caminho extra percorrido pelos caminhões com relação aos dutos e este valor será considerado no presente estudo também. Sendo assim, a distância percorrida pelos caminhões considerando o fator tortuosidade pode ser calculada pela Equação 21, também considerada em SILVA *et al.* (2018). Com a distância é possível calcular a emissão pelo consumo de diesel, combustível utilizado pelos caminhões brasileiros.

$$d_i = 2 * d_{i,Hub} * \tau \qquad (21)$$

- d_i = Distância total de viagem para a destilaria i (km)
- $d_{i,Hub}$ = Distância da destilaria i ao Hub (km)
- τ = Fator de tortuosidade

Outro cálculo necessário é a quantidade de caminhões necessária para o transporte de CO_2. De acordo com SILVA *et al.* (2018) o cálculo para saber o número de caminhões necessários é dado pela Equação 22 e um dos parâmetros dela, que é o tempo total de viagem, pode ser calculado na Equação 23.

$$N_{CT,i} = INT\left(\frac{Q_{v,i} * t_{v,i}}{V_T}\right) + 1 \qquad (22)$$

- $N_{CT,i}$= Número de caminhões necessários para o transporte da destilaria i
- $Q_{v,i}$ = Vazão volumétrica de CO_2 da i-ésima destilaria (m^3/h)
- $t_{v,I}$ = Tempo total de viagem para a destilaria i (h)
- V_T = Volume do tanque intermediário (m^3)

$$t_{v,i} = 2 * t_{cd} + \frac{d_i}{v_m} \qquad (23)$$

[31] Neste estudo (SULTANA *et al.*, 2014), os autores calcularam a média de tortuosidade em diversas estradas no Canadá, através da razão entre uma trajetória percorrida em uma estrada e uma uma linha uma reta deste percurso, chegando-se e a um intervalo com valores entre 1,3 e 3,0.

- $t_{v,i}$ = Tempo total de viagem para a destilaria i (h)
- t_{cd} = Duração de carga e descarga (h)
- d_i = Distância total de viagem para a destilaria i (km)
- v_m = Velocidade média do caminhão (km/h)

Para calcular a emissão referente à fabricação dos caminhões, por falta de maiores dados disponíveis, primeiramente pensou-se em calcular a quantidade de aço carbono contido nos tanques dos caminhões do modelo considerado da Nitrotec, que é feito de aço carbono e possui suas dimensões em um manual disponível no site. Contudo, esse cálculo possui muitas lacunas, pois não considera a emissão da fabricação de todas as partes do caminhão.

Para contornar este problema, utilizou-se um fator do banco de dados EcoInvent 3.4 (2017), que possui dados para a fabricação de um caminhão de um modelo que também transporta carga refrigerada (possuindo refrigeração na carroceria), mas com capacidade de 16 toneladas, menor que o modelo considerado neste estudo, que transporta 30 toneladas de CO_2. De acordo com a EcoInvent (2017), a emissão acumulada referente à produção de uma unidade deste caminhão é de 31.705 kg CO_2e. Este será o valor considerado nos cálculos para a fabricação dos caminhões deste estudo. Sendo assim, o cálculo para a emissão pela fabricação dos caminhões necessários para cada destilaria neste estudo pode ser calculado pela Equação 24 a seguir.

$$E_{i,caminhão} = N_{CT,i} \times FE_{caminhão} \quad (24)$$

- $E_{i,caminhão}$ = Emissão pela fabricação dos caminhões necessários no transporte da destilaria i (tCO_2e)
- $N_{CT,i}$= Número de caminhões necessários para o transporte da destilaria i (caminhões)
- $FE_{caminhão}$ = Fator de emissão da fabricação de uma unidade de caminhão (tCO_2e/caminhão)

Tabela 11: Quadro resumo com os parâmetros utilizados na ACV dos caminhões

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade	Fonte
$E_{i,caminhão}$	Emissão pela fabricação dos caminhões necessários no transporte da destilaria i	Calculado	tCO_2e	-
$N_{CT,i}$	Número de caminhões necessários para o transporte da destilaria i	Calculado	Caminhões	-
$FE_{caminhão}$	Fator de emissão da fabricação do caminhão	31,1	tCO_2e / caminhão	ECOINVENT (2017)

De acordo com a EcoInvent (2017), o tempo de vida desses caminhões é 15 anos. Nas emissões referentes ao ciclo de vida do projeto, que é de 30 anos, a emissão pela fabricação dos caminhões calculada pela Equação 24 deve ser multiplicada por 2.

Outro produto muito utilizado pelos caminhões e que deve ser analisado são os pneus. De acordo com SILVA *et al.* (2018), o conjunto de caminhão e semirreboque do modelo considerado possui 22 pneus. De acordo com a Pesquisa CNT de Perfil dos Caminhoneiros realizada em 2016, o tempo de duração média de um jogo de pneus utilizados por caminhões em transporte de carga é de 13,6 meses. Considerando este tempo de troca, em 30 anos serão feitas 27 trocas dos 22 pneus de cada caminhão. Para calcular a emissão referente a cada ano, será considerada a emissão total dessas 27 trocas de todos os pneus ao longo de todo o tempo de vida do projeto, e será dividido por 30 anos, para que tenha uma emissão referente a parcela de cada ano.

Para o cálculo da ACV dos pneus, também foram utilizados os dados do banco de dados EcoInvent 3.4 que representam as emissões referentes ao tratamento por incineração de pneu de caminhão usado, considerando todas as emissões acumuladas anteriormente (do berço até esta etapa). Esse fator considera tanto a parte da incineração da borracha quanto a parte metálica do pneu. Mas como apenas a parte da borracha de um pneu que é trocada mais regularmente, optou-se por utilizar um fator de alocação das emissões reportadas

pelo banco de dado para que não fosse considerada a emissão da parte metálica do pneu a cada troca de 13 meses.

Considerando todos os fatores de GWP mencionados no capítulo anterior, pelos dados do banco de dados EcoInvent de emissão de cada GEE, chegou-se a um fator de emissão para a fabricação do pneu de 2,41 kg CO_{2e} por kg de pneu. Também de acordo com o mesmo banco de dados, o fator de alocação dessa emissão pela parte da borracha do pneu corresponde a 0,76. Esse fator de alocação foi usado no fator de emissão mencionado anteriormente, chegando-se a um fator de emissão para o ciclo de vida da borracha do pneu de 1,83 kg CO_{2e} por kg de pneu (já que a parte metálica do pneu não tem esse tempo de troca tão regular quanto a borracha, portanto considerou-se no presente estudo apenas o ciclo de vida da parte de borrada do mesmo).

Para estimar o peso de cada pneu, considerou-se o modelo de caminhão mais vendido no Brasil em 2017. De acordo com a SINDICARGA (2017) o caminhão mais vendido neste ano foi o modelo R440 da Scania. Segundo o manual deste veículo (SCANIA, 2018), o modelo de pneus recomendados é o 295/80R22,5. Um dos fabricantes desse pneu é a Michelin e de acordo com este fabricante, cada pneu deste modelo tem um peso aproximado de 57,1 kg (MICHELIN, 2018). Utilizando-se todos esses dados, chega-se à Equação 25 para o cálculo da emissão pela fabricação dos pneus dos caminhões necessários no transporte de CO_2 de cada destilaria (elaboração própria):

$$E_{i,pneu} = N_{CT,i} \times N_{pneus} \times M_{borracha} \times \frac{FE_{pneu}}{1000} \times \frac{n\ trocas}{30} \qquad (25)$$

- $E_{i,pneu}$ = Emissão anual pela fabricação dos pneus dos caminhões da destilaria i (tCO_2e)
- $N_{CT,i}$= número de caminhões necessários para o transporte da destilaria i (caminhões)
- N_{pneus} = Número de pneus em cada caminhão (pneus / caminhão)
- $M_{borracha}$ = Massa de borracha em cada pneu (kg borracha / pneu)
- FE_{pneu} = Fator de emissão pela fabricação do pneu (kg CO_2e / kg borracha)
- N_{trocas} = Número de trocas dos jogos de pneus em 30 anos

Tabela 12: Quadro resumo para o cálculo da ACV dos pneus

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade	Fonte
$E_{i,pneu}$	Emissão anual pela fabricação dos pneus dos caminhões da destilaria i	Calculado	tCO_2e	-
$N_{CT,i}$	Número de caminhões necessários para o transporte da destilaria i	Calculado	Caminhões	-
N_{pneus}	Número de pneus em cada caminhão	22	Pneus / caminhão	NITROTEC (2017c) in SILVA *et al.* (2018)
$M_{borracha}$	Massa de borracha em cada pneu	57,1	kg borracha / pneu	MICHELIN (2017)
FE_{pneu}	Fator de emissão pela fabricação do pneu	1,83	kg CO_2e / kg borracha	Adaptado de ECOINVENT (2017)
N trocas	Número de trocas dos jogos de pneu ao longo de 30 anos	27	Calculado	Baseado em CNT (2016)

Com esses dados, para cada caminhão calculado pela Equação 22, serão considerados esses parâmetros no cálculo da ACV dos pneus. O resultado da Equação 25 é uma emissão anual[32], que deve ser multiplicada por 30 no cálculo da emissão total do ciclo de vida do projeto.

Para calcular o consumo de combustível dos caminhões, considerou-se o mesmo fator de consumo de SILVA *et al.* (2018) de 2 km/l. Contudo, o 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (MMA, 2011), reporta um fator de consumo diferente do estudo citado, considerando 3,17 km/l para o consumo de diesel para caminhões pesados.

[32] O tempo de troca dos pneus era maior que um ano, mas a emissão foi feita considerando um fator que correlacionava este período de tempo a uma emissão anual.

O número de viagens necessárias em um ano para cada destilaria pode ser calculado pela Equação 26 (adaptado de SILVA *et al*. (2018).

$$N_{V,i} = INT\left(\frac{m_i}{\rho * V_c}\right) + 1 \qquad (26)$$

- $N_{V,I}$ = Número de viagens por ano dos caminhões para a destilaria i
- m_i = Produção anual de CO_2 da destilaria i (tCO_2 / ano)
- ρ = Densidade do CO_2 liquefeito (t CO_2 / m^3 CO_2)
- V_c = Volume dos caminhões de transporte de CO_2 (m^3 CO_2)

Para calcular o consumo total de combustível pelos caminhões, deve-se considerar o número total de viagens necessárias (calculada pela Equação 26), a distância total percorrida (calculada pela Equação 20) e o fator de consumo mencionado anteriormente.

Todo diesel brasileiro comercializado contém uma mistura de biodiesel desde 2008. Essa porcentagem de mistura começou com 2% em 2008, chegando a 8% em 2017. Contudo, como este estudo considera grande parte de seus dados para o ano de 2016, neste ano a mistura vigente de biodiesel no diesel ainda era de 7% (ANP, 2017_b). Sendo assim, toda a quantidade de combustível calculada como sendo consumida por caminhões neste estudo de caso considera que 7% de seu volume é biodiesel. Com a quantidade total de combustível necessária calculada, é possível se chegar à emissão de GEE desta etapa através da Equação 27 a seguir, utilizada tanto para o diesel quanto para o biodiesel.

$$E_{i,comb\ j} = \sum Comb \times \rho_{comb} \times PCI_j \times EF_{j,k} \times GWP_k \qquad (27)$$

- $E_{i,comb\ j}$ = Emissão de GEE do combustível j para a destilaria i (t CO_2e)
- Comb = Quantidade de combustível consumido (litros)
- ρ_{comb} = Densidade do combustível (kg/l)
- PCI_j = Poder calorífico Inferior do combustível j (GJ/kg)
- $EF_{j,k}$ = Fator de emissão do combustível j para o gás k (t gás / GJ)
- GWP_k = Potencial de aquecimento global para cada GEE analisado

Os fatores usados nesta etapa do cálculo estão na Tabela 13 a seguir. As emissões de CO_2 do biodiesel não são contabilizadas no somatório das emissões de GEE do inventário de ciclo de vida, pois se trata de um biocombustível e o CO_2 emitido por ele é biogênico, não sendo consideradas na emissão total calculada neste estudo.

Tabela 13: Parâmetros para o cálculo da emissão do transporte rodoviário pelo consumo de combustível pelos caminhões

Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
Eficiência do caminhão	2	Km/l	SILVA *et al*. (2018)
Fração de biodiesel no diesel	7	%	ANP (2017)
Poder Calorífico Inferior do diesel	10.100	kcal/kg	BEN (2017)
Densidade do diesel	840	kg/m^3	BEN (2017)
Fator de emissão de CO_2 do diesel	74,1	kg CO_2/GJ	IPCC (2006)
Fator de emissão de CH_4 do diesel	0,003	kg CH_4/GJ	IPCC (2006)
Fator de emissão de N_2O do diesel	0,0006	kg N_2O/GJ	IPCC (2006)
Poder Calorífico Inferior do biodiesel	9.000	kcal/kg	BEN (2017)
Densidade do biodiesel	880	kg/m^3	BEN (2017)
Fator de emissão de CH_4 do biodiesel	0,009	kg CH_4/GJ	Ferramenta GHG Protocol Brasil (2017)
Fator de emissão de N_2O do biodiesel	0,001	kg N_2O/GJ	Ferramenta GHG Protocol Brasil (2017)

Fonte: Elaboração própria baseada em IPCC (2006); ANP (2017b); BEN (2017), GHG PROTOCOL BRASIL (2016) e SILVA *et al*. (2018)

A emissão calculada em 27 para cada combustível (diesel e biodiesel) é anual e deve ser multiplicada por 30 no cálculo da emissão total do ciclo de vida do projeto para este parâmetro.

A Figura 21 a seguir resume as emissões de GEE deste estudo de caso e que serão considerados nos cálculos de cada destilaria.

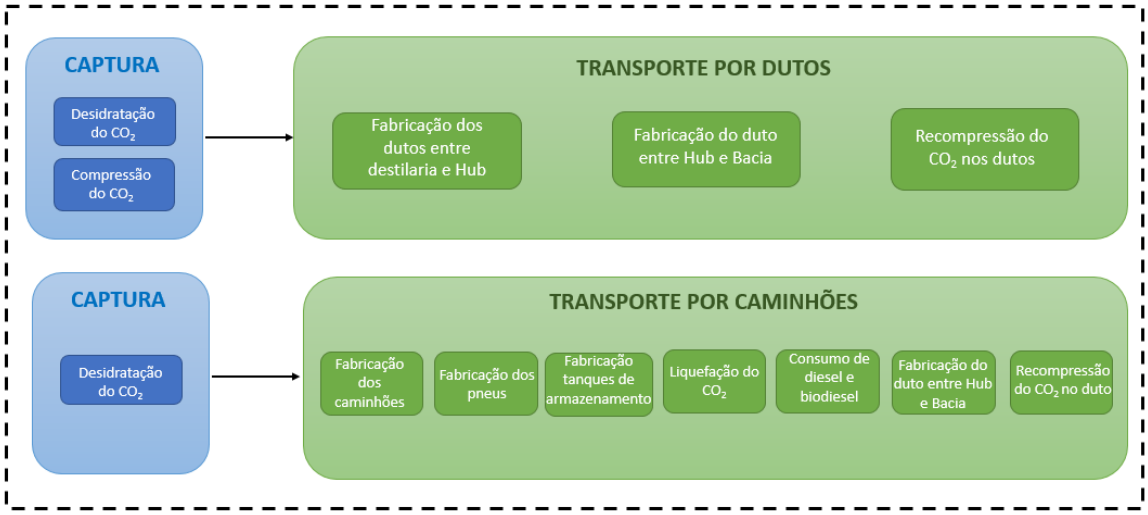

Figura 21: Fluxograma das emissões de GEE consideradas na Análise do Ciclo de Vida do Caso 2.
Fonte: Elaboração própria

Considerando todos esses parâmetros que devem ser contabilizados para o cálculo da emissão do transporte intermodal, a emissão de GEE anual deste caso pode ser calculada pela Equação 28 para as 163 destilarias que fazem seu transporte por dutos e pela Equação 29 para as 70 destilarias que fazem seu transporte por caminhões até o Hub.

$$E_{i,transp\ 2,duto} = E_{duto\ dest_Hub\ i} + E_{recompressor\ i} + (E_{duto\ Hub_bacia} \times \frac{Q_i}{Q_{total}}) \quad (28)$$

- $E_{i,transp\ 2,\ duto}$ = Emissão do transporte do caso 2 para a destilaria i que utiliza dutos (tCO_2e/ano)
- $E_{duto\ dest_Hub\ i}$ = Emissão pela fabricação do duto que transporta a vazão da destilaria i entre a destilaria e o Hub (tCO_2e)
- Q_i = Vazão de CO_2 da destilaria i (tCO_2/h)
- $E_{recompressor\ i}$ = Emissão do consumo de energia pelo recompressor de pressão do duto da destilaria i (tCO_2e)
- Q_{total} = Vazão de CO_2 total transportado (tCO_2/h)

$$E_{j,transp\ 2,rodov} = E_{j,liquefação} + E_{j,caminhão} + E_{j,pneu} + E_{j,tanque} + E_{j,combustível} \quad (29)$$

- $E_{j,transp\ 2,rodov}$ = Emissão do transporte do caso 2 para a destilaria j que utiliza o transporte rodoviário (tCO_2e/ano)
- $E_{j,liquefação}$ = Emissão pela liquefação do CO_2 da destilaria j (tCO_2e/ano)
- $E_{j,caminhão}$ = Emissão pela fabricação dos caminhões necessários para transportar o CO_2 da destilaria j (tCO_2e/ano)
- $E_{j,pneu}$ = Emissão pela fabricação dos pneus necessários para transportar o CO_2 da destilaria j (tCO_2e/ano)
- $E_{j,tanque}$ = Emissão pela fabricação dos tanques de armazenamento necessários para o CO_2 liquefeito da destilaria j (tCO_2e/ano)
- $E_{j,combustível}$ = Emissão pelo consumo de combustível nos caminhões para o transporte do CO_2 liquefeito da destilaria j (tCO_2e/ano)

Os resultados obtidos pelas equações citadas neste item podem ser vistos no Anexo 3 deste trabalho, para cada destilaria.

4.3.3.4. Caso 3: Destilarias ligadas a múltiplos Hubs por dutos

Neste caso, o estudo de SILVA *et al*. (2018) considerou a implementação de oito *Hubs*, com as destilarias sendo agrupadas em 8 *Clusters* e cada destilaria sendo conectada ao *Hub* mais próximo por dutos, como mostra a Figura 22 a seguir.

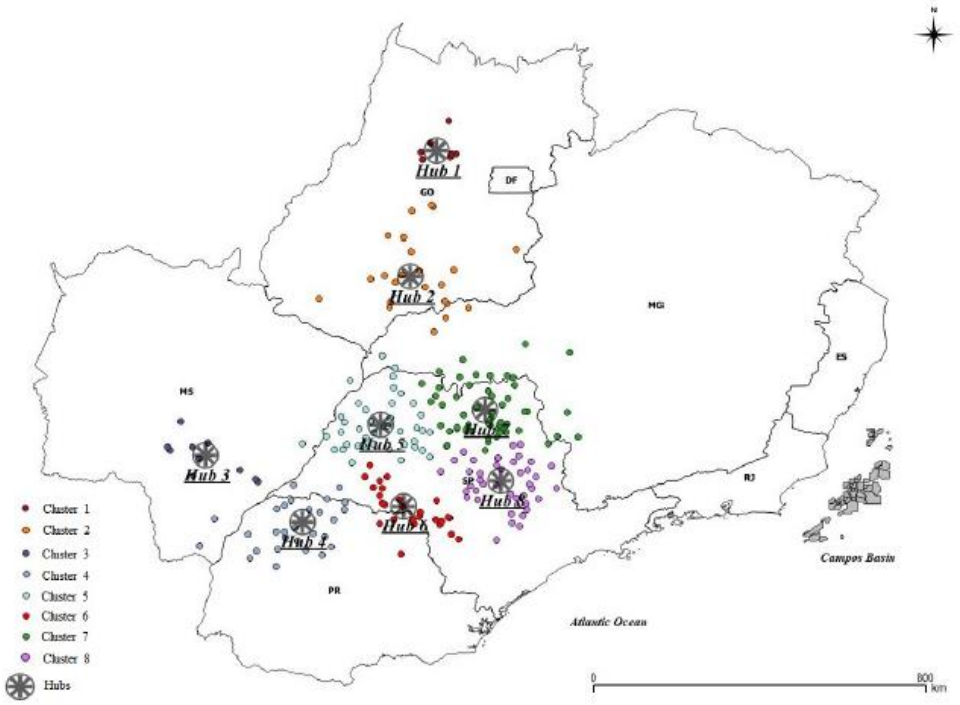

Figura 22: Localização dos *Clusters* de destilarias e dos 8 *Hubs*. Fonte: SILVA *et al*. (2018)

Os *Hubs* de cada cluster definido foram localizados no estudo de SILVA *et al*. (2018) de acordo com a ferramenta de Análise de densidade de Kernel do ArcMap, que posicionou os Hubs no centro de maior concentração de emissões das destilarias consideradas em cada cluster. Esta configuração se mostra vantajosa, neste caso, pois existem muitas destilarias próximas entre si, mas distantes de outros conjuntos de destilarias, o que dificultaria o atendimento de todas por um único *Hub* (SILVA *et al.*, 2018).

De acordo com o estudo supracitado, esta é a opção com menor custo de abatimento, dentre os 3 casos apresentados, o que mostra que a economia de escala e a redução dos comprimentos dos dutos pelos *Hubs* compensam os custos extras de conectar diferentes *Hubs* (SILVA *et al.*, 2018). Um dos motivos para este custo mais baixo é que nesta configuração, os dutos que ligam as destilarias aos diversos *Hubs* possuem comprimentos médios menores do que a média dos comprimentos dos dutos construídos na configuração que utiliza um único *Hub* para todas as destilarias, reduzindo assim a necessidade de material para fabricação desses dutos e de estações de recompressão.

Além disso, apesar da configuração com múltiplos *Hubs* exigir a conexão entre os *Hubs*, já que assume que o transporte de todo o CO_2 até a Bacia de Campos é realizado a partir

somente do *Hub* 8, os investimentos nos dutos que conectam os *Hubs* se aproveitam da economia de escala derivada do volume significativo de CO_2 transportado entre cada *Hub* (SILVA *et al*., 2018).

Após a localização dos *Hubs*, os dutos foram desenhados no estudo de SILVA *et al.* (2018) ligando as destilarias de cada *Cluster* ao seu *Hub* correspondente e entre os diferentes *Hubs* através da ferramenta *Cost Path* do ArcMap 10.1, que considera o percurso de menor custo entre esses pontos. A trajetória dos dutos das destilarias aos Hubs, desenvolvido por SILVA *et al.* (2018) pode ser vista na Figura 23 a seguir.

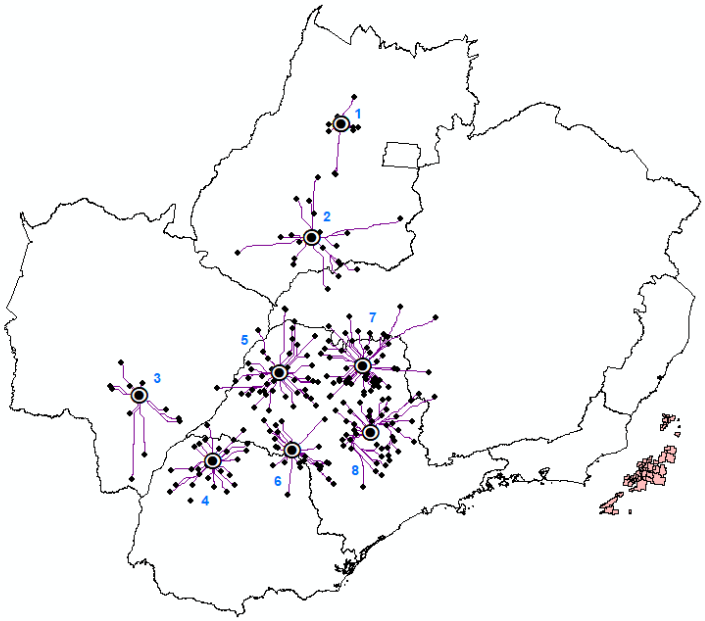

Figura 23: Dutos ligando as destilarias a seu Hub correspondente. Fonte: SILVA *et al.* (2018)

Como cada *Hub* se encontra em uma distância maior que 800 km da Bacia de Campos, a configuração da rede de dutos e *Hubs* foi feita visando otimizar os custos de implementação desse sistema no estudo de SILVA *et al*. (2018). Portanto, decidiu-se conectar os *Hubs* entre si até que o total das emissões de todas as destilarias chegasse ao *Hub* mais próximo da Bacia de Campos (que neste caso, é o *Hub* 8) e posteriormente, esse *Hub* se conectaria à Bacia de Campos. O *Hub* 1 se conecta ao *Hub* 2, e este último se conecta ao *Hub* 7. O *Hub* 3 se conecta ao 4 e este último se conecta ao *Hub* 6, que também recebe as emissões do *Hub* 5. Os *Hubs* 6 e 7 se conectam ao *Hub* 8, que é o mais próximo à Bacia de Campos, como dito anteriormente, e este último leva a quantidade

total de CO_2 do Sistema até a Bacia de Campos. A posição dos *Hubs* e suas conexões podem ser vistas na Figura 24 a seguir.

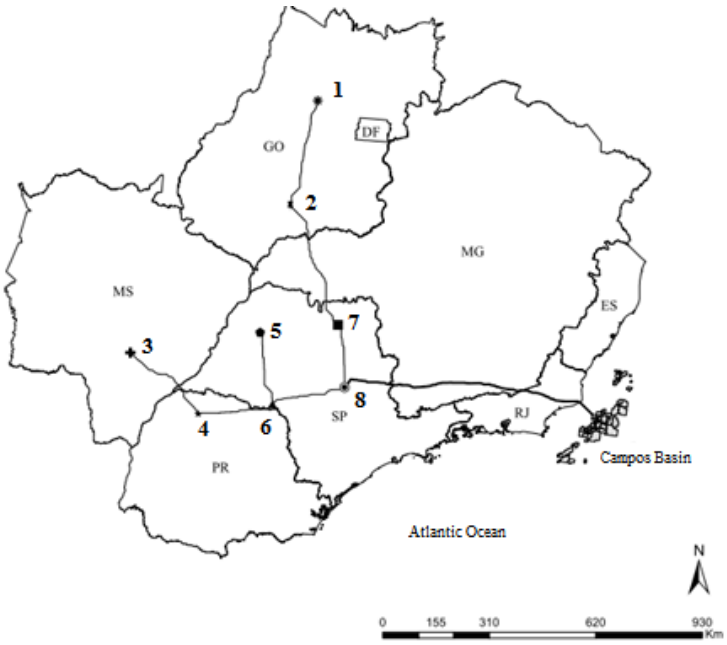

Figura 24: Localização dos hubs para transporte do CO_2 das destilarias do Centro Sul à Bacia de Campos. Fonte: SILVA *et al*. (2018)

Como pode ser visto na Figura 24, as emissões das destilarias pertencentes ao cluster 3, por exemplo, chegam ao Hub 3, sendo encaminhadas depois para o Hub 4, Hub 6, Hub 8 e finalmente chega à Bacia de Campos. E o Hub 6 por exemplo, recebe emissões do cluster 3, 4 e 5. Sendo assim, no cálculo de emissão referente à cada destilaria, serão contabilizadas as emissões proporcionais (de acordo com a quantidade de CO_2 que a destilaria produz frente à quantidade que aquele Hub transporta) da fabricação dos dutos que conectam esses Hubs, dependendo do caminho percorrido por cada cluster.

A Figura 25 a seguir resume todos os consumos energéticos considerados neste estudo de caso e que serão considerados nos cálculos de cada destilaria.

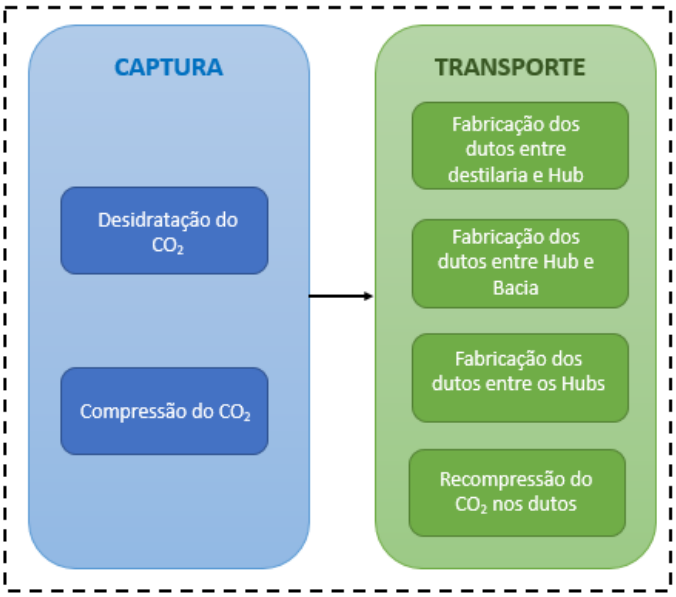

Figura 25: Fluxograma das emissões de GEE consideradas na Análise do Ciclo de Vida do caso 3. Fonte: Elaboração própria

As emissões calculadas para cada destilaria neste estudo de caso podem ser vistas nas Equações 30 e 31 a seguir.

$$E_{i,transp\ 3,compartilhado} = E_{dutos\ dest_Hub\ i} + \sum(E_{dutos\ dest_Hub\ i,n} \times \frac{Q_i}{\sum Q_n}) + E_{recompressor\ i} + \sum E_{recompressor\ i,n} \times \frac{Q_i}{\sum Q_n}) + (E_{duto\ Hub_bacia} \times \frac{Q_i}{Q_{total}}) \quad (30)$$

$$E_{i,transp\ 3,individual} = E_{dutos\ dest_Hub\ i} + E_{recompressor\ i} + (E_{duto\ Hub_bacia} \times \frac{Q_i}{Q_{total}}) \quad (31)$$

- E $_{i,transp\ 3,\ compartilhado}$ = Emissão do transporte do caso 3 compartilhado para a destilaria i (tCO_2e/ano)
- E $_{dutos\ dest_Hub\ i}$ = Emissão pela fabricação do duto (ou trecho de duto, no caso compartilhado) que transporta apenas a vazão da destilaria i entre a destilaria e o Hub (tCO_2e)
- E $_{dutos\ dest_Hub\ i,n}$ = Emissão pela fabricação do trecho de duto que transporta a vazão da destilaria i compartilhado com n destilarias entre a destilaria e o Hub (tCO_2e)

- Q_i = Vazão de CO_2 da destilaria i (tCO_2/h)
- Q_n = Vazão de CO_2 das n destilarias que compartilham o trecho de duto (tCO_2/h)
- $E_{recompressor\ i}$ = Emissão do consumo de energia pelo recompressor do duto da destilaria i (tCO_2e)
- $E_{recompressor\ i,n}$ = Emissão do consumo de energia pelo recompressor do duto compartilhado pela destilaria i e outras n destilarias (tCO_2e)
- Q_{total} = Vazão de CO_2 total transportado (tCO_2/h)

Os resultados obtidos pelas equações citadas neste item ser podem vistos no Anexo 4 e Anexo 5 deste trabalho, para cada destilaria ou trecho compartilhado por elas.

No final do tempo de vida econômico ou técnico do projeto, vem a fase na qual o projeto sofre desmantelamento e é abandonado, sofrendo uma desativação permanente que o deixe permanentemente em uma condição segura, de acordo com a regulação (IEAGHG, 2014a). Não existem muitas informações sobre a fase de desmantelamento dos dutos, pois os projetos de dutos de CO_2 são relativamente jovens (40 anos) (IEAGHG, 2014a). Sendo assim, a fase de desmantelamento não será considerada neste estudo para nenhum caso.

4.3.4. Cálculo do saldo de emissões

Com as emissões das etapas de captura e transporte somadas para cada um dos três casos, será utilizada a Equação 32 a seguir para calcular o saldo das emissões o saldo de armazenamento líquido que pode ser obtido com esse projeto após se descontar as emissões na implementação e operação projeto analisado neste estudo. Esta equação foi adaptada de LAUDE *et al*. (2011).

$$Armazenamento\ Líquido\ = CO_2 sequestrado - Emissão\ ciclo\ de\ vida \quad (322)$$

- Armazenamento líquido = Saldo de emissão que pode ser obtido pelo projeto de BIOCCS (tCO_{2e})
- CO_2 sequestrado = Quantidade de CO_2 produzido pelas destilarias durante o ciclo de vida do projeto (tCO_2)
- Emissão ciclo de vida = Quantidade de CO_2 de origem fóssil emitida pelo projeto de BIOCCS ao longo do ciclo de vida (tCO_{2e}).

5. Resultados – Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida

5.1. Apresentação dos resultados

De acordo com a metodologia aplicada, 14,8 $MtCO_2$ são produzidas anualmente pela fermentação do etanol das 233 destilarias do Centro-Sul consideradas neste estudo, o que resulta em 444,7 $MtCO_2$ produzidas ao longo do ciclo de vida de 30 anos do projeto considerado. A seguir, serão apresentados os resultados individuais para cada estudo de caso.

5.1.1. Caso 1 – Destilarias ligadas a um único *Hub* por dutos

Para o caso do transporte de CO_2 das destilarias por dutos até um único Hub e um grande duto conectando esse Hub à Bacia de Campos, foram feitos dois tipos de análise para o cálculo da ACV deste caso: um considerando que os dutos coincidentes na análise espacial feita em SILVA *et al*. (2018) fossem compartilhados pelas destilarias à montante nos trechos exatamente coincidentes do resultado apontado pelo estudo citado, e outro caso considerando que cada destilaria teria seu duto independente conectado ao Hub, como foi considerado no mesmo estudo, pela limitação obtida em sua análise. A Tabela 14: apresenta as principais características da configuração de transporte calculada para este estudo de caso.

***Tabela* 14:** Características gerais do transporte por único Hub

Configurações de Transporte - Caso 1 (Único Hub)		
Duto entre o Hub e a Bacia de Campos		
Parâmetro	**Valor**	**Unidade**
Comprimento do duto	964,53	km
Diâmetro do duto	0,89	m
Quantidade de aço necesária	1.103.025	t
Vazão de CO_2 transportada	856,85	kg CO_2/s
Emissão fabricação do duto	5.735.731	tCO_2e
Quantidade de estações de recompressão	7	unidades
Emissão estações de recompressão	11.785	tCO_2e
Dutos entre destilarias e Hub - compartilhados		
Parâmetro	**Valor**	**Unidade**
Comprimento total dos dutos	24.410	km
Diâmetro dos dutos	variável	m
Quantidade de aço necesária	1.264.818	t
Vazão de CO_2 transportada	variável	kg CO_2/s
Emissão fabricação dos dutos	6.577.054	tCO_2e
Quantidade de estações de recompressão	93	unidades
Emissão estações de recompressão	8.850	tCO_2e
Dutos entre destilarias e Hub - unitários		
Parâmetro	**Valor**	**Unidade**
Comprimento total dos dutos	56.445	km
Diâmetro dos dutos	variável	m
Quantidade de aço necesária	2.272.122	t
Vazão de CO_2 transportada	variável	kg CO_2/s
Emissão fabricação dos dutos	11.815.034	tCO_2e
Quantidade de estações de recompressão	270	unidades
Emissão estações de recompressão	1.886	tCO_2e

* A emissão pelo consumo energético das estações de recompressão consideram 30 anos do projeto

A Tabela 15 e a Tabela 16 apresentam os principais resultados das emissões para cada uma dessas configurações deste caso. A primeira coluna de resultados mostra a soma das emissões ao longo do ciclo de vida para cada aspecto considerado, enquanto a segunda coluna mostra o resultado da ACV considerando a unidade funcional deste estudo, ou seja, a emissão de todo o projeto por 1.000 tCO_2 armazenadas em 30 anos.

Tabela 15: Resultado da Análise de Ciclo de Vida para a configuração de dutos compartilhados para o caso de único Hub

Emissão Caso 1 - Único Hub compartilhado		
Emissão de CO_2 disponível no projeto	**Valor**	**Unidade**
Produção de CO_2 das destilarias em 30 anos (tCO_2)	444.757	1000 tCO_2
ACV do projeto	**Emissão em 30 anos (tCO_2e)**	**tCO_2e/1.000 tCO_2 armaz**
Captura		
Emissão pelo consumo de energia da desidratação	72.673	0,16
Emissão pelo consumo de energia da compressão	4.360.393	9,80
Emissão total da captura (tCO_2e)	**4.433.066**	**9,97**
Transporte		
Fabricação dutos entre destilarias e Hub	6.577.054	14,79
Fabricação duto Hub-Bacia de Campos	5.735.731	12,90
Energia para estações de recompressão	619.067	1,39
Total transporte (tCO_2e)	**12.931.851**	**29,08**
TOTAL CAPTURA + TRANSPORTE (tCO_2e)	**17.364.918**	**39,04**

Fonte: Elaboração própria

Tabela 16: Resultado da Análise de Ciclo de Vida para a configuração de dutos individuais para o caso de único Hub

Emissão Caso 1 - Único Hub unitário		
Emissão de CO_2 disponível no projeto	**Valor**	**Unidade**
Produção de CO_2 das destilarias em 30 anos (tCO_2)	444.757	1000 tCO_2
ACV do projeto	**Emissão em 30 anos (tCO_2e)**	**tCO_2e/1.000 tCO_2 armaz**
Captura		
Emissão pelo consumo de energia da desidratação	72.673	0,16
Emissão pelo consumo de energia da compressão	4.360.393	9,80
Emissão total da captura (tCO_2e)	**4.433.066**	**9,97**
Transporte		
Fabricação dutos entre destilarias e Hub	11.815.034	26,57
Fabricação duto Hub-Bacia de Campos	5.735.731	12,90
Energia para estações de recompressão	410.137	0,92
Total transporte (tCO_2e)	**17.960.902**	**40,38**
TOTAL CAPTURA + TRANSPORTE (tCO_2e)	**22.393.968**	**50,35**

Fonte: Elaboração própria

A etapa da captura teve a mesma emissão nas duas configurações, pois não houve modificações nesta etapa de um caso para outro. O total da emissão de captura foi de **9,97**

tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas. Ao longo dos 30 anos, a emissão total de captura foi de 4,4 $MtCO_2e$ considerando a emissão do consumo energético pela compressão e pela desidratação do CO_2 (com os fatores de consumo indicados no capítulo 4).

A emissão associada ao consumo energético da desidratação para as 233 destilarias consideradas neste caso de acordo com a ACV é de 0,16 tCO_2e/1.000 tCO_2 armazenadas e da compressão do CO_2e para que o mesmo atinja a pressão necessária para o transporte nos dutos é de 9,8 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas. A média anual dessas duas emissões é a mesma ao longo de todos os anos, visto que a quantidade de CO_2 produzida nas destilarias pela fermentação que foi considerada neste estudo não muda ao longo dos anos. Considerando apenas a etapa da captura, a compressão foi responsável por 98% das emissões da ACV, enquanto que a desidratação representou apenas 2% das emissões nas duas configurações nesta etapa.

Na etapa do transporte, o que foi considerado para este estudo de caso foi a fabricação dos dutos que ligam as destilarias ao Hub, a fabricação do duto que liga o Hub à Bacia de Campos e o consumo de energia para as estações de recompressão dos dutos, onde se fizesse necessário. A fabricação dos dutos se dá apenas uma vez ao longo de todo o ciclo de vida do projeto, enquanto que o consumo de energia pelas estações de recompressão ocorre ao longo dos 30 anos. Para este estudo de caso, a configuração que considera dutos compartilhados necessitou de 24.410 km de dutos entre as destilarias e o Hub, enquanto que a configuração de dutos unitários necessitava de 56.445 km desses dutos. Essa redução de quilometragem de dutos que a configuração compartilhada possibilita, além de necessitar de menos aço para a fabricação dos dutos (1,2 Mt de aço carbono necessários nos dutos compartilhados contra 2,3 Mt de aço carbono para os dutos individuais) e emitir menos GEE nesta etapa, também são necessárias menos estações de recompressão, visto que alguns dutos grandes individuais que necessitavam recompressão em cada um podem passar a compartilhar a mesma estação em um duto compartilhado que transporta a vazão somada das destilarias a montante. O número de estações de recompressão necessárias é menor (93 estações para os dutos compartilhados contra 270 estações nos dutos individuais).

A emissão dos dutos considerada neste estudo foi calculada em função do seu material, da espessura e do seu diâmetro. A emissão pela fabricação do duto entre o Hub e a Bacia de Campos em relação à quilometragem calculada nesta configuração é de 5.946,6 tCO_2/km construído, uma emissão bastante alta, já que esse duto transporta todo o CO_2

produzido por todas as destilarias, tendo a maior espessura considerada e o maior diâmetro. Já a fabricação dos dutos entre as destilarias e os Hubs, que apresentam menor espessura e diâmetros bem menores, transportando fluxos de uma ou algumas destilarias apenas em cada duto (na configuração compartilhada), é de 269,4 tCO_2e/km no caso compartilhado e 209,3 tCO_2e/km no caso individual e essa menor emissão dos dutos individuais pode ser explicado pelo fato de que que cada duto individual transporta um fluxo menor de CO_2 que os dutos compartilhados, o que faz com que o diâmetro interno dessa seção seja menor do que a de um duto que transporta uma vazão maior de CO_2 (como no caso de dutos compartilhados) e consequentemente, diminui a quantidade de aço necessária para a produção do duto e também sua emissão de GEE associada para sua fabricação.

O compartilhamento de dutos feito neste estudo seguiu o resultado apresentado por SILVA *et al*. (2018), que apresentou os dutos individuais das destilarias consideradas até o Hub e como o presente estudo faz uma análise de consumo energético e de emissões, optou-se por considerar essa opção para também apresentar uma análise de sensibilidade desses resultados, mas este estudo considerou apenas como compartilhados os dutos exatamente coincidentes, visto que desenhar um novo arranjo de rede de dutos fugiria do escopo deste estudo. A configuração de dutos compartilhados, que foi desenvolvida no presente estudo, apresentou menor emissão na etapa de transporte do que a configuração dos dutos individuais. Isso cocorreu pelo fato de que a quilomentragem de dutos individuais é mais que o dobro da quilomentragem dos dutos compartilhados considerados no presente estudo, aumentando também a emissão associada a fabricação desses dutos. A configuração compartilhada neste estudo de caso reduziu 44,3% das emissões de fabricaçãodos dutos entre as destilarias e o Hub e 27,9% das emissões da etapa de transporte, em comparação com as emissões que consideram dutos unitários.

A emissão ao longo do ciclo de vida da etapa de transportes para a configuração de dutos compartilhados é de **29,08 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenada**s, totalizando 12,9 $MtCO_2e$ ao longo dos 30 anos. A construção dos dutos entre as 233 destilarias e o Hub teve uma emissão de 14,8 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas, totalizando 6,6 $MtCO_2e$ no ciclo de vida do projeto. A construção do duto entre o Hub e a Bacia de Campos teve uma emissão de 12,9 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas, totalizando 5,7 $MtCO_2e$. Já a emissão referente ao consumo de energia pelas estações de recompressão foi de 1,39 tCO_2e/1000 tCO_2

armazenadas, totalizando 0,61 $MtCO_2e$ pelo consumo de energia ao longo dos 30 anos por estas estações.

Para a configuração de dutos individuais, a emissão ao longo do ciclo de vida da etapa de transportes é de **40,38 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenada**s, totalizando 17,9 $MtCO_2e$ ao longo dos 30 anos. A construção dos dutos individuais entre as 233 destilarias e o Hub teve uma emissão de 26,57 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas, totalizando 11,8 $MtCO_2e$ no ciclo de vida do projeto. A construção do duto entre o Hub e a Bacia de Campos teve uma emissão de 12,9 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas, totalizando 5,7 $MtCO_2e$ (como no caso anterior, já que este duto não se modificou na configuração compartilhada e individual). Já a emissão referente ao consumo de energia pelas estações de recompressão foi de 0,92 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas, totalizando 0,41 $MtCO_2e$ pelo consumo de energia ao longo dos 30 anos por estas estações. A contribuição de cada uma destas parcelas da etapa de transportes para as duas configurações consideradas (dutos compartilhados ou individuais) pode ser vista na Figura 26 a seguir.

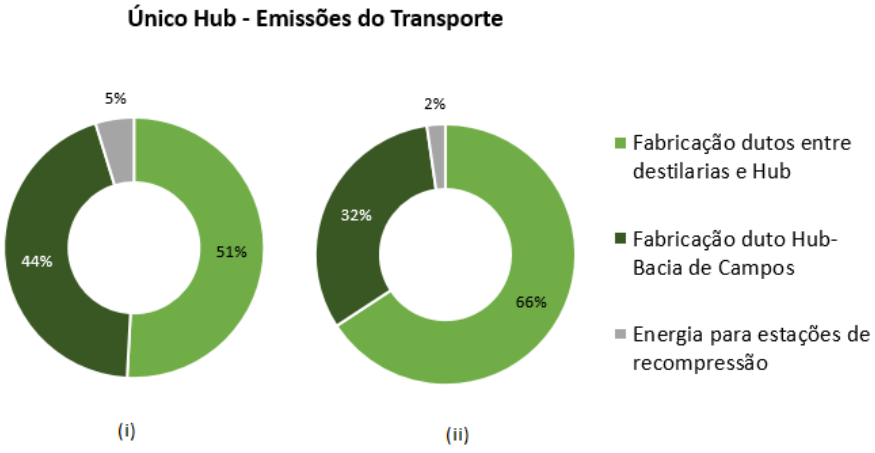

Figura 26: Participação de cada fonte na ACV do transporte no caso de único Hub. (i) para dutos compartilhados e (ii) para dutos individuais. Fonte: Elaboração própria

Considerando as etapas de captura e transporte somadas, a configuração de dutos compartilhados somou **39,04 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenada**s, totalizando 17,4 $MtCO_2e$ em seu ciclo de vida, enquanto que a configuração de dutos individuais somou **50,35 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas**, totalizando 22,4 $MtCO_2e$. Esse aumento de emissão se dá pelo transporte, que representa uma parcela maior das emissões dos dutos entre as

destilarias e o Hub na configuração dos dutos individuais, como pode ser visto na Figura 27 a seguir.

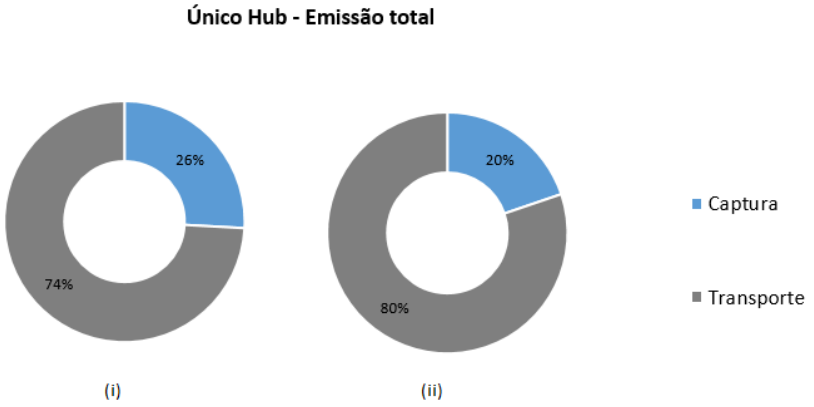

Figura 27: Participação de cada etapa no caso de único Hub. (i) para dutos compartilhados e (ii) para dutos individuais. Fonte: Elaboração própria

A Figura 28 a seguir mostra a contribuição de cada emissão considerada neste estudo de caso, para a configuração de dutos compartilhados entre as destilarias e o Hub em (i) e para a configuração de dutos individuais em (ii).

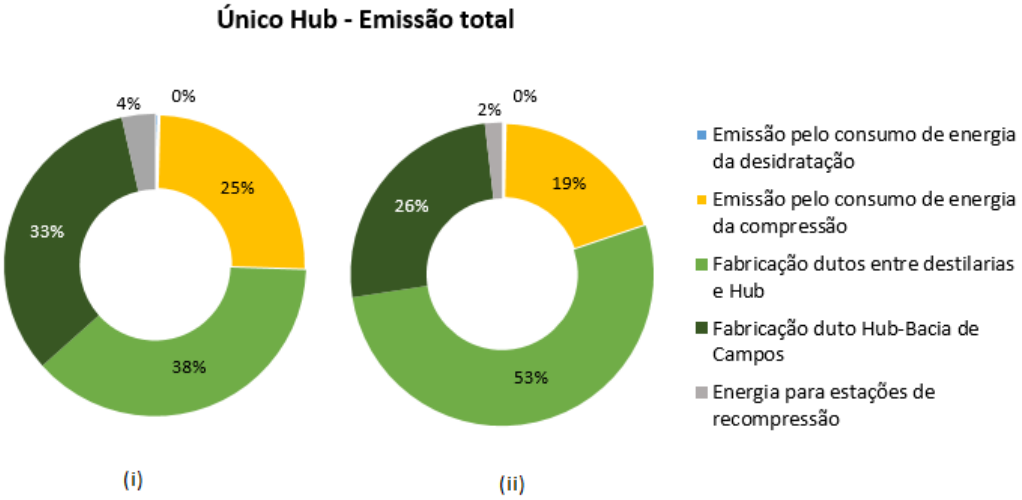

Figura 28: Participação de cada fonte na ACV no caso de único Hub. (i) para dutos compartilhados e (ii) para dutos individuais. Fonte: Elaboração própria

De acordo com a Figura 28, percebe-se que a maior contribuição das emissões do ciclo de vida do estudo de caso 1 (considerando as duas configurações analisadas neste estudo)

se dá pela fabricação dos dutos entre as destilarias e o único Hub, representando 38% e 53% das emissões do ciclo de vida dos dutos compartilhados e individuais, respectivamente. A emissão pela fabricação do duto entre o Hub e a Bacia de Campos é a segunda maior fonte de emissão do ciclo de vida, representando 33% e 26% das emissões dos dutos compartilhados e individuais. Já a emissão pelo consumo energético da compressão na captura ao longo dos 30 anos de projeto representa 25% das emissões da 1ª configuração estudada e 19% da 2ª configuração e a energia consumida pelas estações de recompressão representa 4% das emissões na configuração de dutos compartilhados e 2% na configuração de dutos individuais, enquanto que a desidratação do CO_2 antes da compressão não obteve emissões significativas nos dois casos.

A média para a distância das destilarias ao Hub no caso de um único Hub fazendo o transporte de todo o CO_2 dessas destilarias à Bacia de Campos é de 241 km e a média de emissão calculada para cada destilaria neste caso é de 41,3 tCO_2e/1.000 tCO_2 armazenadas para a configuração de duto compartilhado e 58,8 tCO_2e/1.000 tCO_2 armazenadas para o caso de dutos individuais. Essa média foi calculada considerando toda a metodologia de cálculo demonstrada no Capítulo 4, considerando todas as emissões que ocorreriam em 30 anos (as que ocorreriam apenas uma vez, como a fabricação dos dutos e as periódicas, como o consumo energético da captura e das estações de recompressão) e dividindo pela quantidade de CO_2 produzida pela fermentação de cada destilaria ao longo de 30 anos. Vale ressaltar que para cada destilaria, além da emissão de seu consumo próprio (como o consumo de sua etapa de captura e a fabricação de seu duto individual), também considera a sua fração nas emissões das estações de recompressão e dutos compartilhados (no caso da configuração que assim as considera), como todas as destilarias em ambas as configurações também consideram sua fração de emissão na fabricação do duto que conecta o Hub à Bacia de Campos, de acordo com o cálculo feito com as Equações 12 e 13.

A Figura 29 a seguir mostra a distribuição das médias de emissões das 233 destilarias consideradas neste estudo pela sua distância ao Hub, para o caso de único Hub.

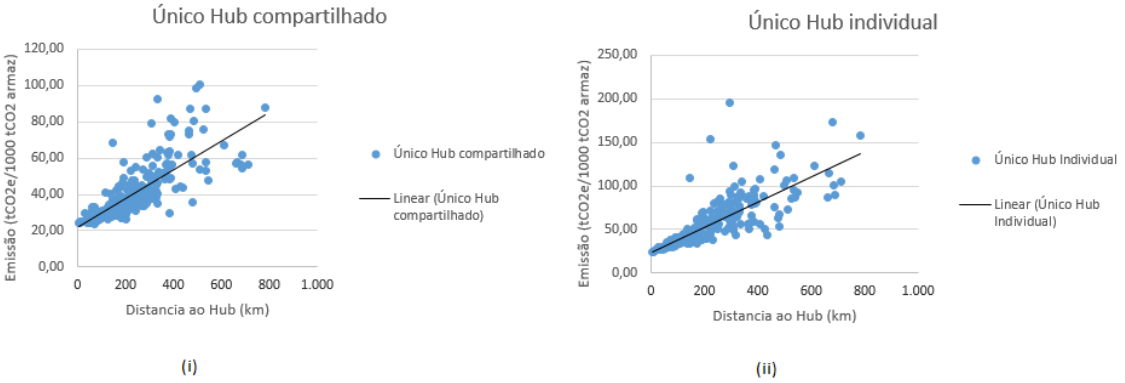

Figura 29: Distribuição da emissão da ACV de cada destilaria pela distância ao Hub no caso de único Hub. (i) para dutos compartilhados e (ii) para dutos individuais. Fonte: Elaboração própria

Pela Figura 29, verifica-se que existe uma grande concentração das destilarias com emissão média menor que 60 $tCO_2e/1.000\ tCO_2$ armazenadas e uma distância menor que 400 km ao Hub nos dois casos. A linha de tendência entre a emissão e distância ao Hub mostra que as grandezas são diretamente proporcionais, ou seja, quanto mais distante do Hub, maior tende a ser a emissão desta destilaria.

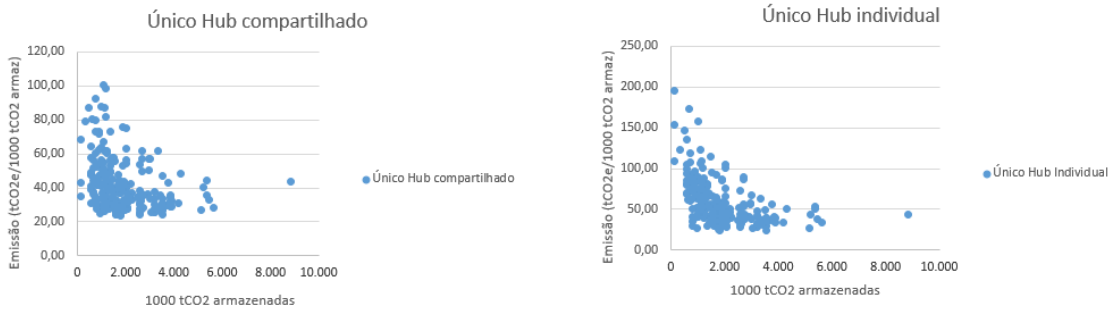

Figura 30: Distribuição da emissão da ACV de cada destilaria pela quantidade de CO_2 produzida por cada destilaria no caso de único Hub. (i) para dutos compartilhados e (ii) para dutos individuais. Fonte: Elaboração própria

Pela Figura 30, percebe-se que existe uma grande concentração das destilarias com emissão média menor que 60 $tCO_2e/1.000\ tCO_2$ armazenadas e produzindo menos de 4 $MtCO_2e$ ao longo dos 30 anos nos dois casos. A distribuição entre a emissão de cada destilaria por quantidade de CO_2 armazenada e a quantidade de CO_2 produzida pela destilaria mostra que as grandezas tendem a ser inversamente proporcionais, ou seja, quanto mais CO_2 a destilaria produz, menor é a sua emissão por tCO_2 armazenado.

O cálculo do saldo de emissão do projeto, calculado pela Equação 32 é de que a quantidade de emissão líquida de armazenamento geológico dos 444,7 $MtCO_2$ produzidos pelas destilarias ao longo de 30 anos de projeto é de 427,4 $MtCO_2$ no caso de dutos compartilhados e de 422,4 $MtCO_2$ para o caso de dutos unitários neste estudo de caso, após se descontar as emissões de GEE de origem fóssil emitida pelo projeto de BIOCCS ao longo do seu ciclo de vida. Essas emissões que ocorreram ao longo do ciclo de vida do projeto correspondem a 3,9% e 5,0% das emissões de CO_2 que foram produzidas pelas destilarias na configuração compartilhada e unitária, respectivamente. Sendo assim, para este estudo de caso, apenas 96,1% e 94,9% das emissões de CO_2 seriam efetivamente armazenadas caso fossem descontadas as emissões para implementação e operação do projeto.

5.1.2. Caso 2 - Destilarias ligadas a um único *Hub* por dutos e caminhões

Para o caso do transporte de CO_2 feito por dutos e caminhões até um único Hub e posteriormente este Hub se conectando à Bacia de Campos, foi elaborada apenas uma análise de configuração (diferente dos demais casos onde foi considerado que os dutos poderiam ser unitários ou compartilhados), considerando que todos os dutos entre as destilarias e o Hub eram unitários. Neste estudo de caso, foi considerado que as 70 destilarias apontadas por SILVA *et al*. (2018) como possuindo os caminhões como melhor opção econômica de transporte ao Hub também fariam neste estudo o seu transporte de CO_2 por este modal, enquanto que as demais destilarias seriam conectadas ao Hub por dutos individuais. A Tabela 17 apresenta as principais características da configuração de transporte calculada para este estudo de caso.

Tabela 17: Características gerais do transporte intermodal

Configurações de Transporte - Caso 2 (Intermodal)		
Duto entre o Hub e a Bacia de Campos		
Parâmetro	**Valor**	**Unidade**
Comprimento do duto	964,53	km
Diâmetro do duto	0,89	m
Quantidade de aço necesária	1.103.025	t
Vazão de CO_2 transportada	856,85	kg CO_2/s
Emissão fabricação do duto	5.735.731	tCO_2e
Quantidade de estações de recompressão	7	unidades
Emissão estações de recompressão	11.785	tCO_2e
Transporte por dutos		
Parâmetro	**Valor**	**Unidade**
Comprimento total dos dutos	27.286	km
Diâmetro dos dutos	variável	m
Quantidade de aço necesária	1.224.262	t
Vazão de CO_2 transportada	variável	kg CO_2/s
Emissão fabricação dos dutos	6.366.164	tCO_2e
Quantidade de estações de recompressão	112	unidades
Emissão estações de recompressão	1.042	tCO_2e
Transporte por caminhões		
Parâmetro	**Valor**	**Unidade**
Percurso total	42.731	km
Quantidade de caminhões	331	unidades
Emissão fabricação dos caminhões	20.989	tCO_2e
Emissão fabricação de pneus	20.545	tCO_2e
Quantidade de tanques intermediários	178	unidades
Emissão fabricação de tanques intermediários	5.799	tCO_2e
Emissão consumo de combustíveis pelo caminh	4.702.804	tCO_2e

* A emissão pelo consumo energético das estações de recompressão e do consumo de combustíveis pelo caminhão consideram 30 anos do projeto

A primeira coluna de resultados da Tabela 18 a seguir apresenta o resultado da análise feita, mostrando a soma das emissões ao longo do ciclo de vida para cada aspecto considerado, enquanto a segunda coluna mostra o resultado da ACV considerando a unidade funcional deste estudo, ou seja, a emissão de todo o projeto por 1.000 tCO_2 armazenadas em 30 anos.

Tabela 18: Resultado da Análise de Ciclo de Vida para o caso intermodal

Emissão Caso 2 - Intermodal		
Emissão de CO_2 disponível no projeto	**Valor**	**Unidade**
Produção de CO_2 das destilarias em 30 anos (tCO_2)	444.757	1000 tCO_2
ACV do projeto	**Emissão em 30 anos (tCO_2e)**	**tCO_2e/1.000 tCO_2 armaz**
Captura		
Emissão pelo consumo de energia da desidratação	72.673	0,16
Emissão pelo consumo de energia da compressão	3.496.438	7,86
Total captura (tCO_2e)	**3.569.111**	**8,02**
Transporte		
Liquefação (destilarias com caminhão)	173.432	0,39
Fabricação dutos entre destilarias e Hub	6.366.164	14,31
Fabricação duto Hub-Bacia de Campos	5.735.731	12,90
Energia para estações de recompressão	334.311	0,75
Fabricação dos caminhões	20.989	0,05
Troca dos pneus	20.545	0,05
Fabricação dos tanques de armazenamento	5.799	0,01
Consumo de combustível	4.702.804	10,57
Total transporte (tCO_2e)	**17.359.776**	**39,03**
TOTAL CAPTURA + TRANSPORTE (tCO_2e)	**20.928.887**	**47,06**

Fonte: Elaboração própria

O total da emissão de captura foi de **8,02 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas.** Ao longo dos 30 anos, essa emissão totalizou 3,6 $MtCO_2e$, considerando a emissão da compressão e da desidratação do CO_2 (com os fatores de consumo indicados no capítulo 4). Esta etapa considera a desidratação do CO_2 para todas as 233 destilarias e a compressão das 163 destilarias consideradas neste estudo, que de acordo com SILVA *et al*. (2018) demonstravam menor custo de transporte ao Hub por dutos. Devido a este fato, a emissão da captura para este caso é menor que o anterior, pois considera o consumo energético da compressão de uma quantidade menor de destilarias. A liquefação e posterior compressão do CO_2 ao Hub das destilarias que fariam o transporte por caminhões foi considerada na etapa de transporte, na categoria "liquefação".

A emissão da desidratação para as 233 destilarias consideradas neste caso de acordo com a ACV é de 0,16 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas e da compressão do CO_2e para a pressão necessária para o transporte nos dutos é de 7,86 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas. A média anual dessas duas emissões é a mesma ao longo de todos os anos, visto que a quantidade de CO_2 produzida nas destilarias pela fermentação que foi considerada neste estudo não

muda ao longo dos anos e ambos os fatores são uma função desta quantidade. Considerando apenas a parte da captura, a compressão foi responsável por 98% das emissões da ACV, enquanto que a desidratação representou apenas 2% das emissões nas duas configurações.

Na parte do transporte, o que foi considerado para o caso do transporte intermodal foi a fabricação dos dutos que ligam as 163 destilarias ao Hub, a fabricação do duto que liga o Hub à Bacia de Campos, o consumo de energia para as estações de recompressão dos dutos, onde se fizesse necessário, além da liquefação e posterior compressão à pressão do Hub para as 70 destilarias que fazem o transporte por caminhões, fabricação dos caminhões, fabricação do pneus utilizados, fabricação dos tanques de armazenamento do CO_2 liquefeito e consumo de combustível pelo transporte dos caminhões.

A fabricação dos dutos e dos tanques de armazenamento se dá apenas uma vez ao longo de todo o ciclo de vida do projeto, visto que seu tempo de vida é de 30 anos, o mesmo do ciclo de vida deste projeto. Já o consumo de energia pelas estações de recompressão, o consumo pela liquefação e compressão do CO_2 dos caminhões e consumo de combustível dos caminhões é periódico ao longo dos 30 anos. O tempo de vida dos caminhões é de 15 anos, então a emissão total referente a esta etapa foi considerada duas vezes no ciclo de vida deste projeto. A troca de pneus foi considerada anual e também considerada periódica ao longo dos 30 anos de vida do projeto.

Para este estudo de caso, seriam necessários 27.286 km de dutos individuais entre as 163 destilarias e o Hub, necessitando de 1,2 Mt de aço carbono na fabricação desses dutos. O número de estações de recompressão necessárias é de 112 estações, emitindo 1.042 tCO_2e anualmente. A fabricação do duto entre o Hub e a Bacia de Campos é a mesma do caso anterior, pois este duto transporta a totalidade do CO_2 produzido, como o caso anterior, e também se encontra na mesma localização.

A emissão ao longo do ciclo de vida da etapa de transportes neste estudo de caso totaliza 17,3 $MtCO_2e$ ao longo dos 30 anos. A emissão deste estudo de caso é de 6,3 $MtCO_2e$ para a construção dos dutos entre as 163 destilarias e o Hub, 5,7 $MtCO_2e$ para a construção do duto entre o Hub e a Bacia de Campos, 0,3 $MtCO_2e$ pelo consumo de energia ao longo dos 30 anos das estações de recompressão, 0,02 $MtCO_2e$ pela fabricação dos caminhões necessários no transporte ao longo dos 30 anos (multiplicando-se a emissão da fabricação dos caminhões necessários no transporte por 2, visto que o tempo de vida útil dos

caminhões é de 15 anos), 0,02 $MtCO_2e$ pela fabricação dos pneus necessários pelo desgaste ao longo dos 30 anos do projeto, 0,005 $MtCO_2e$ pela fabricação dos tanques de armazenamento para estocar o CO_2 liquefeito antes e depois do transporte pelos caminhões (que possuem um tempo de vida útil de 30 anos, sendo construídos apenas uma vez ao longo do projeto), 0,17 $MtCO_2e$ pela liquefação do CO_2 e posteriormente compressão do CO_2 para que atinja a pressão necessária para que seja injetado no Hub (contínuo ao longo dos 30 anos) e 4,7 $MtCO_2e$ pelo consumo de combustível dos caminhões.

Quanto às emissões da ACV calculada neste estudo, as emissões em relação à quantidade de CO_2 armazenada pelo projeto são: 14,31 $tCO_2e/1.000\ tCO_2$ armazenadas para a construção dos dutos entre as 163 destilarias e o Hub; 12,9 $tCO_2e/1.000\ tCO_2$ armazenadas para a construção do duto entre o Hub e a Bacia de Campos; 0,75 $tCO_2e/1.000\ tCO_2$ armazenadas pelo consumo de energia ao longo dos 30 anos das estações de recompressão; 0,05 $tCO_2e/1.000\ tCO_2$ armazenadas pela fabricação dos caminhões necessários no transporte ao longo dos 30 anos; 0,05 $tCO_2e/1.000\ tCO_2$ armazenadas pela fabricação dos pneus necessários pelo desgaste ao longo dos 30 anos do projeto, 0,01 $tCO_2e/1.000\ tCO_2$ armazenadas pela fabricação dos tanques de armazenamento para estocar o CO_2 liquefeito antes e depois do transporte pelos caminhões; 0,39 $tCO_2e/1.000\ tCO_2$ armazenadas pela liquefação do CO_2 e posteriormente compressão do CO_2 transportado por caminhões para que atinja a pressão necessária para que seja injetado no Hub (contínuo ao longo dos 30 anos) e 10,57 $tCO_2e/1.000\ tCO_2$ armazenadas pelo consumo de combustível dos caminhões, totalizando **39,03 $tCO_2e/1.000\ tCO_2$ armazenadas** apenas da etapa do transporte nessa configuração. A contribuição de cada uma destas parcelas em cada caso pode ser vista na Figura 31 a seguir.

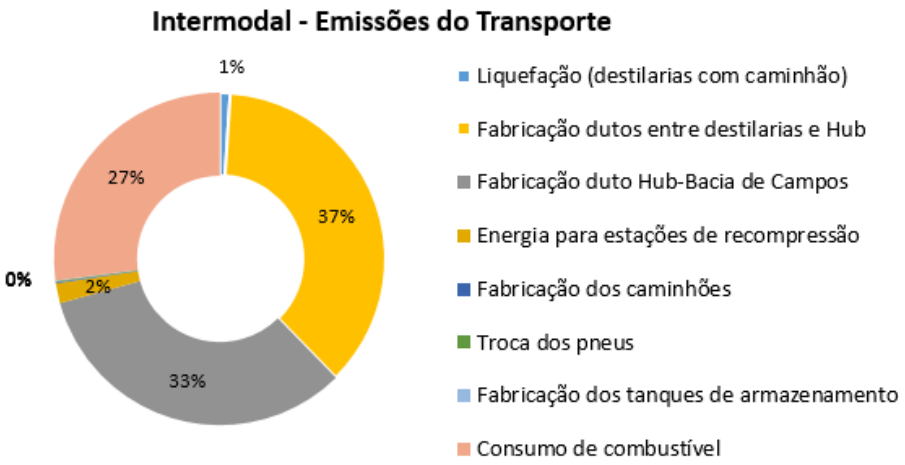

Figura 31: Participação de cada fonte na ACV do transporte no caso intermodal. Fonte: Elaboração própria

Como pode ser visto na Figura 31, a fabricação dos dutos entre as destilarias e o Hub é o maior contribuidor das emissões da etapa de transporte (37%), com cerca de 2/3 das destilarias utilizando esse modal. A segunda maior emissão é a fabricação do duto entre o Hub e a Bacia de Campos, com 33% das emissões, seguido pela emissão do consumo de combustíveis pelos caminhões em 30 anos, com 27% das emissões desta etapa. A emissão pelas estações de recompressão representaram apenas 2% das emissões e a emissão pela liquefação do CO_2 (que também contempla a compressão para compressão do CO_2 liquefeito para a pressão do Hub), representou apenas 1% das emissões do transporte neste estudo de caso. As demais emissões não têm contribuição significante nesta etapa.

As etapas de captura e transporte desse caso somam **47,06 tCO_2e/1.000 tCO_2 armazenadas**, correspondendo a uma emissão de 20,9 $MtCO_2e$ ao longo dos 30 anos. A Figura 32 a seguir mostra que as emissões da etapa de transportes correspondem a 83% das emissões calculadas neste ciclo de vida, enquanto que as emissões de captra representam apenas 17%.

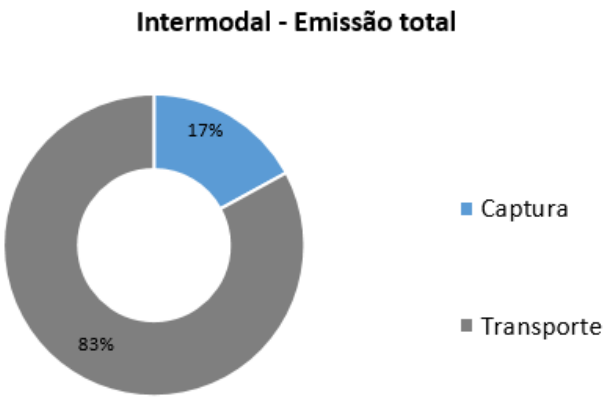

Figura 32: Participação de cada etapa no caso intermodal. Fonte: Elaboração própria

Apenas para efeitos comparativos, foi feita uma simulação considerando que todas as destilarias utilizariam o transporte rodoviário ao único Hub, para que fosse vista a contribuição de cada emissão considerada para este modal, pois no caso intermodal, o peso das emissões rodoviárias e por dutos é diferente, visto que um número bem menor de destilarias faria o transporte rodoviário nesta configuração. Considerando apenas o transporte rodoviário entre as destilarias e o Hub e um duto ligando o Hub à Bacia de Campos em um ciclo de vida de 30 anos, percebe-se que o maior contribuidor seria o consumo de combustível pelos caminhões, com 63% de todas as emissões de transporte ao longo do ciclo de vida, seguido pela fabricação do duto entre o Hub e a Bacia de Campos com 30% das emissões e a liquefação do CO_2 com 5% das emissões do transporte para o caso de apenas transporte rodoviário ligando as destilaras ao Hub. Isso demonstra o peso que as emissões pelo consumo de diesel têm ao longo do ciclo de vida do transporte rodoviário e mesmo sendo mais barato economicamente para algumas destilarias (como mostrou SILVA *et al.*, 2018), não é uma boa escolha quando se considera os impactos nas mudanças climáticas, visto o alto consumo necessário para transportar o CO_2 em caminhões de 30 m^3 ao longo de 30 anos. A contribuição de cada etapa no ciclo de vida do transporte exclusivamente rodoviário pode ser vista na Figura 33 a seguir.

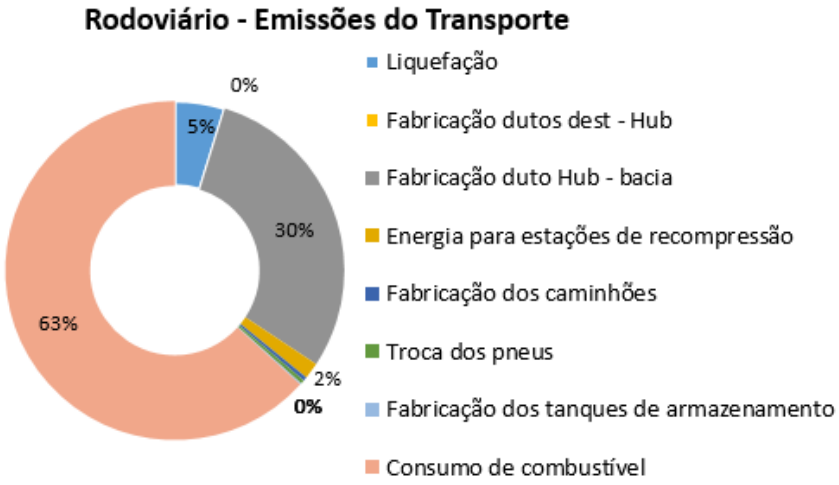

Figura 33: Participação de cada fonte na ACV do transporte considerando apenas o transporte rodoviário. Fonte: Elaboração própria

Considerando todas as emissões da captura e transporte para o caso intermodal, percebe-se que a maior contribuição ainda se dá pela fabricação dos dutos entre as 163 destilarias que utilizam esse modal e o Hub (30% das emissões). A emissão da fabricação do duto que transporta o CO_2 do Hub até a Bacia de Campos é a segunda maior emissão, com 27% do total. O consumo de diesel e biodiesel pelos caminhões no transporte de CO_2 das 70 destilarias consideradas neste estudo ficou com a 3ª maior emissão, representando 23% das mesmas. A energia consumida pela compressão na captura pelas 163 destilarias que utilizam dutos, representou 17% das emissões, enquanto que o consumo de energia das estações de recompressão representou 2% das emissões. A liquefação do CO_2 das 70 destilarias que utilizam o transporte rodoviário representou 1% e a desidratação das 233 destilarias representou uma fração menor 1% das emissões calculadas na ACV. A fabricação dos tanques de armazenamento do CO_2 liquefeito, a fabricação dos caminhões e dos pneus usados em todo o ciclo de vida não representaram emissões significativas nesta análise. A distribuição dessas emissões por fonte também está representada na Figura 34 a seguir.

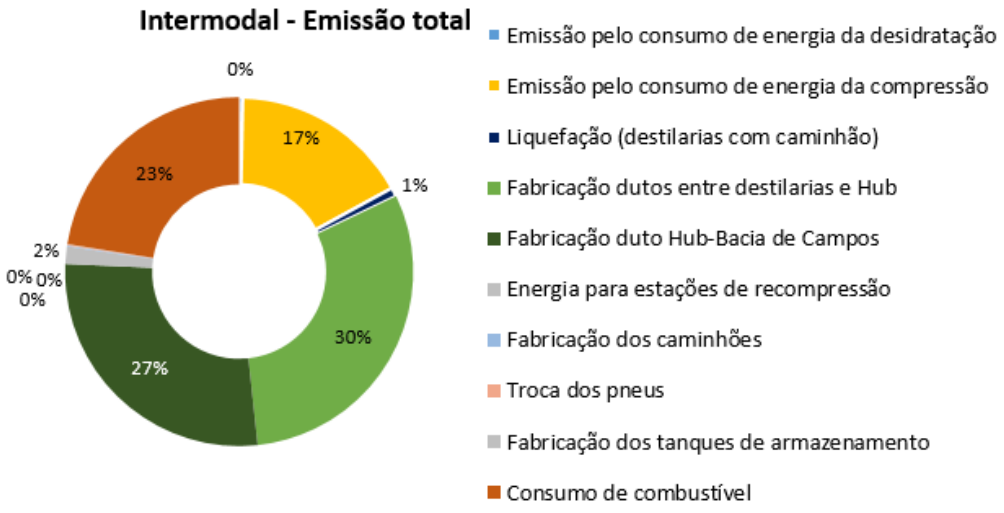

Figura 34*:* Participação de cada fonte na ACV no caso intermodal. Fonte: Elaboração própria

Considerando apenas o transporte rodoviário nesta configuração (como se todas as 233 destilarias transportassem o CO_2 ao Hub por caminhões), a emissão total da etapa de transporte seria de 43,84 tCO_2/1.000 tCO_2 armazenada, sendo que só a etapa do consumo de combustível pelos caminhões é responsável por 27,64 tCO_2/1.000 tCO_2 armazenada. Esse alto resultado é a configuração que apresenta a maior emissão na etapa de transportes dentre todas as opções consideradas, mostrando que o transporte de CO_2 em larga escala por caminhões realmente não é uma boa opção.

A média para a distância das destilarias ao Hub no caso de um único Hub é de 241 km e a média de emissão anual calculada para cada destilaria no caso intermodal considerado é de 58,8 tCO_2e/1.000 tCO_2 armazenadas. Essa média foi calculada considerando toda a metodologia de cálculo demonstrada no Capítulo 4, considerando todas as emissões que ocorreriam em 30 anos (as que ocorreriam apenas uma vez, como a fabricação dos dutos e tanques de armazenamento, as que aconteceriam 2 vezes nesses 30 anos, como o caso da fabricação dos caminhões e as periódicas, como o consumo energético da captura, das estações de recompressão, consumo de combustível pelos caminhões, troca de pneus e liquefação do CO_2) e dividindo pela quantidade de CO_2 produzida por cada destilaria ao longo dos 30 anos do projeto. Vale ressaltar que para cada destilaria, além da emissão de seu consumo próprio (como o consumo de sua etapa de captura e a fabricação de seu duto individual), também considera a sua fração nas emissões das estações de recompressão e sua fração de emissão na fabricação do duto que conecta o Hub à Bacia de Campos, de acordo com o cálculo feito com as equações 28 e 29. Apenas para uma análise

comparativa, a configuração estudada com todas as destilarias utilizando o transporte rodoviário a um único duto tiveram uma emissão média de 67,84 tCO_2e/1.000 tCO_2 armazenadas, um valor bem elevado que fez com que esse modal fosse a melhor opção apenas para uma das 233 destilarias consideradas neste estudo.

A Figura 35 a seguir mostra a distribuição das médias anuais das 233 destilarias consideradas neste estudo pela sua distância ao Hub.

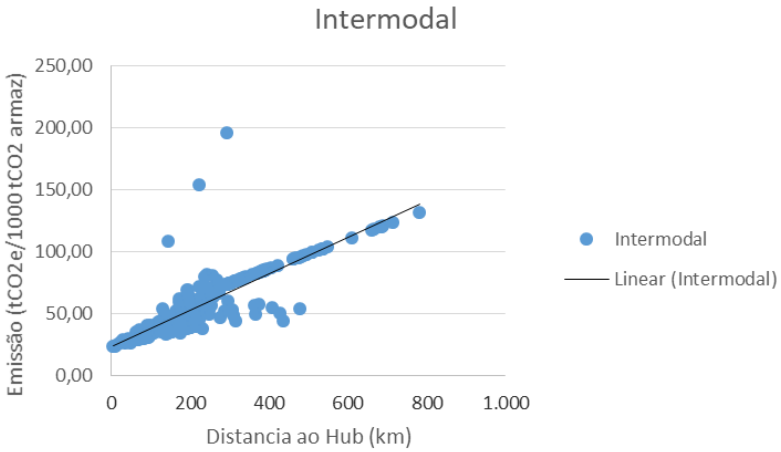

Figura 35: Distribuição da emissão de cada destilaria pela distância ao Hub no intermodal. Fonte: Elaboração própria

Pela Figura 35, percebe-se grande parte das destilarias seguem uma linha de tendência linear, com suas emissões em uma linha visivelmente crescente com a distância.

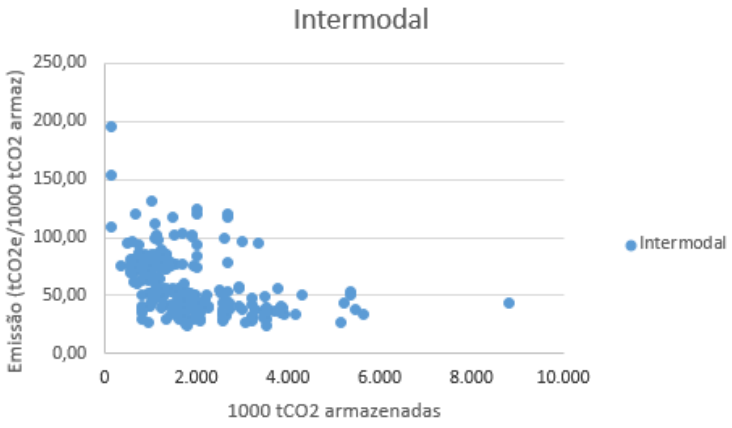

Figura 36: Distribuição da emissão de cada destilaria pela quantidade de CO_2 armazenada no projeto no intermodal. Fonte: Elaboração própria

Pela Figura 36, percebe-se que existe uma grande concentração das destilarias com emissão média menor que 100 $tCO_2e/1.000\ tCO_2$ armazenadas e produzindo menos de 4 $MtCO_2e$ ao longo dos 30 anos. A distribuição entre a emissão de cada destilaria por quantidade de CO_2 armazenada e a quantidade de CO_2 produzida pela destilaria mostra que as grandezas tendem a ser inversamente proporcionais, ou seja, quanto mais CO_2 a destilaria produz, menor é a sua emissão por tCO_2 armazenado.

O cálculo resultante da Equação 32 é de que a quantidade de emissão efetivamente disponível para armazenamento geológico dos 444,7 $MtCO_2$ produzidos pelas destilarias ao longo de 30 anos de projeto é de 423,8 $MtCO_2$, após se descontar as emissões de GEE de origem fóssil emitida pelo projeto de BIOCCS neste estudo de caso, ao longo do seu ciclo de vida. Essas emissões que ocorreram ao longo do ciclo de vida do projeto correspondem a 4,71% das emissões de CO_2 que foram produzidas pelas destilarias neste estudo de caso. Sendo assim, para este estudo de caso, apenas 95,29% das emissões de CO_2 seriam efetivamente armazenadas caso fossem descontadas as emissões para implementação e operação do projeto.

5.1.3. Caso 3 - Destilarias ligadas a múltiplos *Hubs* por dutos

Para o caso do transporte de CO_2 das destilarias por dutos até múltiplos Hubs e um grande duto conectando o último Hub à Bacia de Campos, foram feitos dois cálculos da ACV deste caso: um considerando que os dutos coincidentes na análise espacial feita em SILVA *et al*. (2018) eram compartilhados pelas destilarias (como também foi considerado para o caso de único Hub) e outra configuração considerando que cada destilaria tinha seu duto independente conectado a um dos 8 Hubs, como havia sido considerado também em SILVA *et al*. (2018). As Tabelas 19 e 20 apresentam as principais características da configuração de transporte calculada para este estudo de caso.

Tabela 19: Características gerais da configuração de múltiplos hubs – dutos de grande capacidade

Configurações de Transporte - Caso 3 (Múltiplos Hubs)									
Duto entre Hubs e entre Hub e a Bacia de Campos									
Parâmetro	Hub 1 -2	Hub 2-7	Hub 3-4	Hub 4-6	Hub 5-6	Hub 6-8	Hub 7-8	Hub 8-BC	Unidade
Comprimento do duto	335,01	401,16	284,55	225,65	222,28	229,07	187,2	734,40	km
Diâmetro do duto	0,22	0,40	0,32	0,41	0,47	0,63	0,63	0,89	m
Quantidade de aço necesária	96.760	204.594	116.815	119.244	133.282	185.900	150.976	839.851	t
Vazão de CO_2 transportada	27,47	113,81	66,16	124,37	170,57	363,50	357,88	856,85	kg CO_2/s
Emissão fabricação do duto	503.152	1.063.889	607.436	620.067	693.067	966.679	785.075	4.367.226	tCO_2e
Quantidade de estações de recompr	2	2	1	1	1	1	1	4	unidades
Emissão estações de recompressão	3.234	13.400	3.895	7.322	9.952	17.615	19.452	202.213	tCO_2e

Tabela 20: Características gerais da configuração de múltiplos hubs – dutos entre destilarias e Hubs

Configurações de Transporte - Caso 3 (Múltiplos Hubs)		
Dutos entre destilarias e Hub - compartilhados		
Parâmetro	Valor	Unidade
Comprimento total dos dutos	13.650	km
Diâmetro dos dutos	variável	m
Quantidade de aço necesária	618.396	t
Vazão de CO_2 transportada	variável	kg CO_2/s
Emissão fabricação dos dutos	3.215.662	tCO_2e
Quantidade de estações de recompr	14	unidades
Emissão estações de recompressão	11.853	tCO_2e
Dutos entre destilarias e Hub - unitários		
Parâmetro	Valor	Unidade
Comprimento total dos dutos	19.714	km
Diâmetro dos dutos	variável	m
Quantidade de aço necesária	786.955	t
Vazão de CO_2 transportada	variável	kg CO_2/s
Emissão fabricação dos dutos	4.092.167	tCO_2e
Quantidade de estações de recompr	21	unidades
Emissão estações de recompressão	3.276	tCO_2e

* A emissão pelo consumo energético das estações de recompressão consideram 30 anos do projeto

As Tabelas 21 e 22 apresentam os principais resultados para cada uma dessas configurações deste caso. A primeira coluna de resultados mostra a soma das emissões ao longo do ciclo de vida para cada aspecto considerado, enquanto a segunda coluna mostra o resultado da ACV considerando a unidade funcional deste estudo, ou seja, a emissão de todo o projeto por 1.000 tCO_2 armazenadas em 30 anos.

Tabela 21: Resultado da Análise de Ciclo de Vida para a configuração de dutos compartilhados para o caso de múltiplos Hubs

Emissão Caso 3 - Múltiplos Hubs compartilhados		
Emissão de CO_2 disponível no projeto	**Valor**	**Unidade**
Produção de CO_2 das destilarias em 30 anos (tCO_2)	444.757	1000 tCO_2
ACV do projeto	**Emissão em 30 anos (tCO_2e)**	**tCO_2e/1.000 tCO_2 armaz**
Captura		
Emissão pelo consumo de energia da desidratação	72.673	0,16
Emissão pelo consumo de energia da compressão	4.360.393	9,80
Total captura (tCO_2e)	**4.433.066**	**9,97**
Transporte		
Fabricação dutos entre destilarias e Hub	3.215.662	7,23
Fabricação duto entre Hubs e Hub-Bacia de Campos	9.348.913	21,02
Energia para estações de recompressão	294.246	0,66
Total transporte (tCO_2e)	**12.858.820**	**28,91**
TOTAL CAPTURA + TRANSPORTE (tCO_2e)	**17.291.887**	**38,88**

Fonte: Elaboração própria

Tabela 22: Resultado da Análise de Ciclo de Vida para a configuração de dutos individuais para o caso de múltiplos Hubs

Emissão Caso 3 - Múltiplos Hubs individuais		
Emissão de CO_2 disponível no projeto	**Valor**	**Unidade**
Produção de CO_2 das destilarias em 30 anos (tCO_2)	444.757	1000 tCO_2
ACV do projeto	**Emissão em 30 anos (tCO_2e)**	**tCO_2e/1.000 tCO_2 armaz**
Captura		
Emissão pelo consumo de energia da desidratação	72.673	0,16
Emissão pelo consumo de energia da compressão	4.360.393	9,80
Total captura (tCO_2e)	**4.433.066**	**9,97**
Transporte		
Fabricação dutos entre destilarias e Hub	4.092.167	9,20
Fabricação duto entre Hubs e Hub-Bacia de Campos	9.348.913	21,02
Energia para estações de recompressão	285.668	0,64
Total transporte (tCO_2e)	**13.726.749**	**30,86**
TOTAL CAPTURA + TRANSPORTE (tCO_2e)	**18.159.815**	**40,83**

Fonte: Elaboração própria

A etapa da captura teve a mesma emissão nas duas configurações, pois não houve modificações nesta etapa de um caso para outro. O total da emissão de captura foi de **9,97 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas.** Ao longo dos 30 anos, a emissão total de captura foi de 4,4 $MtCO_2e$ considerando a emissão da compressão e da desidratação do CO_2 (com os fatores de consumo indicados no capítulo 4).

A emissão da desidratação para as 233 destilarias consideradas neste caso de acordo com a ACV é de 0,16 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas e da compressão do CO_2e para a pressão necessária para o transporte nos dutos é de 9,8 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas. A média anual dessas duas emissões é a mesma ao longo de todos os anos, visto que a quantidade de CO_2 produzida nas destilarias pela fermentação que foi considerada neste estudo não muda ao longo dos anos e ambos os fatores são uma função desta quantidade. Considerando apenas a parte da captura, a compressão foi responsável por 98% das emissões da ACV, enquanto que a desidratação representou apenas 2% das emissões nas duas configurações. Esses resultados são os mesmos dos obtidos para as duas configurações consideradas no caso de único Hub também.

Na parte do transporte, o que foi considerado neste caso foi a fabricação dos dutos que ligam as destilarias ao Hub, a fabricação do duto que liga o Hub à Bacia de Campos, a fabricação dos dutos que conectam os Hubs e o consumo de energia para as estações de recompressão dos dutos a cada 150 km de cada trecho, onde se fizesse necessário. A fabricação dos dutos se dá apenas uma vez ao longo de todo o ciclo de vida do projeto, enquanto que o consumo de energia pelas estações de recompressão ocorre ao longo dos 30 anos. Para este estudo de caso, a configuração que considera dutos compartilhados necessitou de 13.650 km de dutos entre as destilarias e os oito Hubs, enquanto que a configuração de dutos unitários necessitava de 19.714 km desses dutos. Essa redução de quilometragem de dutos que a configuração compartilhada possibilita, além de necessitar de menos aço para a fabricação dos dutos (6,2 Mt de aço carbono necessários nos dutos compartilhados contra 7,9 Mt de aço carbono para os dutos individuais) e emitir menos GEE nesta etapa, também são necessárias menos estações de recompressão, visto que alguns dutos grandes individuais que necessitavam recompressão em cada um podem passar a compartilhar a mesma estação em um duto compartilhado que transporta a vazão somada das destilarias a montante.

A quantidade de estações de recompressão necessárias é menor do que para o caso um de único Hub: são necessárias 14 estações para os dutos compartilhados e 21 estações nos

dutos individuais. Apesar de nesse estudo de caso a configuração de dutos compartilhados necessitar de uma quantidade de estações menor do que a configuração de dutos individuais, a emissão referente ao consumo energético dos compressores é maior no caso compartilhado. Isso é explicado pelo fato de que o fator de consumo de energia das estações de recompressão é uma função da quantidade de CO_2 transportado no duto e a configuração de dutos compartilhados permite a um maior transporte de CO_2 pelos dutos, aumentando a vazão do CO_2 que passa pelas estações e seu consumo de energia.

A emissão dos dutos calculada neste estudo é uma função basicamente do seu material, da espessura e do seu diâmetro. A emissão pela fabricação do duto entre o Hub e a Bacia de Campos e para os dutos entre os Hubs em relação à quilometragem calculada nesta configuração é de 3.569,21 tCO_2/km construído, uma emissão relativamente alta, já que esses Hubs possuem a maior espessura considerada, os maiores diâmetros e transportam o CO_2 de todo o cluster correspondente ao Hub e no caso do hub a bacia de campos, transportam o CO_2 de todo o projeto. Já a fabricação dos dutos entre as destilarias e os Hubs, que apresentam a menor espessura e diâmetros bem menores, já que transportam fluxos de uma ou algumas destilarias apenas em cada duto (na configuração compartilhada), é de 235,6 tCO_2e/km no caso compartilhado e 207,6 tCO_2e/km no caso individual. Essa menor emissão dos dutos individuais pode ser explicada pelo mesmo motivo do menor consumo das estações de recompressão, já que cada duto individual transporta um fluxo menor de CO_2 que os compartilhados, reduzindo o diâmetro dessa seção e consequentemente, diminuindo a quantidade de aço necessária para a produção do duto e também sua emissão associada.

O compartilhamento de dutos feito neste estudo seguiu o resultado apresentado por SILVA *et al*. (2018), que apresentou os dutos individuais das destilarias consideradas até o Hub e como o presente estudo faz uma análise de consumo energético e de emissões, optou-se por considerar essa opção para também apresentar uma análise de sensibilidade desses resultados, mas não foi feita uma análise da melhor forma de compartilhamento dos dutos, visto que isto foge do escopo deste estudo. Mas mesmo com um maior consumo por unidade de estação de recompressão dos dutos compartilhados, esta configuração ainda apresenta menor emissão da etapa de transporte do que a configuração dos dutos individuais, onde a emissão pela fabricação desses dutos compensa o aumento do consumo das estações da outra. A configuração compartilhada possibilitou uma redução de emissão de 21,4% nas emissões pela fabricação dos dutos entre as destilarias

e os Hubs, reduzindo também em 6,3% as emissões da etapa de transporte em comparação com a configuração de dutos unitários neste estudo de caso.

A emissão ao longo do ciclo de vida da etapa de transportes para a configuração de dutos compartilhados é de **28,91 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenada**s, totalizando 12,8 $MtCO_2e$ ao longo dos 30 anos. A construção dos dutos entre a destilaria e o Hub teve uma emissão de 7,23 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas, totalizando 3,2 $MtCO_2e$ no ciclo de vida do projeto. A construção dos dutos entre o Hub e a Bacia de Campos e os dutos entre os Hubs tiveram uma emissão de 21,02 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas, totalizando 9,3 $MtCO_2e$. Já a emissão referente ao consumo de energia pelas estações de recompressão foi de 0,66 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas, totalizando 0,3 $MtCO_2e$ pelo consumo de energia ao longo dos 30 anos por estas estações.

Para a configuração de dutos individuais, a emissão ao longo do ciclo de vida da etapa de transportes é de **30,86 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenada**s, totalizando 13,7 $MtCO_2e$ ao longo dos 30 anos. A construção dos dutos entre a destilaria e o Hub teve uma emissão de 9,20 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas, totalizando 4,1 $MtCO_2e$ no ciclo de vida do projeto. A construção dos dutos entre o Hub e a Bacia de Campos e dos dutos entre os Hubs tiveram uma emissão de 21,6 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas, totalizando 9,3 $MtCO_2e$ (como na configuração de dutos compartilhados, já que estes dutos não se modificaram na configuração compartilhada e individual). Já a emissão referente ao consumo de energia pelas estações de recompressão foi de 0,64 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas, totalizando 0,3 $MtCO_2e$ pelo consumo de energia ao longo dos 30 anos por estas estações. A configuração de dutos compartilhados permitiu uma redução de 6,3% das emissões totais do transporte quando comparada às emissões dos dutos individuais neste estudo de caso. A contribuição de cada uma destas parcelas em cada caso pode ser vista na Figura 37 a seguir.

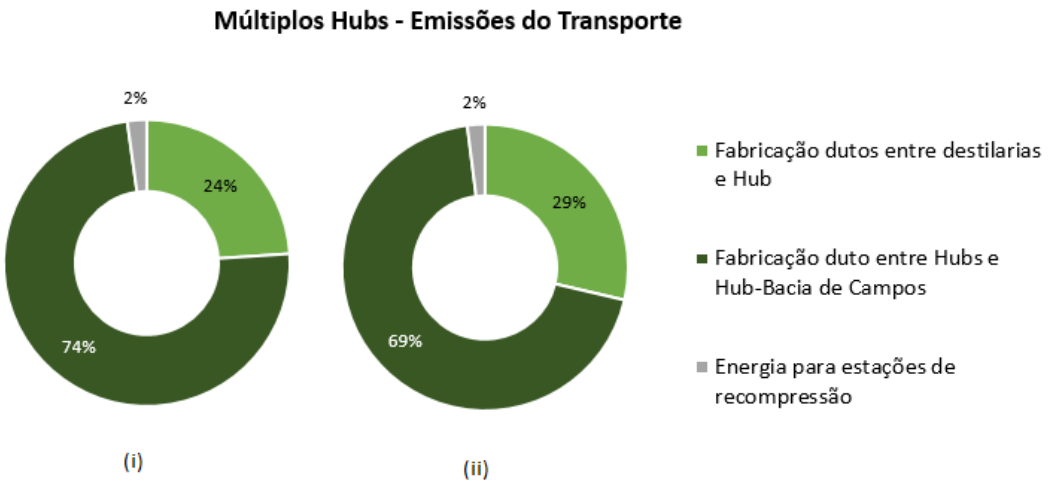

Figura 37: Participação de cada fonte na ACV do transporte no caso de múltiplos Hubs. (i) para dutos compartilhados e (ii) para dutos individuais. Fonte: Elaboração própria

Considerando as etapas de captura e transporte somadas, a configuração de dutos compartilhados somou **38,88 $tCO_2e/1000\ tCO_2$ armazenada**s, totalizando 17,3 $MtCO_2e$ em seu ciclo de vida, enquanto que a configuração de dutos individuais somou **40,83 $tCO_2e/1000\ tCO_2$ armazenada**s, totalizando 18,1 $MtCO_2e$. A configuração de múltiplos Hubs com dutos compartilhados foi a que apresentou menor emissão dentre todos os estudos de caso considerados. O múltiplo Hub com dutos individuais, como havia sido considerado em SILVA *et al*. (2018) ficou em terceiro lugar, logo atrás da configuração de único hub com dutos compartilhados, analisados no presente estudo.

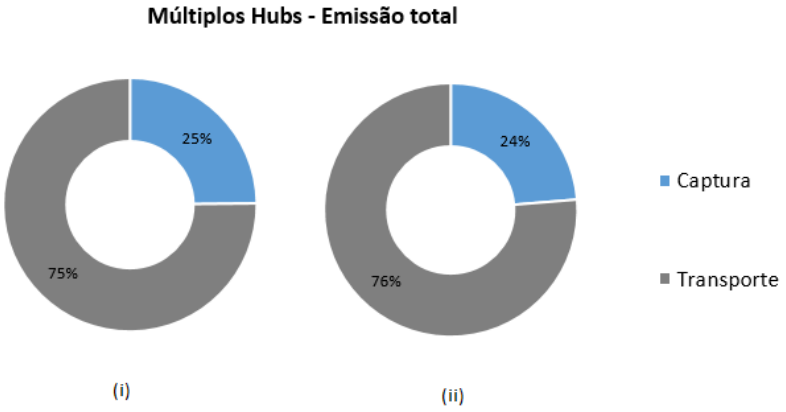

Figura 38: Participação de cada etapa no caso de múltiplos Hubs. (i) para dutos compartilhados e (ii) para dutos individuais. Fonte: Elaboração própria

Comparando todas as emissões de cada caso, percebe-se que a maior contribuição se dá, nas duas configurações, pela fabricação dos dutos de maior capacidade do sistema, que são os dutos entre Hubs e o duto entre o último Hub e a Bacia de Campos, com 54% das emissões totais no caso compartilhado e 52% das emissões no caso de dutos individuais. Isso se dá pelo fato de que esses dutos transportam grandes quantidades de CO_2 e, portanto, possuem uma espessura maior (como foi indicado pelo cálculo da Equação 6), aumentando significativamente a quantidade de aço necessária para os dutos. A segunda maior contribuição neste estudo de caso foi pelo consumo energético da compressão dos CO_2 para a pressão necessária ao transporte nos dutos, representando 25% e 24% das emissões do ciclo de vida dos dutos compartilhados e individuais, respectivamente. A terceira maior contribuição das emissões é da fabricação dos dutos entre as destilarias e os Hubs, que representam 19% e 22% das emissões nos dois casos, para dutos compartilhados e individuaisJá a energia consumida pelas estações de recompressão representa 2% das emissões nas duas configurações, enquanto que a desidratação do CO_2 antes da compressão obteve a menor contribuição das emissões nos dois casos, representando menos do que 1% das emissões. A distribuição das emissões por fonte nas duas configurações também está representada na Figura 39 a seguir.

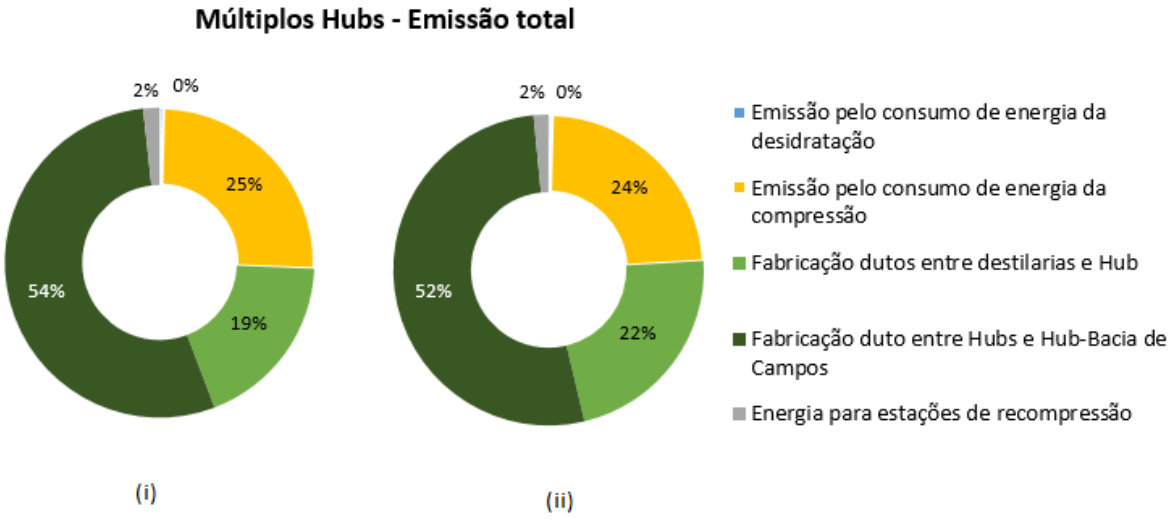

Figura 39: Participação de cada fonte na ACV no caso intermodal. Fonte: Elaboração própria

A média para a distância das destilarias a algum Hub no caso de múltiplos Hubs é de 84 km (quase 3 vezes menor que a distância média no caso de único Hub) e a média de

emissão calculada para cada destilaria (considerando apenas as etapas de captura e transporte) é de 37,5tCO_2e/1.000 tCO_2 armazenadas para a configuração de duto compartilhado e 42,5 tCO_2e/1.000 tCO_2 armazenadas para o caso de dutos individuais. Essa média foi calculada considerando toda a metodologia de cálculo demonstrada no Capítulo 4, considerando todas as emissões que ocorreriam em 30 anos (as que ocorreriam apenas uma vez, como a fabricação dos dutos e as periódicas, como o consumo energético da captura e das estações de recompressão) e dividindo pela quantidade total de CO_2 produzido por cada destilaria ao longo de 30 anos. Vale ressaltar que essa média de cada destilaria, além da emissão de seu consumo próprio (como o consumo de sua etapa de captura e a fabricação de seu duto individual), também considera a sua fração nas emissões das estações de recompressão e dutos compartilhados (no caso da configuração que assim as considera, incluindo o compartilhamento dos dutos entre Hubs por onde o fluxo de cada destilaria passa), como todas as destilarias em ambas as configurações também consideram sua fração de emissão na fabricação do duto que conecta o Hub à Bacia de Campos, de acordo com o cálculo feito com as equações 30 e 31.

A Figura 40 a seguir mostra a distribuição das médias anuais das 233 destilarias consideradas neste estudo pela sua distância a um dos Hub.

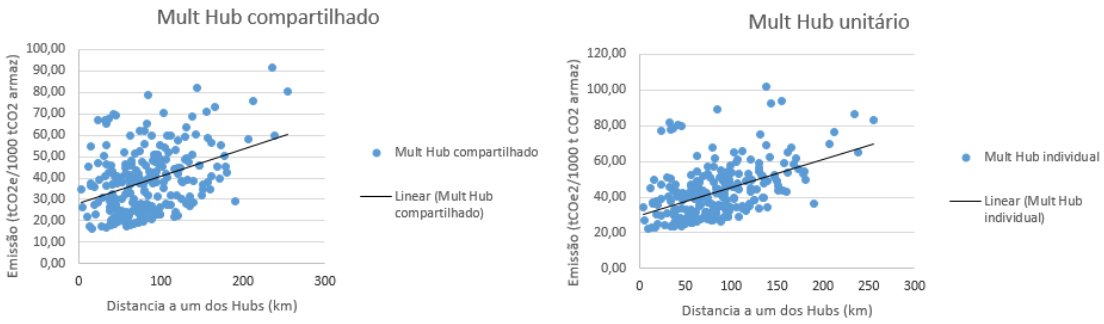

Figura 40: Distribuição da média de emissão anual de cada destilaria pela distância a um dos Hubs no caso de múltiplos Hubs. (i) para dutos compartilhados e (ii) para dutos individuais. Fonte: Elaboração própria

Pela Figura 40, percebe-se que existe uma grande concentração das destilarias com emissão média menor que 50 tCO_2e/1.000 tCO_2 armazenadas e uma distância menor que 200 km ao Hub nos dois casos. A linha de tendência entre a emissão e distância a um dos Hubs mostra que as grandezas são diretamente proporcionais, ou seja, quanto mais distante de algum Hub, maior tende a ser a emissão desta destilaria.

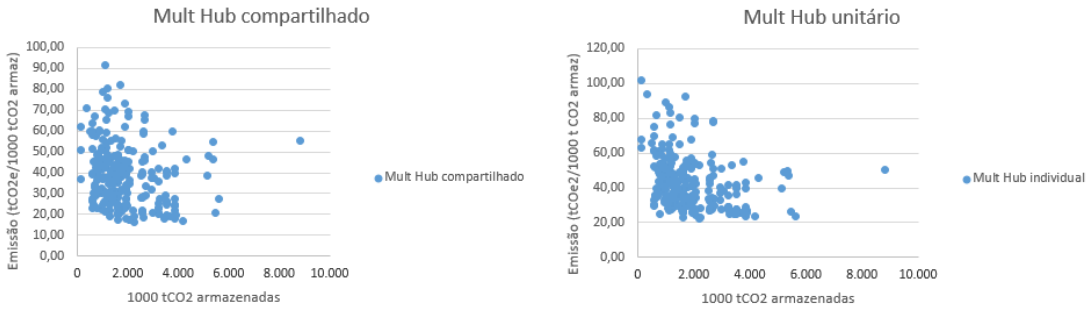

Figura 41: Distribuição da emissão da ACV de cada destilaria pela quantidade de CO_2 produzida por cada destilaria no caso de múltiplos Hub. (i) para dutos compartilhados e (ii) para dutos individuais. Fonte: Elaboração própria

Pela Figura 41, percebe-se que existe uma grande concentração das destilarias com emissão média menor que 50 tCO_2e/1.000 tCO_2 armazenadas e produzindo menos de 4 $MtCO_2e$ ao longo dos 30 anos nos dois casos. A distribuição da emissão de cada destilaria por quantidade de CO_2 armazenada e a quantidade de CO_2 produzida pela destilaria mostra que as grandezas tendem a ser inversamente proporcionais, ou seja, quanto mais CO_2 a destilaria produz, menor tende a ser a sua emissão por tCO_2 armazenado.

O cálculo resultante da Equação 32 é de que a quantidade de emissão efetivamente disponível para armazenamento geológico dos 444,7 $MtCO_2$ produzidos pelas destilarias ao longo de 30 anos de projeto é de 427,5 $MtCO_2$ no caso de dutos compartilhados e de 426,3 $MtCO_2$ para o caso de dutos unitários neste estudo de caso, após se descontar as emissões de GEE de origem fóssil emitida pelo projeto de BIOCCS ao longo do seu ciclo de vida. Essas emissões que ocorreram ao longo do ciclo de vida do projeto correspondem a 3,9% e 4,1% das emissões de CO_2 que foram produzidas pelas destilarias na configuração compartilhada e unitária, respectivamente. Sendo assim, para este estudo de caso, apenas 96,1% e 95,9% das emissões de CO_2 seriam efetivamente armazenadas caso fossem descontadas as emissões para implementação e operação do projeto.

A Tabela 23 seguir apresenta o resumo dos resultados obtidos nos três estudos de caso.

Tabela 23: Quadro resumo dos resultados da ACV das três configurações

Emissões da Análise de Ciclo de Vida do Projeto (tCO_2e/1.000 tCO_2 armazenadas)					
Emissão no ciclo de vida do projeto	Único Hub		Intermodal	Múltiplos Hubs	
	Compartilhado	Individual	individual	Compartilhado	Individual
Emissão pelo consumo de energia da desidratação	0,16		0,16	0,16	
Emissão pelo consumo de energia da compressão	9,80		7,86	9,80	
Total Captura	**9,97**		**8,02**	**9,97**	
Fabricação dutos entre destilarias e Hub	14,79	26,57	14,31	7,23	9,20
Fabricação duto Hub-Bacia de Campos	12,90		12,90	21,02	
Energia para estações de recompressão	1,39	0,92	0,75	0,66	0,64
Liquefação (destilarias com caminhão)	0	0	0,39	0	0
Fabricação dos caminhões	0	0	0,05	0	0
Troca dos pneus	0	0	0,05	0	0
Fabricação dos tanques de armazenamento	0	0	0,01	0	0
Consumo de combustível	0	0	10,57	0	0
Compressão para Hub	0	0	0	0	0
Total Transporte	**29,08**	**40,38**	**39,03**	**28,91**	**30,86**
Emissão total da ACV do projeto	**39,04**	**50,35**	**47,06**	**38,88**	**40,83**

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 23 resume os principais resultados da análise de ciclo de vida desenvolvida neste estudo. Percebe-se que a etapa de transportes é o principal emissor em todas as cinco configurações de transporte consideradas. A configuração de múltiplos Hubs com dutos compartilhados se mostrou a melhor opção quando se considera as emissões do projeto ao longo de seu ciclo de vida (38,88 tCO_2 / 1000 tCO_2e armazenadas), seguido pelo único Hub com dutos compartilhados (39,04 tCO_2 / 1000 tCO_2e armazenadas), múltiplos Hubs com dutos individuais (40,83 tCO_2 / 1000 tCO_2e armazenadas), transporte intermodal (47,06 tCO_2 / 1000 tCO_2e armazenadas) e único Hub com dutos individuais 50,35 (tCO_2 / 1000 tCO_2e armazenadas).

Quando se considera apenas as configurações de dutos individuais, como havia sido desenvolvido no trabalho de SILVA *et al*. (2018), a análise econômica desenvolvida pelos autores desse estudo é similar ao resultado pelo ponto de vista das emissões analisado no presente estudo, onde a opção com menor custo de abatimento apontada por SILVA *et al*. (2018) era a configuração de múltiplos Hubs com dutos individuais, seguido pelo transporte intermodal e por último, a configuração de dutos individuais com único Hub. Contudo, quando o presente estudo analisou os dutos com a possibilidade de compartilhamento dos trechos coincidentes, o único Hub com dutos compartilhados tinha melhores resultados até que a configuração de múltiplos Hubs com dutos individuais, ficando atrás somente da configuração de dutos compartilhados com múltiplos Hubs. Isso se explica pela grande redução de material necessário para construir os dutos na consiguração compartilhada de único Hub, já que neste estudo de caso, a média das

distâncias entre as destilarias e o único Hub é elevada e o compartilhamento de Hubs permitiu uma redução de 56,7% da quilometragem de duto necessária neste estudo de caso, reduzindo cerca de 51% das emissões pela fabricação de dutos entre as destilarias e o único Hub.

A seguir, serão apresentados os resultados das emissões de cada destilaria considerada neste estudo para cada estudo de caso estudado e considerando também uma opção de que todas as destilarias utilizassem o transporte por caminhões até o único Hub apenas para avaliação deste modal para cada destilaria, já que seu estudo de caso não foi considerado. A cor verde mostra a configuração com menor emissão para aquela destilaria, a cor amarela representa as configurações com emissão intermediária e a cor vermelha mostra a opção com maior emissão para cada destilaria. As destilarias marcadas em azul são aquelas que o estudo de SILVA *et al*. (2018) indicou que era melhor economicamente que seu transporte fosse feito por caminhões.

Tabela 24: Emissão por 1.000 tCO_2 armazenadas para cada destilaria e cada caso considerado

Destilaria	CO_2 produzido em 30 anos (1.000 tCO_2)	Dist Mult hub (km)	Dist Único hub (km)	Emissão (tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas)					
				Mult Hub comp	Mult Hub unitario	Único Hub comp	Único Hub unitario	Intermodal	Apenas Rodoviário
Abengoa - São João	1.928	120	303	31,26	34,12	41,01	58,99	75,18	75,18
Abengoa - São Luiz	643	67	257	29,80	35,23	36,74	81,33	81,33	69,78
Adecoagro - Angélica	3.781	89	409	59,29	54,66	43,41	55,52	55,52	87,68
Água Bonita	1.125	45	204	29,68	32,67	26,62	56,43	56,43	63,43
Alcídia	1.558	93	315	47,09	47,49	55,96	65,35	76,59	76,59
Alcoeste	1.607	93	88	40,53	45,50	30,14	35,03	35,03	49,61
Alcoolvale	1.197	130	188	48,08	53,44	46,39	52,76	52,76	61,51
Alta Mogiana	3.534	57	201	18,76	24,96	30,65	39,96	39,96	63,02
Alta Paulista	1.109	91	170	41,86	48,10	31,01	51,22	51,22	59,43
Alta Paulista - Dracena	1.607	116	183	43,58	48,41	29,91	47,42	47,42	60,91
Alto Alegre - Floresta	1.125	98	166	45,98	49,10	33,45	50,35	50,35	58,95
Alto Alegre - Florestópolis	1.472	98	241	47,53	48,58	34,62	56,60	56,60	67,78
Alto Alegre - Junqueira	1.717	44	295	40,32	40,64	44,13	60,41	60,41	74,21
Alto Alegre - Santo Inácio	1.717	63	247	40,82	43,05	43,47	54,45	54,45	68,55
Alvorada do Bebedouro	660	169	297	44,88	57,51	52,10	89,22	74,50	74,50
Americana	785	68	268	39,05	38,96	45,46	77,01	77,01	70,99
Andrade	4.177	33	137	16,47	22,79	31,29	33,64	33,64	55,41
Anicuns	1.511	161	533	55,72	64,58	60,06	95,46	102,44	102,44
Antônio Ruette - Cachoeira	1.607	49	93	18,95	26,65	26,08	35,68	35,68	50,20
Antônio Ruette - Monterey	1.767	95	12	42,25	44,98	25,10	25,12	25,12	40,66
Aralco	803	24	61	38,33	38,14	33,25	35,61	35,61	46,55
Araporã	1.169	105	293	53,68	59,33	41,77	69,61	73,93	73,93
Atena	964	107	163	41,11	44,20	42,78	52,40	52,40	58,52
Baldin	578	51	243	22,13	32,42	31,81	81,75	81,75	68,21
Bandeirantes	1.717	37	248	30,41	30,12	44,96	54,57	54,57	68,67
Barra Grande	3.534	86	200	25,43	27,18	31,69	39,88	39,88	62,90
Batatais - Lins	2.570	108	56	39,57	43,92	26,02	29,12	29,12	45,81
Batatais- Matriz	3.213	76	214	20,09	26,85	37,50	42,02	42,02	64,57
Bazan	3.438	44	161	17,82	23,97	35,64	36,95	36,95	58,27
Bertolo	964	61	97	22,01	31,02	28,84	40,69	40,69	50,73
Bioenergia	1.928	62	128	38,42	40,58	29,48	38,49	38,49	54,39
Biosev - Bioenergia Continental	1.767	73	145	22,80	29,24	36,78	41,36	41,36	56,43
Biosev - Leme	1.157	88	272	26,22	34,12	37,80	66,59	66,59	71,45
Biosev Bioenergia - Jardest	1.285	60	174	21,28	29,18	39,10	49,48	49,48	59,83
Biosev Bioenergia - Santa Elisa	3.695	56	173	18,39	24,76	29,94	37,34	37,34	59,69
Biosev Bioenergia - Vale do Rosário	3.856	37	184	17,13	23,22	29,01	37,84	37,84	60,98
Biosev Bioenergia MB	2.249	17	157	15,64	22,11	36,99	40,35	40,35	57,82
Biosev Maracaju	1.134	83	533	64,72	60,97	88,28	108,89	102,48	102,48
Biosev Passatempo	2.993	30	482	49,49	50,48	57,75	66,89	96,35	96,35
Boa Vista	5.205	91	315	47,57	48,65	40,38	44,00	44,00	76,52
Bom Sucesso	1.679	74	320	52,15	52,15	41,66	64,16	77,19	77,19

Destilaria	CO_2 produzido em 30 anos (1.000 tCO_2)	Dist Mult hub (km)	Dist Único hub (km)	Emissão (tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas)					
				Mult Hub comp	Mult Hub unitario	Único Hub comp	Único Hub unitario	Intermodal	Apenas Rodoviário
Branco Peres	1.028	56	124	41,29	42,90	26,81	44,61	44,61	53,90
Cachoeira	351	155	308	70,30	92,99	79,01	123,12	75,93	75,93
Caçú	1.343	24	377	46,26	46,26	75,13	78,13	83,87	83,87
Caeté - Paulicéia	3.856	121	192	41,13	42,65	36,88	38,45	38,45	61,96
Cafealcool	829	130	72	48,48	58,46	29,44	37,50	37,50	47,83
Campestre	2.089	73	41	41,35	41,47	28,31	28,19	28,19	44,04
Carolo	1.221	43	160	21,43	26,91	34,51	48,15	48,15	58,21
CBAA - Sidrolândia	1.103	103	509	69,76	64,53	100,71	106,45	99,59	99,59
CBAA Brasilândia	2.206	178	247	49,58	52,56	43,24	50,17	50,17	68,52
CEMMA	3.534	90	8	40,15	40,67	26,18	24,30	24,30	40,13
Central Energética	1.753	147	184	45,02	51,44	30,94	46,34	46,34	61,03
Centro Oeste Iguatemi	1.103	235	611	91,19	85,97	67,72	123,09	111,75	111,75
Centroalcool	1.679	144	547	62,29	92,15	49,82	92,85	104,14	104,14
Cevasa	1.767	83	221	20,93	30,49	38,77	50,75	50,75	65,40
Citrosuco	129	80	145	61,62	67,32	69,18	108,96	108,96	57,65
Clarion	1.202	121	331	44,35	44,06	60,94	74,80	78,49	78,49
Clealco - Matriz	1.446	69	71	42,98	42,98	32,92	33,43	33,43	47,64
Clealco - Pouso Alegre	1.607	106	87	48,00	47,19	28,75	34,90	34,90	49,50
Cocal - Narandiba	2.570	101	207	44,55	45,09	38,27	43,95	43,95	63,73
Cocal - Paraguaçu Paulista	1.928	80	175	33,70	34,69	30,41	44,05	44,05	59,94
COFCO - Catanduva	3.213	74	69	19,74	26,70	25,42	29,54	29,54	47,33
COFCO - Meridiano	3.534	92	82	39,84	40,85	30,30	30,26	30,26	48,90
COFCO - Potirendaba	1.607	105	42	27,44	33,99	24,62	29,09	29,09	44,18
COFCO - UNP	3.213	89	51	41,20	41,01	28,14	28,01	28,01	45,21
Colombo - Ariranha	2.635	67	92	17,87	26,75	27,01	32,50	32,50	50,10
Colombo - Palestina	3.213	97	65	22,24	28,61	25,72	29,20	29,20	46,86
Colorado	5.623	45	174	26,65	23,10	28,45	34,38	34,38	59,80
Comanche - Canitar	964	37	226	29,54	32,01	47,71	63,46	63,46	66,09
Comanche - Santa Anita	675	63	221	32,30	39,22	37,97	71,84	71,84	65,53
Coopcana	2.944	15	363	36,92	36,52	50,67	56,51	56,51	82,22
Cooper Nova Produtiva	785	64	275	45,29	48,01	53,71	78,40	71,82	71,82
Cooper Rubiataba	2.687	37	688	47,70	77,56	63,54	89,43	120,77	120,77
Cooperval	981	92	357	50,13	51,26	52,22	85,91	81,56	81,56
Coruripe - Campo Florido	2.629	139	185	27,97	33,73	37,27	41,56	41,56	61,13
Coruripe - Iturama	1.899	147	149	45,02	50,60	31,02	41,08	41,08	56,87
Coruripe - Limeira do Oeste	1.753	173	184	54,79	54,78	38,78	46,34	46,34	61,03
Costa	491	112	468	59,26	64,82	87,85	147,24	94,87	94,87
CRV	1.478	42	665	49,89	79,76	59,91	114,49	118,11	118,11
Da Mata	3.213	19	96	35,22	35,05	30,90	31,84	31,84	50,56
Dacalda	981	41	243	31,95	32,55	54,98	65,99	65,99	68,10
Damfi	578	131	257	63,32	74,18	41,48	85,08	69,86	69,86
Della Coletta	1.317	71	130	26,28	30,65	29,32	42,59	42,59	54,64
Delos	643	66	171	24,02	35,04	44,36	62,07	62,07	59,63
Delta	1.753	98	226	22,32	32,40	37,10	51,49	51,49	65,99
Delta - Volta Grande	2.921	84	196	31,17	32,17	36,67	41,47	41,47	62,44
Denusa	2.015	96	462	50,34	53,66	77,17	76,12	93,99	93,99
Diana	803	87	29	40,08	50,43	29,45	29,34	29,34	42,77
Eldorado	5.356	15	479	53,98	48,75	35,91	54,06	54,06	95,99

Destilaria	CO_2 produzido em 30 anos (1.000 tCO_2)	Dist Mult hub (km)	Dist Único hub (km)	Emissão (tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas)					
				Mult Hub comp	Mult Hub unitario	Único Hub comp	Único Hub unitario	Intermodal	Apenas Rodoviário
Ester	1.446	125	326	29,87	37,46	39,29	68,77	77,84	77,84
Ferrari	1.189	83	260	27,52	33,08	38,57	64,03	64,03	70,01
Figueira - Alcoazul	2.089	4	56	34,05	33,83	28,18	29,84	29,84	45,87
Figueira - Generalco	1.767	53	71	37,39	39,88	23,89	32,33	32,33	47,62
Flórida	1.928	62	134	39,25	40,65	28,21	39,18	39,18	55,10
Frutal	1.461	99	138	25,63	33,84	40,71	42,54	42,54	55,55
Furlan - Matriz	803	136	327	28,83	46,81	42,07	87,95	78,12	78,12
Glencane	1.574	84	153	39,16	44,41	32,81	43,79	43,79	57,38
Goianésia	672	32	681	46,77	81,15	58,66	172,64	119,99	119,99
Goiasa Goiatuba	2.687	39	334	45,09	46,57	37,15	55,59	78,80	78,80
Granelli	129	138	293	50,35	101,16	43,55	196,13	196,13	75,22
Grizzo	1.060	45	179	25,29	27,69	34,76	53,46	53,46	60,50
Guaíra	1.607	39	169	19,76	25,36	33,31	45,62	45,62	59,25
Guarani - Cruz Alta	1.285	73	180	18,66	31,08	39,25	50,37	50,37	60,54
Guarani - Mandu	3.277	45	174	26,70	24,15	28,65	38,43	38,43	59,80
Guarani - Severínia	1.607	41	96	20,39	25,64	30,33	36,07	36,07	50,56
Guarani - Tanabi	1.928	112	49	26,62	33,29	29,34	29,34	29,34	45,00
Guaricanga	2.506	124	130	37,80	37,80	34,40	36,53	54,60	54,60
Guariroba	1.607	134	87	46,75	50,80	27,68	34,90	34,90	49,50
Iacanga	1.748	112	101	31,24	34,03	27,76	36,07	36,07	51,16
Iberia	1.607	78	137	36,19	35,59	29,44	41,37	41,37	55,40
Ipiranga - Descalvado	1.285	53	218	23,87	28,09	32,40	55,99	55,99	65,03
Ipiranga - Mococa	771	140	289	38,01	48,26	60,81	81,79	73,51	73,51
Iracema	1.607	103	254	34,35	38,75	38,14	56,60	56,60	69,29
Itajobi	1.735	94	60	22,47	31,99	27,71	31,06	31,06	46,33
Itapagipe	1.461	135	129	30,68	38,89	30,58	41,31	41,31	54,49
Ituiutaba	2.629	158	221	58,13	58,13	32,47	45,03	45,03	65,38
J. Pilon - Santa Maria	1.253	151	297	34,17	43,08	43,77	68,33	74,47	74,47
Jacarezinho	1.104	30	231	30,01	30,26	47,39	61,17	61,17	66,63
Jalles Machado	2.015	46	685	49,36	79,23	56,70	101,40	120,43	120,43
Jalles Machado - Otávio Lage	2.687	34	661	45,49	77,32	59,17	86,87	117,58	117,58
JJ	1.253	74	177	36,65	36,65	31,93	50,33	50,33	60,20
Laguna	1.260	139	382	67,95	68,52	49,03	81,00	84,51	84,51
Lasa Lago Azul	1.175	255	496	79,90	82,73	98,93	101,33	98,10	98,10
Londra	1.317	127	278	37,66	43,98	42,00	64,25	72,21	72,21
Malosso	996	104	102	37,33	38,08	29,21	41,22	41,22	51,32
Maringá	1.574	48	184	24,81	26,52	33,41	47,84	47,84	61,04
Melhoramentos - Jussara	2.944	50	373	39,62	39,73	57,39	57,41	57,41	83,40
Melhoramentos - Nova Londrina	1.030	64	368	45,86	45,98	52,36	85,98	82,83	82,83
Moema	3.213	96	88	22,19	28,56	27,66	31,16	31,16	49,61
Monte Alegre	584	207	341	57,66	69,35	64,65	104,75	79,76	79,76
Moreno	3.856	108	207	26,84	28,52	35,61	39,59	39,59	63,73
Morrinhos	1.343	98	390	54,88	57,00	49,18	80,01	85,50	85,50
Nardini	2.570	60	108	20,26	26,24	30,57	34,19	34,19	51,99
Onda Verde	1.992	118	66	23,37	33,71	27,17	31,16	31,16	47,06
Ouroeste	1.607	123	120	44,35	49,32	30,94	39,17	39,17	53,39
Panorama	2.015	91	298	50,29	53,17	39,78	57,39	74,57	74,57
Parapuã	803	100	135	47,87	53,00	30,16	50,11	50,11	55,29

Destilaria	CO_2 produzido em 30 anos (1.000 tCO_2)	Dist Mult hub (km)	Dist Único hub (km)	Emissão (tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas)					
				Mult Hub comp	Mult Hub unitario	Único Hub comp	Único Hub unitario	Intermodal	Apenas Rodoviário
Pedra - Buriti	5.462	88	232	20,34	25,82	32,94	38,16	38,16	66,68
Pedra - Da Pedra	3.856	90	201	21,36	27,24	31,68	39,14	39,14	63,02
Pedra - Ipê	2.570	83	151	38,71	41,55	35,31	38,49	38,49	57,07
Pioneiros	1.285	40	122	36,07	39,41	32,24	41,69	41,69	53,70
Pitangueiras	1.928	39	141	17,24	24,88	27,67	39,99	39,99	55,92
Planalto	876	238	390	59,14	64,74	73,09	96,40	85,51	85,51
Pyles	578	19	193	26,87	29,92	57,72	69,82	69,82	62,30
Quatá	2.731	81	156	33,02	33,06	28,69	38,44	38,44	57,69
Raizen - Araraquara	1.607	37	184	23,96	25,08	30,84	47,55	47,55	61,02
Raizen - Barra	3.881	58	201	23,55	24,64	29,33	39,07	39,07	63,02
Raízen - Benálcool	803	18	90	35,75	36,91	28,52	41,29	41,29	49,98
Raízen - Bom Retiro	858	149	328	31,46	48,40	45,37	85,66	78,19	78,19
Raizen - Bonfim	3.898	78	143	19,11	26,29	32,67	34,52	34,52	56,14
Raizen - Costa Pinto	2.545	131	288	27,10	33,07	35,51	52,02	52,02	73,35
Raizen - Destivale	1.340	14	44	35,55	35,44	28,22	30,00	30,00	44,38
Raizen - Diamante	697	66	181	27,80	34,25	32,68	62,37	62,37	60,79
Raizen - Dois Córregos	588	37	192	25,43	29,04	49,74	69,13	69,13	62,16
Raizen - Gasa	3.843	74	152	39,04	39,07	34,94	35,41	35,41	57,20
Raizen - Ipaussu	1.982	52	232	29,70	31,45	42,71	50,20	50,20	66,73
Raizen - Junqueira	1.873	98	241	22,23	31,94	39,29	52,18	52,18	67,81
Raizen - Mundial	1.006	43	118	37,02	40,75	41,40	43,86	43,86	53,20
Raizen - Rafard	1.350	157	314	37,24	42,87	41,07	68,95	76,45	76,45
Raizen - Santa Helena	1.028	151	299	36,23	45,86	37,37	74,28	74,69	74,69
Raizen - Serra	803	20	200	22,52	24,12	34,15	62,95	62,95	62,97
Raizen - Tarumã	2.731	38	215	28,64	29,09	35,72	43,98	43,98	64,70
Raizen - Univalem	2.089	34	105	35,97	37,19	28,58	35,25	35,25	51,65
Raizen Paraguaçu	713	60	171	33,38	38,07	36,07	59,75	59,75	59,59
Raizen Tarumã Maracaí	1.928	56	190	32,00	32,00	30,90	45,78	45,78	61,77
Renuka - Marialva	809	65	339	47,70	47,81	52,78	89,99	79,55	79,55
Renuka - São Pedro do Ivaí	1.104	96	384	50,08	50,76	55,48	86,05	84,82	84,82
Renuka do Brasil - Madhu	5.141	91	47	37,73	39,30	26,73	26,68	26,68	44,75
Revati	3.052	46	34	37,02	37,50	26,70	26,65	26,65	43,21
Rio Pardo	1.607	95	246	37,32	37,78	37,51	55,57	55,57	68,34
Rio Verde - Decal	1.008	80	386	55,46	56,61	63,76	89,89	85,10	85,10
Sabarálcool - Filial	613	69	485	50,99	51,10	81,10	135,72	96,95	96,95
Sabarálcool - Matriz	883	142	383	59,77	61,53	72,17	94,77	84,67	84,67
Santa Adélia - Jaboticabal	2.249	69	153	18,43	27,65	33,10	39,93	39,93	57,35
Santa Adélia - Pereira Barreto	3.534	66	151	37,77	38,78	33,64	35,93	35,93	57,08
Santa Fé	2.570	75	126	27,38	27,58	28,01	35,94	35,94	54,12
Santa Helena	1.142	55	380	51,38	51,65	61,87	84,17	84,31	84,31
Santa Helena	1.142	130	386	58,83	55,95	30,10	58,31	84,24	84,24
Santa Isabel - Filial	964	109	19	51,36	52,51	24,73	27,00	27,00	41,52
Santa Isabel - Matriz	1.607	120	53	21,97	35,87	24,92	30,51	30,51	45,48
Santa Juliana	3.506	190	310	28,51	35,83	47,43	48,97	48,97	75,96
Santa Lúcia	996	86	270	24,25	35,08	34,14	70,26	70,26	71,29
Santa Luzia	8.822	34	437	54,62	49,40	44,78	44,21	44,21	90,99
Santa Maria	129	63	222	36,08	62,43	35,22	154,37	154,37	66,79
Santa Rita	1.928	71	227	27,09	28,44	33,42	50,07	50,07	66,14

Destilaria	CO_2 produzido em 30 anos (1.000 tCO_2)	Dist Mult hub (km)	Dist Único hub (km)	Emissão (tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas)					
				Mult Hub comp	Mult Hub unitario	Único Hub comp	Único Hub unitario	Intermodal	Apenas Rodoviário
Santa Rosa	578	171	314	38,84	61,17	48,69	98,80	76,60	76,60
Santa Teresinha - Cidade	736	62	406	44,94	48,09	79,59	107,72	87,50	87,50
Santa Terezinha - Iguatemi	736	37	335	42,02	42,87	93,02	93,06	79,12	79,12
Santa Terezinha - Ivaté	736	121	462	57,01	60,15	73,40	119,39	94,11	94,11
Santa Terezinha - Paranacity	1.349	32	289	40,18	39,76	50,02	65,25	73,50	73,50
Santa Terezinha - Rondon	981	41	368	42,67	42,26	56,86	87,82	82,86	82,86
Santa Terezinha - Tapejara	1.227	81	421	45,46	47,51	61,70	87,87	89,13	89,13
Santa Terezinha - Terra Rica	859	56	332	43,87	45,81	46,49	86,38	78,68	78,68
Santa Terezinha - Zona Rural	1.349	47	395	40,11	41,97	56,59	80,58	86,11	86,11
Santo Ângelo	1.169	91	170	36,74	34,54	44,63	50,37	50,37	59,41
Santo Antônio	2.089	58	175	16,55	26,74	30,97	43,10	43,10	59,98
São Domingos	1.607	76	73	22,74	30,16	25,42	33,09	33,09	47,84
São Fernando	2.599	62	510	59,03	53,81	54,47	73,39	99,69	99,69
São José	1.607	13	126	16,67	22,07	31,46	39,94	39,94	54,10
São José da Estiva	2.570	116	53	21,45	31,67	24,92	28,83	28,83	45,45
São Luiz	1.446	24	214	27,87	28,76	44,82	53,24	53,24	64,61
São Manoel	3.856	80	215	23,93	26,35	33,04	40,21	40,21	64,67
São Martinho - Iracema	1.446	135	313	26,30	38,77	38,56	66,98	76,30	76,30
São Martinho - Matriz	2.988	76	163	20,10	27,15	33,87	38,29	38,29	58,49
São Martinho - Santa Cruz	3.534	50	184	24,15	24,29	27,66	38,59	38,59	61,01
São Paulo	2.015	12	374	44,70	44,23	65,17	66,08	83,54	83,54
São Simão	1.343	96	223	30,70	34,07	53,21	55,86	55,86	65,70
Serranópolis	1.175	212	387	75,19	76,08	81,74	84,22	85,12	85,12
SJC - São Francisco	2.687	76	307	46,65	50,10	49,75	53,03	53,03	75,61
TGM	835	92	248	40,95	43,12	41,77	71,23	71,23	68,61
Tirolli	1.125	5	206	25,56	26,28	42,33	56,75	56,75	63,67
Toniello	1.125	54	156	20,93	28,98	33,72	48,75	48,75	57,77
Tonon - Bom Retiro	1.890	74	525	61,43	56,45	76,68	85,54	101,45	101,45
Tonon - Cândida GL	1.928	46	172	24,64	25,62	29,71	43,70	43,70	59,58
Tonon - Paraíso	2.185	10	216	21,26	21,31	34,69	46,99	46,99	64,80
Tropical	5.373	56	427	46,05	46,36	46,51	50,63	50,63	89,82
UCP ANP	589	107	237	59,20	60,56	48,00	79,72	79,72	67,49
Unialco	1.221	52	101	37,35	41,33	29,20	39,05	39,05	51,24
Uruaçú	1.008	85	782	58,68	88,55	89,61	157,95	131,99	131,99
Usina Passos	876	179	312	44,43	53,84	62,80	81,89	76,30	76,30
Usinavi	1.890	166	537	72,58	67,36	53,37	86,95	102,87	102,87
Usinova	3.358	118	475	52,64	52,64	63,84	63,44	95,53	95,53
USJ	3.213	92	276	24,76	28,11	34,24	47,31	47,31	71,88
Vale do Verdão	4.299	33	365	45,65	45,20	50,18	50,02	50,02	82,46
Vale Verde - Itapaci	2.015	23	713	46,85	76,72	58,17	104,56	123,80	123,80
Vertente	2.570	58	100	20,70	25,97	30,77	33,41	33,41	51,05
Viralcool - Santa Amália	1.928	86	175	42,32	43,45	44,02	44,05	44,05	59,94
Viralcool - Santa Cecília	2.089	27	144	16,65	23,38	36,26	39,56	39,56	56,26
Virgolino de Oliveira - Catanduva	3.438	63	92	17,36	25,49	26,56	31,19	31,19	50,09

Destilaria	CO_2 produzido em 30 anos (1.000 tCO_2)	Dist Mult hub (km)	Dist Único hub (km)	Emissão (tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas)					
				Mult Hub comp	Mult Hub unitario	Único Hub comp	Único Hub unitario	Intermodal	Apenas Rodoviário
Virgolino de Oliveira - Itapira	1.414	160	332	33,85	42,65	41,34	70,22	78,54	78,54
Virgolino de Oliveira - José Bonifácio	1.799	161	4	40,27	52,96	24,17	24,14	24,14	39,71
Vista Alegre	1.125	180	329	41,81	49,25	51,32	76,56	78,31	78,31
Zambianco - Pederneiras	578	133	294	38,50	51,92	39,93	93,92	74,24	74,24
ZL - São José	3.534	80	185	25,07	26,72	27,33	38,67	38,67	61,13
MÉDIA	**1.893**	**84**	**241**	**37,5**	**42,5**	**41,8**	**58,8**	**58,8**	**67,8**

Fonte: Elaboração própria

Como pode ser visto na Tabela 24, a opção do transporte rodoviário foi a melhor opção apenas para uma destilaria, que é de pequeno porte, mas a média das emissões por destilaria para este modal é a pior dentre todas as consideradas. A cor vermelha também aparece em alguns casos para o intermodal e para o caso de único Hub com dutos unitários. As melhores opções para cada destilaria, na maioria dos casos, são os dutos compartilhados para múltiplos Hubs e único Hub, com uma tendência a melhor opção ser realmente a de múltiplos Hubs para a maioria das 233 destilarias consideradas neste estudo.

5.2. Discussões

Os principais objetivos desse estudo eram: verificar o saldo de emissões líquidas armazenadas em um projeto de BIOCCS que utilizaria o CO_2 da fermentação das destilarias de etanol do Centro-Sul do Brasil para atividades de EOR na Bacia de Campos após desconsiderar as emissões de GEE que ocorreram pela implementação e operação do projeto e analisar as emissões ao longo do ciclo de vida das três configurações de transportes consideradas, verificando qual apresentava melhor desempenho no ponto de vista de impactos a mudanças climáticas.

A configuração que apresentou menor emissão associada à sua análise de ciclo de vida foi o caso de múltiplos Hubs com dutos compartilhados. Mesmo com o aumento das emissões associadas à fabricação de dutos entre os Hubs, que possuem uma espessura bem maior que a de dutos entre destilarias e Hubs (aumentando a quantidade de aço necessária), a menor distância entre as destilarias e um dos Hubs reduz consideravelmente o tamanho dos dutos (quando comparado ao caso de um único Hub), reduzindo ainda mais a necessidade de aço para a construção dos mesmos. O múltiplo Hubs também foi a opção que mostrou maior viabilidade econômica no estudo de SILVA *et al*. (2018) (apesar de que no estudo citado eram considerados apenas dutos individuais, e não compartilhados), se mostrando, portanto, a opção mais promissora para implementação de um projeto que transportasse o CO_2 da fermentação das destilarias do Centro-Sul à Bacia de Campos.

A segunda melhor opção pelos custos de abatimento em SILVA *et al*. (2018) foi o transporte intermodal, com o transporte com um único Hub ficando com a pior colocação. Mas quando se considera as emissões de gases de efeito estufa, a configuração de único Hub com dutos individuais e o transporte intermodal tiveram praticamente a mesma média de emissão por destilaria (mas no resultado total do projeto, o único Hub com dutos individuais emitiu mais que o intermodal).

A segunda melhor opção de transporte foi o caso das destilarias ligadas por dutos a um único Hub na configuração compartilhada. Apesar da distância média entre as destilarias ao Hub ainda ser três vezes maior do que a distância média no caso de múltiplos Hubs, ainda foi melhor fazer esse transporte construindo dutos do que transportando por caminhões. Devido a este fato, o estudo de caso intermodal foi o que apresentou a pior média de emissões anuais dentre os três casos analisados.

Analisando apenas o transporte rodoviário, o maior contribuinte nas emissões de GEE ao longo do ciclo de vida do projeto é o consumo de combustíveis pelos caminhões, correspondendo a 63% das emissões da etapa de transporte. A literatura estudada indicava que este modal não é recomendado para transportes do CO_2 em grande escala e os resultados do presente estudo também mostraram que apenas uma das 233 destilarias consideradas mostrou que a melhor opção de transporte do CO_2 era por caminhões pelo ponto de vista das emissões de GEE. Essa destilaria é uma destilaria de pequeno porte, mas não era uma das 70 destilarias apontadas em SILVA *et al*. (2018) que mostrarm que a melhor opção econômica era por este modal.

O compartilhamento de dutos entre as destilarias e os Hubs desenvolvido neste trabalho baseando-se em uma análise detalhada dos resultados obtidos em SILVA *et al*. (2018) mostrou que os custos calculados em seu trabalho poderiam ser até menores, caso alguns dutos exatamente coincidentes em seu resultado também fossem considerados como sendo compartilhados, já que o estudo citado apenas considerou dutos individuais para cada destilaria. O compartilhamento de dutos exatamente coincidentes proporcionou uma redução de 21,4% das emissões de fabricação dos dutos entre destilarias e Hub no caso de múltiplos Hubs e de 51,4% no caso do único Hub (que possui uma média de distância entre as destilarias e Hub bem maior), contribuindo para que as emissões da etapa de transportes na configuração compartilhada fossem 6,3% menores no caso de múltiplos Hubs e 27,9% menores no caso de único Hub. Se fossem considerados apenas os dutos unitários, como a rede havia sido projetada, o caso de único Hub seria o de pior emissão, pior até mesmo que o caso que considera dutos e caminhões. Mas com o compartilhamento de dutos desenvolvido pelo presente estudo, o caso de dutos compartilhados a um único Hub ficou em segundo lugar com as melhores emissões, atás apenas dos dutos compartilhados a múltiplos Hubs.

O presente estudo também acredita que os resultados aqui apresentados de compartilhamento de dutos podem ser melhorados, visto que alguns dutos não eram exatamente coincidentes, mas eram próximos a algum outro duto e não foram compartilhados no presente estudo pelo fato de que um novo desenho de uma configuração ótima dessa rede de transporte fugia do escopo deste estudo.

Nenhuma destilaria apresentou uma emissão de ACV maior que do que seu potencial de redução de GEE em nenhuma das configurações estudadas, nem na rodoviária, que apresentou a maior emissão de ACV dentre as opções de transporte consideradas. A etapa

que mais emitiu GEE em toda a análise de ciclo de vida foi a etapa de transportes, nos três estudos de casos considerados.

Mesmo utilizando o BIOCCS para produção adicional de petróleo em atividades de EOR, a utilização do CO_2 da fermentação do etanol pode ser uma excelente oportunidade para o Brasil iniciar seus projetos de remoção de CO_2, pelo seu baixo custo de captura (SILVA *et al*., 2018), principalmente estando associado ao EOR, o que possibilita um incentivo financeiro maior para a implementação deste projeto e fornece *know-how* para futuros projetos de BIOCCS no país.

A etapa de inventário de ciclo de vida é a etapa central da ACV, demandando muito esforço e grande obtenção de dados para que seja elaborada da melhor forma possível. O ideal seria que todos os dados utilizados fossem dados primários, mas ao longo deste trabalho nem sempre eles estavam disponíveis e uma das limitações deste estudo é essa, a adaptação de dados de bancos de dados que nem sempre refletem a realidade brasileira. Eles foram utilizados principalmente nas fabricações dos equipamentos de transporte como no cálculo da emissão pela fabricação dos dutos, pneus, caminhões, sendo que o único que possui emissões relevantes dentre esses são os dutos, e um estudo futuro poderia aprofundar mais a emissão referente a esta etapa. Além disso, não possuir dados sobre a fabricação de dutos de aço carbono no Brasil e considerar um fator de aço cromado internacional é uma outra limitação que pode influenciar os resultados deste estudo.

Uma outra limitação desse estudo foi a espessura considerada nos dutos. De acordo com uma publicação (IEAGHG, 2014) que mostrava a espessura de dutos existentes que transportam CO_2, dutos de alta capacidade de transporte possuíam uma espessura variando de 19 a 27 mm e a espessura calculada no presente estudo para esses dutos foi de 52 mm, que é bem maior do que a espessura encontrada na literatura. Contudo, o presente estudo optou por não considerar uma espessura de outro projeto e utilizar uma fórmula para este cálculo que considerava a pressão do projeto, mas precisava de uma espessura arbitrária para este cálculo. O cálculo da espessura foi feito de duas maneiras diferentes neste estudo e o resultado ficou dentro de uma faixa pequena de valores, utilizando-se o resultado do primeiro cálculo, que era próximo do ponto médio da faixa de espessura calculada na segunda análise. Contudo, as maiores emissões nos três casos foram as construções dos dutos e talvez a consideração de uma espessura maior do que a média de espessuras da literatura pode ter influenciado nesse resultado.

Outra limitação é a utilização de fatores de consumo energético para algumas atividades, principalmente no caso do uso da amônia na refrigeração durante a liquefação, onde estudos futuros poderiam considerar emissões mais precisas nesta etapa. Mas como essa atividade especificamente representava apenas uma das três etapas consideradas no cálculo do consumo de energia pela liquefação como um todo de 1/3 das destilarias para um estudo de caso, acredita-se que este fator de consumo utilizado não tenha interferido tanto nos resultados finais. Duas outras limitações que também podem ser apontadas é a utilização do fator do grid, que se modifica a cada ano de acordo com a fração de geração no ano entre fontes renováveis (como as hidroelétricas) e fósseis (como a maioria das termoelétricas) e a não consideração do ciclo de vida da amônia utilizada na liquefação.

O compartilhamento de dutos desenvolvido neste estudo com base no resultado de SILVA *et al*. (2018), pois seus resultados apresentavam a limitação de que só foram considerados dutos individuais entre as destilarias e o(s) Hub(s), com diversos dutos exatamente coincidentes e em um projeto real, isso não aconteceria. Sendo assim, tentando aproximar o resultado da realidade, foi simulada um compartilhamento dos dutos coincidentes, transportando o CO_2 das destilarias localizadas a montante. Isso foi feito para todas as destilarias no caso em que todas utilizavam dutos como transporte aos dutos, analisados visualmente e medidos utilizando o software ArcMap. Contudo, nessa análise a limitação é de que pode ter ocorrido algum erro entre considerados entre os trechos compartilhados pelas destilarias (apesar do cuidado despendido nesta etapa). Além disso, estudos futuros poderiam melhorar ainda mais o resultado das emissões pela fabricação desses dutos, já que dutos próximos não foram considerados como sendo compartilhados, já que esta análise estava fora do escopo desse estudo, mas em um projeto real esses dutos próximos provavelmente seriam compartilhados também.

Seria importante que estudos futuros analisassem melhor as emissões envolvidas na etapa de EOR, como: consumo energético para injeção do CO_2, taxa de produção de CO_2 com o petróleo, taxa de armazenamento do CO_2 e certificação do armazenamento do CO_2 ao longo do tempo, principalmente para a Bacia de Campos, para que essas emissões também fossem incluídas nas emissões do ciclo de vida de um projeto como esse, e o saldo do que realmente pode ser considerado como CO_2 armazenado pelo projeto seja ainda mais completo.

6. Considerações Finais

O objetivo deste estudo era analisar o saldo de emissões líquidas de CO_2 da fermentação das destilarias do Centro-Sul brasileiro que podem efetivamente serem consideradas como armazenadas geologicamente através da sua utilização em atividades de recuperação avançada de petróleo na Bacia de Campos, após se descontar as emissões as principais emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida do projeto (instalação e operação), já que geramente não se considera essas emissões nos cálculos de potencial de redução de emissão desses projetos, além de identificar a configuração de transporte (que já havia sido desenvolvida por estudos anteriores) que apresentaria a menor emissão associada. Foram consideradas três configurações de transporte do CO_2, através de dutos ligando as destilarias a um único Hub, ligando a oito Hubs e o transporte sendo feito por caminhões ou dutos da destilaria ao Hub. Foram consideradas as emissões de GEE pela fabricação dos dutos, dos caminhões, consumo de combustível do caminhão e o consumo energético da captura e transporte.

A metodologia aplicada neste estudo foi a Análise de Ciclo de Vida (ACV), considerando apenas a categoria de impactos de mudanças climáticas, pois é o aspecto que apresenta a melhor resposta para a questão colocada neste trabalho. O inventário de ciclo de vida realizado neste estudo procurou ser justo na comparação entre as três configurações de transporte e considerar as emissões mais relevantes das atividades que foram definidas que seriam consideradas na elaboração do escopo. As premissas iniciais seguiram o estudo que desenvolveu a trajetória dos dutos, para que esse resultado pudesse ser utilizado, mas foi necessária a obtenção de diversos outros parâmetros para um completo estudo das emissões de GEE envolvidas em todo o ciclo de vida do projeto analisado. Além disso, no presente estudo também foi considerada uma nova configuração para os dutos desenvolvidos em um estudo anterior, que apontava que uma de suas limitações era que a análise desenvolvida anteriormente considerou apenas dutos unitários da destilaria até o Hub, sendo que vários deles eram exatamente coincidentes em diversos trechos. Visando uma melhoria dos resultados, o presente estudo considerou que nos casos em que os dutos eram exatamente coincidentes, que eles seriam compartilhados pelas destilarias a montante. Essa análise foi feita para o caso de múltiplos Hubs e de único Hub. Os resultados mostraram que o compartilhamento de dutos exatamente coincidentes proporcionou uma redução de 21,4% das emissões de fabricação dos dutos entre destilarias e Hub no caso de múltiplos Hubs e de 44,3% no caso do único Hub (que possui

uma média de distância entre as destilarias e Hub bem maior), contribuindo para que as emissões da etapa de transportes na configuração compartilhada fossem 6,3% menores no caso de múltiplos Hubs e 27,9% menores no caso de único Hub. Mas o estudo a respeito do compartilhamento dos dutos por destilarias ainda pode ser melhorado, através de estudos mais detalhados que considerem a possibilidade de diversos dutos de conectarem, mesmo eles não estando coincidentes, mas serem próximos, otimizando assim o transporte do CO_2 das destilarias até seu local de armazenamento por uma rede de dutos compartilhados.

A obtenção de todos os dados necessários para o inventário (que demanda uma grande quantidade deles), é sempre uma etapa difícil em uma ACV. Sempre que existiam dados brasileiros disponíveis, os mesmos foram utilizados neste estudo. Contudo, para alguns aspectos, os dados obtidos foram de bancos de dados internacionais ou da literatura.

De acordo com os resultados deste estudo, a configuração que apresentou melhor resultado (ou seja, suas emissões de GEE ao longo do ciclo de vida do projeto eram menores), foi o transporte sendo feito por dutos para oito diferentes Hubs e posteriormente, sendo encaminhado para a Bacia de Campos por dutos compartilhados. Em segundo lugar ficou a configuração de transporte por dutos a um único Hub por dutos compartilhados também. A configuração de múltiplos hubs com dutos individuais ficou em terceiro lugar nas emissões, seguido pelo caso intermodal e por dutos individuais a um único Hub, que teve essa má colocação devido à necessidade de uma grande quilomentragem de dutos necessários conectando as destilarias em dutos individuais. Por isso a análise de compartilhamento feita no presente estudo foi necessária, para melhorar a rede de dutos desenhada em um estudo anterior e aproximar mais essa configuração de um projeto real, que não construiria dutos individuais coincidentes em um mesmo local, sem compartilhamento.

Quanto aos resultados individuais de cada destilaria, os dutos compartilhados ligados a múltiplos Hubs também tiveram a melhor colocação, com uma média de 37,5 tCO_2e/1000 tCO2 armazenadas e sendo a melhor opção para a maioria das destilarias. Os dutos compartilhados ligados a um único Hub ficaram com a segunda colocação, com uma média de 41,8 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas, seguida pelo múltiplos hubs unitários (42,5 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas), e o transporte intermodal e único Hub com dutos unitários, ambos com 58,8 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas. O transporte rodoviário se mostrou a melhor opção apenas para uma das 233 destilarias consideradas, mas esse modal teve a pior média de emissão por destilaria, o que mostra que realmente o

transporte de CO_2 por caminhões não é recomendável em larga escala, principalmente pelo ponto de vista de emissões de GEE. Caso todas as destilarias fizessem o transporte por esse modal, a média das emissões das mesmas seria de 67,8 tCO_2e/1000 tCO_2 armazenadas, apresentando a pior média de resultados individuais das destilarias.

Além disso, para cada configuração, também pôde-se observar quais etapas contribuíam mais para um aumento das emissões do projeto. De todo o ciclo de vida, a fabricação dos dutos se mostraram os maiores contribuidores nas emissões nas configurações consideradas, mas isso pode ter interferência da espessura calculada neste estudo, que é maior do a espessura de dutos existentes e isso pode influenciar esse resultado. Considerando apenas o transporte rodoviário, o consumo de combustíveis pelos caminhões é o grande contribuidor das emissões, com 63% das emissões da etapa de transporte deste modal.

Espera-se que esses resultados contribuam para o desenvolvimento de projetos de BIOCCS no Brasil utilizando-se o CO_2 da fermentação do etanol, já que a tecnologia está disponível e pelo fato do Brasil ser o segundo maior produtor de etanol no. A utilização do CO_2 em projetos de EOR pode ser uma boa alternativa para o Brasil, pois como atualmente não existe uma precificação pelo carbono emitido, fica mais difícil o investimento em projetos de CCS em armazenamento geológico, pois não há retorno financeiro e não há muito incentivo para investidores investirem em projetos desse tipo, dificultando sua execução. Através do EOR, tanto a empresa petrolífera (possibilitando a recuperação de petróleo) quanto a indústria de etanol (comercializando o CO_2 que era antigamente emitido para a atmosfera) se beneficiam. Mesmo não sendo constante ao longo do ano, o CO_2 da fermentação do etanol é uma fonte contínua ao longo dos anos, dada a importância da indústria do etanol no Brasil, que possui até mistura mandatória do combustível em toda gasolina consumida no país. E a Bacia de Campos, que possui diversos campos de petróleo já maduros, poderia utilizar o CO_2 das destilarias de etanol do Centro-Sul do país, tendo assim uma fonte garantida de CO_2 para suas atividades.

Com isso, abre-se o questionamento sobre a utilização de CO_2 de origem biogênica para sua utilização em uma produção incremental de combustível fóssil. Como foi dito anteriormente, a principal questão é a não existência de uma precificação pelo CO_2 emitido. Além disso, é melhor ter um projeto que, mesmo aumentando a oferta e consumo de combustíveis fósseis (em um cenário onde a demanda por esse tipo de combustível não deve ser modificada a curto e médio prazo), produz emissões negativas, do que não ser feito nenhum projeto nem de redução de emissão de GEE.

Os resultados do presente estudo mostraram que mesmo se considerar as emissões pela implementação e operação deste projeto, ainda é possível considerar que o armazenamento líquido foi de 94,9% a 96,1% da quantidade de CO_2 produzido pelas destilarias (444,7 $MtCO_2$ em 30 anos), já que as emissões do ciclo de vida do projeto nas três configurações variam entre 3,9% a 5,4%.

A utilização do BIOCCS utilizando CO_2 da fermentação do etanol para atividades de EOR na Bacia de Campos pode ser uma excelente oportunidade para o Brasil iniciar seus projetos de remoção de CO_2, pelo seu baixo custo de captura, pela possibilidade de incentivo financeiro para a implementação deste projeto e desenvolvimento de *know-how* para futuros projetos de BIOCCS no país.

7. Referências Bibliográficas

ABNT NBR ISO 14.040, 2009 – Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura.

ABNT NBR 12.712, 2002 - Projeto de sistemas de transmissão e distribuição de gás combustível

AFDC, 2018. Alternative Fuels Data Center. U.S. Department of Energy. Disponível em: <https://www.afdc.energy.gov/data/>. Acesso em janeiro, 2018.

ALABDULKAREM, A., HWANG, Y., RADERMACHER, R., 2012. "Development of CO_2 liquefaction cycles for CO_2 sequestration". **Applied Thermal Engineering**. 33–34, pp. 144–156.

ANP, 2016_a. Boletim do etanol. Junho de 2016.

ANP, 2016_b. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. - Rio de Janeiro

ANP, 2017_a. Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural. Janeiro 2017 / Número 77

ANP, 2017_b. Site ANP – Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acesso em agosto/2017

ASME B31.8, 2004. " Gas Transmission and Distribution Piping Systems".

ASSEN, N.; JUNG, J.; BARDOW, A., 2013. "Life-cycle assessment of carbon dioxide capture and utilization: avoiding the pitfalls". **Energy and Environmental Science,** volume 6, pp. 2721–2734

ASSEN, N.; VOLL, P.; PETERS, M.; BARDOW, A., 2014. "Life cycle assessment of CO_2 capture and utilization: a tutorial review". **Chemical Society Reviews**, volume 43, pp. 7982-7994

AZZOLINA, N. A.; NAKLES, D.V.; GORECKI, C.D.; PECK, W.D., *et al*., 2015. "CO_2 storage associated with CO_2 enhanced oil recovery: A statistical analysis of historical operations". **International Journal of Greenhouse Gas Control**, volume 37, pp.384–397

BANCO MUNDIAL, ECOFYS e VIVID ECONOMICS, 2017 – "State and Trends of Carbon Pricing 2017". World Bank, Washington, DC.

BEN, 2017. Balanço Energético Nacional.

BONIJOLY, D., FABBRI, A.; CHAPUIS, F.; *et al*., 2009. "Technical and economic feasibility of the capture and geological storage of CO_2 from a bio-fuel distillery: CPER Artenay Project". **Energy Procedia,** volume 1, pp 3927-3934.

BRASIL, 2016 - Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC)

CONAB, 2011 – "A geração termoelétrica com a queima do bagaço de cana-de-açúcar no Brasil. Análise do desempenho da safra 2009-2010". Março de 2011.

CONAB, 2017. "Perfil do Setor do Açúcar e do Etanol no Brasil. Edição para a safra 2014/2015". Brasília, 2017.

COSTA, I.V.L., 2014. *Proposta de estrutura regulatória para sequestro geológico de CO_2 no Brasil e uma aplicação para o Estado do Rio de Janeiro*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CNT, 2016. Pesquisa CNT de Perfil dos Caminhoneiros 2016. Confederação Nacional dos Transportes.

DANTAS, G.A., 2008. "O Impacto dos Créditos de Carbono na Rentabilidade da Cogeração Sucroalcooleira Brasileira". Dissertação de Mestrado. ISEG/Universidade Técnica de Lisboa, in: UNICA, 2010. "Etanol e bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro a matriz energética". Coordenação e organização: Eduardo L. Leão de Sousa e Isaias de Carvalho Macedo.

ECOINVENT, 2017 – Ecoinvent versão 3.4

EEA, 1997. "Life Cycle Assessment - A guide to approaches, experiences and information sources". European Environment Agency. Environmental Issues Series number 6. United Kingdom. Agosto, 1997.

EERC, 2011. "Opportunities and Challenges associated with CO_2 compression and Transportation during CCs activities". Energy & Environment Research Center (EERC). University of North Dakota. Dakota do Norte, EUA.

EPE, 2014. Plano Decenal de Expansão da Malha de Transporte Dutoviário – PEMAT 2022

FABBRI, A.; BONIJOLY, D.; BOUC, O.; BUREAU, G.; CASTAGNAC, C. *et al*., 2011. "From Geology to Economics: Technico-economic feasibility of a biofuel-CCS system". **Energy Procedia**, volume 4, pp. 2901-2908.

FARLA, J.C.M.; HENDRIKS, C.A.; BLOK, K., 1995. "Carbon dioxide recovery from industrial processes". **Climatic Change**, volume, 29 pp. 439-461.

FERREIRA, V. M., 2016. "Avaliação de métodos de recuperação melhorada de petróleo para campos marítimos no Brasil: o caso da Bacia de Campos". Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

FOX, C., 2009. "CO_2-EOR carbon balance". In: 7th Annual EOR Carbon Management Workshop, dezembro in AZZOLINA, N. A.; NAKLES, D.V.; GORECKI, C.D.; PECK, W.D., *et al*., 2015. "CO_2 storage associated with CO_2 enhanced oil recovery: A statistical analysis of historical operations". **International Journal of Greenhouse Gas Control**, volume 37, pp.384–397

GASSER, T.; GUIVARCH, C.; TACHIIRI, K.; JONES, C.D.; CIIS, P., 2015. "Negative emissions physically needed to keep global warming below 2ºC". Nature Communications. DOI: 10.1038/ncomms8958

GHG Protocol Brasil, 2016. Ferramenta GHG Protocol v2016.2.

GLOBAL CSS INSTITUTE, 2010 - Global Status of BECCS Projects 2010. Disponível em: <http://hub.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/13516/gccsi-biorecro-global-status-beccs-110302-report.pdf>. Acesso em novembro, 2017.

GLOBAL CCS INSTITUTE, 2017 – BIOCCS. Disponível em: <https://www.globalccsinstitute.com/insights/authors/AliceGibson/2015/11/25/importance-bio-ccs-deliver-negative-emissions>. Acesso: novembro, 2017.

GRONENBERG, H.; DIXON, T., 2010. "Using carbon market to advance negative emissions from biomass and CCS" in: LAUDE, A., RICCI, O., ROYER-ADNOT, J. & FABBRI, A., 2011. "CO_2 Capture and Storage from a bioethanol plant: carbon and energy footprint and economic assessment". **International Journal of Greenhouse Gas Control**, Volume 5, pp. 1220-1231.

HENDRIKS, C. e GRAUS, W., 2004. "Global carbon dioxide storage potential and costs". Ecofys. Disponível em:

<https://www.ecofys.com/files/files/ecofys_2004_globalcarbondioxidestorage.pdf>. Acesso em setembro, 2017.

HILL, B.; Hovorka, S.; Melzer, s.; 2013. "Geologic carbon storage through enhanced oil recovery". **Energy Procedia,** volume 37, pp. 6808 – 6830

IEA, 2013 – "Technology Roadmap: Carbon Capture and Storage". 2013 edition.

IEAGHG, 2010. "Environmental Evaluation of CCS using Life Cycle Assessment (LCA)"

IEAGHG, 2011. "Potential for Biomass and Carbon Dioxide Capture and Storage".

IEAGHG, 2014a. "CO_2 pipeline infrastructure"

IEAGHG, 2014b. "Evaluation and analysis of the performance of the dehydratation units for CO_2 capture".

ILCD, 2010. "ILCD handbook – General Guide for Life Cycle Assessment – Detailed Guidance"

ILLINOIS STATE GEOLOGICAL SURVEY, 2006. Evaluation of CO_2 Capture Options from Ethanol Plants. Topical Report. October 1, 2005–September 30, 2006. Principal Investigator: Robert Finley

INMETRO, 2004. Portaria n^o 33 de 22 de janeiro de 2004.

INSTITUTO AÇO BRASIL, 2016. Relatorio de sustentabilidade 2016 – dados de 2014/2015.

IPCC, 2005. "IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage". Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.

IPCC, 2006. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan

IPCC, 2007. *Fourth Assessment Report* of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2014. Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IYER, G. C.; EDMONDS, J.A.; FAWCETT, A.A.; HULTMAN, N.E.; ALSALAM, J. *et al*., 2015. "The contribution of Paris to limit global warming to 2°C". **Environmental Research Letters**, volume 10

JAKOBSEN, J.P.; TANGEN, G.; NORDBϕ, ϕ.; MϕLNVIK, M.J.; 2008. "Methodology for CO_2 chain analysis". **International Journal of Greenhouse Gas Control**, volume 2, pp. 43 9 – 44 7

KHATIWADA, D.; LEDUC, S.; SILVEIRA, S.; McCALLUM, I.; 2016. "Optimizing ethanol and bioelectricity production in sugarcane biorefineries in Brazil". **Renewable Energy**, Volume 85. Pp. 371-386

KEMPER, J., 2015. "Biomass and carbon dioxide capture and storage: A review". **International Journal of Greenhouse Gas Control,** volume 40, pp. 401–430

KNOOPE, M.M.J., RAMÍREZ, A., FAAIJ, A.P.C., 2013. "A state-of-the-art review of techno-economic models predicting the costs of CO_2 pipeline transport". **International Journal of Greenhouse Gas Control**. Volume16, pp. 241–270.

KUUSKRAA, V., WALLACE, M., 2014. "CO_2-EOR set for growth as new CO_2 supplies emerge". **Oil Gas Journal**. Maio, pp. 92–105.

LAUDE, A., RICCI, O., ROYER-ADNOT, J. & FABBRI, A., 2011. "CO_2 Capture and Storage from a bioethanol plant: carbon and energy footprint and economic assessment". **International Journal of Greenhouse Gas Control**, Volume 5, pp. 1220-1231

LEAL, M.R; WALTER, A.S.; SEABRA, J.E.A., 2013. "Sugarcane as an energy source", **Biomass Conversion and Biorefinery**, volume 3, pp. 17-26.

LINDFELDT, E.G. e WESTERMARK, M.O, 2009. "Biofuel production with CCS as a strategy for creating a CO_2-neutral road transport sector". **Energy Procedia**, volume 1, pp. 4111–4118.

McCOLLUM, D.L., OGDEN, J.M., 2006. Techno-Economic Models for Carbon Dioxide Compression, Transport and Storage Correlations for Estimating Carbon Dioxide Density and Viscosity 87.

MCTI, 2017. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2017 – Fator médio para inventários coorporativos. Disponível em <www.mcti.gov.br>. Acesso em novembro de 2017.

McGLASHAN, N.R.; WORMAN, M.H.W.; CALDECOTT, B.; SHAH, N., 2012. **“**Negative Emissions Technologies”. Grantham Institute for Climate Change. Imperial College London. Briefing paper No 8.

MERSCHMANN, P., 2014. Análise do potencial técnico e de mercado de uso industrial de CO_2 de destilarias de etanol do Centro-Sul do Brasil. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MERSHMANN, P., SZKLO, A. e SCHAEFFER, R., 2016. “Technical potential and abatement costs associated with the use of process emissions from sugarcane ethanol distilleries for EOR in offshore fields in Brazil”. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, Volume 52, pp. 270-292.

MICHELIN, 2018 – Especificações do pneu 275/80 R22.5. Disponível em: <https://caminhoes-onibus.michelin.com.br/x-multi-z-275>. Acesso em janeiro, 2018

MMA, 2011. Ministério do Meio Ambiente. Primeiro Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/>

MMA, 2017 - Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.mma.gov.br>. Acesso em dezembro, 2018.

MÖLLERSTEN, K.; YAN, J.; MOREIRA, J. R., 2003. “Potential Market niches for biomass energy with CO_2 capture and storage – opportunities for supply with negative CO_2 emissions”. **Biomass and Bioenergy** volume 25, pp. 273-285.

MOREIRA, J.R.; ROMEIRO, V.; FUSS, S.; *et al.*, 2016. “BECCS potential in Brazil: Achieving negative emissions in ethanol and electricity production based on sugar cane bagasse and other residues”. **Applied Energy** volume 179, pp. 55–63.

MOREIRA, J.R., 2017. Comunicação pessoal.

NITROTEC, 2017a – Descrição técnica do semi-reboque para CO_2 de eixos espaçados.

NITROTEC, 2017b - Tanques para CO_2 Isolados a Vácuo

NITROTEC, 2017c – Dados considerados no caminhão em SILVA, F.T.F.; CARVALHO, F.M.; CORREA JR, *et al.*, 2018. “CO_2 capture in ethanol distilleries in Brazil: designing the optimum carbon transportation by integrating hubs, pipelines and trucks”. **International Journal of Greenhouse Gas Control,** volume 71, pp. 168-183.

NITROTEC, 2018 – Comunicação pessoal por telefone. Em janeiro, 2018.

ØI, L.E., ELDRUP, N., ADHIKARI, U., BENTSEN, M.H., BADALGE, J.L., YANG, S., 2016. "Simulation and cost comparison of CO_2 liquefaction". **Energy Procedia** volume 86, pp. 500–510.

PEACE SOFTWARE, 2017. Online calculation. Disponível em: <http://www.peacesoftware.de/einigewerte/co2_e.html>. Acesso: novembro, 2017.

RAVAGNANI, A.T.F. da S.G., 2007. Modelagem Técnico-Econômica de Sequestro de CO_2 considerando Injeção em Campos Maduros. Tese de D.Sc., Unicamp, Campinas, SP, Brasil.

REBITZER, G.; EKVALL, T.; FRISCHKNECHT, R.; et al, 2004 – "Life cycle assessment - Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications". **Environment International**, volume 30, pp. 701– 720

ROCKETT, G. C.; KETZER, J. M. M.; RAMÍREZ, A.; van den BROEK, M., 2013. "CO_2 Storage Capacity of Campos Basin's Oil Fields, Brazil". **Energy Procedia**, volume 37, pp. 5124-5133.

ROGELJ, J.; DEN ELZEN, M.; HÖNE, N.; FRANSESN, T. *et al*., 2016. "Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2ºC". **Nature**, volume 534, pp. 631.

ROSA, A.J.; MACHADO, M.V.B., 2014. "Panorama da aplicação de métodos de recuperação melhorada no Brasil e no Mundo". Disponível em: <http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/Palestras/Aumento_Fator_Recuperacao/Marcos_Vitor_Barbosa_Machado_Petrobras.pdf>. Acesso em: novembro, 2017.

SCANIA, 2018 – Especificação técnica do Highline R440 LA8X2 R 885. Disponível em: <https://www.scania.com/br/pt/home/products-and-services/trucks/our-range/r-series/especificacionestecnicas.html>. Acesso em janeiro, 2018.

SILVA, F.T.F.; CARVALHO, F.M.; CORREA JR, *et al.*, 2018. "CO_2 capture in ethanol distilleries in Brazil: designing the optimum carbon transportation by integrating hubs, pipelines and trucks". **International Journal of Greenhouse Gas Control,** volume 71, pp. 168-183.

SINDICARGA, 2017. Disponível em: <http://sindicarga.org.br/site/scania-r440-e-o-caminhao-mais-vendido-de-2017/>. Acesso em 15 de janeiro de 2018.

SMITH, P.; DAVIS, S.J.; CREUTZIG, F.; FUSS, S.; *et al*., 2016 – "Biophysical and economic limits to negative CO_2 emissions". Nature Climate Change, volume 6, janeiro de 2016.

STALKUP, F.I.Jr.,; 1983. "Status of miscible displacement: Journal of Petroleum Technology, Abril, pp. 815–826 in: VERMA, M.K., 2015. Fundamentals of carbon dioxide-enhanced oil recovery (CO_2-EOR) - A supporting document of the assessment methodology for hydrocarbon recovery using CO_2-EOR associated with carbon sequestration: U.S. Geological Survey Open-File Report 2015–1071, 19 p

SULTANA, A.; KUMAR, A., 2014 – "Development of tortuosity factor for assessment of lignocellulosic biomass delivery cost to a biorefinery". **Applied Energy**, volume 119, pp. 288–295.

SVENSSON, R.; ODENBERGER, M.; JOHNSSON, F., STRÖMBERG, L., 2004. "Transportation systems for CO_2–application to carbon capture and storage". **Energy Conversion and Management.** Volume 45, pp. 2343–2353.

TAGOMORI, I.S., CARVALHO, F.M., DA SILVA, F.T.F., MERSCHMANN, P.R., ROCHEDO, P.R.R., SZKLO, A., SCHAEFFER, R., 2018. "Designing an optimum carbon capture and transportation network by integrating ethanol distilleries with fossil-fuel processing plants in Brazil". **International Journal of Greenhouse Gas Control**, volume 68, pp. 112–127

THOMAS, J.E., 2004. Fundamentos de Engenharia de Petróleo, editora. Interciência, 2° edição, Rio de janeiro, 271p.

UDOP, 2016. Acompanhamento da safra 2016/2017

UNICA, 2007. "A energia da cana-de-açúcar".

UNICA, 2008. "A indústria de cana-de-açúcar – etanol, açúcar e bioeletricidade".

UNICA, 2010. "Etanol e bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro a matriz energética". Coordenação e organização: Eduardo L. Leão de Sousa e Isaias de Carvalho Macedo.

VERMA, M.K., 2015. "Fundamentals of carbon dioxide-enhanced oil recovery (CO_2-EOR) - A supporting document of the assessment methodology for hydrocarbon recovery using CO_2-EOR associated with carbon sequestration". U.S. Geological Survey Open-File Report 2015–1071, 19 p

WIGLEY, T.M.L., 2018 – "The Paris warming targets: emissions requirements and sea level consequences". **Climatic Change,** volume 147, pp. 31-45.

WRI, 2008 – CCS Guideliness

XU, Y.; ISOM, L.; HANNA, M. A.; 2010. "Adding value to carbon dioxide from ethanol fermentations". **Bioresource Technology**, volume 101, pp. 3311–3319

ZEP e EBTP, 2012. Zero Emission Plataform e European Biofuels Technology Platform. "Biomass with CO_2 capture and Storage (BIO-CCS) – The way forward to Europe". Disponível em: <http://www.zeroemissionsplatform.eu/library/publication/206-biomass-with-co2-capture-and-storage-bio-ccs-%20the-way-forward-for-europe.html>. Acesso em julho, 2017.

Anexo 1 – Dados obtidos para o Caso de único Hub de dutos compartilhados

Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressores (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
1	Vale Verde - Itapaci	3,89	669,48	61,5	0,10	13.981		117.204	58,17	2.015
2	CRV	2,85	490,95	12,81	0,09	2.572		88.522	59,91	1.478
3	Vale Verde + CRV	6,74		102,58	0,13	29.060				
4	Uruaçú	1,94	334,74	232,51	0,08	40.059		90.279	89,61	1.008
5	Vale Verde + CRV+ Uruaçu	8,68		34,72	0,14	10.885				
6	Cooper Rubiataba	5,18	892,64	169,7	0,12	43.284		170.705	63,54	2.687
7	Vale Verde + CRV+ Uruaçu+ Cooper Rubi	13,86		308,41	0,17	116.603				
8	Caçú	2,59	446,32	329,77	0,09	63.745		100.926	75,13	1.343
9	Jalles Machado	3,89	669,48	96,15	0,10	21.859		114.246	56,70	2.015
10	Goianésia	1,30	223,16	20,1	0,07	2.945		39.398	58,66	672
11	Jalles Machado - Otávio Lage	5,18	892,64	14,43	0,12	3.681		158.965	59,17	2.687
12	Goianésia + Jalles Mac (Otavio)	6,48		72,32	0,13	20.168				
13	Goianésia + Jalles Mac (Otavio)+ Jalles Machado	10,37		68,73	0,15	23.132				
14	Centroalcool	3,24	557,90	18,51	0,10	3.912		83.652	49,82	1.679
15	Goianésia + Jalles Mac (Otavio)+ Jalles Machado +	13,60		194,38	0,17	72.938				
16	Goiasa Goiatuba	5,18	892,64	0	0,12	0	3592,8	99.798	37,15	2.687
17	Goianésia + Jalles Mac (Otavio)+ Jalles Machado +	18,79		135,57	0,19	57.881				
18	Vale Verde + CRV+ Uruaçu+ Cooper Rubi + Goian	32,65		112,02	0,24	59.660				
19	Guariroba	3,10	533,77	0	0,09	0		44.466	27,68	1.607
20	Vale Verde + CRV+ Uruaçu+ Cooper Rubi + Goian	38,34		47,08	0,26	26.738				
21	Anicuns	2,92	502,11	101,04	0,09	20.474		90.769	60,06	1.511
22	Tropical	10,37	1785,28	0	0,15	0		249.939	46,51	5.373
23	Anicuns + Tropical	13,28		373,88	0,17	138.947				
24	Denusa	3,89	669,48	443,48	0,10	100.820		155.495	77,17	2.015
25	São Paulo	3,89	669,48	337,12	0,10	76.641		131.315	65,17	2.015
26	COFCO - UNP	6,20	1067,55	11,81	0,12	3.236		90.419	28,14	3.213
27	Danusa+UNP+ São Paulo	13,97		15,3	0,17	5.803				
28	Vale Verde + CRV+ Uruaçu+ Cooper Rubi + Goian	65,59		7,57	0,32	5.329				
29	Usinova	6,48	1115,80	453,58	0,13	126.493		214.400	63,84	3.358
30	Vale do Verdão	8,29	1428,23	335,23	0,14	103.191		215.712	50,18	4.299
31	CEMMA	6,82	1174,30	0	0,13	0		92.516	26,18	3.534
32	Vale Verde + CRV+ Uruaçu+ Cooper Rubi + Goian	87,18		7,57	0,36	5.972				
33	Santa Helena	2,20	379,37	73,31	0,08	13.279		70.650	61,87	1.142
34	Rio Verde - Decal	1,94	334,74	79,05	0,08	13.620		64.241	63,76	1.008
35	SJC - São Francisco	5,18	892,64	0	0,12	0		133.656	49,75	2.687
36	Santa Helena + Decal + SJC	9,33		306,78	0,15	98.989	135,6			
37	Boa Vista	10,04	1729,49	166,16	0,15	55.217		210.211	40,38	5.205
38	Coruripe - Iturama	3,66	630,89	10,65	0,10	2.364		58.904	31,02	1.899
39	Santa Helena + Decal + SJC + Boa Vista + Corurip	23,03		148,89	0,21	68.966				
40	COFCO - Meridiano	6,82	1174,30	82,43	0,13	23.463	0	107.082	30,30	3.534
41	Coruripe - Limeira do Oeste	3,38	582,36	63,91	0,10	13.741		67.972	38,78	1.753
42	Central Energética	3,38	582,36	0	0,10	0		54.231	30,94	1.753
43	Ouroeste	3,10	533,77	0	0,09	0		49.706	30,94	1.607
44	Coruripe + Central Energética + Ouroeste	9,86		32,4	0,15	10.689				
45	Alcoeste	3,10	533,77	9,98	0,09	2.072	73,1	48.419	30,14	1.607
46	Coruripe + Ouroeste + Alcoeste	12,96		45,13	0,17	16.609				
47	Serranópolis	2,27	390,53	343,78	0,08	62.997		96.074	81,74	1.175
48	Figueira - Generalco	3,41	587,15	0	0,10	0		42.211	23,89	1.767
49	Serranópolis + Generalco	5,68		19,62	0,12	5.190				
50	Coruripe + Ouroeste + Alcoeste + Serranópolis +	18,64		56,54	0,19	24.062				
51	Alcoolvale	2,31	397,80	121,82	0,08	22.489		55.541	46,39	1.197
52	Santa Adélia - Pereira Barreto	6,82	1174,30	28,64	0,13	8.152		118.891	33,64	3.534
53	Pioneiros	2,48	427,02	6,16	0,09	1.170	22,8	41.439	32,24	1.285
54	Santa Adelia Pereira + Pioneiros	9,30		55,72	0,15	17.955				
55	Santa Adelia Pereira + Pioneiros + Alcoolvale	11,61		65,51	0,16	23.069				
56	Viralcool - Santa Amália	3,72	640,53	174,76	0,10	39.033	7,3	84.863	44,02	1.928
57	Aralco	1,55	266,89	41,84	0,07	6.584		26.710	33,25	803
58	Raizen - Gasa	7,41	1276,79	117,67	0,13	34.633		134.261	34,94	3.843
59	Da Mata	6,20	1067,55	60,59	0,12	16.601		99.299	30,90	3.213
60	Raizen Gasa + Da Mata	13,61		9,17	0,17	3.442				
61	CBAA - Sidrolândia	2,13	366,39	453,05	0,08	80.929		111.063	100,71	1.103
62	Figueira - Alcoazul	4,03	693,91	7,69	0,10	1.773		58.845	28,18	2.089
63	CBAA + Alcoazul	6,16		11,06	0,12	3.022	152,1			
64	Raizen - Destivale	2,58	445,17	11,38	0,09	2.198		37.805	28,22	1.340
65	CBAA + Alcoazul + Raizen Destivale	8,74		16,4	0,14	5.156				
66	Raizen Gasa + Da Mata +CBAA + Alcoazul + Raiz	22,35		4,96	0,21	2.270				
67	Raizen - Mundial	1,94	334,14	94,4	0,08	16.253		41.638	41,40	1.006
68	Raizen Gasa + Da Mata +CBAA + Alcoazul + Raiz	24,29		4,99	0,21	2.361				
69	Aralco + Raizen Gasa + Da Mata +CBAA + Alcoaz	25,84		29,13	0,22	14.128				

Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressores (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
70	Pedra - Ipê	4,96	854,04	64,66	0,11	16.203		90.764	35,31	2.570
71	Caeté - Paulicéia	7,44	1281,06	103,06	0,13	30.374		142.214	36,88	3.856
72	Pedra + Caeté	12,40		13,6	0,16	4.917				
73	Raízen - Benálcool	1,55	266,89	13,83	0,07	2.176		22.910	28,52	803
74	Pedra + Caeté + Benálcool	13,95		46,35	0,17	17.565				
75	Santa Luzia	17,02	2931,12	348,26	0,19	142.921		395.096	44,78	8.822
76	Biosev Maracaju	2,19	376,86	330,01	0,08	59.618		100.139	88,28	1.134
77	Biosev Passatempo	5,77	994,49	278,76	0,12	74.242		172.871	57,75	2.993
78	Maracaju + Passatempo	7,96		97,3	0,14	29.468	1113,5			
79	Raizen - Univalem	4,03	693,91	0	0,10	0		59.699	28,58	2.089
80	Santa Luzia + Maracaju + Passatempo + Univalem	29,01		82,09	0,23	41.700				
81	Pedra + Caeté + Benálcool + Santa Luzia + Maraca	42,95		10,5	0,27	6.241				
82	Tonon - Bom Retiro	3,65	628,10	285,26	0,10	63.217		144.969	76,68	1.890
83	CBAA Brasilândia	4,25	732,78	0	0,11	0		95.377	43,24	2.206
84	Tonon + CBAA Brasilandia	7,90		240,3	0,14	72.554				
85	Revati	5,89	1014,17	13,24	0,12	3.554		81.487	26,70	3.052
86	Pedra + Caeté + Benálcool + Santa Luzia + Maraca	56,74		32,63	0,30	21.678				
87	Eldorado	10,33	1779,61	51,44	0,15	17.291		192.341	35,91	5.356
88	São Fernando	5,01	863,63	83,6	0,11	21.043		141.583	54,47	2.599
89	Eldorado + São Fernando	15,35		103,46	0,18	40.739				
90	Adecoagro - Angélica	7,29	1256,20	82,98	0,13	24.265		164.146	43,41	3.781
91	Eldorado + São Fernando + Adecoagro	22,64		19,2	0,21	8.832				
92	Centro Oeste Iguatemi	2,13	366,39	110,42	0,08	19.724		74.684	67,72	1.103
93	Usinavi	3,65	628,10	30,14	0,10	6.679		100.895	53,37	1.890
94	Centro Oeste + Usinavi	5,77		198,77	0,12	52.938				
95	Eldorado + São Fernando + Adecoagro + Centro O	28,41		22,4	0,23	11.285				
96	Santa Helena	4,56	379,37	102,51	0,11	24.838		71.127	30,10	2.363
97	Eldorado + São Fernando + Adecoagro + Centro O	32,97		16,4	0,24	8.769				
98	Laguna	2,43	418,73	116,38	0,09	21.930	514,0	61.794	49,03	1.260
99	Eldorado + São Fernando + Adecoagro + Centro O	35,40		91,3	0,25	50.225				
100	Alta Paulista - Dracena	3,10	533,77	11,43	0,09	2.373		48.050	29,91	1.607
101	Eldorado + São Fernando + Adecoagro + Centro O	38,50		23,29	0,26	13.249				
102	Alcídia	3,01	517,76	160,47	0,09	32.917		87.205	55,96	1.558
103	Alta Paulista	2,14	368,30	17,23	0,08	3.084		34.379	31,01	1.109
104	Eldorado + São Fernando + Adecoagro + Centro O	43,65		25,12	0,27	15.026				
105	Glencane	3,04	523,10	40,1	0,09	8.260		51.661	32,81	1.574
106	Eldorado + São Fernando + Adecoagro + Centro O	46,68		29,88	0,28	18.360				
107	Flórida	3,72	640,53	12,12	0,10	2.707		54.389	28,21	1.928
108	Branco Peres	1,98	341,61	0	0,08	0		27.564	26,81	1.028
109	Eldorado + São Fernando + Adecoagro + Centro O	52,39		108,95	0,29	70.104				
110	Bioenergia	3,72	640,53	31,67	0,10	7.074		56.836	29,48	1.928
111	Unialco	2,36	405,67	20,8	0,08	3.870		35.654	29,20	1.221
112	Santa Terezinha - Ivaté	1,42	244,50	130,33	0,07	19.803		54.013	73,40	736
113	Melhoramentos - Nova Londrina	1,99	342,30	36,17	0,08	6.288		53.948	52,36	1.030
114	Santa Terezinha - Terra Rica	1,66	285,25	0	0,07	0	52,2	39.912	46,49	859
115	Santa Terezinha Ivate + Melhoramentos + Terra Ri	5,06		164,58	0,11	41.589				
116	Alto Alegre - Floresta	2,17	373,64	17,53	0,08	3.156		37.616	33,45	1.125
117	Santa Terezinha Ivate + Melhoramentos + Terra Ri	7,23		59,31	0,13	17.285				
118	Bioenergia + Unialco + Santa Terezinha Ivate + Me	13,31		39,8	0,17	14.803				
119	Santa Teresinha - Cidade	1,42	244,50	201,28	0,07	30.584		58.571	79,59	736
120	Costa	0,95	163,00	124,72	0,06	16.114		43.099	87,85	491
121	Sabarálcool - Filial	1,18	203,75	113,31	0,06	16.006		49.737	81,10	613
122	Santa Terezinha - Rondon	1,89	326,00	10,7	0,08	1.824	63,1	55.794	56,86	981
123	Sabará Filial + Santa Terezinha Rondon + Costa	4,02		120,52	0,10	27.776				
124	Santa Terezinha - Paranacity	2,60	448,25	58,06	0,09	11.243		67.478	50,02	1.349
125	Sabará Filial + Santa Terezinha Rondon + Costa +	6,62		39,2	0,13	11.030				
126	Sabará Filial + Santa Terezinha Rondon + Paranac	8,04		196,88	0,14	59.872				
127	Cocal - Narandiba	4,96	854,04	18,77	0,11	4.704		98.370	38,27	2.570
128	Coopcana	5,68	978,01	228,31	0,12	60.401		149.166	50,67	2.944
129	Alto Alegre - Santo Inácio	3,31	570,50	56,59	0,10	12.068	60,8	74.638	43,47	1.717
130	Santo Inacio + Cocal	8,27		87,62	0,14	26.943				
131	Parapuã	1,55	266,89	0	0,07	0		24.223	30,16	803
132	Santo Inacio + Cocal +Coopcana + Parapuã	15,50		127,42	0,18	50.371				
133	Santa Terezinha - Tapejara	2,37	407,50	102,32	0,08	19.072		75.680	61,70	1.227
134	Santa Terezinha - Zona Rural	2,60	448,25	72,68	0,09	14.074		76.342	56,59	1.349
135	Tapejara + Zona Rural	4,97		20,82	0,11	5.222				
136	Alto Alegre - Junqueira	3,31	570,50	0	0,10	0	39,8	75.770	44,13	1.717
137	Tapejara + Zona Rural + Alto Alegre Junqueia	8,28		209,58	0,14	64.478				
138	Atena	1,86	320,26	77,85	0,08	13.178		41.234	42,78	964
139	Tapejara + Zona Rural + Alto Alegre Junqueia + A	10,14		82,26	0,15	27.443				
142	Melhoramentos - Jussara	5,68	978,01	372,82	0,12	98.631	22,3	168.942	57,39	2.944
143	Clealco - Matriz	2,79	480,40	67,23	0,09	13.384	0	47.592	32,92	1.446
144	Campestre	4,03	693,91	42,1	0,10	9.709	0	59.121	28,31	2.089
145	Sabarálcool - Matriz	1,70	293,40	108,39	0,07	17.716		63.733	72,17	883
146	Cooper Nova Produtiva	1,51	260,80	8,04	0,07	1.254		42.158	53,71	785
147	Sabará + Nova Produtiva	3,22		32,55	0,10	6.861	17,1			
148	UCP ANP	1,14	195,60	0	0,06	0		28.257	48,00	589
149	Sabará + Nova Produtiva + UCP	4,35		228,74	0,11	54.413				
150	Santa Terezinha - Iguatemi	1,42	244,50	334,85	0,07	50.879	5,57	68.457	93,02	736

Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressores (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
151	Renuka - São Pedro do Ivaí	2,13	366,75	106,42	0,08	19.017		61.237	55,48	1.104
152	Cooperval	1,89	326,00	80,43	0,08	13.712		51.240	52,22	981
153	Renuka + Cooperval	4,02		32,79	0,10	7.557				
154	Renuka - Marialva	1,56	268,95	93,09	0,07	14.694		42.721	52,78	809
155	Alto Alegre - Florestópolis	2,84	489,00	0	0,09	0		50.958	34,62	1.472
156	Renuka + Cooperval + Marialva + Florestópolis	8,42		83,04	0,14	25.722				
157	Cocal - Paraguaçu Paulista	3,72	640,53	14,51	0,10	3.241		58.632	30,41	1.928
158	Renuka + Cooperval + Marialva + Florestópolis + C	12,14		23,11	0,16	8.286				
159	Americana	1,51	260,80	73,33	0,07	11.434		35.687	45,46	785
160	Raizen Tarumã Maracaí	3,72	640,53	0	0,10	0		59.566	30,90	1.928
161	Americana + Maracaí	5,23		36,89	0,12	9.446				
162	Quatá	5,27	907,41	13,6	0,12	3.492	256,1	78.367	28,69	2.731
163	Água Bonita	2,17	373,64	0	0,08	0		29.937	26,62	1.125
164	Raizen Paraguaçu	1,38	237,00	41,16	0,07	6.177		25.732	36,07	713
165	Renuka + Cooperval + Marialva + Florestópolis + C	26,19		14,09	0,22	6.870				
166	Raizen - Tarumã	5,27	907,41	93,72	0,12	24.062		97.556	35,72	2.731
167	Iberia	3,10	533,77	19,6	0,09	4.070		47.301	29,44	1.607
168	Renuka + Cooperval + Marialva + Florestópolis + C	34,56		23,66	0,25	12.890				
169	Bandeirantes	3,31	570,50	151,12	0,10	32.226		77.197	44,96	1.717
170	Renuka + Cooperval + Marialva + Florestópolis + C	37,87		34,59	0,26	19.547				
171	Clealco - Pouso Alegre	3,10	533,77	27,52	0,09	5.714		46.190	28,75	1.607
172	Pyles	1,12	192,16	136,32	0,06	18.811		33.382	57,72	578
173	Renuka + Cooperval + Marialva + Florestópolis + C	42,08		43,79	0,27	25.814				
174	Diana	1,55	266,89	29,57	0,07	4.653	0	23.658	29,45	803
175	Clarion	2,32	399,35	158,24	0,08	29.258		73.254	60,94	1.202
176	Tirolli	2,17	373,64	35,79	0,08	6.444		47.607	42,33	1.125
177	Clarion + Tirolli	4,49		13,69	0,11	3.297				
178	Jacarezinho	2,13	366,75	75,36	0,08	13.467	33,4	52.308	47,39	1.104
179	Clarion + Tirolli + Jacarezinho	6,62		56,62	0,13	15.925				
180	Dacalda	1,89	326,00	140,63	0,08	23.974		53.944	54,98	981
181	Clarion + Tirolli + Jacarezinho + Dacalda	8,51		94,44	0,14	29.374				
182	Comanche - Canitar	1,86	320,26	35,63	0,08	6.031		45.994	47,71	964
183	São Luiz	2,79	480,40	24,4	0,09	4.857	9,1	64.801	44,82	1.446
184	Canitar + São Luiz	4,65		174,52	0,11	42.619				
185	Londra	2,54	437,69	26,5	0,09	5.083		55.331	42,00	1.317
186	Iracema	3,10	533,77	0	0,09	0		61.279	38,14	1.607
187	Londra + Iracema	5,64		32,4	0,12	8.549				
188	Comanche - Santa Anita	1,30	224,18	12,66	0,07	1.858		25.622	37,97	675
189	Santa Maria	0,25	42,70	0	0,03	0		4.527	35,22	129
190	Londra + Iracema + Comanche - Santa Anita + Sai	7,19		29,91	0,13	8.696				
191	Rio Pardo	3,10	533,77	35,8	0,09	7.434		60.267	37,51	1.607
192	TGM	1,61	277,56	46,43	0,07	7.422		34.895	41,77	835
193	Londra + Iracema + Comanche - Santa Anita + Sai	11,90		16,56	0,16	5.890				
194	JJ	2,42	416,34	0	0,09	0	58,0	40.013	31,93	1.253
195	Londra + Iracema + Comanche - Santa Anita + Sai	14,32		73,2	0,17	28.034				
196	Raizen - Ipaussu	3,82	658,68	127,8	0,10	28.865		84.681	42,71	1.982
197	Londra + Iracema + Comanche - Santa Anita + Sai	18,14		47,7	0,19	20.083				
198	Cafealcool	1,60	275,43	17,82	0,07	2.840		24.409	29,44	829
199	Batatais - Lins	4,96	854,04	0	0,11	0		66.881	26,02	2.570
200	Londra + Iracema + Comanche - Santa Anita + Sai	24,70		30,26	0,22	14.414				
201	Guaricanga	4,83	832,69	96	0,11	23.815		86.202	34,40	2.506
202	Londra + Iracema + Comanche - Santa Anita + Sai	29,53		33,54	0,23	17.160				
203	Vista Alegre	2,17	373,64	93,03	0,08	16.749		57.719	51,32	1.125
204	Santa Rosa	1,12	192,16	20,63	0,06	2.847		28.160	48,69	578
205	J. Pilon - Santa Maria	2,42	416,34	0	0,09	0		54.846	43,77	1.253
206	Santa Rosa + J Pilon	3,53		61,41	0,10	13.438				
207	Vista Alegre + Santa Rosa + J Pilon	5,70		110,27	0,12	29.222				
208	Barra Grande	6,82	1174,30	37,62	0,13	10.708		112.020	31,69	3.534
209	São José	3,10	533,77	21,61	0,09	4.487		50.538	31,46	1.607
210	Barra Grande + São José	9,92		17,75	0,15	5.869				
211	São Manoel	7,44	1281,06	72,24	0,13	21.290		127.410	33,04	3.856
212	Barra Grande + São José + São Manoel	17,35		21,25	0,19	8.789				
213	Raízen - Bom Retiro	1,65	285,03	56,34	0,07	9.102		38.925	45,37	858
214	Raizen - Rafard	2,60	448,37	43,98	0,09	8.517		55.428	41,07	1.350
215	Zambianco - Pederneiras	1,12	192,16	21,67	0,06	2.990		23.095	39,93	578
216	Bom Retiro + Rafard + Zambianco	5,37		40,5	0,12	10.481				
217	Furlan - Matriz	1,55	266,89	23,96	0,07	3.770		33.793	42,07	803
218	Raizen - Santa Helena	1,98	341,61	0	0,08	0		38.429	37,37	1.028
219	Furlan + Santa Helena	3,53		35,43	0,10	7.753				
220	Raizen - Costa Pinto	4,91	845,50	24,14	0,11	6.025		90.364	35,51	2.545
221	Granelli	0,25	42,70	17,69	0,03	1.337		5.597	43,55	129
222	Furlan + Santa helena + Costa Pinto + Granelli	8,69		30,77	0,14	9.651				
223	Bom Retiro + Rafard + Zambianco+ Furlan + Santa	14,06		32,01	0,17	12.172				
224	Raizen - Barra	7,49	1289,60	0	0,13	0		113.843	29,33	3.881
225	Bom Retiro + Rafard + Zambianco+ Furlan + Santa	21,55		40,29	0,20	18.172				
226	Raizen - Diamante	1,34	231,66	23,35	0,07	3.472		22.788	32,68	697
227	Bom Retiro + Rafard + Zambianco+ Furlan + Santa	22,90		29,74	0,21	13.743				
228	Vista Alegre + Santa Rosa + J Pilon + Barra Grand	45,95		35,23	0,28	21.511				
229	Tonon - Paraíso	4,21	725,93	60,08	0,11	14.108		75.800	34,69	2.185
230	Tonon - Cândida GL	3,72	640,53	12,73	0,10	2.843		57.277	29,71	1.928
231	Grizzo	2,05	352,29	39,33	0,08	6.916		36.855	34,76	1.060
232	Della Coletta	2,54	437,69	7,42	0,09	1.423		38.620	29,32	1.317
233	Paraíso + Cândida + Grizzo + Della Coletta	12,52		46,36	0,16	16.827				
234	Raizen - Dois Córregos	1,13	195,36	101,99	0,06	14.167		29.245	49,74	588
235	Iacanga	3,37	580,75	17,25	0,10	3.705		48.526	27,76	1.748
236	Vista Alegre + Santa Rosa + J Pilon + Barra Grand	62,98		34,04	0,31	23.578	1831,5			
237	São Martinho - Iracema	2,79	480,40	38,1	0,09	7.585		55.747	38,56	1.446
238	Ester	2,79	480,40	43,42	0,09	8.644		56.806	39,29	1.446
239	USJ	6,20	1067,55	10,87	0,12	2.978		110.006	34,24	3.213
240	Santa Lúcia	1,92	330,94	4,8	0,08	823		34.002	34,14	996
241	São Martinho + Ester + USJ + Santa Lúcia	13,70		28,26	0,17	10.633				

Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressores (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
242	Baldin	1,12	192,16	0	0,06	0		18.399	31,81	578
243	São Martinho + Ester + USJ + Santa Lúcia + Baldin	14,81		41,22	0,18	16.003				
244	Virgolino de Oliveira - Itapira	2,73	469,72	62,65	0,09	12.361		58.445	41,34	1.414
245	Biosev - Leme	2,23	384,32	33,08	0,08	6.023		43.728	37,80	1.157
246	Abengoa - São Luiz	1,24	213,51	18,52	0,07	2.666		23.613	36,74	643
247	Itapira + Biosev Leme + São Luiz	6,20		24,23	0,12	6.639				
248	Abengoa - São João	3,72	640,53	90,48	0,10	20.209		79.068	41,01	1.928
249	Itapira + Biosev Leme + São Luiz + São João	9,92		12,47	0,15	4.123				
250	São Martinho + Ester + USJ + Santa Lúcia + Baldin	24,73		27,06	0,22	12.896				
251	Raizen - Serra	1,55	266,89	27,72	0,07	4.362		27.434	34,15	803
252	Raizen - Araraquara	3,10	533,77	16,4	0,09	3.405		49.550	30,84	1.607
253	São Martinho + Ester + USJ + Santa Lúcia + Baldin	29,38		42,01	0,23	21.449				
254	Ferrari	2,29	394,99	68,61	0,08	12.630		45.858	38,57	1.189
255	Ipiranga - Descalvado	2,48	427,02	30,15	0,09	5.726	1831,5	41.648	32,40	1.285
256	Ferrari + Ipiranga Desc	4,77		6,37	0,11	1.572				
257	Santa Rita	3,72	640,53	52,72	0,10	11.775		64.433	33,42	1.928
258	São Martinho - Santa Cruz	6,82	1174,30	4,27	0,13	1.215		97.755	27,66	3.534
259	São Martinho + Ester + USJ + Santa Lúcia + Baldin	44,69		48,89	0,27	29.521				
260	Maringá	3,04	523,10	56,37	0,09	11.611		52.609	33,41	1.574
261	Santa Fé	4,96	854,04	20,19	0,11	5.059		71.995	28,01	2.570
262	Malosso	1,92	330,94	18,4	0,08	3.156		29.093	29,21	996
263	São Martinho + Ester + USJ + Santa Lúcia + Baldin	54,61		41,48	0,30	27.137				
264	Citrosuco	0,25	42,70	74,96	0,03	5.667		8.891	69,18	129
265	Moreno	7,44	1281,06	137,73	0,13	40.591		137.298	35,61	3.856
266	São Martinho + Ester + USJ + Santa Lúcia + Baldin	62,29		7,53	0,31	5.193				
267	Santa Isabel - Matriz	3,10	533,77	0	0,09	0		40.036	24,92	1.607
268	São José da Estiva	4,96	854,04	0	0,11	0		64.058	24,92	2.570
269	Vista Alegre + Santa Rosa + J Pilon + Barra Grand	133,33		34,51	0,42	32.266				
270	São Simão	2,59	446,32	204,59	0,09	39.548	5,1	71.482	53,21	1.343
271	Santa Isabel - Filial	1,86	320,26	6,11	0,08	1.034	0,0	23.840	24,73	964
272	Ipiranga - Mococa	1,49	256,21	145,56	0,07	22.535		46.896	60,81	771
273	Raizen - Bonfim	7,52	1294,93	14,26	0,13	4.221		127.342	32,67	3.898
274	Ipiranga + Bonfim	9,01		10,64	0,14	3.385	26,2			
275	Santa Adélia - Jaboticabal	4,34	747,28	21,13	0,11	5.020		74.440	33,10	2.249
276	Ipiranga + Bonfim + Santa Adelia	13,34		131,77	0,17	49.065				
277	São Martinho - Matriz	5,76	992,82	45,58	0,12	12.131		101.215	33,87	2.988
278	Guarani - Cruz Alta	2,48	427,02	63,88	0,09	12.132		50.447	39,25	1.285
279	São Martinho + Guarani Cruz	8,24		6,73	0,14	2.067				
280	Nardini	4,96	854,04	12,73	0,11	3.190		78.578	30,57	2.570
281	São Martinho + Guarani Cruz + Nardini	13,20		59,33	0,17	21.997				
282	Itajobi	3,35	576,48	12,96	0,10	2.775		48.086	27,71	1.735
283	São Martinho + Guarani Cruz + Nardini + Itajobi	16,55		14,61	0,18	5.929				
284	Delos	1,24	213,51	79,49	0,07	11.441	79,8	28.509	44,36	643
285	Colombo - Ariranha	5,08	875,39	4,65	0,11	1.177		71.156	27,01	2.635
286	Virgolino de Oliveira - Catanduva	6,63	1142,27	0	0,13	0		91.315	26,56	3.438
287	Bertolo	1,86	320,26	12,96	0,08	2.194		27.796	28,84	964
288	Delos+ Colombo + Catanduva + Bertolo	14,81		22,49	0,18	8.731				
289	São Domingos	3,10	533,77	0	0,09	0		40.844	25,42	1.607
290	COFCO - Catanduva	6,20	1067,55	0	0,12	0		81.688	25,42	3.213
291	São Martinho + Guarani Cruz + Nardini + Itajobi + D	40,66		59,85	0,26	34.798				
292	Usina Passos	1,69	291,18	169,46	0,07	27.613		55.034	62,80	876
293	Andrade	8,06	1387,81	0	0,14	0		130.693	31,29	4.177
294	Carolo	2,36	405,67	21,17	0,08	3.939	63,3	42.141	34,51	1.221
295	Passos + Andrade + Carolo	12,10		93,18	0,16	33.367				
296	Viralcool - Santa Cecília	4,03	693,91	93,18	0,10	21.489		75.729	36,26	2.089
297	Passos + Andrade + Carolo+ Viralcool Sta Cecilia	16,13		43,4	0,18	17.434				
298	Monte Alegre	1,13	194,12	141,82	0,06	19.649		37.772	64,65	584
299	Alvorada do Bebedouro	1,27	219,36	95,66	0,07	13.918		34.397	52,10	660
300	Pedra - Da Pedra	7,44	1281,06	8,67	0,13	2.555		122.153	31,68	3.856
301	Monte Alegre + Alvorada do Bebedouro + Pedra	9,84		99,03	0,15	32.641				
302	Biosev Bioenergia - Jardest	2,48	427,02	77,29	0,09	14.678		50.247	39,10	1.285
303	Bazan	6,63	1142,27	97,23	0,13	27.371		122.517	35,64	3.438
304	Toniello	2,17	373,64	37,79	0,08	6.804		37.926	33,72	1.125
305	Santo Antônio	4,03	693,91	9,31	0,10	2.147	82,8	64.676	30,97	2.089
306	Biosev Bioenergia - Santa Elisa	7,13	1227,68	0	0,13	0		110.628	29,94	3.695
307	Santo Antônio + Biosev Bioenergia	11,16		37,79	0,16	13.098				
308	Pitangueiras	3,72	640,53	0	0,10	0		53.353	27,67	1.928
309	Jardest + Bazan + Toniello + Sto Antonio + Santa E	26,16		44,33	0,22	21.605				
310	Antônio Ruette - Cachoeira	3,10	533,77	0	0,09	0		41.901	26,08	1.607
311	Jardest + Bazan + Sto Antonio + Santa Elisa + Pita	29,26		43,53	0,23	22.187				
312	COFCO - Potirendaba	3,10	533,77	0	0,09	0		39.551	24,62	1.607
313	Monte Alegre + Alvorada do Bebedouro + Pedra +	42,19		31,36	0,27	18.505				
314	Cevasa	3,41	587,15	19,73	0,10	4.256		68.512	38,77	1.767
315	Batatais- Matriz	6,20	1067,55	13,34	0,12	3.655	18,9	120.484	37,50	3.213
316	Cevasa + Batatais	9,61		192,02	0,15	62.692				

Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressores (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
317	Planalto	1,69	291,18	249,83	0,07	40.709		64.055	73,09	876
318	Pedra - Buriti	10,54	1814,83	88,1	0,15	29.846		179.923	32,94	5.462
319	Alta Mogiana	6,82	1174,30	36,51	0,13	10.392		108.346	30,65	3.534
320	Biosev Bioenergia - Vale do Rosário	7,44	1281,06	16,99	0,13	5.007		111.866	29,01	3.856
321	Alta Mogiana + Vale Rosario	14,26		20,8	0,17	7.952				
322	Planalto + Pedra Buriti + Alta Mogiana + Vale Rosá	26,48		7,2	0,22	3.527				
323	Raizen - Junqueira	3,61	622,38	109,51	0,10	24.180		73.598	39,29	1.873
324	Guaíra	3,10	533,77	53,58	0,09	11.126		53.509	33,31	1.607
325	ZL - São José	6,82	1174,30	11,83	0,13	3.367		96.610	27,33	3.534
326	Planalto + Pedra Buriti + Alta Mogiana + Vale Rosá	40,01		24,34	0,26	14.062	289,0			
327	Delta	3,38	582,36	74,81	0,10	16.085		65.027	37,10	1.753
328	Guarani - Mandu	6,32	1088,90	8,6	0,12	2.375		93.886	28,65	3.277
329	Colorado	10,85	1868,21	8,6	0,15	2.947		159.952	28,45	5.623
330	Delta + Guarani Mandu + Colorado	20,55		53,41	0,20	23.636				
331	Planalto + Pedra Buriti + Alta Mogiana + Vale Rosá	60,56		25,46	0,31	17.361				
332	Delta - Volta Grande	5,64	970,60	127,59	0,12	33.652		107.125	36,67	2.921
333	Biosev Bioenergia MB	4,34	747,28	63,06	0,11	14.981		83.206	36,99	2.249
334	Guarani - Severínia	3,10	533,77	0	0,09	0		48.733	30,33	1.607
335	MB + Severinea	7,44		67,81	0,13	19.985				
336	Planalto + Pedra Buriti + Alta Mogiana + Vale Rosá	73,64		65,47	0,33	48.274				
337	Santa Juliana	6,76	1164,72	292,35	0,13	82.941	13,3	166.277	47,43	3.506
338	Santo Ângelo	2,25	388,24	111,56	0,08	20.395		52.147	44,63	1.169
339	Biosev - Bioenergia Continental	3,41	587,15	78,67	0,10	16.970		64.990	36,78	1.767
340	Vertente	4,96	854,04	36,88	0,11	9.242	28,4	79.088	30,77	2.570
341	Onda Verde	3,84	661,88	0	0,10	0		54.131	27,17	1.992
342	Santo Ângelo + Biosev Cont + Vertente + Onda V	14,46		66,3	0,17	25.496				
343	Lasa Lago Azul	2,27	390,53	435,01	0,08	79.715		116.285	98,93	1.175
344	Frutal	2,82	485,30	70,14	0,09	14.020	29,9	59.464	40,71	1.461
345	Lago azul + Frutal	5,09		74,07	0,11	18.750				
346	Morrinhos	2,59	446,32	52,28	0,09	10.106		66.072	49,18	1.343
347	Bom Sucesso	3,24	557,90	0	0,10	0		69.957	41,66	1.679
348	Colorado + Bom Sucesso	5,83		65,92	0,12	17.625				
349	Panorama	3,89	669,48	34,99	0,10	7.955		80.153	39,78	2.015
350	Colorado + Bom Sucesso + Panorama	9,72		15,2	0,15	4.985				
351	Araporã	2,25	388,24	44,26	0,08	8.092		48.804	41,77	1.169
352	Colorado + Bom Sucesso + Panorama + Araporã	11,97		27,3	0,16	9.733				
353	Damfi	1,12	192,18	34,41	0,06	4.748		23.994	41,48	578
354	Colorado + Bom Sucesso + Panorama + Araporã	13,09		14,76	0,17	5.453				
355	Ituiutaba	5,07	873,54	0	0,11	0	153,5	85.367	32,47	2.629
356	Colorado + Bom Sucesso + Panorama + Araporã	18,16		61,28	0,19	25.810				
357	Cachoeira	0,68	116,47	152,98	0,05	17.278		27.699	79,01	351
358	Colorado + Bom Sucesso + Panorama + Araporã	18,84		48,49	0,19	20.724				
359	Itapagipe	2,82	485,30	21,71	0,09	4.340		44.661	30,58	1.461
360	Colorado + Bom Sucesso + Panorama + Araporã	21,65		38,16	0,20	17.244				
361	Moema	6,20	1067,55	18,61	0,12	5.099		88.860	27,66	3.213
362	Colorado + Bom Sucesso + Panorama + Araporã	27,85		10	0,23	4.998				
363	Colombo - Palestina	6,20	1067,55	0	0,12	0		82.648	25,72	3.213
364	Coruripe - Campo Florido	5,07	873,54	120,05	0,11	30.357		97.986	37,27	2.629
365	Colorado + Bom Sucesso + Panorama + Araporã	39,12		65,05	0,26	37.243				
366	Guarani - Tanabi	3,72	640,53	49,01	0,10	10.947	0	56.557	29,34	1.928
367	Virgolino de Oliveira - José Bonifácio	3,47	597,83	4,25	0,10	923	0	43.494	24,17	1.799
368	Antônio Ruette - Monterey	3,41	587,15	11,84	0,10	2.554	0	44.364	25,10	1.767
369	Renuka do Brasil - Madhu	9,92	1708,07	47,8	0,15	15.806	0	137.434	26,73	5.141

Duto ao hub Duto compartilhado

Anexo 2 - Dados obtidos para o Caso de único Hub de dutos unitários

Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
Abengoa - São João	3,72	303	0,10	67.676	14,6	113.725	58,99	1.928
Abengoa - São Luiz	1,24	257	0,07	36.990	2,4	52.266	81,33	643
Adecoagro - Angélica	7,29	409	0,13	119.598	28,6	209.909	55,52	3.781
Água Bonita	2,17	204	0,08	36.727	4,3	63.462	56,43	1.125
Alcídia	3,01	315	0,09	64.616	11,8	101.839	65,35	1.558
Alcoeste	3,10	88	0,09	18.273	0,0	56.282	35,03	1.607
Alcoolvale	2,31	188	0,08	34.706	4,5	63.168	52,76	1.197
Alta Mogiana	6,82	201	0,13	57.212	13,4	141.233	39,96	3.534
Alta Paulista	2,14	170	0,08	30.431	4,2	56.783	51,22	1.109
Alta Paulista - Dracena	3,10	183	0,09	37.999	6,1	76.191	47,42	1.607
Alto Alegre - Floresta	2,17	166	0,08	29.886	4,3	56.620	50,35	1.125
Alto Alegre - Florestópolis	2,84	241	0,09	48.319	5,6	83.308	56,60	1.472
Alto Alegre - Junqueira	3,31	295	0,10	62.908	6,5	103.727	60,41	1.717
Alto Alegre - Santo Inácio	3,31	247	0,10	52.672	6,5	93.492	54,45	1.717
Alvorada do Bebedouro	1,27	297	0,07	43.211	2,5	58.906	89,22	660
Americana	1,51	268	0,07	41.787	3,0	60.447	77,01	785
Andrade	8,06	137	0,14	41.690	0,0	140.513	33,64	4.177
Anicuns	2,92	533	0,09	108.001	17,2	144.270	95,46	1.511
Antônio Ruette - Cachoeira	3,10	93	0,09	19.311	0,0	57.320	35,68	1.607
Antônio Ruette - Monterey	3,41	12	0,10	2.589	0,0	44.398	25,12	1.767
Aralco	1,55	61	0,07	9.599	0,0	28.604	35,61	803
Araporã	2,25	293	0,08	53.566	4,4	81.344	69,61	1.169
Atena	1,86	163	0,08	27.591	3,6	50.506	52,40	964
Baldin	1,12	243	0,06	33.531	2,2	47.280	81,75	578
Bandeirantes	3,31	248	0,10	52.885	6,5	93.705	54,57	1.717
Barra Grande	6,82	200	0,13	56.927	13,4	140.949	39,88	3.534
Batatais - Lins	4,96	56	0,11	14.033	0,0	74.848	29,12	2.570
Batatais- Matriz	6,20	214	0,12	58.634	12,2	135.017	42,02	3.213
Bazan	6,63	161	0,13	45.322	13,0	127.052	36,95	3.438
Bertolo	1,86	97	0,08	16.419	0,0	39.225	40,69	964
Bioenergia	3,72	128	0,10	28.589	0,0	74.200	38,49	1.928
Biosev - Bioenergia Continenta	3,41	145	0,10	31.279	0,0	73.089	41,36	1.767
Biosev - Leme	2,23	272	0,08	49.525	4,4	77.023	66,59	1.157
Biosev Bioenergia - Jardest	2,48	174	0,09	33.045	4,9	63.598	49,48	1.285
Biosev Bioenergia - Santa Elisa	7,13	173	0,13	50.126	14,0	137.966	37,34	3.695
Biosev Bioenergia - Vale do Rc	7,44	184	0,13	54.228	14,6	145.888	37,84	3.856
Biosev Bioenergia MB	4,34	157	0,11	37.297	8,5	90.765	40,35	2.249
Biosev Maracaju	2,19	533	0,08	96.289	12,9	123.511	108,89	1.134
Biosev Passatempo	5,77	482	0,12	128.371	34,0	200.206	66,89	2.993
Boa Vista	10,04	315	0,15	104.678	39,4	229.015	44,00	5.205
Bom Sucesso	3,24	320	0,10	67.632	12,7	107.740	64,16	1.679
Branco Peres	1,98	124	0,08	21.539	0,0	45.864	44,61	1.028
Cachoeira	0,68	308	0,05	34.787	2,7	43.161	123,12	351
Caçú	2,59	377	0,09	72.875	10,2	104.962	78,13	1.343
Caeté - Paulicéia	7,44	192	0,13	56.586	14,6	148.245	38,45	3.856
Cafealcool	1,60	72	0,07	11.474	0,0	31.087	37,50	829
Campestre	4,03	41	0,10	9.455	0,0	58.867	28,19	2.089
Carolo	2,36	160	0,08	29.769	4,6	58.795	48,15	1.221
CBAA - Sidrolândia	2,13	509	0,08	90.923	12,5	117.389	106,45	1.103
CBAA Brasilândia	4,25	247	0,11	58.219	8,3	110.650	50,17	2.206
CEMMA	6,82	8	0,13	2.277	0,0	85.897	24,30	3.534
Central Energética	3,38	184	0,10	39.562	6,6	81.230	46,34	1.753
Centro Oeste Iguatemi	2,13	611	0,08	109.144	16,7	135.734	123,09	1.103
Centroalcool	3,24	547	0,10	115.608	19,1	155.908	92,85	1.679
Cevasa	3,41	221	0,10	47.673	6,7	89.683	50,75	1.767
Citrosuco	0,25	145	0,03	10.963	0,0	14.004	108,96	129
Clarion	2,32	331	0,08	61.200	9,1	89.910	74,80	1.202
Clealco - Matriz	2,79	71	0,09	14.134	0,0	48.343	33,43	1.446

Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
Clealco - Pouso Alegre	3,10	87	0,09	18.065	0,0	56.074	34,90	1.607
Cocal - Narandiba	4,96	207	0,11	51.873	9,7	112.979	43,95	2.570
Cocal - Paraguaçu Paulista	3,72	175	0,10	39.087	7,3	84.917	44,05	1.928
COFCO - Catanduva	6,20	69	0,12	18.905	0,0	94.923	29,54	3.213
COFCO - Meridiano	6,82	82	0,13	23.340	0,0	106.960	30,26	3.534
COFCO - Potirendaba	3,10	42	0,09	8.721	0,0	46.730	29,09	1.607
COFCO - UNP	6,20	51	0,12	13.973	0,0	89.992	28,01	3.213
Colombo - Ariranha	5,08	92	0,11	23.283	0,0	85.618	32,50	2.635
Colombo - Palestina	6,20	65	0,12	17.809	0,0	93.827	29,20	3.213
Colorado	10,85	174	0,15	59.635	21,3	193.305	34,38	5.623
Comanche - Canitar	1,86	226	0,08	38.255	3,6	61.170	63,46	964
Comanche - Santa Anita	1,30	221	0,07	32.435	2,6	48.475	71,84	675
Coopcana	5,68	363	0,12	96.034	22,3	166.344	56,51	2.944
Cooper Nova Produtiva	1,51	275	0,07	42.878	3,0	61.539	78,40	785
Cooper Rubiataba	5,18	688	0,12	175.484	40,7	240.268	89,43	2.687
Cooperval	1,89	357	0,08	60.861	7,4	84.297	85,91	981
Coruripe - Campo Florido	5,07	185	0,11	46.780	10,0	109.282	41,56	2.629
Coruripe - Iturama	3,66	149	0,10	33.079	0,0	78.003	41,08	1.899
Coruripe - Limeira do Oeste	3,38	184	0,10	39.562	6,6	81.230	46,34	1.753
Costa	0,95	468	0,06	60.465	5,6	72.239	147,24	491
CRV	2,85	665	0,09	133.542	22,4	169.173	114,49	1.478
Da Mata	6,20	96	0,12	26.303	0,0	102.321	31,84	3.213
Dacalda	1,89	243	0,08	41.426	3,7	64.752	65,99	981
Damfi	1,12	257	0,06	35.465	2,2	49.215	85,08	578
Della Coletta	2,54	130	0,09	24.934	0,0	56.101	42,59	1.317
Delos	1,24	171	0,07	24.612	2,4	39.888	62,07	643
Delta	3,38	226	0,10	48.592	6,6	90.260	51,49	1.753
Delta - Volta Grande	5,64	196	0,12	51.695	11,1	121.142	41,47	2.921
Denusa	3,89	462	0,10	105.031	22,9	153.390	76,12	2.015
Diana	1,55	29	0,07	4.564	0,0	23.568	29,34	803
Eldorado	10,33	479	0,15	161.007	60,8	289.555	54,06	5.356
Ester	2,79	326	0,09	64.899	10,9	99.435	68,77	1.446
Ferrari	2,29	260	0,08	47.862	4,5	76.123	64,03	1.189
Figueira - Alcoazul	4,03	56	0,10	12.915	0,0	62.327	29,84	2.089
Figueira - Generalco	3,41	71	0,10	15.316	0,0	57.126	32,33	1.767
Flórida	3,72	134	0,10	29.929	0,0	75.540	39,18	1.928
Frutal	2,82	138	0,09	27.584	0,0	62.142	42,54	1.461
Furlan - Matriz	1,55	327	0,07	51.459	6,1	70.646	87,95	803
Glencane	3,04	153	0,09	31.514	6,0	68.942	43,79	1.574
Goianésia	1,30	681	0,07	99.764	10,2	115.960	172,64	672
Goiasa Goiatuba	5,18	334	0,12	85.192	20,3	149.365	55,59	2.687
Granelli	0,25	293	0,03	22.153	0,5	25.208	196,13	129
Grizzo	2,05	179	0,08	31.477	4,0	56.683	53,46	1.060
Guaíra	3,10	169	0,09	35.092	6,1	73.284	45,62	1.607
Guarani - Cruz Alta	2,48	180	0,09	34.185	4,9	64.738	50,37	1.285
Guarani - Mandu	6,32	174	0,12	48.053	12,4	125.964	38,43	3.277
Guarani - Severínia	3,10	96	0,09	19.934	0,0	57.943	36,07	1.607
Guarani - Tanabi	3,72	49	0,10	10.944	0,0	56.555	29,34	1.928
Guaricanga	4,83	130	0,11	32.249	0,0	91.543	36,53	2.506
Guariroba	3,10	87	0,09	18.065	0,0	56.074	34,90	1.607
Iacanga	3,37	101	0,10	21.692	0,0	63.046	36,07	1.748
Iberia	3,10	137	0,09	28.447	0,0	66.456	41,37	1.607
Ipiranga - Descalvado	2,48	218	0,09	41.401	4,9	71.955	55,99	1.285
Ipiranga - Mococa	1,49	289	0,07	44.742	2,9	63.074	81,79	771
Iracema	3,10	254	0,09	52.742	6,1	90.933	56,60	1.607
Itajobi	3,35	60	0,10	12.848	0,0	53.898	31,06	1.735
Itapagipe	2,82	129	0,09	25.785	0,0	60.343	41,31	1.461
Ituiutaba	5,07	221	0,11	55.884	10,0	118.386	45,03	2.629
J. Pilon - Santa Maria	2,42	297	0,09	55.836	4,7	85.626	68,33	1.253
Jacarezinho	2,13	231	0,08	41.280	4,2	67.521	61,17	1.104
Jalles Machado	3,89	685	0,10	155.727	30,5	204.315	101,40	2.015
Jalles Machado - Otávio Lage	5,18	661	0,12	168.598	40,7	233.381	86,87	2.687
JJ	2,42	177	0,09	33.276	4,7	63.065	50,33	1.253

Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
Laguna	2,43	382	0,09	71.981	9,5	102.084	81,00	1.260
Lasa Lago Azul	2,27	496	0,08	90.891	13,3	119.101	101,33	1.175
Londra	2,54	278	0,09	53.320	5,0	84.637	64,25	1.317
Malosso	1,92	102	0,08	17.494	0,0	41.059	41,22	996
Maringá	3,04	184	0,09	37.899	6,0	75.327	47,84	1.574
Melhoramentos - Jussara	5,68	373	0,12	98.679	22,3	168.990	57,41	2.944
Melhoramentos - Nova Londrin	1,99	368	0,08	63.972	7,8	88.581	85,98	1.030
Moema	6,20	88	0,12	24.111	0,0	100.129	31,16	3.213
Monte Alegre	1,13	341	0,06	47.246	4,4	61.201	104,75	584
Moreno	7,44	207	0,13	61.007	14,6	152.666	39,59	3.856
Morrinhos	2,59	390	0,09	75.388	10,2	107.475	80,01	1.343
Nardini	4,96	108	0,11	27.064	0,0	87.879	34,19	2.570
Onda Verde	3,84	66	0,10	14.936	0,0	62.067	31,16	1.992
Ouroeste	3,10	120	0,09	24.917	0,0	62.926	39,17	1.607
Panorama	3,89	298	0,10	67.747	7,6	115.648	57,39	2.015
Parapuã	1,55	135	0,07	21.244	0,0	40.249	50,11	803
Pedra - Buriti	10,54	232	0,15	78.596	20,7	208.447	38,16	5.462
Pedra - Da Pedra	7,44	201	0,13	59.238	14,6	150.898	39,14	3.856
Pedra - Ipê	4,96	151	0,11	37.840	9,7	98.946	38,49	2.570
Pioneiros	2,48	122	0,09	23.170	0,0	53.577	41,69	1.285
Pitangueiras	3,72	141	0,10	31.493	0,0	77.104	39,99	1.928
Planalto	1,69	390	0,07	63.549	6,6	84.483	96,40	876
Pyles	1,12	193	0,06	26.632	2,2	40.381	69,82	578
Quatá	5,27	156	0,12	40.052	10,3	104.978	38,44	2.731
Raizen - Araraquara	3,10	184	0,09	38.207	6,1	76.398	47,55	1.607
Raizen - Barra	7,49	201	0,13	59.396	14,7	151.667	39,07	3.881
Raízen - Benálcool	1,55	90	0,07	14.163	0,0	33.167	41,29	803
Raízen - Bom Retiro	1,65	328	0,07	52.992	6,5	73.484	85,66	858
Raizen - Bonfim	7,52	143	0,13	42.327	0,0	134.537	34,52	3.898
Raizen - Costa Pinto	4,91	288	0,11	71.881	9,6	132.377	52,02	2.545
Raizen - Destivale	2,58	44	0,09	8.497	0,0	40.196	30,00	1.340
Raizen - Diamante	1,34	181	0,07	26.915	2,6	43.490	62,37	697
Raizen - Dois Córregos	1,13	192	0,06	26.670	2,2	40.648	69,13	588
Raizen - Gasa	7,41	152	0,13	44.737	14,5	136.091	35,41	3.843
Raizen - Ipaussu	3,82	232	0,10	52.401	7,5	99.529	50,20	1.982
Raizen - Junqueira	3,61	241	0,10	53.213	7,1	97.744	52,18	1.873
Raizen - Mundial	1,94	118	0,08	20.316	0,0	44.109	43,86	1.006
Raizen - Rafard	2,60	314	0,09	60.808	10,2	93.042	68,95	1.350
Raizen - Santa Helena	1,98	299	0,08	51.936	3,9	76.378	74,28	1.028
Raizen - Serra	1,55	200	0,07	31.473	3,0	50.569	62,95	803
Raizen - Tarumã	5,27	215	0,12	55.200	10,3	120.126	43,98	2.731
Raizen - Univalem	4,03	105	0,10	24.215	0,0	73.627	35,25	2.089
Raizen Paraguaçu	1,38	171	0,07	25.661	2,7	42.618	59,75	713
Raizen Tarumã Maracaí	3,72	190	0,10	42.437	7,3	88.267	45,78	1.928
Renuka - Marialva	1,56	339	0,07	53.512	6,1	72.847	89,99	809
Renuka - São Pedro do Ivaí	2,13	384	0,08	68.621	8,4	94.988	86,05	1.104
Renuka do Brasil - Madhu	9,92	47	0,15	15.541	0,0	137.170	26,68	5.141
Revati	5,89	34	0,12	9.126	0,0	81.344	26,65	3.052
Rio Pardo	3,10	246	0,09	51.081	6,1	89.272	55,57	1.607
Rio Verde - Decal	1,94	386	0,08	66.504	7,6	90.569	89,89	1.008
Sabarálcool - Filial	1,18	485	0,06	68.511	7,0	83.229	135,72	613
Sabarálcool - Matriz	1,70	383	0,07	62.598	6,7	83.692	94,77	883
Santa Adélia - Jaboticabal	4,34	153	0,11	36.347	8,5	89.815	39,93	2.249
Santa Adélia - Pereira Barreto	6,82	151	0,13	42.980	13,4	127.001	35,93	3.534
Santa Fé	4,96	126	0,11	31.575	0,0	92.389	35,94	2.570
Santa Helena	2,20	380	0,08	68.832	8,6	96.106	84,17	1.142
Santa Helena	4,56	386	0,11	93.528	17,9	137.799	58,31	2.363
Santa Isabel - Filial	1,86	19	0,08	3.216	0,0	26.022	27,00	964
Santa Isabel - Matriz	3,10	53	0,09	11.005	0,0	49.014	30,51	1.607
Santa Juliana	6,76	310	0,13	87.949	26,5	171.683	48,97	3.506
Santa Lúcia	1,92	270	0,08	46.307	3,8	69.985	70,26	996
Santa Luzia	17,02	437	0,19	179.339	66,8	390.062	44,21	8.822
Santa Maria	0,25	222	0,03	16.785	0,5	19.840	154,37	129
Santa Rita	3,72	227	0,10	50.701	7,3	96.531	50,07	1.928
Santa Rosa	1,12	314	0,06	43.328	4,4	57.143	98,80	578

Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
Santa Teresinha - Cidade	1,42	406	0,07	61.690	5,6	79.268	107,72	736
Santa Terezinha - Iguatemi	1,42	335	0,07	50.902	5,6	68.480	93,06	736
Santa Terezinha - Ivaté	1,42	462	0,07	70.200	8,4	87.861	119,39	736
Santa Terezinha - Paranacity	2,60	289	0,09	55.961	5,1	88.034	65,25	1.349
Santa Terezinha - Rondon	1,89	368	0,08	62.736	7,4	86.173	87,82	981
Santa Terezinha - Tapejara	2,37	421	0,08	78.472	9,3	107.768	87,87	1.227
Santa Terezinha - Terra Rica	1,66	332	0,07	53.655	6,5	74.162	86,38	859
Santa Terezinha - Zona Rural	2,60	395	0,09	76.487	10,2	108.712	80,58	1.349
Santo Ângelo	2,25	170	0,08	31.079	4,4	58.858	50,37	1.169
Santo Antônio	4,03	175	0,10	40.359	7,9	90.008	43,10	2.089
São Domingos	3,10	73	0,09	15.158	0,0	53.167	33,09	1.607
São Fernando	5,01	510	0,11	128.375	29,5	190.759	73,39	2.599
São José	3,10	126	0,09	26.163	0,0	64.172	39,94	1.607
São José da Estiva	4,96	53	0,11	13.281	0,0	74.096	28,83	2.570
São Luiz	2,79	214	0,09	42.602	5,5	76.975	53,24	1.446
São Manoel	7,44	215	0,13	63.364	14,6	155.024	40,21	3.856
São Martinho - Iracema	2,79	313	0,09	62.311	10,9	96.847	66,98	1.446
São Martinho - Matriz	5,76	163	0,12	43.383	11,3	114.419	38,29	2.988
São Martinho - Santa Cruz	6,82	184	0,13	52.373	13,4	136.394	38,59	3.534
São Paulo	3,89	374	0,10	85.025	15,3	133.155	66,08	2.015
São Simão	2,59	223	0,09	43.107	5,1	75.041	55,86	1.343
Serranópolis	2,27	387	0,08	70.917	8,9	98.993	84,22	1.175
SJC - São Francisco	5,18	307	0,12	78.305	20,3	142.478	53,03	2.687
TGM	1,61	248	0,07	39.644	3,2	59.503	71,23	835
Tirolli	2,17	206	0,08	37.088	4,3	63.822	56,75	1.125
Toniello	2,17	156	0,08	28.086	4,3	54.820	48,75	1.125
Tonon - Bom Retiro	3,65	525	0,10	116.345	21,5	161.715	85,54	1.890
Tonon - Cândida GL	3,72	172	0,10	38.417	7,3	84.247	43,70	1.928
Tonon - Paraíso	4,21	216	0,11	50.721	8,3	102.662	46,99	2.185
Tropical	10,37	427	0,15	143.711	40,7	272.058	50,63	5.373
UCP ANP	1,14	237	0,06	32.936	2,2	46.932	79,72	589
Unialco	2,36	101	0,08	18.792	0,0	47.679	39,05	1.221
Uruaçú	1,94	782	0,08	134.732	19,1	159.140	157,95	1.008
Usina Passos	1,69	312	0,07	50.839	6,6	71.773	81,89	876
Usinavi	3,65	537	0,10	119.005	21,5	164.375	86,95	1.890
Usinova	6,48	475	0,13	132.467	38,1	213.065	63,44	3.358
USJ	6,20	276	0,12	75.621	12,2	152.004	47,31	3.213
Vale do Verdão	8,29	365	0,14	112.355	32,5	215.032	50,02	4.299
Vale Verde - Itapaci	3,89	713	0,10	162.093	30,5	210.681	104,56	2.015
Vertente	4,96	100	0,11	25.059	0,0	85.874	33,41	2.570
Viralcool - Santa Amália	3,72	175	0,10	39.087	7,3	84.917	44,05	1.928
Viralcool - Santa Cecília	4,03	144	0,10	33.209	0,0	82.621	39,56	2.089
Virgolino de Oliveira - Catanduv	6,63	92	0,13	25.899	0,0	107.238	31,19	3.438
Virgolino de Oliveira - Itapira	2,73	332	0,09	65.502	10,7	99.271	70,22	1.414
Virgolino de Oliveira - José Bor	3,47	4	0,10	869	0,0	43.439	24,14	1.799
Vista Alegre	2,17	329	0,08	59.232	8,5	86.094	76,56	1.125
Zambianco - Pederneiras	1,12	294	0,06	40.569	2,2	54.318	93,92	578
ZL - São José	6,82	185	0,13	52.658	13,4	136.679	38,67	3.534

Anexo 3 - Dados obtidos para o Caso Intermodal

Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Modal de transporte mais vantajoso economicamente	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
Abengoa - São Luiz	1,24	Dutos	214	257	0,07	36.990	2	52.172	81,19	643
Adecoagro - Angélica	7,29	Dutos	1.256	409	0,13	119.598	29	209.358	55,37	3.781
Água Bonita	2,17	Dutos	374	204	0,08	36.727	4	63.298	56,29	1.125
Alcoeste	3,10	Dutos	534	88	0,09	18.273	0	56.048	34,89	1.607
Alcoolvale	2,31	Dutos	398	188	0,08	34.706	5	62.993	52,61	1.197
Alta Mogiana	6,82	Dutos	1.174	201	0,13	57.212	13	140.718	39,81	3.534
Alta Paulista	2,14	Dutos	368	170	0,08	30.431	4	56.621	51,08	1.109
Alta Paulista - Dracena	3,10	Dutos	534	183	0,09	37.999	6	75.956	47,28	1.607
Alto Alegre - Floresta	2,17	Dutos	374	166	0,08	29.886	4	56.456	50,20	1.125
Alto Alegre - Florestópolis	2,84	Dutos	489	241	0,09	48.319	6	83.093	56,46	1.472
Alto Alegre - Junqueira	3,31	Dutos	571	295	0,10	62.908	7	103.477	60,26	1.717
Alto Alegre - Santo Inácio	3,31	Dutos	571	247	0,10	52.672	7	93.241	54,30	1.717
Americana	1,51	Dutos	261	268	0,07	41.787	3	60.333	76,86	785
Andrade	8,06	Dutos	1.388	137	0,14	41.690	0	139.905	33,49	4.177
Antônio Ruette - Cachoeira	3,10	Dutos	534	93	0,09	19.311	0	57.086	35,53	1.607
Antônio Ruette - Monterey	3,41	Dutos	587	12	0,10	2.589	0	44.141	24,98	1.767
Aralco	1,55	Dutos	267	61	0,07	9.599	0	28.487	35,46	803
Atena	1,86	Dutos	320	163	0,08	27.591	4	50.366	52,25	964
Baldin	1,12	Dutos	192	243	0,06	33.531	2	47.196	81,60	578
Bandeirantes	3,31	Dutos	571	248	0,10	52.885	7	93.455	54,43	1.717
Barra Grande	6,82	Dutos	1.174	200	0,13	56.927	13	140.434	39,73	3.534
Batatais - Lins	4,96	Dutos	854	56	0,11	14.033	0	74.473	28,97	2.570
Batatais- Matriz	6,20	Dutos	1.068	214	0,12	58.634	12	134.548	41,87	3.213
Bazan	6,63	Dutos	1.142	161	0,13	45.322	13	126.551	36,81	3.438
Bertolo	1,86	Dutos	320	97	0,08	16.419	0	39.084	40,55	964
Bioenergia	3,72	Dutos	641	128	0,10	28.589	0	73.919	38,34	1.928
Biosev - Bioenergia Continental	3,41	Dutos	587	145	0,10	31.279	0	72.831	41,21	1.767
Biosev - Leme	2,23	Dutos	384	272	0,08	49.525	4	76.854	66,44	1.157
Biosev Bioenergia - Jardest	2,48	Dutos	427	174	0,09	33.045	5	63.411	49,34	1.285
Biosev Bioenergia - Santa Elisa	7,13	Dutos	1.228	173	0,13	50.126	14	137.427	37,19	3.695
Biosev Bioenergia - Vale do Ros	7,44	Dutos	1.281	184	0,13	54.228	15	145.326	37,69	3.856
Biosev Bioenergia MB	4,34	Dutos	747	157	0,11	37.297	9	90.437	40,21	2.249
Boa Vista	10,04	Dutos	1.729	315	0,15	104.678	39	228.256	43,85	5.205
Branco Peres	1,98	Dutos	342	124	0,08	21.539	0	45.714	44,46	1.028
Caeté - Paulicéia	7,44	Dutos	1.281	192	0,13	56.586	15	147.683	38,30	3.856
Cafealcool	1,60	Dutos	275	72	0,07	11.474	0	30.966	37,35	829
Campestre	4,03	Dutos	694	41	0,10	9.455	0	58.563	28,04	2.089
Carolo	2,36	Dutos	406	160	0,08	29.769	5	58.617	48,01	1.221
CBAA Brasilândia	4,25	Dutos	733	247	0,11	58.219	8	110.328	50,02	2.206
CEMMA	6,82	Dutos	1.174	8	0,13	2.277	0	85.382	24,16	3.534
Central Energética	3,38	Dutos	582	184	0,10	39.562	7	80.974	46,20	1.753
Cevasa	3,41	Dutos	587	221	0,10	47.673	7	89.426	50,60	1.767
Citrosuco	0,25	Dutos	43	145	0,03	10.963	0	13.985	108,81	129
Clealco - Matriz	2,79	Dutos	480	71	0,09	14.134	0	48.132	33,29	1.446
Clealco - Pouso Alegre	3,10	Dutos	534	87	0,09	18.065	0	55.840	34,76	1.607
Cocal - Narandiba	4,96	Dutos	854	207	0,11	51.873	10	112.605	43,81	2.570
Cocal - Paraguaçu Paulista	3,72	Dutos	641	175	0,10	39.087	7	84.636	43,90	1.928
COFCO - Catanduva	6,20	Dutos	1.068	69	0,12	18.905	0	94.455	29,40	3.213
COFCO - Meridiano	6,82	Dutos	1.174	82	0,13	23.340	0	106.445	30,12	3.534
COFCO - Potirendaba	3,10	Dutos	534	42	0,09	8.721	0	46.496	28,94	1.607
COFCO - UNP	6,20	Dutos	1.068	51	0,12	13.973	0	89.523	27,86	3.213
Colombo - Ariranha	5,08	Dutos	875	92	0,11	23.283	0	85.234	32,35	2.635
Colombo - Palestina	6,20	Dutos	1.068	65	0,12	17.809	0	93.359	29,06	3.213
Colorado	10,85	Dutos	1.868	174	0,15	59.635	21	192.485	34,23	5.623
Comanche - Canitar	1,86	Dutos	320	226	0,08	38.255	4	61.030	63,31	964
Comanche - Santa Anita	1,30	Dutos	224	221	0,07	32.435	3	48.377	71,70	675
Coopcana	5,68	Dutos	978	363	0,12	96.034	22	165.915	56,36	2.944
Coruripe - Campo Florido	5,07	Dutos	874	185	0,11	46.780	10	108.899	41,42	2.629
Coruripe - Iturama	3,66	Dutos	631	149	0,10	33.079	0	77.727	40,93	1.899
Coruripe - Limeira do Oeste	3,38	Dutos	582	184	0,10	39.562	7	80.974	46,20	1.753
Da Mata	6,20	Dutos	1.068	96	0,12	26.303	0	101.853	31,70	3.213
Dacalda	1,89	Dutos	326	243	0,08	41.426	4	64.609	65,85	981
Della Coletta	2,54	Dutos	438	130	0,09	24.934	0	55.909	42,44	1.317
Delos	1,24	Dutos	214	171	0,07	24.612	2	39.795	61,93	643
Delta	3,38	Dutos	582	226	0,10	48.592	7	90.005	51,35	1.753
Delta - Volta Grande	5,64	Dutos	971	196	0,12	51.695	11	120.716	41,32	2.921
Diana	1,55	Dutos	267	29	0,07	4.564	0	23.451	29,19	803

Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Modal de transporte mais vantajoso economicamente	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
Eldorado	10,33	Dutos	1.780	479	0,15	161.007	61	288.774	53,91	5.356
Ferrari	2,29	Dutos	395	260	0,08	47.862	5	75.950	63,89	1.189
Figueira - Alcoazul	4,03	Dutos	694	56	0,10	12.915	0	62.022	29,70	2.089
Figueira - Generalco	3,41	Dutos	587	71	0,10	15.316	0	56.868	32,18	1.767
Flórida	3,72	Dutos	641	134	0,10	29.929	0	75.259	39,04	1.928
Frutal	2,82	Dutos	485	138	0,09	27.584	0	61.929	42,40	1.461
Glencane	3,04	Dutos	523	153	0,09	31.514	6	68.712	43,64	1.574
Granelli	0,25	Dutos	43	293	0,03	22.153	0	25.189	195,99	129
Grizzo	2,05	Dutos	352	179	0,08	31.477	4	56.529	53,31	1.060
Guaíra	3,10	Dutos	534	169	0,09	35.092	6	73.049	45,47	1.607
Guarani - Cruz Alta	2,48	Dutos	427	180	0,09	34.185	5	64.550	50,22	1.285
Guarani - Mandu	6,32	Dutos	1.089	174	0,12	48.053	12	125.486	38,29	3.277
Guarani - Severínia	3,10	Dutos	534	96	0,09	19.934	0	57.709	35,92	1.607
Guarani - Tanabi	3,72	Dutos	641	49	0,10	10.944	0	56.274	29,19	1.928
Guariroba	3,10	Dutos	534	87	0,09	18.065	0	55.840	34,76	1.607
Iacanga	3,37	Dutos	581	101	0,10	21.692	0	62.791	35,92	1.748
Iberia	3,10	Dutos	534	137	0,09	28.447	0	66.222	41,22	1.607
Ipiranga - Descalvado	2,48	Dutos	427	218	0,09	41.401	5	71.767	55,84	1.285
Iracema	3,10	Dutos	534	254	0,09	52.742	6	90.699	56,46	1.607
Itajobi	3,35	Dutos	576	60	0,10	12.848	0	53.645	30,92	1.735
Itapagipe	2,82	Dutos	485	129	0,09	25.785	0	60.130	41,17	1.461
Ituiutaba	5,07	Dutos	874	221	0,11	55.884	10	118.003	44,88	2.629
Jacarezinho	2,13	Dutos	367	231	0,08	41.280	4	67.360	61,02	1.104
JJ	2,42	Dutos	416	177	0,09	33.276	5	62.883	50,18	1.253
Malosso	1,92	Dutos	331	102	0,08	17.494	0	40.914	41,08	996
Maringá	3,04	Dutos	523	184	0,09	37.899	6	75.097	47,70	1.574
Melhoramentos - Jussara	5,68	Dutos	978	373	0,12	98.679	22	168.561	57,26	2.944
Moema	6,20	Dutos	1.068	88	0,12	24.111	0	99.661	31,02	3.213
Moreno	7,44	Dutos	1.281	207	0,13	61.007	15	152.104	39,45	3.856
Nardini	4,96	Dutos	854	108	0,11	27.064	0	87.504	34,04	2.570
Onda Verde	3,84	Dutos	662	66	0,10	14.936	0	61.777	31,01	1.992
Ouroeste	3,10	Dutos	534	120	0,09	24.917	0	62.692	39,02	1.607
Parapuã	1,55	Dutos	267	135	0,07	21.244	0	40.132	49,96	803
Pedra - Buriti	10,54	Dutos	1.815	232	0,15	78.596	21	207.651	38,02	5.462
Pedra - Da Pedra	7,44	Dutos	1.281	201	0,13	59.238	15	150.336	38,99	3.856
Pedra - Ipê	4,96	Dutos	854	151	0,11	37.840	10	98.571	38,35	2.570
Pioneiros	2,48	Dutos	427	122	0,09	23.170	0	53.389	41,54	1.285
Pitangueiras	3,72	Dutos	641	141	0,10	31.493	0	76.823	39,85	1.928
Pyles	1,12	Dutos	192	193	0,06	26.632	2	40.296	69,67	578
Quatá	5,27	Dutos	907	156	0,12	40.052	10	104.580	38,29	2.731
Raizen - Araraquara	3,10	Dutos	534	184	0,09	38.207	6	76.164	47,41	1.607
Raizen - Barra	7,49	Dutos	1.290	201	0,13	59.396	15	151.101	38,93	3.881
Raízen - Benálcool	1,55	Dutos	267	90	0,07	14.163	0	33.050	41,14	803
Raizen - Bonfim	7,52	Dutos	1.295	143	0,13	42.327	0	133.969	34,37	3.898
Raizen - Costa Pinto	4,91	Dutos	845	288	0,11	71.881	10	132.006	51,87	2.545
Raizen - Destivale	2,58	Dutos	445	44	0,09	8.497	0	40.001	29,85	1.340
Raizen - Diamante	1,34	Dutos	232	181	0,07	26.915	3	43.389	62,23	697
Raizen - Dois Córregos	1,13	Dutos	195	192	0,06	26.670	2	40.562	68,98	588
Raizen - Gasa	7,41	Dutos	1.277	152	0,13	44.737	15	135.531	35,27	3.843
Raizen - Ipaussu	3,82	Dutos	659	232	0,10	52.401	8	99.240	50,06	1.982
Raizen - Junqueira	3,61	Dutos	622	241	0,10	53.213	7	97.471	52,03	1.873
Raizen - Mundial	1,94	Dutos	334	118	0,08	20.316	0	43.963	43,71	1.006
Raizen - Serra	1,55	Dutos	267	200	0,07	31.473	3	50.452	62,81	803
Raizen - Tarumã	5,27	Dutos	907	215	0,12	55.200	10	119.728	43,84	2.731
Raizen - Univalem	4,03	Dutos	694	105	0,10	24.215	0	73.323	35,11	2.089
Raizen Paraguaçu	1,38	Dutos	237	171	0,07	25.661	3	42.514	59,60	713
Raizen Tarumã Maracaí	3,72	Dutos	641	190	0,10	42.437	7	87.986	45,64	1.928
Renuka do Brasil - Madhu	9,92	Dutos	1.708	47	0,15	15.541	0	136.421	26,54	5.141
Revati	5,89	Dutos	1.014	34	0,12	9.126	0	80.899	26,50	3.052
Rio Pardo	3,10	Dutos	534	246	0,09	51.081	6	89.038	55,42	1.607
Santa Adélia - Pereira Barreto	6,82	Dutos	1.174	151	0,13	42.980	13	126.486	35,79	3.534
Santa Fé	4,96	Dutos	854	126	0,11	31.575	0	92.015	35,80	2.570
Santa Isabel - Filial	1,86	Dutos	320	19	0,08	3.216	0	25.881	26,85	964
Santa Isabel - Matriz	3,10	Dutos	534	53	0,09	11.005	0	48.780	30,36	1.607
Santa Juliana	6,76	Dutos	1.165	310	0,13	87.949	27	171.172	48,83	3.506
Santa Lúcia	1,92	Dutos	331	270	0,08	46.307	4	69.840	70,12	996
Santa Luzia	17,02	Dutos	2.931	437	0,19	179.339	67	388.777	44,07	8.822
Santa Maria	0,25	Dutos	43	222	0,03	16.785	0	19.821	154,22	129
Santa Rita	3,72	Dutos	641	227	0,10	50.701	7	96.250	49,93	1.928
Santo Ângelo	2,25	Dutos	388	170	0,08	31.079	4	58.688	50,22	1.169
Santo Antônio	4,03	Dutos	694	175	0,10	40.359	8	89.703	42,95	2.089
São Domingos	3,10	Dutos	534	73	0,09	15.158	0	52.933	32,95	1.607
São José	3,10	Dutos	534	126	0,09	26.163	0	63.938	39,80	1.607

Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Modal de transporte mais vantajoso economicamente	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
São José da Estiva	4,96	Dutos	854	53	0,11	13.281	0	73.721	28,68	2.570
São Luiz	2,79	Dutos	480	214	0,09	42.602	5	76.764	53,09	1.446
São Manoel	7,44	Dutos	1.281	215	0,13	63.364	15	154.462	40,06	3.856
São Martinho - Matriz	5,76	Dutos	993	163	0,12	43.383	11	113.983	38,14	2.988
São Martinho - Santa Cruz	6,82	Dutos	1.174	184	0,13	52.373	13	135.879	38,44	3.534
São Simão	2,59	Dutos	446	223	0,09	43.107	5	74.845	55,72	1.343
SJC - São Francisco	5,18	Dutos	893	307	0,12	78.305	20	142.087	52,89	2.687
TGM	1,61	Dutos	278	248	0,07	39.644	3	59.382	71,08	835
Tirolli	2,17	Dutos	374	206	0,08	37.088	4	63.658	56,61	1.125
Toniello	2,17	Dutos	374	156	0,08	28.086	4	54.656	48,60	1.125
Tonon - Cândida GL	3,72	Dutos	641	172	0,10	38.417	7	83.966	43,55	1.928
Tonon - Paraíso	4,21	Dutos	726	216	0,11	50.721	8	102.343	46,84	2.185
Tropical	10,37	Dutos	1.785	427	0,15	143.711	41	271.275	50,49	5.373
UCP ANP	1,14	Dutos	196	237	0,06	32.936	2	46.846	79,57	589
Unialco	2,36	Dutos	406	101	0,08	18.792	0	47.501	38,90	1.221
USJ	6,20	Dutos	1.068	276	0,12	75.621	12	151.536	47,16	3.213
Vale do Verdão	8,29	Dutos	1.428	365	0,14	112.355	33	214.406	49,88	4.299
Vertente	4,96	Dutos	854	100	0,11	25.059	0	85.499	33,26	2.570
Viralcool - Santa Amália	3,72	Dutos	641	175	0,10	39.087	7	84.636	43,90	1.928
Viralcool - Santa Cecília	4,03	Dutos	694	144	0,10	33.209	0	82.317	39,41	2.089
Virgolino de Oliveira - Catanduva	6,63	Dutos	1.142	92	0,13	25.899	0	106.737	31,05	3.438
Virgolino de Oliveira - José Bonif	3,47	Dutos	598	4	0,10	869	0	43.177	24,00	1.799
ZL - São José	6,82	Dutos	1.174	185	0,13	52.658	13	136.164	38,53	3.534

Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Modal de transporte mais vantajoso economicamente	Emissão anual Compressor + Liq amônia + Compressão Hub (kWh)	Distancia Rodoviária (tortuosidade) (km)	Emissão fabricação do caminhão anual (tCO2e)	Emissão pneus (tCO2e)	Emissão GEE Rodoviário (tCO2e/ano)	Emissão tanques (tCO2e)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
Abengoa - São João	3,72	Rodoviário	1.633	455	190	12	2.298	130	144.928	75,18	1.928
Alcídia	3,01	Rodoviário	1.320	473	159	10	1.932	65	119.352	76,59	1.558
Alvorada do Bebedouro	1,27	Rodoviário	559	446	63	4	772	65	49.186	74,50	660
Anicuns	2,92	Rodoviário	1.280	800	190	12	3.171	65	154.807	102,44	1.511
Araporã	2,25	Rodoviário	990	440	95	6	1.348	65	86.391	73,93	1.169
Biosev Maracaju	2,19	Rodoviário	961	800	159	10	2.379	65	116.246	102,48	1.134
Biosev Passatempo	5,77	Rodoviário	2.535	723	349	23	5.676	130	288.384	96,35	2.993
Bom Sucesso	3,24	Rodoviário	1.422	480	159	10	2.115	130	129.608	77,19	1.679
Cachoeira	0,68	Rodoviário	297	462	32	2	426	65	26.617	75,93	351
Caçú	2,59	Rodoviário	1.138	566	127	8	1.993	65	112.671	83,87	1.343
CBAA - Sidrolândia	2,13	Rodoviário	934	764	127	8	2.210	65	109.822	99,59	1.103
Centro Oeste Iguatemi	2,13	Rodoviário	934	917	159	10	2.653	65	123.233	111,75	1.103
Centroalcool	3,24	Rodoviário	1.422	821	222	14	3.615	130	174.863	104,14	1.679
Clarion	2,32	Rodoviário	1.018	497	127	8	1.565	65	94.344	78,49	1.202
Cooper Nova Produtiva	1,51	Rodoviário	665	413	63	4	849	65	56.374	71,82	785
Cooper Rubiataba	5,18	Rodoviário	2.275	1032	380	25	7.273	130	324.469	120,77	2.687
Cooperval	1,89	Rodoviário	831	536	95	6	1.379	65	80.031	81,56	981
Costa	0,95	Rodoviário	415	702	63	4	904	65	46.542	94,87	491
CRV	2,85	Rodoviário	1.251	998	222	14	3.868	65	174.534	118,11	1.478
Damfi	1,12	Rodoviário	490	386	63	4	585	65	40.409	69,86	578
Denusa	3,89	Rodoviário	1.706	693	222	14	3.663	130	189.381	93,99	2.015
Ester	2,79	Rodoviário	1.225	489	127	8	1.855	65	112.544	77,84	1.446
Furlan - Matriz	1,55	Rodoviário	680	491	95	6	1.034	65	62.754	78,12	803
Goianésia	1,30	Rodoviário	569	1022	95	6	1.800	65	80.595	119,99	672
Goiasa Goiatuba	5,18	Rodoviário	2.275	501	254	17	3.531	130	211.705	78,80	2.687
Guaricanga	4,83	Rodoviário	2.123	195	159	10	1.282	130	136.847	54,60	2.506
Ipiranga - Mococa	1,49	Rodoviário	653	434	63	4	878	65	56.685	73,51	771
J. Pilon - Santa Maria	2,42	Rodoviário	1.061	446	127	8	1.465	65	93.319	74,47	1.253
Jalles Machado	3,89	Rodoviário	1.706	1028	285	19	5.431	130	242.671	120,43	2.015
Jalles Machado - Otávio Lage	5,18	Rodoviário	2.275	992	380	25	6.987	130	315.906	117,58	2.687
Laguna	2,43	Rodoviário	1.067	573	127	8	1.895	65	106.512	84,51	1.260
Lasa Lago Azul	2,27	Rodoviário	995	744	159	10	2.294	65	115.307	98,10	1.175
Londra	2,54	Rodoviário	1.116	417	127	8	1.442	65	95.132	72,21	1.317
Melhoramentos - Nova Londrina	1,99	Rodoviário	873	552	95	6	1.492	65	85.333	82,83	1.030
Monte Alegre	1,13	Rodoviário	495	512	63	4	784	65	46.603	79,76	584
Morrinhos	2,59	Rodoviário	1.138	585	159	10	2.061	65	114.858	85,50	1.343
Panorama	3,89	Rodoviário	1.706	447	190	12	2.363	130	150.249	74,57	2.015
Planalto	1,69	Rodoviário	742	585	95	6	1.345	65	74.943	85,51	876
Raízen - Bom Retiro	1,65	Rodoviário	727	492	95	6	1.107	65	67.080	78,19	858
Raizen - Rafard	2,60	Rodoviário	1.143	471	127	8	1.668	65	103.165	76,45	1.350
Raizen - Santa Helena	1,98	Rodoviário	871	449	95	6	1.210	65	76.793	74,69	1.028
Renuka - Marialva	1,56	Rodoviário	686	509	95	6	1.081	65	64.397	79,55	809
Renuka - São Pedro do Ivaí	2,13	Rodoviário	935	576	127	8	1.669	65	93.625	84,82	1.104
Rio Verde - Decal	1,94	Rodoviário	853	579	127	8	1.531	65	85.737	85,10	1.008

Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Modal de transporte mais vantajoso economicamente	Emissão anual Compressor + Liq amônia + Compressão Hub (kWh)	Distancia Rodoviária (tortuosidade) (km)	Emissão fabricação do caminhão anual (tCO2e)	Emissão pneus (tCO2e)	Emissão GEE Rodoviário (tCO2e/ano)	Emissão tanques (tCO2e)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
Sabarálcool - Filial	1,18	Rodoviário	519	728	95	6	1.171	65	59.455	96,95	613
Sabarálcool - Matriz	1,70	Rodoviário	748	575	95	6	1.331	65	74.775	84,67	883
Santa Helena	2,20	Rodoviário	967	570	127	8	1.707	65	96.264	84,31	1.142
Santa Helena	4,56	Rodoviário	2.001	570	222	14	3.534	130	199.066	84,24	2.363
Santa Rosa	1,12	Rodoviário	490	471	63	4	715	65	44.301	76,60	578
Santa Teresinha - Cidade	1,42	Rodoviário	623	609	95	6	1.176	65	64.392	87,50	736
Santa Terezinha - Iguatemi	1,42	Rodoviário	623	503	95	6	970	65	58.222	79,12	736
Santa Terezinha - Ivaté	1,42	Rodoviário	623	693	95	6	1.338	65	69.259	94,11	736
Santa Terezinha - Paranacity	2,60	Rodoviário	1.143	434	127	8	1.535	65	99.168	73,50	1.349
Santa Terezinha - Rondon	1,89	Rodoviário	831	552	95	6	1.421	65	81.306	82,86	981
Santa Terezinha - Tapejara	2,37	Rodoviário	1.039	632	127	8	2.033	65	109.324	89,13	1.227
Santa Terezinha - Terra Rica	1,66	Rodoviário	727	498	95	6	1.122	65	67.548	78,68	859
Santa Terezinha - Zona Rural	2,60	Rodoviário	1.143	593	159	10	2.098	65	116.183	86,11	1.349
São Fernando	5,01	Rodoviário	2.201	765	317	21	5.216	130	259.125	99,69	2.599
São Martinho - Iracema	2,79	Rodoviário	1.225	470	127	8	1.781	65	110.325	76,30	1.446
São Paulo	3,89	Rodoviário	1.706	561	190	12	2.965	130	168.325	83,54	2.015
Serranópolis	2,27	Rodoviário	995	581	127	8	1.790	65	100.056	85,12	1.175
Tonon - Bom Retiro	3,65	Rodoviário	1.601	788	222	14	3.905	130	191.793	101,45	1.890
Uruaçú	1,94	Rodoviário	853	1173	159	10	3.101	65	132.977	131,99	1.008
Usina Passos	1,69	Rodoviário	742	468	95	6	1.076	65	66.870	76,30	876
Usinavi	3,65	Rodoviário	1.601	806	222	14	3.994	130	194.470	102,87	1.890
Usinova	6,48	Rodoviário	2.844	713	380	25	6.276	195	320.808	95,53	3.358
Vale Verde - Itapaci	3,89	Rodoviário	1.706	1070	317	21	5.653	130	249.456	123,80	2.015
Virgolino de Oliveira - Itapira	2,73	Rodoviário	1.197	498	127	8	1.847	65	111.032	78,54	1.414
Vista Alegre	2,17	Rodoviário	952	494	127	8	1.456	65	88.063	78,31	1.125
Zambianco - Pederneiras	1,12	Rodoviário	490	441	63	4	670	65	42.935	74,24	578

Anexo 4 - Dados obtidos para o Caso múltiplos Hubs de dutos compartilhados

Cluster 1										
Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
1	Cooper Rubiataba	5,18	893	36,71	0,12	9.363	0	128.143	47,70	2.686,68
2	CRV	2,85	491	41,8	0,09	8.394	0	73.723	49,89	1.477,68
3	Goianésia	1,30	223	11,75	0,07	1.721		31.416	46,77	671,67
4	Jalles Machado - Otávio Lage	5,18	893	13,51	0,12	3.446	0	122.226	45,49	2.686,68
5	Jalles Machado - Otavio + Goianesia	6,48		20,68	0,13	5.767				
6	Jalles Machado	3,89	669	45,65	0,10	10.378	0	99.463	49,36	2.015,01
7	Uruaçú	1,94	335	84,64	0,08	14.583	0	59.125	58,68	1.007,51
8	Vale Verde - Itapaci	3,89	669	23,43	0,10	5.327	0	94.412	46,85	2.015,01
9	Centroalcool	3,24	558	143,62	0,10	30.354	0	104.592	62,29	1.679,18

Cluster 2										
Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCo2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
1	Anicuns	2,92	502	105,2	0,09	21.316		84.207	55,72	1.511,26
2	Denusa	3,89	669	39,81	0,10	9.050		101.431	50,34	2.015,01
3	Tropical	10,37	1.785	7,93	0,15	2.669	34	247.456	46,05	5.373,36
4	Anicuns + Denusa	6,80		3,6	0,13	1.024				
5	Anicuns + Denusa + Tropical	17,17		56	0,19	23.062				
6	Usinova	6,48	1.116	117,9	0,13	32.880	0	176.788	52,64	3.358,35
7	São Paulo	3,89	669	12,22	0,10	2.778		90.078	44,70	2.015,01
8	Santa Helena	2,20	379	50,79	0,08	9.200	0	58.670	51,38	1.141,84
9	Santa Helena + São Paulo	6,09		5,5	0,12	1.496				
10	Serranópolis	2,27	391	187,05	0,08	34.277		88.381	75,19	1.175,42
11	Rio Verde - Decal	1,94	335	55,12	0,08	9.497		55.872	55,46	1.007,51
12	Serranópolis + Decal	4,21		25,36	0,11	5.953	25			
13	Vale do Verdão	8,29	1.428	32,77	0,14	10.087		196.233	45,65	4.298,69
14	Serranópolis + Decal + Vale do Verdão	12,50		6,05	0,16	2.195				
15	Boa Vista	10,04	1.729	14,48	0,15	4.812		247.630	47,57	5.205,45
16	SJC - São Francisco	5,18	893	0	0,12	0	0	125.326	46,65	2.686,68
17	Boa Vista + SJC São Francisco	15,22		76,33	0,18	29.960				
18	Ituiutaba	5,07	874	157,7	0,11	39.877	10	152.839	58,13	2.629,20
19	Damfi	1,12	192	67,86	0,06	9.364		36.625	63,32	578,42
20	Araporã	2,25	388	41,85	0,08	7.651		62.722	53,68	1.168,53
21	Damfi + Araporã	3,37		2	0,10	429				
22	Cachoeira	0,68	116	63,77	0,05	7.203		24.644	70,30	350,56
23	Panorama	3,89	669	4,73	0,10	1.075	26	101.328	50,29	2.015,01
24	Cachoeira + panorama	4,56		28,01	0,11	6.790				
25	Damfi+ Araporã+Cachoeira + Panorama	7,93		24,33	0,14	7.358				
26	Goiasa Goiatuba	5,18	893	0	0,12	0		121.152	45,09	2.686,68
27	Damfi+ Araporã+Cachoeira + Panorama	13,12		39,15	0,17	14.477				
28	Bom Sucesso	3,24	558	73,88	0,10	15.615	0	87.569	52,15	1.679,18
29	Lasa Lago Azul	2,27	391	205,66	0,08	37.687		93.916	79,90	1.175,42
30	Morrinhos	2,59	446	48,94	0,09	9.460	10	73.722	54,88	1.343,34
31	Lasa + Morrinhos	4,86		49,38	0,11	12.274				
32	Caçú	2,59	446	23,7	0,09	4.581	0	62.145	46,26	1.343,34

Cluster 3										
Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCo2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
1	Santa Luzia	17,02	2.931	34,15	0,19	14.015	0	481.884	54,62	8.822
2	CBAA - Sidrolândia	2,13	366	103,23	0,08	18.440	0	76.924	69,76	1.103
3	Biosev Passatempo	5,77	994	29,98	0,12	7.985	0	148.139	49,49	2.993
4	Biosev Maracaju	2,19	377	53,39	0,08	9.645		73.406	64,72	1.134
5	Tonon - Bom Retiro	3,65	628	44,48	0,10	9.857	0	116.126	61,43	1.890
6	Biosev Maracaju + Tonon	5,83		35,96	0,12	9.617				
7	Eldorado	10,33	1.780	15,03	0,15	5.052	0	289.115	53,98	5.356
8	São Fernando	5,01	864	61,95	0,11	15.594	0	153.448	59,03	2.599
9	Centro Oeste Iguatemi	2,13	366	234,86	0,08	41.953	4	100.562	91,19	1.103
10	Usinavi	3,65	628	165,77	0,10	36.736	7	137.209	72,58	1.890
11	Laguna	2,43	419	65,2	0,09	12.286		85.642	67,95	1.260
12	Santa Helena	4,56	379	56,38	0,11	13.661		139.031	58,83	2.363
13	Laguna + Santa Helena	6,99		50,07	0,13	14.394	0			
14	Adecoagro - Angélica	7,29	1.256	65,43	0,13	19.133		224.181	59,29	3.781
15	Laguna + Santa Helena + Angélica	14,28		23,2	0,17	8.877				

Cluster 4										
Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressores (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCo2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000
1	Alcídia	3,01	518	66,22	0,09	13.584		73.380	47,09	1.558
2	Santa Terezinha - Terra Rica	1,66	285	29,2	0,07	4.719		37.663	43,87	859
3	Alcídia + Santa Terezinha Terra Rica	4,66		27,13	0,11	6.633	0			
4	Santa Terezinha - Paranacity	2,60	448	31,7	0,09	6.138		54.205	40,18	1.349
5	Alcídia + Santa Terezinha Terra Rica + Pai	7,26		5,4	0,13	1.577				
6	Melhoramentos - Nova Londrina	1,99	342	63,83	0,08	11.096	0	47253	45,86	1.030
7	Santa Terezinha - Ivaté	1,42	245	75,81	0,07	11.519		41951	57,01	736
8	Santa Teresinha - Cidade	1,42	245	17,39	0,07	2.642	0	33075	44,94	736
9	Santa Terezinha - Ivaté + Cidade	2,84		45,11	0,09	9.044				
10	Santa Terezinha - Rondon	1,89	326	40,58	0,08	6.918		41870	42,67	981
11	Coopcana	5,68	978	14,42	0,12	3.815		108671	36,92	2.944
12	Santa Terezinha Rondon + Coopcana	7,57		2,3	0,13	683				
13	Costa	0,95	163	48,38	0,06	6.251		29071	59,26	491
14	Sabarálcool - Matriz	1,70	293	71,6	0,07	11.702		52779	59,77	883
15	Costa + Sabarálcool	2,65		64,29	0,09	12.539	0			
16	Santa Terezinha - Tapejara	2,37	408	35,18	0,08	6.557		55757	45,46	1.227
17	Santa Terezinha - Zona Rural	2,60	448	0	0,09	0		54119	40,11	1.349
18	Santa Terezinha - Tapejara + Zona Rural	4,97		28	0,11	7.022				
19	Costa + Sabaralcool+Santa Terezinha - Ta	7,62		25,74	0,13	7.659				
20	Rondon+Coopcana+Costa+Sabaralcool+Ta	15,19		4,8	0,18	1.882				
21	Melhoramentos - Jussara	5,68	978	50,33	0,12	13.315	0	116621	39,62	2.944
22	Sabarálcool - Filial	1,18	204	69	0,06	9.747	0	31269	50,99	613
23	Renuka - São Pedro do Ivaí	2,13	367	80,15	0,08	14.323		55280	50,08	1.104
24	Cooperval	1,89	326	74,95	0,08	12.777		49184	50,13	981
25	Renuka São Pedro do Ivai + Cooperval	4,02		8,58	0,10	1.977	0			
26	Santa Terezinha - Iguatemi	1,42	245	28,4	0,07	4.315		30922	42,02	736
27	Renuka São Pedro do Ivai + Cooperval + S	5,44		10,27	0,12	2.671				
28	Renuka - Marialva	1,56	269	64,62	0,07	10.200	0	38610	47,70	809
29	Cooper Nova Produtiva	1,51	261	37,7	0,07	5.878		35551	45,29	785
30	Alto Alegre - Florestópolis	2,84	489	71,41	0,09	14.317		69954	47,53	1.472
31	Cooper Nova Produtiva + Alto Alegre Flores	4,35		15,2	0,11	3.616				
32	Alto Alegre - Junqueira	3,31	571	33,16	0,10	7.071		69230	40,32	1.717
33	Cooper Nova Produtiva + Alto Alegre Flores	7,67		2	0,13	597				
34	UCP ANP	1,14	196	98,07	0,06	13.629	0	34852	59,20	589
35	Cooper Nova Produtiva + Alto Alegre Flores	8,80		10,56	0,14	3.329				
36	Cocal - Narandiba	4,96	854	38,21	0,11	9.575		114505	44,55	2.570
37	Alto Alegre - Santo Inácio	3,31	571	0	0,10	0		70094	40,82	1.717
38	Cocal Narandiba + Alto Alegre Santo Inaci	8,27		76,7	0,14	23.585				
39	Cooper Nova Produtiva + Alto Alegre Flores	17,07		2,4	0,19	986				

Cluster 5										
Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCo2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
1	Coruripe - Limeira do Oeste	3,38	582	173,18	0,10	37.235	7	96027	54,79	1.753
2	Alcoolvale	2,31	398	70,64	0,08	13.040		57560	48,08	1.197
3	Santa Adélia - Pereira Barreto	6,82	1.174	7,29	0,13	2.075		133497	37,77	3.534
4	Alcoovale + Santa Adelia Pereira Barreto	9,13		16,44	0,14	5.259				
5	Pioneiros	2,48	427	0	0,09	0	0	46362	36,07	1.285
6	Alcoovale + Santa Adelia Pereira Barreto+	11,61		42,32	0,16	14.903				
7	Da Mata	6,20	1.068	19,06	0,12	5.222		113168	35,22	3.213
8	Alcoovale + Santa Adelia Pereira Barreto+	17,80		3,69	0,19	1.542				
9	Viralcool - Santa Amália	3,72	641	59,73	0,10	13.341		81591	42,32	1.928
10	Raizen - Gasa	7,41	1.277	47,48	0,13	13.975	0	150020	39,04	3.843
11	Viralcool Santa Amalia + Raízen Gasa	11,13		32,89	0,16	11.390				
12	Caeté - Paulicéia	7,44	1.281	52,33	0,13	15.423		158603	41,13	3.856
13	Pedra - Ipê	4,96	854	16,14	0,11	4.045		99498	38,71	2.570
14	Caete + Pedra Ipê	12,40		35,45	0,16	12.816	0			
15	Raizen - Mundial	1,94	334	11,01	0,08	1.896		37236	37,02	1.006
16	Caete + Pedra Ipê + Raízen Mundial	14,34		33,2	0,17	12.722				
17	CBAA Brasilândia	4,25	733	119,56	0,11	28.181		109357	49,58	2.206
18	Alta Paulista - Dracena	3,10	534	46,07	0,09	9.566		70015	43,58	1.607
19	Alta Paulista	2,14	368	21,05	0,08	3.768		46401	41,86	1.109
20	Glencane	3,04	523	5,39	0,09	1.110	25	61662	39,16	1.574
21	Alta Paulista + Glencane	5,18		8,77	0,12	2.236				
22	Alta Paulista Dracena+Alta Paulista + Gle	8,27		11,44	0,14	3.518				
23	CBAA+Alta Paulista Dracena+Alta Paulist	12,53		58,39	0,16	21.200				
24	Flórida	3,72	641	28,29	0,10	6.319		75673	39,25	1.928
25	Raizen - Univalem	4,03	694	0	0,10	0		75134	35,97	2.089
26	Flórida + Raízen Univalem	7,75		16,98	0,14	5.087				
27	Branco Peres	1,98	342	38,99	0,08	6.772		42459	41,29	1.028
28	Flórida + Raízen Univalem+ Branco Peres	9,73		6,94	0,15	2.277				
29	Raízen - Benálcool	1,55	267	7,60	0,07	1.196		28714	35,75	803
30	Flórida + Raízen Univalem+ Branco Peres-	11,28		6,91	0,16	2.406				
31	Alto Alegre - Floresta	2,17	374	49,49	0,08	8.910	0	51704	45,98	1.125
32	Bioenergia	3,72	641	3,2	0,10	715		74075	38,42	1.928
33	Alto Alegre Floresta + Bioenergia	5,89		15,96	0,12	4.284				
34	Parapuã	1,55	267	57,26	0,07	9.011		38450	47,87	803
35	Alto Alegre Floresta + Bioenergia+ Parapu	7,44		9,17	0,13	2.703				
36	Unialco	2,36	406	9,2	0,08	1.712		45604	37,35	1.221
37	Alto Alegre Floresta + Bioenergia+ Parapu	9,79		32,45	0,15	10.676				
38	Flórida + Raízen Univalem+ Branco Peres-	21,07		10,19	0,20	4.555				
39	Clealco - Matriz	2,79	480	69,37	0,09	13.810	0	62144	42,98	1.446
40	Clealco - Pouso Alegre	3,10	534	106,5	0,09	22.114		77112	48,00	1.607
41	Campestre	4,03	694	64,48	0,10	14.870	0	86368	41,35	2.089
42	Clealco Pouso Alegre + Campestre	7,13		10,27	0,13	2.976				
43	Cafealcool	1,60	275	61,91	0,07	9.866		40188	48,48	829
44	Batatais - Lins	4,96	854	20,76	0,11	5.202		101718	39,57	2.570
45	Renuka do Brasil - Madhu	9,92	1.708	2,8	0,15	926		193957	37,73	5.141
46	Batatais Lins + Renuka Madhu	14,88		19,24	0,18	7.482				
47	Cafealcool+Batatais Lins + Renuka Madhu	16,47		2,4	0,18	972				
48	Diana	1,55	267	18,47	0,07	2.907		32197	40,08	803
49	Cafealcool+Batatais Lins + Renuka Madhu	18,02		56,48	0,19	23.717	0			
50	Revati	5,89	1.014	35,16	0,12	9.438		112993	37,02	3.052
51	Cafealcool+Batatais Lins + Renuka Madhu	23,91		7,36	0,21	3.461				
52	Figueira - Alcoazul	4,03	694	3,62	0,10	835		71105	34,05	2.089
53	Cafealcool+Batatais Lins + Renuka Madhu	27,94		2,96	0,23	1.481				
54	Raizen - Destivale	2,58	445	13,93	0,09	2.690		47634	35,55	1.340
55	Cafealcool+Batatais Lins + Renuka Madhu	30,53		3,52	0,23	1.825				
56	Santa Isabel - Filial	1,86	320	102,12	0,08	17.286	0	49509	51,36	964
57	Antônio Ruette - Monterey	3,41	587	43,57	0,10	9.399		74666	42,25	1.767
58	Virgolino de Oliveira - José Bonifácio	3,47	598	27,6	0,10	5.997		72451	40,27	1.799
59	Antônio Ruette Monterey + Virgolino	6,88		22,7	0,13	6.485	0			
60	CEMMA	6,82	1.174	62,59	0,13	17.815		141924	40,15	3.534
61	Antônio Ruette Monterey + Virgolino+CEM	13,70		21,2	0,17	7.977				
62	Santa Isabel+Antônio Ruette Monterey + V	15,56		11,46	0,18	4.537				
63	Aralco	1,55	267	24,07	0,07	3.788		30790	38,33	803
64	COFCO - UNP	6,20	1.068	88,94	0,12	24.369	0	132377	41,20	3.213
65	Aralco+COFCO UNP	7,75		2,5	0,14	749				
66	Guariroba	3,10	534	71,98	0,09	14.946		75102	46,75	1.607
67	COFCO - Meridiano	6,82	1.174	29,71	0,13	8.457	0	140799	39,84	3.534
68	Guariroba + COFCO Meridiano	9,92		62,43	0,15	20.643				
69	Coruripe - Iturama	3,66	631	0	0,10	0		85494	45,02	1.899
70	Central Energética	3,38	582	0	0,10	0	0	78917	45,02	1.753
71	Coruripe + Central energética	7,04		146,83	0,13	42.342				
72	Ouroeste	3,10	534	29,55	0,09	6.136		71247	44,35	1.607
73	Alcoeste	3,10	534	0	0,09	0		65111	40,53	1.607
74	Ouroeste + Alcoeste	6,20		49,42	0,12	13.541	0			
75	Figueira - Generalco	3,41	587	8,81	0,10	1.900		66075	37,39	1.767
76	Ouroeste + Alcoeste+ Generalco	9,61		44,02	0,15	14.372				

Cluster 6										
Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCo2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
1	Iberia	3,10	534	78,25	0,09	16.248		58135	36,19	1.607
2	Quatá	5,27	907	65,44	0,12	16.801		90185	33,02	2.731
3	Pyles	1,12	192	0	0,06	0	0	15540	26,87	578
4	Quatá + Pyles	6,38		9,51	0,13	2.637				
5	Iberia+Quatá+Pyles	9,48		9	0,15	2.923				
6	Atena	1,86	320	60,4	0,08	10.224		39631	41,11	964
7	Raizen Paraguaçu	1,38	237	13,65	0,07	2.048		23810	33,38	713
8	Atena + Raizen Paraguaçu	3,24		22,59	0,10	4.772	0			
9	Cocal - Paraguaçu Paulista	3,72	641	52,08	0,10	11.632		64962	33,70	1.928
10	Atena + Raizen Paraguaçu + Cocal	6,95		27,45	0,13	7.875				
11	Raizen Tarumã Maracaí	3,72	641	56,33	0,10	12.582	0	61699	32,00	1.928
12	Água Bonita	2,17	374	6,53	0,08	1.176		33383	29,68	1.125
13	Raizen - Tarumã	5,27	907	0	0,12	0	0	78218	28,64	2.731
14	Água Bonita + Raízen Tarumã	7,44		41,36	0,13	12.190				
15	Americana	1,51	261	67,9	0,07	10.587		30654	39,05	785
16	Clarion	2,32	399	120,79	0,08	22.333		53304	44,35	1.202
17	Bandeirantes	3,31	571	37,42	0,10	7.980	0	52223	30,41	1.717
18	Clarion + Bandeirantes	5,63		2,24	0,12	591				
19	Tirolli	2,17	374	0	0,08	0		28749	25,56	1.125
21	Americana + Clarion + Bandeirantes + Tirc	9,31		1,29	0,15	416				
22	Dacalda	1,89	326	11,53	0,08	1.966		31347	31,95	981
23	Jacarezinho	2,13	367	0,4	0,08	71	0	33126	30,01	1.104
24	Dacalda + Jacarezinho	4,02		40,41	0,10	9.313				
25	Londra	2,54	438	42,01	0,09	8.057		49614	37,66	1.317
26	Iracema	3,10	534	21,73	0,09	4.512		55191	34,35	1.607
27	Londra + Iracema	5,64		35,73	0,12	9.427				
28	Comanche - Santa Anita	1,30	224	10,83	0,07	1.589		21793	32,30	675
29	Santa Maria	0,25	43	10,43	0,03	789		4637	36,08	129
30	Comanche Santa Anita + Santa Maria	1,55		4,88	0,07	768				
31	Raizen - Ipaussu	3,82	659	6,29	0,10	1.421		58885	29,70	1.982
32	Comanche Santa Anita + Santa Maria + Ip	5,37		7,16	0,12	1.853				
33	Londra + Iracema+Comanche Santa Anita	11,01		33,39	0,16	11.514	0			
34	Comanche - Canitar	1,86	320	18,4	0,08	3.115		28470	29,54	964
35	Londra + Iracema+Comanche Santa Anita	12,87		5,65	0,17	2.074				
36	TGM	1,61	278	68,36	0,07	10.928		34210	40,95	835
37	São Luiz	2,79	480	0	0,09	0		40296	27,87	1.446
38	TGM + São Luiz	4,40		17,91	0,11	4.279				
39	Londra + Iracema+Comanche Santa Anita	17,27		6,36	0,19	2.626				
40	Rio Pardo	3,10	534	89,89	0,09	18.665		59954	37,32	1.607
41	Londra + Iracema+Comanche Santa Anita	20,37		5,33	0,20	2.351				
42	JJ	2,42	416	74,46	0,09	13.999	0	45925	36,65	1.253
43	Guaricanga	4,83	833	124,49	0,11	30.882	0	94735	37,80	2.506

Cluster 7										
Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCo2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
1	Delta - Volta Grande	5,64	971	60,18	0,12	15.873		91049	31,17	2.921
2	Guarani - Mandu	6,32	1.089	2	0,12	552		87508	26,70	3.277
3	Colorado	10,85	1.868	2	0,15	685		149875	26,65	5.623
4	Guarani Mandu + Colorado	17,17		17,26	0,19	7.108	0			
5	Delta + Guarani Mandu + Colorado	22,80		10	0,21	4.614				
6	Santo Ângelo	2,25	388	72,86	0,08	13.320		42935	36,74	1.169
7	Delta + Guarani Mandu + Colorado+ santo	25,06		20,4	0,22	9.773				
8	Coruripe - Campo Florido	5,07	874	129,57	0,11	32.764		73534	27,97	2.629
9	Biosev - Bioenergia Continental	3,41	587	59,76	0,10	12.891	0	40295	22,80	1.767
10	Coruripe + Biosev Continental	8,48		10,58	0,14	3.286				
11	Itapagipe	2,82	485	77,79	0,09	15.549		44820	30,68	1.461
12	Frutal	2,82	485	40,89	0,09	8.173		37444	25,63	1.461
13	Itapagipe + Frutal	5,64		57,66	0,12	15.208				
14	Moema	6,20	1.068	33,41	0,12	9.154		71293	22,19	3.213
15	Colombo - Palestina	6,20	1.068	34	0,12	9.316		71455	22,24	3.213
16	Moema + Colombo Palestina	12,40		75,57	0,16	27.321				
17	Vertente	4,96	854	57,56	0,11	14.424	0	53207	20,70	2.570
18	Guarani - Tanabi	3,72	641	83,5	0,10	18.650		51324	26,62	1.928
19	Onda Verde	3,84	662	56,51	0,10	12.788		46551	23,37	1.992
20	Guarani Tanabi + Onda Verde	7,56		24,58	0,13	7.292				
21	Moema + Colombo Palestina+Vertente+Ta	24,92		3,52	0,22	1.683				
22	São José	3,10	534	13,24	0,09	2.749		26779	16,67	1.607
23	Moema + Colombo Palestina+Vertente+Ta	28,02		3,6	0,23	1.803				
24	Itapagipe+Frutal+Moema + Colombo Pales	33,65		2,4	0,24	1.294				
25	Guarani - Severínia	3,10	534	40,87	0,09	8.486		32757	20,39	1.607
26	COFCO - Potirendaba	3,10	534	90,42	0,09	18.775		44085	27,44	1.607
27	Itajobi	3,35	576	24,8	0,10	5.311		38988	22,47	1.735
28	COFCO - Catanduva	6,20	1.068	3,92	0,12	1.074		63440	19,74	3.213
29	Itajobi + COFCO Catanduva	9,55		55,55	0,15	18.089				
30	COFCO Potirendaba + Itajobi + COFCO C	12,64		11,63	0,16	4.238	0			
31	Guarani + COFCO Potirendaba + Itajobi +	15,74		2,82	0,18	1.122				
32	São Domingos	3,10	534	29,31	0,09	6.086		36531	22,74	1.607
33	Antônio Ruette - Cachoeira	3,10	534	0	0,09	0		30445	18,95	1.607
34	São Domingos + Antonio Ruette Cachoeira	6,20		46,68	0,12	12.790				
35	Guarani + COFCO Potirendaba + Itajobi +	21,94		5,28	0,21	2.399				
36	Santa Isabel - Matriz	3,10	534	4,03	0,09	837		35298	21,97	1.607
37	São José da Estiva	4,96	854	0	0,11	0		55138	21,45	2.570
38	Santa Isabel + São José da Estiva	8,06		56,17	0,14	17.093				
39	Virgolino de Oliveira - Catanduva	6,63	1.142	0	0,13	0		59678	17,36	3.438
40	Colombo - Ariranha	5,08	875	5,29	0,11	1.339	0	47073	17,87	2.635
41	Santa Isabel + São José da Estiva + Virg	19,77		37,27	0,20	16.241				
42	Bertolo	1,86	320	35,53	0,08	6.014		21219	22,01	964
43	Santa Isabel + São José da Estiva + Virg	21,63		14,14	0,20	6.387				
44	Nardini	4,96	854	51,88	0,11	13.001		52083	20,26	2.570
45	Santa Isabel + São José da Estiva + Virg	26,59		12,5	0,22	6.132				
46	Raizen - Bonfim	7,52	1.295	9	0,13	2.664		74478	19,11	3.898
47	Santa Adélia - Jaboticabal	4,34	747	0	0,11	0		41442	18,43	2.249
48	Raizen Bonfim + Adelia Jaboticabal	11,86		39,71	0,16	14.103				
49	São Martinho - Matriz	5,76	993	44,54	0,12	11.854		60057	20,10	2.988
50	Raizen Bonfim + Adelia Jaboticabal + São	17,62		3,2	0,19	1.332				
51	Pitangueiras	3,72	641	10,87	0,10	2.428		33245	17,24	1.928
52	Raizen Bonfim + Adelia Jaboticabal + São	21,34		29,36	0,20	13.191				
53	Delos	1,24	214	33,68	0,07	4.848		15434	24,02	643
54	Andrade	8,06	1.388	0	0,14	0		68813	16,47	4.177
55	Delos + Andrade	9,30		13,3	0,15	4.286				
56	Biosev Bioenergia - Santa Elisa	7,13	1.228	35,79	0,13	10.370		67957	18,39	3.695
57	Delos + Andrade + Biosev Santa Elisa	16,43		3,2	0,18	1.295				
58	Viralcool - Santa Cecília	4,03	694	11,03	0,10	2.544	0	34775	16,65	2.089
59	Delos + Andrade + Biosev Santa Elisa + V	20,45		10,16	0,20	4.488				
60	Toniello	2,17	374	32,61	0,08	5.871		23535	20,93	1.125
61	Guarani - Cruz Alta	2,48	427	14,28	0,09	2.712		23977	18,66	1.285
62	Santo Antônio	4,03	694	0	0,10	0		34556	16,55	2.089
63	Guarani Cruz Alta+ Sto Antonio	6,51		10,13	0,13	2.830				
64	Bazan	6,63	1.142	25,76	0,13	7.252		61252	17,82	3.438
65	Tonielo+Guarani Cruz Alta+ Sto Antonio +	15,31		14,07	0,18	5.535				
66	Delos + Andrade + Biosev Santa Elisa + V	35,76		4,4	0,25	2.430				
67	Carolo	2,36	406	42,99	0,08	7.999		26165	21,43	1.221
68	Delos + Andrade + Biosev Santa Elisa + V	38,12		2,98	0,26	1.688				
69	Raizen Bonfim + Adelia Jaboticabal + São	59,46		1,54	0,31	1.042				
70	Pedra - Da Pedra	7,44	1.281	64,45	0,13	18.995		82371	21,36	3.856
71	Biosev Bioenergia - Jardest	2,48	427	32,77	0,09	6.223		27349	21,28	1.285
72	Pedra + Jardest	9,92		19,35	0,15	6.398				
73	Usina Passos	1,69	291	150,38	0,07	24.504		38939	44,43	876
74	Cevasa	3,41	587	6,91	0,10	1.491		36989	20,93	1.767
75	Batatais- Matriz	6,20	1.068	0	0,12	0	50	64543	20,09	3.213
76	Cevasa + Batatais	9,61		55,16	0,15	18.009				
77	Passos + Cevasa + Batatais	11,30		14	0,16	4.877				
78	Biosev Bioenergia MB	4,34	747	0	0,11	0		35174	15,64	2.249
79	Passos + Cevasa + Batatais + Biosev MB	15,64		9,12	0,18	3.618				
80	Pedra + Jardest +Passos + Cevasa + Bata	25,55		8,77	0,22	4.235				
81	Alta Mogiana	6,82	1.174	32,36	0,13	9.211		66307	18,76	3.534
82	Biosev Bioenergia - Vale do Rosário	7,44	1.281	12,75	0,13	3.758		66044	17,13	3.856
83	Alta Mogiana + Biosev Rosario	14,26		24,72	0,17	9.451	0			
84	Pedra - Buriti	10,54	1.815	88,08	0,15	29.839		111093	20,34	5.462
85	Alta Mogiana + Biosev Rosario + Pedra Bu	24,79		3,13	0,22	1.493				
86	Planalto	1,69	291	238,07	0,07	38.793	3	51827	59,14	876
87	Santa Juliana	6,76	1.165	125,1	0,13	35.492		99947	28,51	3.506
88	Delta	3,38	582	32,06	0,10	6.893		39121	22,32	1.753
89	Santa Juliana + Delta	10,14		6,8	0,15	2.269	27			
90	Raizen - Junqueira	3,61	622	36,28	0,10	8.011		41645	22,23	1.873
91	Santa Juliana + Delta + Raízen Junqueira	13,76		58,32	0,17	21.981				
93	Guaíra	3,10	534	38,72	0,09	8.040	0	31751	19,76	1.607

Cluster 8										
Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
1	São Martinho - Santa Cruz	6,82	1.174	18,89	0,13	5.377		85.348	24,15	3.534
2	Maringá	3,04	523	16,66	0,09	3.432		39.055	24,81	1.574
3	São Martinho + Maringá	9,86		15,2	0,15	5.013				
4	Raizen - Araraquara	3,10	534	17,89	0,09	3.715	0	38.489	23,96	1.607
5	São Martinho + Maringá + Raízen Araraqu	12,95		3,22	0,17	1.185				
6	Citrosuco	0,25	43	68,25	0,03	5.160		7.919	61,62	129
7	São Martinho +Maringá + Raízen Araraqua	13,20		22,41	0,17	8.309				
8	Malosso	1,92	331	91,21	0,08	15.643		37.184	37,33	996
9	Santa Fé	4,96	854	58,97	0,11	14.778	0	70.368	27,38	2.570
10	Malosso + Santa Fé	6,88		17,13	0,13	4.894				
11	Iacanga	3,37	581	42,72	0,10	9.175		54.603	31,24	1.748
12	Della Coletta	2,54	438	2	0,09	384		34.622	26,28	1.317
13	Iacanga + Della Coletta	5,91		47,07	0,12	12.656				
14	Tonon - Cândida GL	3,72	641	23,99	0,10	5.358	0	47.503	24,64	1.928
15	Iacanga + Della Coletta + Tonon Cândida	9,63		4,65	0,15	1.520				
16	Grizzo	2,05	352	22,5	0,08	3.957		26.814	25,29	1.060
17	Iacanga + Della Coletta + Tonon Cândida +	11,68		22,33	0,16	7.882				
18	Vista Alegre	2,17	374	102,38	0,08	18.432		47.024	41,81	1.125
19	Santa Rosa	1,12	192	19,6	0,06	2.705		22.466	38,84	578
20	J. Pilon - Santa Maria	2,42	416	0	0,09	0		42.817	34,17	1.253
21	Santa Rosa + J Pilon	3,53		73,19	0,10	16.015				
22	Vista Alegre + Santa Rosa + J Pilon	5,70		27,35	0,12	7.248				
23	Raizen - Rafard	2,60	448	72,92	0,09	14.121		50.257	37,24	1.350
24	Zambianco - Pedemeiras	1,12	192	49,12	0,06	6.778		22.265	38,50	578
25	Rafard + Zambianco	3,72		15,1	0,10	3.373				
26	Raizen - Santa Helena	1,98	342	52,47	0,08	9.114		37.249	36,23	1.028
27	Granelli	0,25	43	39,08	0,03	2.955		6.472	50,35	129
28	Raízen Santa Helena + Granelli	2,23		14,84	0,08	2.702				
29	Rafard + Zambianco +Raízen Santa Helena	5,95		23,52	0,12	6.340				
30	Vista Alegre+Santa Rosa+Jpilon+Rafard +	11,65		10,98	0,16	3.873				
31	São Manoel	7,44	1.281	26,68	0,13	7.863	92	92.268	23,93	3.856
32	Vista Alegre+Santa Rosa+Jpilon+Rafard +	19,09		38,71	0,19	16.633				
33	Barra Grande	6,82	1.174	40,47	0,13	11.519		89.870	25,43	3.534
34	ZL - São José	6,82	1.174	36	0,13	10.247		88.598	25,07	3.534
35	Barra Grande + São José	13,64		7,65	0,17	2.873				
36	Raizen - Diamante	1,34	232	28,33	0,07	4.213		19.386	27,80	697
37	Barra Grande + São José + Raizen Diama	14,98		6,8	0,18	2.652				
38	Raizen - Barra	7,49	1.290	27,94	0,13	8.256		91.397	23,55	3.881
39	Barra Grande + São José + Raizen Diama	22,47		11,87	0,21	5.444				
40	Raizen - Dois Córregos	1,13	195	18,96	0,06	2.634		14.954	25,43	588
41	Barra Grande + São José + Raizen Diama	23,60		7,91	0,21	3.700				
42	Vista Alegre+Santa Rosa+Jpilon+Rafard +	42,69		1,26	0,27	747				
43	Tonon - Paraíso	4,21	726	6	0,11	1.409		46.454	21,26	2.185
44	Vista Alegre+Santa Rosa+Jpilon+Rafard +	46,91		9,81	0,28	6.039				
45	Raízen - Bom Retiro	1,65	285	13,93	0,07	2.251		26.987	31,46	858
46	Furlan - Matriz	1,55	267	0	0,07	0		23.162	28,83	803
47	Raizen Bom Retiro + Furlan	3,20		35,89	0,10	7.553				
48	Raizen - Costa Pinto	4,91	845	21,42	0,11	5.346		68.976	27,10	2.545
49	São Martinho - Iracema	2,79	480	9,39	0,09	1.869		38.022	26,30	1.446
50	Raízen Costa Pinto + São Martinho	7,70		9,57	0,14	2.860				
51	Raizen Bom Retiro + Furlan + Raízen Cos	10,90		18,92	0,16	6.498				
52	Ester	2,79	480	44,22	0,09	8.803		43.196	29,87	1.446
53	USJ	6,20	1.068	11,43	0,12	3.132		79.560	24,76	3.213
54	Ester + USJ	8,99		6,8	0,14	2.162				
55	Santa Lúcia	1,92	331	5,38	0,08	923		24.153	24,25	996
56	Ester + USJ + Santa Lúcia	10,91		3,04	0,16	1.044				
57	Raizen Bom Retiro + Furlan + Raízen Cos	21,81		29,75	0,20	13.483				
58	Virgolino de Oliveira - Itapira	2,73	470	63,64	0,09	12.556		47.861	33,85	1.414
59	Biosev - Leme	2,23	384	7,93	0,08	1.444		30.330	26,22	1.157
60	Itapira + Biosev Leme	4,96		29,14	0,11	7.302	77			
61	Baldin	1,12	192	0	0,06	0		12.800	22,13	578
62	Itapira + Biosev Leme+ Baldin	6,07		2,16	0,12	587				
63	Raizen Bom Retiro + Furlan + Raízen Cos	27,89		21,32	0,23	10.660				
64	Alvorada do Bebedouro	1,27	219	53,03	0,07	7.715		29.630	44,88	660
65	Ipiranga - Mococa	1,49	256	23,99	0,07	3.714		29.311	38,01	771
66	Alvorada do Bebedouro + Ipiranga Mococa	2,76		85,83	0,09	17.018				
67	Monte Alegre	1,13	194	133,43	0,06	18.487		33.686	57,66	584
68	Ferrari	2,29	395	9,74	0,08	1.793		32.720	27,52	1.189
69	Monte Alegre + Ferrari	3,42		26,2	0,10	5.659				
70	Abengoa - São João	3,72	641	72,83	0,10	16.267		60.266	31,26	1.928
71	Monte Alegre + Ferrari + Abengoa São Joã	7,14		17,21	0,13	4.990				
72	Abengoa - São Luiz	1,24	214	37,18	0,07	5.351		19.151	29,80	643
73	Monte Alegre + Ferrari + Abengoa São Joã	8,38		2,4	0,14	742				
74	Alvorada do Bebedouro + Ipiranga+Monte A	11,14		1,6	0,16	554				
75	Raizen Bom Retiro + Furlan + Raízen Cos	39,03		29,7	0,26	16.987				
76	São Simão	2,59	446	50,51	0,09	9.764		41.238	30,70	1.343
77	Moreno	7,44	1.281	44,65	0,13	13.159		103.499	26,84	3.856
78	São Simão + Moreno	10,03		33,77	0,15	11.217				
79	Raizen - Serra	1,55	267	6,35	0,07	999		18.087	22,52	803
80	São Simão + Moreno + Raízen Serra	11,58		6,08	0,16	2.139	0			
81	Santa Rita	3,72	641	37,58	0,10	8.394		52.217	27,09	1.928
82	Ipiranga - Descalvado	2,48	427	19,96	0,09	3.791		30.682	23,87	1.285
83	Santa Rita + Ipiranga Descalvado	6,20		21,29	0,12	5.833				
84	São Simão + Moreno + Raízen Serra+ Sar	17,78		14,6	0,19	6.097				

Duto ao hub Duto compartilhado

Anexo 5 - Dados obtidos para o Caso múltiplos Hubs de dutos unitários

Cluster 1										
Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
1	Cooper Rubiataba	5,18	893	36,71	0,12	9363,42	0	208.381	77,56	2.687
2	CRV	2,85	491	41,8	0,09	8394,05	0	117.854	79,76	1.478
3	Goianésia	1,30	223	32,42	0,07	4749,40	0	54.504	81,15	672
4	Jalles Machado - Otávio Lage	5,18	893	34,19	0,12	8720,65	0	207.738	77,32	2.687
5	Jalles Machado	3,89	669	45,65	0,10	10378,04	0	159.641	79,23	2.015
6	Uruaçú	1,94	335	84,64	0,08	14582,71	0	89.214	88,55	1.008
7	Vale Verde - Itapaci	3,89	669	23,43	0,10	5326,56	0	154.590	76,72	2.015
8	Centroalcool	3,24	558	143,62	0,10	30354,07	0	154.740	92,15	1.679

Cluster 2										
Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
1	Anicuns	2,92	502	161,2	0,09	32663,60	5,7	97.592	64,58	1.511
2	Denusa	3,89	669	95,8	0,10	21779,10	0,0	108.122	53,66	2.015
3	Tropical	10,37	1.785	56	0,15	18847,34	0,0	249.095	46,36	5.373
4	Usinova	6,48	1.116	117,9	0,13	32879,70	0,0	176.785	52,64	3.358
5	São Paulo	3,89	669	12,22	0,10	2778,09	0,0	89.121	44,23	2.015
6	Santa Helena	2,20	379	55,49	0,08	10051,25	0,0	58.979	51,65	1.142
7	Serranópolis	2,27	391	212,41	0,08	38923,88	4,4	89.424	76,08	1.175
8	Rio Verde - Decal	1,94	335	80,48	0,08	13865,98	0,0	57.037	56,61	1.008
9	Vale do Verdão	8,29	1.428	32,77	0,14	10087,29	0,0	194.285	45,20	4.299
10	Boa Vista	10,04	1.729	90,82	0,15	30180,62	0,0	253.233	48,65	5.205
11	SJC - São Francisco	5,18	893	76,34	0,12	19471,62	0,0	134.595	50,10	2.687
12	Ituiutaba	5,07	874	157,71	0,11	39879,73	10,0	152.839	58,13	2.629
13	Damfi	1,12	192	131,34	0,06	18124,21	0,0	42.910	74,18	578
14	Araporã	2,25	388	105,33	0,08	19256,26	0,0	69.328	59,33	1.169
15	Cachoeira	0,68	116	155,26	0,05	17535,90	1,3	32.597	92,99	351
16	Panorama	3,89	669	91,49	0,10	20799,27	0,0	107.142	53,17	2.015
17	Goiasa Goiatuba	5,18	893	39,15	0,12	9985,77	0,0	125.110	46,57	2.687
18	Bom Sucesso	3,24	558	73,88	0,10	15614,53	0,0	87.567	52,15	1.679
19	Lasa Lago Azul	2,27	391	255,05	0,08	46737,61	4,4	97.238	82,73	1.175
20	Morrinhos	2,59	446	98,33	0,09	19007,46	0,0	76.569	57,00	1.343
21	Caçú	2,59	446	23,7	0,09	4581,27	0,0	62.143	46,26	1.343

Cluster 3										
Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCo2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
1	Santa Luzia	17,02	2.931	34,15	0,19	14.015	0	435.794	49,40	8.822
2	CBAA - Sidrolândia	2,13	366	103,23	0,08	18.440	0	71.162	64,53	1.103
3	Biosev Passatempo	5,77	994	29,98	0,12	7.985	0	151.088	50,48	2.993
4	Biosev Maracaju	2,19	377	82,65	0,08	14.931	0	69.160	60,97	1.134
5	Tonon - Bom Retiro	3,65	628	73,74	0,10	16.342	0	106.723	56,45	1.890
6	Eldorado	10,33	1.780	15,03	0,15	5.052	0	261.132	48,75	5.356
7	São Fernando	5,01	864	61,95	0,11	15.594	0	139.868	53,81	2.599
8	Centro Oeste Iguatemi	2,13	366	234,86	0,08	41.953	4	94.801	85,97	1.103
9	Usinavi	3,65	628	165,77	0,10	36.736	7	127.332	67,36	1.890
10	Laguna	2,43	419	138,5	0,09	26.098	0	86.352	68,52	1.260
11	Santa Helena	4,56	379	129,65	0,11	31.414	0	132.218	55,95	2.363
12	Adecoagro - Angélica	7,29	1.256	88,63	0,13	25.917	0	206.679	54,66	3.781

Cluster 4										
Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
1	Alcídia	3,01	518	93,35	0,09	19.149	0	74.014	47,49	1.558
2	Santa Terezinha - Terra Rica	1,66	285	56,33	0,07	9.104	0	39.331	45,81	859
3	Santa Terezinha - Paranacity	2,60	448	31,7	0,09	6.138	0	53.638	39,76	1.349
4	Melhoramentos - Nova Londrina	1,99	342	63,84	0,08	11.098	0	47.370	45,98	1.030
5	Santa Terezinha - Ivaté	1,42	245	120,8	0,07	18.355	0	44.264	60,15	736
6	Santa Teresinha - Cidade	1,42	245	62,38	0,07	9.478	0	35.387	48,09	736
7	Santa Terezinha - Rondon	1,89	326	40,58	0,08	6.918	0	41.463	42,26	981
8	Coopcana	5,68	978	14,59	0,12	3.860	0	107.496	36,52	2.944
9	Costa	0,95	163	112,46	0,06	14.530	0	31.802	64,82	491
10	Sabarálcool - Matriz	1,70	293	142,2	0,07	23.242	0	54.332	61,53	883
11	Santa Terezinha - Tapejara	2,37	408	80,98	0,08	15.094	0	58.276	47,51	1.227
12	Santa Terezinha - Zona Rural	2,60	448	47,13	0,09	9.126	0	56.626	41,97	1.349
13	Melhoramentos - Jussara	5,68	978	50,33	0,12	13.315	0	116.951	39,73	2.944
14	Sabarálcool - Filial	1,18	204	69	0,06	9.747	0	31.338	51,10	613
15	Renuka - São Pedro do Ivaí	2,13	367	96,05	0,08	17.164	0	56.028	50,76	1.104
16	Cooperval	1,89	326	92,4	0,08	15.752	0	50.297	51,26	981
17	Santa Terezinha - Iguatemi	1,42	245	37,1	0,07	5.637	0	31.546	42,87	736
18	Renuka - Marialva	1,56	269	64,62	0,07	10.200	0	38.700	47,81	809
19	Cooper Nova Produtiva	1,51	261	64,48	0,07	10.054	0	37.690	48,01	785
20	Alto Alegre - Florestópolis	2,84	489	98,19	0,09	19.687	0	71.504	48,58	1.472
21	Alto Alegre - Junqueira	3,31	571	43,74	0,10	9.327	0	69.782	40,64	1.717
22	UCP ANP	1,14	196	107,41	0,06	14.927	0	35.654	60,56	589
23	Cocal - Narandiba	4,96	854	101,37	0,11	25.403	0	115.902	45,09	2.570
24	Alto Alegre - Santo Inácio	3,31	571	63,16	0,10	13.469	0	73.923	43,05	1.717

Cluster 5										
Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressores (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCo2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
1	Coruripe - Limeira do Oeste	3,38	582	173,18	0,10	37.235	6,6	96.026	54,78	1.753
2	Alcoolvale	2,31	398	129,77	0,08	23.956	0,0	63.979	53,44	1.197
3	Santa Adélia - Pereira Barreto	6,82	1.174	66,42	0,13	18.906	0,0	137.053	38,78	3.534
4	Pioneiros	2,48	427	40,48	0,09	7.688	0,0	50.651	39,41	1.285
5	Da Mata	6,20	1.068	19,06	0,12	5.222	0,0	112.629	35,05	3.213
6	Viralcool - Santa Amália	3,72	641	86,48	0,10	19.316	0,0	83.760	43,45	1.928
7	Raizen - Gasa	7,41	1.277	73,73	0,13	21.701	0,0	150.160	39,07	3.843
8	Caeté - Paulicéia	7,44	1.281	120,7	0,13	35.572	0,0	164.461	42,65	3.856
9	Pedra - Ipê	4,96	854	83,36	0,11	20.889	0,0	106.815	41,55	2.570
10	Raizen - Mundial	1,94	334	42,78	0,08	7.365	0,0	40.984	40,75	1.006
11	CBAA Brasilândia	4,25	733	177,95	0,11	41.944	8,3	115.920	52,56	2.206
12	Alta Paulista - Dracena	3,10	534	115,89	0,09	24.064	0,0	77.768	48,41	1.607
13	Alta Paulista	2,14	368	90,87	0,08	16.266	0,0	53.322	48,10	1.109
14	Glencane	3,04	523	83,98	0,09	17.298	0,0	69.927	44,41	1.574
15	Flórida	3,72	641	62,37	0,10	13.931	0,0	78.375	40,65	1.928
16	Raizen - Univalem	4,03	694	34,07	0,10	7.857	0,0	77.672	37,19	2.089
17	Branco Peres	1,98	342	56,09	0,08	9.743	0,0	44.113	42,90	1.028
18	Raízen - Benálcool	1,55	267	17,79	0,07	2.800	0,0	29.651	36,91	803
19	Alto Alegre - Floresta	2,17	374	97,89	0,08	17.624	0,0	55.216	49,10	1.125
20	Bioenergia	3,72	641	61,71	0,10	13.783	0,0	78.227	40,58	1.928
21	Parapuã	1,55	267	99,9	0,07	15.721	0,0	42.573	53,00	803
22	Unialco	2,36	406	51,84	0,08	9.645	0,0	50.460	41,33	1.221
23	Clealco - Matriz	2,79	480	69,37	0,09	13.810	0,0	62.143	42,98	1.446
24	Clealco - Pouso Alegre	3,10	534	106,46	0,09	22.106	0,0	75.809	47,19	1.607
25	Campestre	4,03	694	72,79	0,10	16.787	0,0	86.602	41,47	2.089
26	Cafealcool	1,60	275	130,24	0,07	20.755	0,0	48.466	58,46	829
27	Batatais - Lins	4,96	854	107,62	0,11	26.969	0,0	112.895	43,92	2.570
28	Renuka do Brasil - Madhu	9,92	1.708	91,23	0,15	30.166	0,0	202.018	39,30	5.141
29	Diana	1,55	267	86,77	0,07	13.655	0,0	40.506	50,43	803
30	Revati	5,89	1.014	46,3	0,12	12.428	0,0	114.465	37,50	3.052
31	Figueira - Alcoazul	4,03	694	3,62	0,10	835	0,0	70.650	33,83	2.089
32	Raizen - Destivale	2,58	445	13,93	0,09	2.690	0,0	47.479	35,44	1.340
33	Santa Isabel - Filial	1,86	320	108,64	0,08	18.390	0,0	50.612	52,51	964
34	Antônio Ruette - Monterey	3,41	587	94,67	0,10	20.422	0,0	79.496	44,98	1.767
35	Virgolino de Oliveira - José Bon	3,47	598	160,82	0,10	34.942	6,8	95.294	52,96	1.799
36	CEMMA	6,82	1.174	89,89	0,13	25.586	0,0	143.734	40,67	3.534
37	Aralco	1,55	267	24,07	0,07	3.788	0,0	30.640	38,14	803
38	COFCO - UNP	6,20	1.068	88,94	0,12	24.369	0,0	131.776	41,01	3.213
39	Guariroba	3,10	534	134,41	0,09	27.910	0,0	81.613	50,80	1.607
40	COFCO - Meridiano	6,82	1.174	92,14	0,13	26.226	0,0	144.374	40,85	3.534
41	Coruripe - Iturama	3,66	631	146,86	0,10	32.604	0,0	96.078	50,60	1.899
42	Central Energética	3,38	582	146,86	0,10	31.576	0,0	90.168	51,44	1.753
43	Ouroeste	3,10	534	122,98	0,09	25.536	0,0	79.240	49,32	1.607
44	Alcoeste	3,10	534	93,44	0,09	19.402	0,0	73.106	45,50	1.607
45	Figueira - Generalco	3,41	587	52,84	0,10	11.398	0,0	70.472	39,88	1.767

Cluster 6										
Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
1	Iberia	3,10	534	78,25	0,09	16.248	0	57.177	35,59	1.607
2	Quatá	5,27	907	80,69	0,12	20.717	0	90.296	33,06	2.731
3	Pyles	1,12	192	18,61	0,06	2.568	0	17.302	29,92	578
6	Atena	1,86	320	106,62	0,08	18.048	0	42.605	44,20	964
7	Raizen Paraguaçu	1,38	237	59,87	0,07	8.984	0	27.157	38,07	713
9	Cocal - Paraguaçu Paulista	3,72	641	79,53	0,10	17.763	0	66.878	34,69	1.928
11	Raizen Tarumã Maracaí	3,72	641	56,33	0,10	12.582	0	61.696	32,00	1.928
12	Água Bonita	2,17	374	44,95	0,08	8.093	0	36.743	32,67	1.125
13	Raizen - Tarumã	5,27	907	38,42	0,12	9.864	0	79.444	29,09	2.731
15	Americana	1,51	261	67,9	0,07	10.587	0	30.585	38,96	785
16	Clarion	2,32	399	120,79	0,08	22.333	0	52.955	44,06	1.202
17	Bandeirantes	3,31	571	37,42	0,10	7.980	0	51.725	30,12	1.717
19	Tirolli	2,17	374	5,00	0,08	900	0	29.551	26,28	1.125
22	Dacalda	1,89	326	40,69	0,08	6.937	0	31.934	32,55	981
23	Jacarezinho	2,13	367	29,56	0,08	5.282	0	33.405	30,26	1.104
25	Londra	2,54	438	127,12	0,09	24.382	0	57.943	43,98	1.317
26	Iracema	3,10	534	102,68	0,09	21.321	0	62.250	38,75	1.607
28	Comanche - Santa Anita	1,30	224	63,21	0,07	9.277	0	26.467	39,22	675
29	Santa Maria	0,25	43	62,82	0,03	4.750	0	8.024	62,43	129
31	Raizen - Ipaussu	3,82	659	52,39	0,10	11.833	0	62.340	31,45	1.982
34	Comanche - Canitar	1,86	320	37,2	0,08	6.297	0	30.854	32,01	964
36	TGM	1,61	278	92,22	0,07	14.742	0	36.025	43,12	835
37	São Luiz	2,79	480	23,87	0,09	4.752	0	41.588	28,76	1.446
40	Rio Pardo	3,10	534	95,22	0,09	19.772	0	60.701	37,78	1.607
42	JJ	2,42	416	74,46	0,09	13.999	0	45.923	36,65	1.253
43	Guaricanga	4,83	833	124,49	0,11	30.882	0	94.731	37,80	2.506

Cluster 7										
Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
1	Delta - Volta Grande	5,64	971	83,91	0,12	22.131	0	93.967	32,17	2.921
2	Guarani - Mandu	6,32	1.089	44,96	0,12	12.417	0	79.138	24,15	3.277
3	Colorado	10,85	1.868	44,96	0,15	15.409	0	129.883	23,10	5.623
4	Santo Ângelo	2,25	388	90,67	0,08	16.576	0	40.366	34,54	1.169
5	Coruripe - Campo Florido	5,07	874	139,07	0,11	35.166	0	88.692	33,73	2.629
6	Biosev - Bioenergia Continental	3,41	587	72,79	0,10	15.702	0	51.679	29,24	1.767
7	Itapagipe	2,82	485	135,45	0,09	27.075	0	56.811	38,89	1.461
8	Frutal	2,82	485	98,55	0,09	19.699	0	49.436	33,84	1.461
9	Moema	6,20	1.068	96,18	0,12	26.352	0	91.766	28,56	3.213
10	Colombo - Palestina	6,20	1.068	96,77	0,12	26.514	0	91.928	28,61	3.213
11	Vertente	4,96	854	57,56	0,11	14.424	0	66.755	25,97	2.570
12	Guarani - Tanabi	3,72	641	111,6	0,10	24.926	0	64.175	33,29	1.928
13	Onda Verde	3,84	662	117,57	0,10	26.606	0	67.163	33,71	1.992
14	São José	3,10	534	13,24	0,09	2.749	0	35.456	22,07	1.607
15	Guarani - Severínia	3,10	534	40,87	0,09	8.486	0	41.193	25,64	1.607
16	COFCO - Potirendaba	3,10	534	105,44	0,09	21.894	0	54.601	33,99	1.607
17	Itajobi	3,35	576	94,21	0,10	20.174	0	55.497	31,99	1.735
18	COFCO - Catanduva	6,20	1.068	74,32	0,12	20.363	0	85.777	26,70	3.213
19	São Domingos	3,10	534	75,81	0,09	15.742	0	48.448	30,16	1.607
20	Antônio Ruette - Cachoeira	3,10	534	48,69	0,09	10.110	0	42.817	26,65	1.607
21	Santa Isabel - Matriz	3,10	534	120,01	0,09	24.920	0	57.626	35,87	1.607
22	São José da Estiva	4,96	854	115,98	0,11	29.064	0	81.395	31,67	2.570
23	Virgolino de Oliveira - Catanduv	6,63	1.142	62,63	0,13	17.631	0	87.623	25,49	3.438
24	Colombo - Ariranha	5,08	875	66,51	0,11	16.832	0	70.472	26,75	2.635
25	Bertolo	1,86	320	60,71	0,08	10.276	0	29.901	31,02	964
26	Nardini	4,96	854	60,3	0,11	15.111	0	67.442	26,24	2.570
27	Raizen - Bonfim	7,52	1.295	78,07	0,13	23.108	0	102.455	26,29	3.898
28	Santa Adélia - Jaboticabal	4,34	747	69,07	0,11	16.408	0	62.198	27,65	2.249
29	São Martinho - Matriz	5,76	993	76,24	0,12	20.291	0	81.126	27,15	2.988
30	Pitangueiras	3,72	641	39,07	0,10	8.726	0	47.975	24,88	1.928
31	Delos	1,24	214	65,53	0,07	9.432	0	22.514	35,04	643
32	Andrade	8,06	1.388	33,43	0,14	10.173	0	95.211	22,79	4.177
33	Biosev Bioenergia - Santa Elisa	7,13	1.228	56,08	0,13	16.249	0	91.474	24,76	3.695
34	Viralcool - Santa Cecília	4,03	694	27,36	0,10	6.310	0	48.829	23,38	2.089
35	Toniello	2,17	374	53,84	0,08	9.693	0	32.588	28,98	1.125
36	Guarani - Cruz Alta	2,48	427	72,54	0,09	13.776	0	39.942	31,08	1.285
37	Santo Antônio	4,03	694	57,81	0,10	13.332	0	55.851	26,74	2.089
38	Bazan	6,63	1.142	44,17	0,13	12.434	0	82.427	23,97	3.438
39	Carolo	2,36	406	42,99	0,08	7.999	0	32.856	26,91	1.221
40	Pedra - Da Pedra	7,44	1.281	90,01	0,13	26.528	0	105.024	27,24	3.856
41	Biosev Bioenergia - Jardest	2,48	427	59,71	0,09	11.340	0	37.505	29,18	1.285
42	Usina Passos	1,69	291	179,48	0,07	29.246	3	47.187	53,84	876
43	Cevasa	3,41	587	83,02	0,10	17.909	0	53.886	30,49	1.767
44	Batatais- Matriz	6,20	1.068	76,11	0,12	20.853	0	86.267	26,85	3.213
45	Biosev Bioenergia MB	4,34	747	16,63	0,11	3.951	0	49.740	22,11	2.249
46	Alta Mogiana	6,82	1.174	57,08	0,13	16.247	0	88.202	24,96	3.534
47	Biosev Bioenergia - Vale do Ro	7,44	1.281	37,47	0,13	11.043	0	89.539	23,22	3.856
48	Pedra - Buriti	10,54	1.815	88,08	0,15	29.839	0	141.043	25,82	5.462
49	Planalto	1,69	291	238,07	0,07	38.793	3	56.734	64,74	876
50	Santa Juliana	6,76	1.165	189,71	0,13	53.822	13	125.588	35,83	3.506
51	Delta	3,38	582	98,2	0,10	21.114	0	56.798	32,40	1.753
52	Raizen - Junqueira	3,61	622	98,22	0,10	21.687	0	59.823	31,94	1.873
53	Guaíra	3,10	534	38,72	0,09	8.040	0	40.747	25,36	1.607

Cluster 8										
Trecho	Destilaria	CO_2 projeto (kg CO2/s)	Emissão Total captura (tCO2e)	Comprimento duto (km)	Diâmetro (m)	Emissão dutos (tCO2e)	Emissão compressor (tCO2e/ano)	Emissão total 30 anos (tCO2)	Emissão (tCO2e/1.000 tCO2 armaz)	CO2 Fermentação 30 anos (1000 tCO2)
1	São Martinho - Santa Cruz	6,82	1.174	50,08	0,13	14.255	0	85.839	24,29	3.534
2	Maringá	3,04	523	47,89	0,09	9.864	0	41.752	26,52	1.574
3	Raizen - Araraquara	3,10	534	37,32	0,09	7.749	0	40.288	25,08	1.607
4	Citrosuco	0,25	43	80,01	0,03	6.049	0	8.652	67,32	129
5	Malosso	1,92	331	103,51	0,08	17.753	0	37.926	38,08	996
6	Santa Fé	4,96	854	75,19	0,11	18.842	0	70.904	27,58	2.570
7	Iacanga	3,37	581	112,12	0,10	24.080	0	59.482	34,03	1.748
8	Della Coletta	2,54	438	71,40	0,09	13.694	0	40.376	30,65	1.317
9	Tonon - Cândida GL	3,72	641	46,32	0,10	10.346	0	49.392	25,62	1.928
10	Grizzo	2,05	352	44,83	0,08	7.883	0	29.359	27,69	1.060
11	Vista Alegre	2,17	374	180,42	0,08	32.482	4	55.387	49,25	1.125
12	Santa Rosa	1,12	192	171,04	0,06	23.602	2	35.381	61,17	578
13	J. Pilon - Santa Maria	2,42	416	151,38	0,09	28.460	5	53.982	43,08	1.253
14	Raizen - Rafard	2,60	448	156,81	0,09	30.367	5	57.853	42,87	1.350
15	Zambianco - Pederneiras	1,12	192	132,74	0,06	18.317	0	30.030	51,92	578
16	Raizen - Santa Helena	1,98	342	150,92	0,08	26.214	4	47.156	45,86	1.028
17	Granelli	0,25	43	137,53	0,03	10.398	0	13.001	101,16	129
18	São Manoel	7,44	1.281	79,76	0,13	23.507	0	101.599	26,35	3.856
19	Barra Grande	6,82	1.174	86,04	0,13	24.490	0	96.075	27,18	3.534
20	ZL - São José	6,82	1.174	80,33	0,13	22.865	0	94.449	26,72	3.534
21	Raizen - Diamante	1,34	232	65,62	0,07	9.758	0	23.880	34,25	697
22	Raizen - Barra	7,49	1.290	57,57	0,13	17.012	0	95.625	24,64	3.881
23	Raizen - Dois Córregos	1,13	195	37,19	0,06	5.166	0	17.075	29,04	588
24	Tonon - Paraíso	4,21	726	9,80	0,11	2.301	0	46.553	21,31	2.185
25	Raízen - Bom Retiro	1,65	285	149,48	0,07	24.150	0	41.526	48,40	858
26	Furlan - Matriz	1,55	267	135,55	0,07	21.331	0	37.600	46,81	803
27	Raizen - Costa Pinto	4,91	845	130,66	0,11	32.611	0	84.152	33,07	2.545
28	São Martinho - Iracema	2,79	480	134,50	0,09	26.776	0	56.060	38,77	1.446
29	Ester	2,79	480	124,97	0,09	24.879	0	54.163	37,46	1.446
30	USJ	6,20	1.068	92,18	0,12	25.256	0	90.333	28,11	3.213
31	Santa Lúcia	1,92	331	86,13	0,08	14.772	0	34.946	35,08	996
32	Virgolino de Oliveira - Itapira	2,73	470	159,65	0,09	31.498	5	60.292	42,65	1.414
33	Biosev - Leme	2,23	384	88,07	0,08	16.036	0	39.463	34,12	1.157
34	Baldin	1,12	192	51,01	0,06	7.039	0	18.753	32,42	578
35	Alvorada do Bebedouro	1,27	219	168,56	0,07	24.524	2	37.971	57,51	660
36	Ipiranga - Mococa	1,49	256	139,52	0,07	21.600	0	37.218	48,26	771
37	Monte Alegre	1,13	194	206,54	0,06	28.616	2	40.516	69,35	584
38	Ferrari	2,29	395	82,85	0,08	15.251	0	39.330	33,08	1.189
39	Abengoa - São João	3,72	641	119,73	0,10	26.742	0	65.788	34,12	1.928
40	Abengoa - São Luiz	1,24	214	66,87	0,07	9.624	0	22.640	35,23	643
41	São Simão	2,59	446	96,04	0,09	18.565	0	45.772	34,07	1.343
42	Moreno	7,44	1.281	108,12	0,13	31.865	0	109.957	28,52	3.856
43	Raizen - Serra	1,55	267	19,75	0,07	3.108	0	19.377	24,12	803
44	Santa Rita	3,72	641	70,63	0,10	15.776	0	54.822	28,44	1.928
45	Ipiranga - Descalvado	2,48	427	53,01	0,09	10.067	0	36.098	28,09	1.285