



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Química

MATEUS GUIMARÃES DA SILVA

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO METANOL PRODUZIDO PELA
COGASEIFICAÇÃO DO CARVÃO MINERAL E BIOMASSA RESIDUAL DO ARROZ

CAMPINAS/SP

2018

MATEUS GUIMARÃES DA SILVA

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO METANOL PRODUZIDO PELA
COGASEIFICAÇÃO DO CARVÃO MINERAL E BIOMASSA RESIDUAL DO ARROZ

*Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
Química da Universidade Estadual de Campinas
como parte dos requisitos exigidos para a
obtenção do título de Doutor em Engenharia
Química.*

Orientador: PROF. DR. ANTONIO CARLOS LUZ LISBÔA

Coorientador: PROF. DR. RONALDO HOFFMANN

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO
MATEUS GUIMARÃES DA SILVA E ORIENTADO
PELO PROF. DR. ANTONIO CARLOS LUZ
LISBÔA.

CAMPINAS/SP

2018

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CAPES, 1312961

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

Si38a Silva, Mateus Guimarães da, 1988-
Avaliação do ciclo de vida do metanol produzido pela cogaseificação do carvão mineral e biomassa residual do arroz / Mateus Guimarães da Silva. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Antonio Carlos Luz Lisbôa.

Coorientador: Ronaldo Hoffmann.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Aquecimento global. 2. Metanol. 3. Carvão mineral. 4. Biomassa - Gaseificação. 5. Arroz. I. Lisbôa, Antonio Carlos Luz, 1954-. II. Hoffmann, Ronaldo. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Titulo em outro idioma: Life cycle assessment of the methanol produced by co-gasification of coal and residual biomass of rice

Palavras-chave em inglês:

Global warming

Methanol

Mineral coal

Biomass - Gasification

Rice

Área de concentração: Engenharia Química

Titulação: Doutor em Engenharia Química

Banca examinadora:

Antonio Carlos Luz Lisbôa [Orientador]

Adriano Luiz Tonetti

Ana Rosa Costa Muniz

Gustavo Paim Valença

Pedro Juarez Melo

Data de defesa: 10-08-2018

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

FOLHA DE APROVAÇÃO

Tese de doutorado defendida por Mateus Guimarães da Silva e aprovada pela banca examinadora constituída pelos membros:

Prof. Dr. Antonio Carlos Luz Lisbôa
FEQ/UNICAMP

Prof. Dr. Adriano Luiz Tonetti
FEC/UNICAMP

Prof.^a Dr.^a Ana Rosa Costa Muniz
UNIPAMPA

Prof. Dr. Gustavo Paim Valença
FEQ/UNICAMP

Prof. Dr. Pedro Juarez Melo
UFRGS

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Aos meus pais, Diva e João (in memoriam),
sinônimos de coragem, perseverança e amor
incondicional.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A minha esposa Juliene Marques Guimarães. Você chegou em 2008 e me acompanhou durante toda a minha vida acadêmica; obrigado por todo o incentivo para o desenvolvimento desta tese. Eu te amo.

Aos meus pais Diva e João (in memoriam) por serem os meus modelos de força, coragem e perseverança; obrigado pela compreensão, incentivo, amor e apoio durante todos os momentos da minha vida.

A minha família e a família da minha esposa que sempre me apoiaram e acreditaram no meu trabalho.

Ao orientador Professor Antonio Carlos Luz Lisbôa pela oportunidade, pela confiança, apoio e orientação ao longo deste doutorado.

Ao coorientador Professor Ronaldo Hoffmann pela confiança e orientação durante o desenvolvimento da tese.

Ao Professor Marcilio Machado Moraes pelos ensinamentos profissionais, pela confiança depositada e, principalmente, pelo incentivo em iniciar a pós-graduação na UNICAMP.

Ao pessoal que convivi nesses anos de UNICAMP, em especial ao Wilson, Carlos, Manuel, Rodrigo, Alan, Rhelvis, Jean, Kelly, Juliana, Wesley e Sidi. Ao pessoal da moradia estudantil André, Alexandre e Thiago. Obrigado pelo apoio, carinho e as experiências vividas com vocês.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UNICAMP pela oportunidade para o desenvolvimento desta tese.

Ao pessoal da Companhia Riograndense de Mineração pelo apoio.

À CAPES pelo suporte financeiro concedido por meio da bolsa de doutorado.

“A mente que se abre a uma nova ideia,
jamais voltará ao seu tamanho original.”

Oliver Wendell Holmes

RESUMO

A demanda de metanol vem aumentando no Brasil principalmente para produção de biodiesel, em virtude do sancionamento da Lei Federal nº 13263/2016 que estabelece o aumento do percentual de biodiesel adicionado ao diesel, o qual deverá alcançar 10 % em 2019. O problema é que todo metanol utilizado atualmente é importado porque as empresas nacionais suspenderam a sua produção em razão do seu baixo preço no mercado internacional e pelo alto custo do gás natural. Uma alternativa para reduzir essa dependência externa é utilizar uma rota tecnológica que desvincule o gás natural da cadeia do metanol, como também utilize matérias-primas que estejam disponíveis em grandes volumes no território nacional a preços relativamente baixos e estáveis. A tecnologia da cogaseificação do carvão mineral e biomassa residual do arroz é uma alternativa importante, que atende a esses requisitos para a produção e, ainda, possui a vantagem de utilizar um recurso renovável. Ao considerar o aproveitamento da biomassa residual, é possível obter pelo menos dois benefícios relacionados ao aquecimento global. O seu aproveitamento evita as emissões de CH₄ procedentes da sua decomposição no solo, caso seja dado esse destino. O segundo benefício ocorre na etapa da produção do metanol, ao substituir o carvão pela biomassa, pois o CO₂ emitido pelo processamento da biomassa foi previamente absorvido no crescimento da planta. No entanto, as operações logísticas necessárias para disponibilizar a biomassa até à planta de metanol emitem gases de efeito estufa (GEE) em quantidades suficientes ao ponto de colocar em dúvida o quão benéfica é esta alternativa tecnológica. Ainda não se sabe o potencial mitigador das emissões dos GEE desta tecnologia para o cenário brasileiro. Então, nesta tese desenvolveu-se uma análise do impacto do aquecimento global do ciclo de vida do metanol produzido a partir da gaseificação do carvão mineral e da cogaseificação do carvão mineral e biomassas residuais do arroz sob condições reais de produção dessas matérias primas e de logística no sul do estado do Rio Grande do Sul. Para tal, todas as emissões envolvidas desde a mineração do carvão e coleta das biomassas até a produção de metanol foram contabilizadas para compor o balanço dos GEE no ciclo do metanol. Essa investigação foi executada com base na metodologia de avaliação de ciclo de vida, utilizando dados coletados *in situ*, dados secundários e obtidos por meio da simulação no Aspen Plus. Os resultados mostraram que o sistema alimentado com 70 % de carvão e 30 % de palha de arroz alcançou a maior redução das emissões dos GEE, igual a 23,25 %, comparado com os 20,38 % alcançados pelo cenário com casca de arroz, na mesma proporção de alimentação. Em ambos os sistemas, a etapa da produção do metanol foi responsável pela maior emissão, o que está relacionado aos processos de gaseificação e condicionamento. Tendo em

vista os resultados, conclui-se que o metanol produzido a partir da cogaseificação do carvão mineral e biomassa é mais vantajoso ambientalmente.

Palavras-chave: emissões evitadas; decomposição anaeróbica; ciclo neutro de carbono, aquecimento global.

ABSTRACT

Demand for methanol has been increasing in Brazil mainly for biodiesel production, due to the enactment of Federal Law 13263/2016 which establishes an increase in the percentage of biodiesel added to diesel oil, which should reach 10% in 2019. The problem is that all methanol used currently is imported because the national companies suspend their production due to their low price in the international market and the high cost of natural gas. One of the possibilities to reduce this external dependence is the use of a technology, which uses raw materials that are available in large volumes in the national territory at relatively low and stable prices. The co-gasification technology of coal and rice residual biomass is an important alternative, that meets these requirements for production of methanol and also has the advantage of using a renewable resource, especially in this moment in which there is a greater concern with the global warming. When considering the use of residual biomass, it is possible to obtain at least two benefits related to global warming. The use of biomass prevents CH₄ emissions from their decomposition in the soil. The second benefit occurs in the methanol production stage, when part of the coal is replaced by biomass, because the CO₂ emitted by the biomass processing was previously (or will be) absorbed in the plant growth through photosynthesis. However, greenhouse gas emissions (GHG) mitigation potential of this technology for the Brazilian scenario is not yet known. In this thesis, an analysis of the impact of global warming on the life cycle of methanol produced from gasification of coal and co-gasification of coal and rice residual biomass under real conditions of production of these raw materials and logistics in the south of the state of Rio Grande do Sul. Considering the above, in order to attest the net environmental benefit, all the direct and indirect emissions involved from coal mining and biomass collection to methanol production were accounted for to compose the GHG balance in the methanol cycle. This investigation was performed based on the life cycle assessment methodology, using data collected in situ, secondary data and obtained through simulation in Aspen Plus. Results showed that the system fed with 70% of coal and 30% of rice straw achieved the greatest reduction in GHG emissions, equal to 23.25%, compared to the 20.38% achieved by the rice husk scenario, in the same proportion of feed. In both systems, the corresponding stage of methanol production was responsible for the largest portion of emission in the cycle, which is related to the gasification and conditioning processes. In view of the results, it is concluded that the methanol produced from the cogaseification of coal and biomass is more environmentally advantageous.

Keywords: avoided emissions; anaerobic decomposition; carbon neutral cycle, global warming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais processos da carbonificação	30
Figura 2 – Reservas mundiais de cada tipo de carvão mineral e suas principais aplicações ...	31
Figura 3 – Localização das principais jazidas de carvão nos estados do RS e SC	33
Figura 4 – Esquema geral dos processos e componentes da gaseificação.....	41
Figura 5 – Esquema do processo da pirólise	42
Figura 6 – Maiores produtores mundiais de metanol	50
Figura 7 – Demanda global de metanol por segmento	51
Figura 8 – Demanda brasileira de metanol por segmento	52
Figura 9 – Fluxograma simplificado da produção do metanol.....	55
Figura 10 – Fluxograma simplificado da ACV	56
Figura 11 – Elementos da fase de avaliação do impacto do ciclo de vida	60
Figura 12 – Relação entre as categorias de impacto e o inventário do ciclo de vida	63
Figura 13 – Fonte dos dados do inventário do ciclo de vida	70
Figura 14 – Localização da mina de Candiota e unidades de produção dos insumos consideradas no ciclo do carvão mineral.....	75
Figura 15 – Etapas da mineração superficial e processamento do carvão.....	77
Figura 16 – Fluxograma dos insumos e emissões na mineração do carvão	81
Figura 17 – Fronteiras do sistema da produção do carvão mineral	82
Figura 18 – Etapas da rota da palha de arroz.....	90
Figura 19 – Fronteiras do ciclo de vida da palha de arroz.....	95
Figura 20 – Fronteiras do ciclo de vida da casca de arroz.....	103
Figura 21 – Fronteiras do sistema da produção convencional de metanol-carvão.....	110
Figura 22 – Diagrama de fluxo do modelo de gaseificação no Aspen Plus	114
Figura 23 – Diagrama de fluxos dos processos de limpeza do gás de síntese no Aspen Plus	117
Figura 24 – Diagrama de fluxos da etapa de condicionamento do gás de síntese no Aspen Plus	120
Figura 25 – Diagrama de fluxos da etapa de remoção de CO ₂ do gás de síntese no Aspen Plus	122
Figura 26 – Diagrama de fluxos do processo de síntese do metano no Aspen Plus.....	122
Figura 27 – Diagrama de fluxo dos processos de separação do metanol no Aspen Plus	124
Figura 28 – Comparação do impacto do aquecimento global pela mineração do carvão	130
Figura 29 – Distribuição das emissões estimadas dos GEE no ciclo de vida do carvão mineral	130

Figura 30 – Distribuição das emissões dos GEE no ciclo de vida do carvão – total (a), emissões indiretas (b) e emissões diretas (c)	131
Figura 31 – Relação do consumo de energia e emissões no ciclo de vida do carvão.....	132
Figura 32 – Análise de sensibilidade das emissões diretas	133
Figura 33 – Análise de sensibilidade das emissões indiretas	134
Figura 34 – Distribuição das emissões estimadas dos GEE no ciclo de vida da palha	135
Figura 35 – Distribuição das emissões estimadas dos GEE no ciclo de vida da palha - total (a), emissões indiretas (b) e emissões diretas (c).....	136
Figura 36 – Distribuição das emissões dos GEE no ciclo de vida da casca de arroz	138
Figura 37 – Emissões estimadas dos GEE na logística da palha de arroz.....	138
Figura 38 – Emissões dos GEE na logística da casca de arroz	139
Figura 39 – Comparação do rendimento do metanol obtido no cenário A com outros estudos	140
Figura 40 – Comparação das emissões do ciclo de vida do metanol obtido no cenário A com outros estudos	146
Figura 41 – Emissões dos GEE no ciclo de vida do metanol obtidos nos cenários avaliados	149
Figura 42 – Variação das emissões líquidas no ciclo de vida do metanol em função da proporção da palha alimentada na cogaseificação	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais reservas de carvão no mundo.....	32
Tabela 2 – Uso da casca de arroz no estado do Rio Grande do Sul	39
Tabela 3 – Processos físico-químicos da gaseificação	41
Tabela 4 – Consumo de metanol (m ³) na produção de biodiesel por região e estados brasileiros	53
Tabela 5 – Tipo de estudo da ACV	58
Tabela 6 – Principais fatores de categorias de impacto intermediários e substâncias de referência	65
Tabela 7 – Caracterização físico-química do carvão mineral.....	78
Tabela 8 – Consumo ¹ de óleo diesel e eletricidade por equipamento de mineração para produção de 1 kg de carvão bruto.....	83
Tabela 9 – Insumos consumidos ¹ na mineração para produção de 1 kg de carvão bruto	83
Tabela 10 – Fatores de emissão dos equipamentos a óleo diesel	84
Tabela 11 – Fatores de emissão de CO ₂ da detonação de explosivos	84
Tabela 12 – Fatores de emissão de metano na mineração a céu aberto.....	86
Tabela 13 – Fatores de emissão de CO ₂ e N ₂ O na aplicação de insumos agrícolas	87
Tabela 14 – Fator de emissão do CO _{2eq} na produção dos insumos	88
Tabela 15 – Distância para o transporte dos insumos	88
Tabela 16 – Fatores de emissão para transporte rodoviário	89
Tabela 17 – Caracterização físico-química da palha de arroz	91
Tabela 18 – Análise elementar da palha de arroz	91
Tabela 19 – Composição química da cinza da palha de arroz.....	92
Tabela 20 – Geração de palha nos municípios compreendidos na área de estudo	96
Tabela 21 – Produção da palha em relação ao arroz colhido	97
Tabela 22 – Consumo de óleo diesel e eletricidade por etapa do ciclo de vida da palha	98
Tabela 23 – Insumos consumidos no ciclo de vida da palha.....	99
Tabela 24 – Distância para o transporte do insumo partindo de Rio Grande	100
Tabela 25 – Parâmetros do modelo de emissões evitadas de CH ₄ para a palha de arroz	101
Tabela 26 – Casca de arroz excedente por unidade de beneficiamento	104
Tabela 27 – Proporção dos elementos gerados no processamento do arroz com casca	106
Tabela 28 – Consumo de óleo diesel e eletricidade por etapa do ciclo da casca.....	106
Tabela 29 – Insumos consumidos no ciclo de vida da casca de arroz.....	107
Tabela 30 – Distância para o transporte do insumo.....	108

Tabela 31 – Parâmetros do modelo de emissões evitadas de CH ₄ para a casca de arroz	109
Tabela 32 – Caracterização físico-química das matérias primas.....	112
Tabela 33 – Parâmetros de entrada para simulação da gaseificação	114
Tabela 34 – Descrição dos blocos de operações para gaseificação do carvão e cogaseificação do carvão e biomassas	115
Tabela 35 – Descrição dos blocos de operações da limpeza do gás de síntese para remoção das partículas e dos gases ácidos	118
Tabela 36 – Descrição dos blocos de operações de condicionamento do gás de síntese	119
Tabela 37 – Descrição dos blocos de operações de remoção CO ₂ do gás de síntese	121
Tabela 38 – Descrição dos blocos das operações de síntese do metanol	123
Tabela 39 – Descrição dos blocos das operações de separação do metanol.....	125
Tabela 40 – Fatores de emissão da combustão do carvão	126
Tabela 41 – Emissões ¹ estimadas dos GEE do ciclo de vida do carvão mineral	129
Tabela 42 – Emissões estimadas dos GEE no ciclo de vida da palha de arroz	134
Tabela 43 – Emissões dos GEE no ciclo de vida da casca de arroz	137
Tabela 44 – Metanol produzido nos cenários simulados no Aspen Plus	141
Tabela 45 – Geração dos GEE nos processos simulados – Cenário A.....	141
Tabela 46– Geração dos GEE nos processos simulados – Cenário B	142
Tabela 47 – Geração dos GEE nos processos simulados – Cenário C	143
Tabela 48 – Balanço das emissões dos GEE nos cenários simulados	143
Tabela 49 – Emissões dos GEE estimados no ciclo de vida da produção do metanol.....	144
Tabela 50 – Emissões totais dos GEE no ciclo de vida do metanol - cenário A.....	146
Tabela 51 – Emissões totais dos GEE no ciclo de vida do metanol - cenário B	147
Tabela 52 – Emissões totais dos GEE no ciclo de vida do metanol - cenário C	148
Tabela A.1 – Fator de oxidação.....	171
Tabela A.2 – Fator de correção de metano	172
Tabela A.3 – Fator de carbônico orgânico degradável	173
Tabela A.4 – Taxa de decaimento da decomposição do resíduo orgânico.....	174
Tabela A.5 – Perfuratrizes e consumo de óleo diesel (l)	175
Tabela A.6 – Trator esteira e consumo de óleo diesel (l)	176
Tabela A.7 – Escavadeira hidráulica e consumo de óleo diesel (l)	177
Tabela A.8 – Caminhão (30t) e consumo de óleo diesel (l)	178
Tabela A.9 – Caminhão-fora-de-estrada (65t) e consumo de óleo diesel (l).....	179
Tabela A.10 – Pás carregadeiras e consumo de óleo diesel (l).....	180

Tabela A.11 – Trator, moto bomba e consumo de óleo diesel (l)	181
Tabela A.12 – Equipamentos elétricos e consumo de energia (kWh).....	182
Tabela A.13 – Produção do carvão mineral no ano de 2015 e 2016	183
Tabela A.14 – Equipamentos utilizados na etapa de coleta da palha	184
Tabela A.15 – Principais equipamentos da etapa de processamento da palha de arroz	185
Tabela A.16 – Consumo de óleo diesel estimado e número de viagens para o transporte da palha por cidade	186
Tabela A.17 – Consumo de óleo diesel estimado e número de viagens para o transporte da casca por cidade	186
Tabela A.18 – Consumo do óleo diesel estimado no transporte do insumo (óleo diesel) da refinaria até a cidade de recolhimento da palha	187
Tabela A.19 – Consumo do óleo diesel estimado no transporte do insumo (óleo diesel) da refinaria até a cidade da beneficiadora de arroz	188
Tabela A.20 – Consumo do óleo diesel estimado no transporte da cinza da planta de metanol até a mina de carvão	189
Tabela A.21 – Definição dos parâmetros para a decomposição do carvão mineral em seus constituintes principais no Aspen Plus	190
Tabela A.22 – Definição dos parâmetros para a decomposição das biomassas em seus constituintes principais no Aspen Plus	191

NOMENCLATURA

SIGLAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ANP	Agência Nacional do Petróleo
COPENOR	Companhia Petroquímica do Nordeste
CRM	Companhia Riograndense de Mineração
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
GEE	Gases de efeito estufa
ICI	Imperial Chemical Industries
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRGA	Instituto Rio Grandense do Arroz
ISO	International Organization for Standardization
MP	Material particulado
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
SOSBAI	Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change

SÍMBOLOS

$BE_{CH_4,y}$	Emissões de metano evitadas da decomposição da biomassa
$Carga$	Carga transportada
C_c	Consumo específico pelo caminhão
C_d	Quantidade de calcário dolomítico aplicado no solo
C_{ij}	Fator de caracterização da categoria de impacto i para a substância j
C_{ip}	Fator de danos da categoria i em relação a categoria de dano p
C_v	Consumo de combustível por viagem
d	Distância do local de carregamento até a planta de metanol
DOC_f	Fração do carbono orgânico degradável que se decompõe em condições anaeróbica
DOC_j	Fração de carbono orgânico degradável da biomassa

D_p	Indicador de dano p
E	Emissão dos gases de efeito estufa
E_f	Emissão total da produção do metanol no cenário f
EF_i	Fator de emissão
ES_{if}	Emissão da biomassa i no cenário f
F	Fração volumétrica de metano no gás gerado na decomposição
$fuel_i$	Tipo de combustível consumido
GWP	Potencial de aquecimento global
$I_{CO_2/C}$	Indicador de emissão dos GEE da produção de metanol do cenário A
I_i	Indicador da categoria de impacto ambiental i
I_i'	Valor de referência para o indicador da categoria do impacto ambiental i
k_j	Taxa de decaimento da biomassa
MCF	Fator de correção do metano para decomposição aeróbica
m_j	Intervenção ambiental da substância j
N_i	Indicador normalizado da categoria de impacto ambientais i
N_{FERT}	Quantidade de nitrogênio aplicado como fertilizante nitrogenado
OX	Fator de oxidação do metano no local em que está disposto
P	Índice de impacto ambiental
P_c	Peso do caminhão vazio
Q	Produção de carvão mineral
Q_{ar}	Vazão de ar atmosférico
Q_C	Vazão do carvão no cenário f
Q_{mc}	Vazão de material carbonáceo
Q_{vapor}	Vazão de vapor
RE	Razão de equivalência
VB	Parâmetro vapor-biomassa
$W_{j,x}$	Quantidade da biomassa
y	Período de emissões de metano da decomposição da biomassa
φ	Fator de correção

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	23
1.1 Objetivo geral	26
1.2 Objetivos específicos	26
1.3 Justificativa.....	27
1.4 Organização da tese	29
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
2.1 Carvão mineral	30
2.1.1 Reservas de carvão mineral	32
2.1.2 Carvão no cenário energético	34
2.2 Biomassa.....	34
2.2.1 Palha de arroz	35
2.2.1.1 Coleta da palha de arroz	36
2.2.1.2 Alternativas para aproveitamento da palha	38
2.2.2 Casca de arroz.....	38
2.2.2.1 Alternativas para aproveitamento da casca	39
2.3 Gaseificação.....	40
2.3.1 Processos físico-químicos	41
2.3.2 Principais parâmetros de processo.....	44
2.3.2.1 Relação vapor-material carbonáceo.....	44
2.3.2.2 Razão de equivalência	44
2.3.2.3 Temperatura de operação.....	45
2.3.3 Gás de síntese	45
2.3.3.1 Limpeza do gás de síntese	46
2.3.3.2 Condicionamento do gás de síntese.....	47
2.4 Cogaseificação.....	47
2.5 Metanol.....	49

2.5.1	Produção de metanol no Brasil.....	51
2.5.2	Síntese do metanol.....	54
2.6	Avaliação do ciclo de vida.....	55
2.6.1	Metodologia de avaliação do ciclo de vida	55
2.6.2	Definição do objetivo e do escopo	56
2.6.3	Inventário do ciclo de vida	59
2.6.4	Avaliação dos impactos	59
2.6.5	Interpretação do ciclo de vida.....	62
2.7	Categorias de impacto e fatores de caracterização	62
2.7.1	Classificação dos dados do inventário do ciclo de vida	62
2.7.2	Categoria de impacto.....	63
2.7.3	Caracterizações de impactos intermediários (midpoint)	64
2.7.4	Caracterização de danos (<i>Endpoint</i>).....	66
2.8	Estudos de avaliação do ciclo de vida	66
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA GERAL		69
3.1	Dados de entrada e condições de contorno.....	70
3.2	Mitigação das emissões	72
3.3	Software Aspen Plus.....	73
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE GERAL DOS PROCESSOS		75
4.1	Ciclo de vida do carvão mineral	75
4.1.1	Descrição dos processos de mineração.....	76
4.1.1.1	Caracterização físico-química	78
4.1.1.2	Remoção da camada superficial	79
4.1.1.3	Decapeamento	79
4.1.1.4	Extração do carvão	79
4.1.1.5	Transporte do carvão bruto.....	80
4.1.1.6	Cominuição e transporte do carvão	80

4.1.1.7 Recuperação da área minerada	80
4.1.2 Escopo do estudo	81
4.1.3 Inventário do ciclo de vida do carvão.....	82
4.1.3.1 Emissões do consumo de diesel nos processos de mineração.....	84
4.1.3.2 Emissões da detonação dos explosivos	84
4.1.3.3 Emissões relativas ao consumo de energia elétrica.....	85
4.1.3.4 Emissões fugitivas	85
4.1.3.5 Emissões oriundas da aplicação dos insumos agrícolas	86
4.1.3.6 Emissões relativas a produção dos insumos.....	87
4.1.3.7 Emissões do transporte dos insumos	88
4.2 Ciclo de vida da palha de arroz	89
4.2.1 Descrição dos processos da rota da palha do arroz	89
4.2.1.1 Caracterização físico-química	91
4.2.1.2 Segamento	92
4.2.1.3 Enleiramento.....	93
4.2.1.4 Adensamento	93
4.2.1.5 Translado dos fardos.....	93
4.2.1.6 Carregamento e transporte dos fardos	93
4.2.1.7 Armazenamento da palha de arroz	94
4.2.1.8 Processamento da palha de arroz.....	94
4.2.2 Escopo do estudo	95
4.2.3 Inventário do ciclo de vida da palha.....	95
4.2.3.1 Emissões do consumo de diesel nos implementos agrícolas.....	99
4.2.3.2 Emissões do transporte da palha de arroz.....	99
4.2.3.3 Emissões do consumo de eletricidade	99
4.2.3.4 Emissões relativas a produção de óleo diesel.....	99
4.2.3.5 Emissões do transporte do insumo (óleo diesel)	99

4.2.3.6 Emissões evitadas da decomposição da palha.....	100
4.3 Ciclo de vida da casca do arroz	101
4.3.1 Descrição dos processos da rota da casca do arroz	101
4.3.1.1 Transporte da casca	102
4.3.1.2 Armazenamento e processamento da casca de arroz.....	102
4.3.2 Escopo do estudo	103
4.3.3 Inventário do ciclo de vida da casca de arroz.....	103
4.3.3.1 Emissões do transporte da casca de arroz.....	107
4.3.3.2 Emissões relativas a produção de óleo diesel.....	107
4.3.3.3 Emissões do transporte do insumo (óleo diesel)	107
4.3.3.4 Emissões do consumo de eletricidade	108
4.3.3.5 Emissões evitadas da decomposição da casca de arroz.....	108
4.4 Ciclo de vida da produção de metanol.....	109
4.4.1 Escopo do estudo	109
4.4.2 Descrição dos processos simulados	110
4.4.2.1 Preparação da matéria prima	112
4.4.2.2 Separação do oxigênio.....	113
4.4.2.3 Gaseificação.....	113
4.4.2.4 Limpeza do gás de síntese	116
4.4.2.5 Condicionamento do gás	119
4.4.2.6 Remoção do CO ₂	120
4.4.2.7 Síntese do metanol.....	122
4.4.2.8 Separação do metanol.....	123
4.4.2.9 Caldeira e equipamentos elétricos	126
4.4.2.10 Transporte dos resíduos sólidos.....	126
4.4.2.11 Emissões pela combustão do carvão mineral-vapor.....	126
4.4.2.12 Emissões pelo transporte dos resíduos sólidos	127

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	128
5.1 Avaliação do impacto do carvão mineral	128
5.2 Avaliação do impacto da palha de arroz.....	134
5.3 Avaliação do impacto da casca de arroz.....	137
5.4 Emissões na logística das biomassas	138
5.5 Avaliação do impacto da produção de metanol.....	140
5.5.1 Resultados da simulação dos cenários.....	140
5.5.2 Inventário das emissões do ciclo de produção do metanol.....	144
5.6 Avaliação do impacto da cadeia carvão/biomassa – metanol.....	145
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES	151
6.1 Sugestões para os próximos trabalhos	152
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153
APÊNDICE A – PARÂMETROS DO MODELO DE EMISSÕES EVITADAS DA DECOMPOSIÇÃO DA BIOMASSA	171
APÊNDICE B – MINERAÇÃO DO CARVÃO E CONSUMO ENERGÉTICO	175
APÊNDICE C – EQUIPAMENTOS DA ROTA DA PALHA DE ARROZ.....	184
APÊNDICE D – CONSUMO DE ÓLEO DIESEL NAS OPERAÇÕES DE TRANSPORTE LIGADAS AS BIOMASSAS.....	186
APÊNDICE E – CÓDIGOS DE CÁLCULO DESENVOLVIDOS EM FORTRAN.....	190
ANEXO A – PRODUÇÃO DE ARROZ POR UNIDADE DE BENEFICIAMENTO	192

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A produção nacional de metanol há muitos anos vem sendo insuficiente para abastecer o mercado interno; poucas empresas apostam neste segmento em razão dos altos investimentos necessários e principalmente pela restrição da oferta e instabilidade dos preços do gás natural, principal matéria-prima utilizada no Brasil. Em agosto de 2016, a última unidade nacional de produção de metanol, pertencente a Copenor (Companhia Petroquímica do Nordeste), localizada em Camaçari-Bahia, interrompeu suas operações por tempo indeterminado em razão da diminuição do seu preço no mercado internacional, sem a equivalente redução do preço do gás natural no Brasil (COPENOR, 2017). A exploração do gás de xisto, impulsionada nos Estados Unidos, provocou uma redução do custo do gás natural e tornou a produção de metanol altamente competitiva, inviabilizando a sua produção no Brasil por meio desta matéria-prima. O resultado de tudo isso é que atualmente o país importa todo o metanol necessário para atender a demanda do mercado interno, em que somente para a produção de biodiesel é destinado aproximadamente 32% do metanol importado, reagente importante para o processo de transesterificação dos óleos vegetais e gorduras animais (ANP, 2015, 2016).

Com o sancionamento da lei federal nº 13263/2016, que trata sobre os percentuais de adição de biodiesel ao óleo diesel, a demanda de metanol no país aumentará significativamente nos próximos anos (BRASIL, 2016b). Em março de 2017 houve um aumento de 7% para 8%, o que exigiu a produção de 4,2 bilhões de litros de biodiesel e o consumo de aproximadamente 462 milhões de litros de metanol. Segundo essa lei, o percentual deverá alcançar 9% em 2018 e 10% em 2019. Ainda, há um planejamento do governo para que no ano de 2020 chegue a 15% (BRASIL, 2017). É notório a importância do Programa Nacional de Produção do Biodiesel para o desenvolvimento econômico, sustentável e da agricultura familiar; contudo, o país não pode criar grandes ambições para o futuro comércio de biocombustíveis, uma vez que um dos seus principais insumos provém do mercado externo, deixando as empresas do setor vulneráveis aos reflexos de qualquer alteração do mercado internacional, fato que aconteceu com a “revolução do gás de xisto”.

Uma alternativa para reduzir a dependência externa e aumentar a segurança do abastecimento de metanol para atender o mercado interno, tanto no setor de biocombustíveis quanto em outros setores importantes da indústria como petroquímica, resinas, celulose e papel, é utilizar uma rota tecnológica que não apenas desvincule o gás natural da cadeia do metanol, como também utilize uma matéria-prima que esteja disponível em grandes volumes no território

nacional a preços relativamente baixos e estáveis. O carvão mineral é uma alternativa importante, que atende a todos esses requisitos para a produção de metanol pela rota de gaseificação. O Brasil possui a segunda maior reserva de carvão mineral da América Latina, correspondente a cerca de 2,8 bilhões de toneladas, localizada na região sul, predominantemente no estado do Rio Grande do Sul. Deste montante, em torno de 38,7% está presente em um único local, na jazida de Candiota/RS (DNPM, 2015).

O carvão é visto como um vilão, assim como outros combustíveis fósseis, porque contribui para a emissão de gases poluentes de efeito local e, principalmente, de efeito global (aquecimento global); desta forma, a expansão da sua utilização no setor energético, tem sido fortemente questionada. O aquecimento global é um processo de elevação da temperatura média da atmosfera terrestre e dos oceanos intensificado pelo efeito estufa. O efeito estufa corresponde a um fenômeno natural indispensável para a retenção de calor e preservação da vida no planeta Terra. Esse fenômeno ocorre porque a atmosfera é composta por gases que permitem a passagem da radiação solar, e absorvem (retém) grande parte da radiação infravermelho emitida pela superfície aquecida da terra. A grande preocupação é a sua possível intensificação, causada pelo aumento da concentração dos GEE na atmosfera, e as suas consequências para o clima. Os principais gases que contribuem para o efeito estufa são dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4)¹.

Novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas para elevar a eficiência da conversão do carvão em metanol e reduzir as emissões líquidas dos GEE. A cogaseificação do carvão e biomassa é a tecnologia mais promissora, que recebeu ampla atenção dos pesquisadores devido ao efeito sinérgico de os metais alcalinos e alcalinos-terrosos presentes na biomassa promoverem o aumento da conversão (gaseificação) do *char* e a diminuição do teor de alcatrão no gás de síntese (MALLICK et al., 2017), além de uma série de outros fatores relacionados a aspectos logísticos, operacional e de segurança no abastecimento da biomassa. Ainda, os sistemas de cogaseificação podem ser integrados de uma forma que, além da produção de metanol, seja gerada eletricidade e obtidos outros produtos químicos.

A utilização da biomassa oriunda dos resíduos agrícolas e agroindustriais tem recebido uma atenção especial no setor de bioenergia, especialmente porque eles não competem

¹ O gás de efeito estufa mais importante para o aquecimento global é o vapor de água, porém a sua concentração na atmosfera terrestre não depende significativamente das emissões diretas oriundas de ações antrópicas. A emissão de CO_2 está associada em grande parte à combustão de combustíveis fósseis, o que tem alertado o mundo em realizar esforços para a sua redução (IPCC, 2007).

com o cultivo de culturas alimentares nem ameaçam o abastecimento de alimentos (SIMS et al., 2008; SILALERTRUKSA e GHEEWALA, 2013; PATEL et al., 2016). A palha e a casca de arroz são resíduos notavelmente disponíveis no Rio Grande do Sul. O estado é responsável por cerca de 70% da produção do cereal no país (SOSBAI, 2016). Estima-se que são gerados 2 milhões de toneladas de casca e 9,3 milhões de toneladas de palha de arroz anualmente. O aproveitamento da casca para produção de metanol auxilia na solução dos problemas ambientais enfrentados pelas empresas beneficiadoras de arroz em relação a sua destinação final, acarretados pela grande quantidade gerada, aliada à sua baixa massa específica aparente. No que diz respeito a palha rejeitada na lavoura, não é considerada um problema para os produtores, desde que o seu manejo seja adequado para o cultivo do arroz; mas o seu aproveitamento pode gerar uma renda extra aos produtores.

A disponibilidade da biomassa residual e, principalmente, do carvão mineral no estado do Rio Grande do Sul potencializa a alternativa de produção de metanol pela cogaseificação. Sabe-se que há um ganho ambiental em cada tonelada de carvão substituída pela biomassa, especialmente relacionada a categoria de impacto de aquecimento global, visto que a biomassa e seus produtos possuem um ciclo neutro² de CO₂ quando destinados a reações químicas em que há formação de CO₂ e, somado a isso, as emissões do CH₄ derivadas da decomposição anaeróbica da palha e da casca de arroz disposta no solo é evitada. Segundo o IPCC (2006c), o CH₄ gerado pela decomposição de resíduos sólidos orgânicos contribui aproximadamente em 3 a 4 % para as emissões antropogênicas globais de GEE anualmente. Contudo, ainda não se sabe a magnitude da mitigação do aproveitamento da biomassa para produção de metanol, tampouco se conhece as emissões associadas a mineração do carvão a céu aberto no Brasil.

Nesta tese partiu-se de duas hipóteses: 1) a cogaseificação do carvão mineral extraído a céu aberto e a biomassa residual do arroz para produção de metanol é vantajosa em relação aos aspectos ambientais comparado com a gaseificação apenas do carvão; 2) e a contabilização das emissões derivadas da cadeia (logística) das biomassas residuais são muito importantes para a avaliação do benefício líquido da tecnologia de cogaseificação, em relação às emissões de CO₂ equivalente (CO_{2eq}) evitado.

² Ciclo neutro de CO₂ ou carbono – nesta tese entende-se que o CO₂, procedente exclusivamente da combustão ou de outras reações químicas da biomassa residual do arroz, será absorvido no próximo cultivo da planta por meio da fotossíntese. Todas as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O oriundas tanto de fontes biogênicas quanto do consumo de insumos agrícolas e energéticos para o plantio, cultivo, coleta, transporte e processamento do arroz são correspondentes ao ciclo de vida do arroz beneficiado; ou seja, essas emissões não fazem parte da cadeia das biomassas residuais (casca e palha).

A fim de testar estas hipóteses, contabilizou-se as emissões da cadeia das biomassas e do carvão mineral e, avaliou-se como essas emissões estão distribuídas e influenciam no ciclo do metanol. Esta avaliação não é uma empreitada simples pois há a necessidade de conhecer todas as atividades, processos e insumos importantes envolvidos no sistema e requer metodologias e ferramentas adequadas, dada a complexidade das rotas de produção que tendem a alterar a cadeia verticalizada para uma cadeia horizontal, vinculando ao sistema insumos agrícolas, energéticos e químicos de diversas localidades. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta reconhecida que pode ser utilizada para a aplicação desta abordagem porque permite avaliar impactos ambientais relacionados direta ou indiretamente ao produto (metanol) em toda a cadeia tecnológica, desde a extração de recursos naturais para o uso como matéria-prima, passando pelo transporte, fabricação, utilização (consumo), reciclagem e disposição final.

Os estudos de ACV pouco avançaram no Brasil, justamente porque não existe um banco de dados (inventários) disponível sobre os produtos e processos. Há bancos de dados europeus, americanos e asiáticos, porém na sua maioria não representam as reais condições do cenário brasileiro por diversos motivos, dentre eles as diferenças encontradas na matriz energética, as condições climáticas, a biodiversidade e extensão geográfica. Este desafio foi contornado nesta tese pela utilização de dados primários de uma empresa de mineração da jazida de Candiota e pela utilização das metodologias do IPCC para construir o inventário de emissões dos GEE.

1.1 Objetivo geral

Considerando o panorama exposto acima, este trabalho tem o objetivo de avaliar os impactos ambientais relativos ao aquecimento global do ciclo de vida do metanol produzido pela cogaseificação do carvão mineral, extraído a céu aberto, e da biomassa residual do arroz.

1.2 Objetivos específicos

A fim de alcançar o objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Construir um inventário e analisar as emissões dos gases de efeito estufa do carvão minerado a céu aberto baseado em dados coletados *in situ*.

- Avaliar o potencial de aproveitamento das biomassas residuais de arroz na região próxima a Jazida de carvão de Candiota, limitada a um raio de 160 km.
- Construir um inventário e analisar as emissões dos gases de efeito estufa da cadeia da palha e casca de arroz.
- Avaliar as emissões dos gases de efeito estufa do ciclo de vida do metanol produzido pela gaseificação do carvão mineral.
- Avaliar as emissões dos gases de efeito estufa do ciclo de vida do metanol produzido pela cogaseificação do carvão mineral e biomassa residual do arroz.
- Avaliar a capacidade de mitigação do CO₂ equivalente do metanol produzido pela cogaseificação.

1.3 Justificativa

A justificativa para o presente trabalho deriva das seguintes constatações:

- Não foi realizado inventário do carvão minerado a céu aberto no Brasil até o momento, portanto há uma lacuna de conhecimento que precisa ser preenchida, principalmente devido às reservas expressivas do fósil localizadas no sul do país que têm atraído a atenção de investidores sul-coreanos (Posco), franceses (Engie), japoneses (Tepco) e norte-americanos (Transgas) para instalação de novas usinas termelétricas e unidades de gaseificação para produção de ureia, metanol e gás natural sintético (RIO GRANDE DO SUL, 2014, 2015, 2017; CRM, 2016).
- A realização do inventário possibilitará a ampliação do banco de dados de ACV no Brasil e no Mundo, podendo ser utilizado em análises ambientais futuras as quais o carvão mineral e as biomassas residuais de arroz estejam inseridas.
- O Rio Grande do Sul é o maior produtor nacional de arroz, ocupa a área equivalente a 1 milhão de hectares para o seu cultivo e possui 187 unidades de beneficiamento de arroz distribuídas em todo o estado, as quais são responsáveis pela geração de aproximadamente 8,3 Mt de palha de arroz e 2 Mt de casca de arroz anualmente, respectivamente. Esforços devem ser realizados para encontrar alternativas de aproveitamento destes materiais lignocelulósicos disponíveis em grandes quantidades para proporcionar benefícios não apenas econômicos, mas também ambientais, visto que esses resíduos (no caso da casca) tornaram-se um passivo ambiental.

- A gaseificação do carvão, assim como a cogaseificação do carvão e biomassa, são alternativas potenciais para reduzir a dependência externa e aumentar a segurança do abastecimento de metanol para atender o mercado interno, uma vez que os fatores positivos dessas matérias-primas vão de encontro às questões relativas ao gás natural.

- Por fim, contribuir para a mitigação da intensificação do aquecimento global, o que pode colaborar evidentemente para a conservação da vida no planeta.

1.4 Organização da tese

A tese de doutorado está estruturada em 6 capítulos:

Capítulo 1: apresenta a contextualização do problema relacionado a oferta e demanda do metanol no cenário nacional atual, bem como a vulnerabilidade das empresas em razão aos reflexos de qualquer alteração do setor do gás natural no mercado internacional. Destacou-se as potencialidades e os benefícios ambientais da utilização do carvão mineral e da biomassa residual do arroz como matéria-prima para produção de metanol no estado do Rio Grande do Sul.

Capítulo 2: fornece os subsídios necessários para alcançar os objetivos específicos relativos ao estudo da ACV, abordando inicialmente os principais aspectos positivos do aproveitamento do carvão mineral e da biomassa residual do arroz para, então, relatar sobre as tecnologias de cogaseificação e conversão de gás de síntese, ambas utilizadas na produção de metanol. O capítulo foi finalizado com a descrição da metodologia de ACV.

Capítulo 3: descreve de maneira geral a metodologia e a estrutura utilizada para conduzir o estudo, o que inclui a definição dos cenários e dos métodos para análise dos resultados.

Capítulo 4: discorre sobre os processos associados a cadeia tecnológica do carvão mineral extraído da Jazida de Candiota e da palha e casca de arroz aproveitada da região entorno da Jazida. Ainda neste capítulo foram discutidas todas as premissas e métodos usados para a elaboração do escopo e dos inventários.

Capítulo 5: inicia a discussão dos dados inventariados e dos resultados dos impactos ambientais de todas as etapas envolvidas em cada cenário avaliado.

Capítulo 6: finalmente neste capítulo são apresentadas as conclusões e as sugestões para os trabalhos futuros.

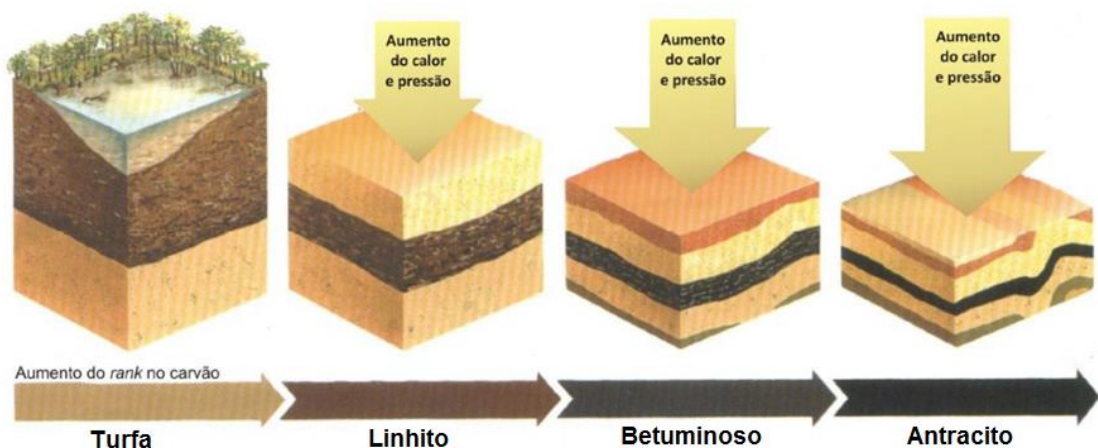
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Carvão mineral

O carvão é uma rocha sedimentar orgânica formada a partir de resto de material vegetal que originalmente se acumulava em pântanos e turfeiras, tendo sofrido soterramento, compactação e transformações devido ao aumento de pressão e temperatura. A energia que se obtém do carvão hoje é procedente da energia que as plantas absorveram do sol há milhões de anos (WCA, 2017). O carvão fóssil é erroneamente chamado de carvão mineral, uma vez que pela própria gênese e natureza, é uma rocha sedimentar orgânica. A denominação carvão mineral tem origem comercial, sendo utilizada somente para diferenciar do outro carvão comercial – carvão vegetal (FEIL, 2011).

A ação da temperatura e pressão em decorrência do soterramento e das atividades orogênicas³ promoveram a solidificação do material vegetal ao longo dos anos, liberação de oxigênio e hidrogênio e aumento das concentrações de carbono, em um processo conhecido como carbonificação. Quanto maior a temperatura e pressão que a camada de material vegetal for submetida, e quanto maior o período deste processo, mais alto será o grau de carbonificação, ou *rank*, e melhor a qualidade energética do carvão, conforme o esquema apresentado na Figura 1 (BORBA, 2001).

Figura 1 – Principais processos da carbonificação

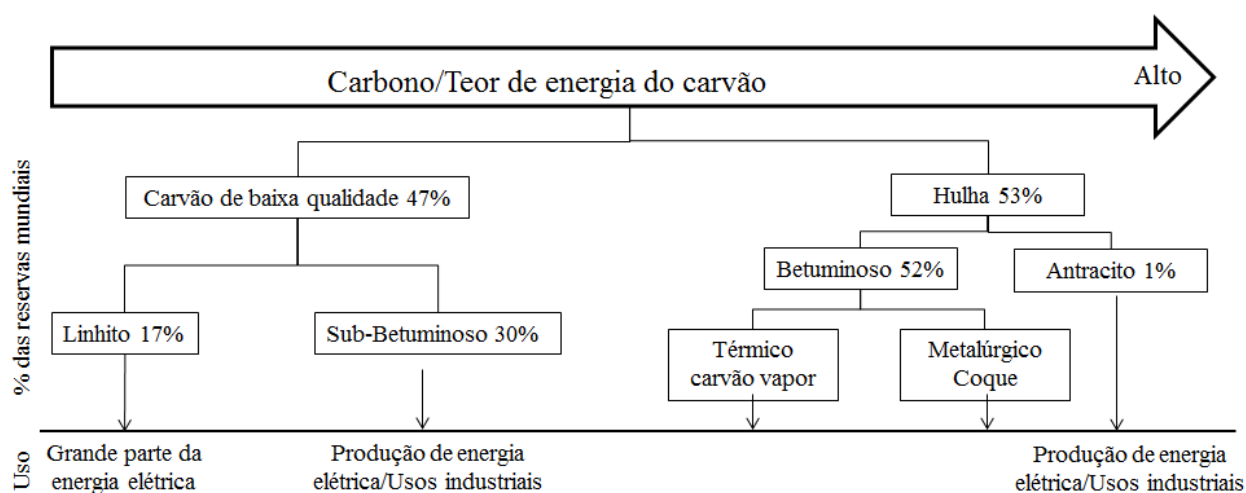


Fonte: EPE (2016)

³ Movimentação da crosta terrestre em virtude dos movimentos tectônicos (FAUSTINONI E CARNEIRO, 2015)

O *rank* é a medida do grau de maturidade ou carbonificação do carvão, classificado em turfa, linhito, carvão sub-betuminoso, carvão betuminoso e antracito. Primeiramente a turfa é convertida em linhito, tipo de carvão com baixa maturidade orgânica, possui estrutura macia e sua cor pode variar de preto para vários tons de marrom. Ao longo de milhões de anos, os efeitos contínuos de temperatura e pressão produzem mudanças no linhito, aumentando progressivamente sua maturidade orgânica e transformando-o em carvão sub-betuminoso. Outras mudanças químicas e físicas ocorrem até transformar-se em um material mais duro e escuro, formando o carvão betuminoso (hulha) e, por último, o antracito, o mais puro, aquele que possui a maior concentração de carbono (BORBA, 2001; WCA, 2017). Na Figura 2 é apresentada a porcentagem das reservas mundiais de cada tipo de carvão e exemplos das suas principais aplicações.

Figura 2 – Reservas mundiais de cada tipo de carvão mineral e suas principais aplicações



Fonte: WCA (2017)

A classificação do carvão também pode ser realizada pelo índice denominado *grade*, que mede de forma inversamente proporcional o percentual de cinza presente no carvão. Carvão com baixo *grade* significa alto percentual de cinzas misturado à matéria carbonosa, resultando em um material de baixa qualidade (BORBA, 2001).

A extração de minérios de carvão envolve técnicas de mineração superficial (à céu aberto) ou subterrâneas. O método selecionado depende de uma variedade de fatores, incluindo a natureza, localização, tamanho e profundidade da jazida (NORGATE e HAQUE, 2010). A operação de mineração de superfície constitui basicamente em três estágios distintos: remoção da sobrecarga, exploração de carvão e recuperação da área. Há uma série de equipamentos e

métodos de mineração utilizados para ambos os propósitos, que dependem de muitos fatores para uma determinada mina. A técnica utilizada para a exploração do carvão pode ser a mesma ou diferente da utilizada para a remoção de sobrecargas (SCOTT et al., 2010).

2.1.1 Reservas de carvão mineral

Existem cerca de 894 bilhões de toneladas de reservas de carvão comprovadas em todo o mundo, sendo que as maiores estão presentes nos territórios dos EUA, Rússia, China e Índia (Tabela 1). Isso significa que há carvão suficiente para durar cerca de 110 anos com as taxas de produção atuais. Em contraste, reservas comprovadas de petróleo e gás são equivalentes a aproximadamente 52 e 54 anos, respectivamente, nos níveis de produção atuais (WCA, 2017).

Tabela 1 – Principais reservas de carvão no mundo

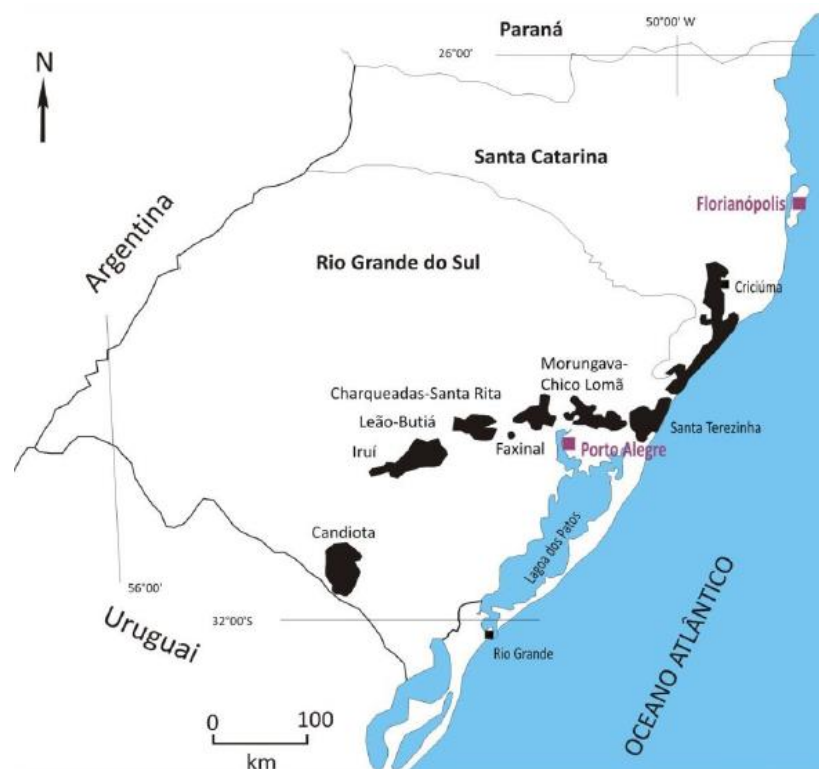
Países	Reserva (10⁶ t)
Brasil	2771
China	114500
EUA	237295
Índia	60600
Austrália	76400
Indonésia	28017
Rússia	157010
África do Sul	30156
Alemanha	40548
Polônia	5465
Cazaquistão	33600
Ucrânia	33873
Colômbia	6746
Canadá	6582
República Tcheca	1052
Venezuela	480
Outros países	59689

Fonte: DNPM (2015)

As maiores reservas e produtores de carvão na América Latina estão presentes na Colômbia, Brasil e Venezuela. A Colômbia possui os maiores indicadores de reservas e de produção da região e destaca-se no mercado internacional como um importante exportador de carvão térmico. Os principais mercados incluem a América do Norte, Turquia e Holanda e, mais recentemente, Índia, Japão, Coreia do Sul e Emirados Árabes Unidos. A maior mina do país é Carbones del Cerrejón, de propriedade conjunta da BHP Billiton, Glencore e Anglo American (WEC, 2017).

As reservas de carvão mineral comprovadas do Brasil são da ordem de 2,7 bilhões de toneladas e estão situadas predominantemente no sul do país; cerca de 90,1% são encontradas no estado do Rio Grande do Sul; 9,6% no estado de Santa Catarina e 0,3% no estado do Paraná (Figura 3). Outras pequenas reservas estão presentes nos estados do Amazonas, Pará, Pernambuco, Maranhão e São Paulo (EPE, 2016). A maior jazida de carvão é encontrada em Candiota (Figura 3), cidade localizada no sul do Rio Grande do Sul; alcança cerca de 38,7% do total nacional. Geologicamente, o carvão de Candiota pertence a Formação Rio Bonito, que caracteriza-se por sedimentos de granulometria variável e pelo confinamento dos leitos de carvão por camadas de argilitos (ABOARRAGE e LOPES, 1986).

Figura 3 – Localização das principais jazidas de carvão nos estados do RS e SC



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2010)

2.1.2 Carvão no cenário energético

No Brasil a participação do carvão mineral na oferta interna de eletricidade é bem modesta; corresponde a apenas 3,2% do total (EPE, 2016). Por outro lado, no cenário mundial, o carvão mineral continua sendo a principal fonte de geração de energia elétrica, responsável por cerca de 40 %, ultrapassando o gás natural, seu principal concorrente, em aproximadamente duas vezes (IEA, 2015; EPE, 2016). No entanto, as demandas por mitigação das mudanças climáticas, a transição para formas de energia mais limpas e o aumento da concorrência de outros recursos estão apresentando desafios para o setor.

A geração de energia elétrica por meio de usinas termelétricas a carvão mineral tem sido questionada devido a seus impactos ambientais. Novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas com a finalidade de aumentar a eficiência de conversão de energia, visto que a intensidade de emissões dos GEE é significativamente maior que de outros combustíveis, além de existir a preocupação com as emissões de poluentes atmosféricos de efeito regional.

Este impacto negativo sobre o meio ambiente força a implementação das chamadas tecnologias de carvão "limpas". É necessário desenvolver e aperfeiçoar novas tecnologias de elevada eficiência e baixo teor de carbono. Grandes esperanças estão associadas com a gaseificação do carvão, principalmente devido ao custo potencialmente menor de captura do CO₂ e a maior eficiência da remoção de material particulado (MP) e compostos sulfurosos em comparação com os sistemas convencionais baseados na combustão direta do carvão.

2.2 Biomassa

A biomassa é um combustível sustentável e com baixas concentrações de enxofre, que a torna uma fonte de energia com enorme potencial para substituir os combustíveis fósseis convencionais, principalmente no momento atual, em que há um acirrado debate sobre as evidências da conexão entre mudanças climáticas e o efeito estufa.

O Brasil é um país que possui uma extensa área agrícola; isso, por conseguinte, gera uma variedade enorme de biomassas residuais, somente no estado do Rio Grande do Sul é gerado cerca de 2 Mt de casca e 9,3 Mt de palha de arroz anualmente (IRGA, 2016), recurso que pode ser recuperado para produção de energia, combustíveis ou produtos químicos. Isso, por sua vez, destaca a necessidade de analisar alternativas para o seu aproveitamento.

O arroz é um dos cereais mais produzidos e consumidos no planeta, caracterizando-se como o principal alimento de mais da metade da população. A produção mundial de arroz é

estimada em mais de 481 milhões de toneladas por ano, sendo que, aproximadamente; 8,16 milhões de toneladas são produzidas no Brasil (CONAB, 2015; USDA, 2017).

No estado do Rio Grande do Sul é produzido cerca de 70% da produção do arroz (*Oryza sativa* L.) nacional. A área cultivada pelo sistema irrigado por inundação no estado corresponde a 1 milhão de hectares em seis regiões: Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Zona Sul, Planície Costeira Interna e Planície Costeira Externa, as quais variam em produtividade em razão de fatores climáticos como disponibilidade de radiação solar e temperatura do ar durante a estação de crescimento da cultura, alcançando em média 7.000 kg/ha, desempenho semelhante ao obtido em outros países tradicionais no cultivo do cereal (SOSBAI, 2016). A região da campanha, região em que está localizada a jazida de carvão mineral de Candiota, concentra a 3º maior área de produção, equivalente a 163.329 ha⁴.

2.2.1 Palha de arroz

A palha é composta pelos caules e folhas da planta que foram rejeitadas na lavoura após a colheita do arroz. A sua utilização como biomassa para geração de biocombustíveis e eletricidade apresenta um alto potencial, especialmente pela grande quantidade produzida. Antigamente, a palha era queimada na lavoura após a colheita com o propósito de preparar o solo para o próximo plantio, no entanto, a legislação brasileira proibiu essa atividade, e o resíduo passou a ser incorporado no solo, que dependendo do manejo do solo e da quantidade utilizada pode reduzir a produtividade do arroz irrigado (BEUTLER et al., 2014). A incorporação da palha no solo favorece a sua decomposição por processos de metanogênese (anaeróbicos) que promovem a geração e emissão de metano (YE, 2015). As arqueas metanogênicas apresentam máxima população em solos completamente reduzidos e o seu metabolismo é potencializado pela disponibilidade de materiais fermentativos, como a palha de arroz (AGOSTINETTO et al., 2002). Segundo Yagi e Minami (1990), a aplicação de 6 e 9 toneladas de palha por hectare aumentou a taxa de emissão de metano em 1,8 e 3,5 vezes, respectivamente. Em outros estudos, os resultados mostraram que a adição de palha na lavoura aumentou entre 1,5 (NUGROHO et al., 1996) e 1,8 vezes (SUBADIYASA et al., 1997) a emissão de metano.

⁴ Dados de área semeada e de produtividade da região orizícola na safra de 2015/2016 (SOSBAI, 2016).

No estudo realizado por Yuan et al. (2014) foi verificado que a palha não atua apenas como um substrato para produção de metano, mas estimula também a produção de CH₄ a partir do carbono presente no solo e nas raízes do arroz.

Segundo Agostinetto et al. (2002), apesar que a inserção da palha incrementa a taxa de emissão de metano, não deve ser totalmente eliminada da lavoura, pois solos intensamente cultivados e de baixa quantidade de matéria orgânica tornam-se empobrecidos e o rendimento das culturas diminui.

2.2.1.1 Coleta da palha de arroz

A coleta ainda é o maior desafio na cadeia de suprimento da palha de arroz para prepará-la como matéria-prima para uso posterior. A palha precisa ser coletada na lavoura e adensada para torná-la compacta e fácil de transportar. No sistema atual de colheita do arroz, a colheitadeira corta a parte superior da planta, coleta o cereal e a palha é descartada pela parte traseira da colheitadeira na forma de leiras ou dispersa na lavoura, dependendo da tecnologia utilizada. Como a palha de arroz é um subproduto ainda de baixo valor, assim como a palha de outras culturas, os sistemas projetados disponíveis atualmente para a sua recuperação são oriundos de tecnologias adaptadas para colheita de plantas forrageiras na produção de feno.

Segundo Kadam et al. (2000) e Braunbeck et al. (2008), existem duas técnicas básicas para a recuperação de resíduos de culturas agrícolas:

- Coleta pós-colheita: a biomassa é rejeitada no campo pelas máquinas colheitadeiras para posterior recuperação com equipamentos derivados de tecnologias de fenação, os quais possuem a finalidade de compactar a biomassa para facilitar o seu manuseio e transporte até a unidade de aproveitamento.
- Colheita integral: Neste processo a colheitadeira remove o arroz e a palha da lavoura na mesma operação e encaminha-os para um veículo de transbordo que acompanha a colheitadeira por meio de uma esteira de descarga lateral. O veículo de transbordo realiza o transporte até os caminhões de estrada, o qual conduz a mistura até a fazenda, terminal ou unidade industrial de beneficiamento de arroz para segregação. Desta forma, a palha estará disponível para ser aproveitada na própria unidade ou para ser compactada e encaminhada a outra. Este sistema não é utilizado no cultivo de arroz no Brasil.

A coleta pós-colheita é preferida pelos agricultores porque não envolve uma mudança para um conceito totalmente novo ou a utilização de novas máquinas agrícolas (KADAM et al., 2000).

A compactação da biomassa é fundamental para diminuição dos custos de transporte e para redução das emissões dos GEE, um dos parâmetros que justifica seu aproveitamento na gaseificação, principalmente quando a distância compreendida entre o local de produção e de consumo é elevada. Existem vários métodos de compactação como enfardamento, briquetagem e peletização (KADAM, et al., 2000; BRAUNBECK et al., 2008). Para a aplicação desses sistemas, é necessário que a palha dispersa na lavoura sofra um processo de secagem natural até alcançar teores de umidade abaixo de 25% (b.u.). Posteriormente, é submetida ao processo de enleiramento para formação de leiras, cuja finalidade é agrupar o material em linhas e facilitar os processos a jusante de coleta e compactação. Este processo não é necessário quando é utilizada uma colheitadeira que já rejeita a palha na forma de leiras.

A compactação pela técnica de enfardamento ocorre por meio da prensagem de baixa pressão com uso de amarração para evitar a recuperação e a perda de densidade do fardo. Os fardos são produzidos e liberados na lavoura, permanecendo no local até serem carregados e transportados ao local de armazenamento.

Nas operações de compactação por briquetagem e peletização, a adição da operação de trituração ou picagem da palha é necessária, tornando o processo mais oneroso. Segundo Wang et al. (2016), o tamanho das partículas tem grandes efeitos no consumo de energia de compressão e na qualidade do produto. Nesses sistemas, as leiras são recolhidas pela máquina picadora de forragem e lançado a uma carreta de transbordo que alimenta, ainda na lavoura, câmeras peletizadoras ou briquetadoras, as quais executam os seus processos característicos de compressão, não sendo necessária a amarração. O material adensado segue para o local de armazenamento.

No estudo realizado por Michelazzo e Braunbeck (2008) para o palhiço da cana de açúcar foi mostrado que a distância entre o local de produção e consumo é determinante para definição do método de adensamento em relação ao desempenho econômico e operacional. Sistemas de briquetagem e peletização são menos influenciados pela variação da distância, embora apresentem os maiores custos. Já os sistemas de enfardamento são mais afetados a variação da distância de transporte como consequência da baixa densidade da carga, o que promove o aumento do consumo de combustível e demandando mais veículos, porém os custos estimados por toneladas são cerca de 3 vezes menos.

A disponibilidade e a produtividade da palha de arroz foram avaliadas, assim como o consumo de energia do método de recolhimento por enfardamento. Há outros sistemas de recolhimento que podem ser mais eficientes, porém não foram avaliados neste estudo. No trabalho de Carvalho (2015), foi estimado o consumo de energia em três sistemas de

recolhimento de palha de cana, o sistema de coleta integral da palha junto a cana apresentou o menor consumo de energia: 43% menor em relação a rota de enfardamento, e 56% menor em relação ao recolhimento granel por forrageira.

2.2.1.2 Alternativas para aproveitamento da palha

Foi efetuada uma pesquisa na literatura sobre as alternativas que têm sido investigadas para o aproveitamento da palha de arroz. Segundo Euclides et al. (1988), a palha de arroz pode ser utilizada para alimentação de animais, embora seja deficiente em nutrientes e possua baixa digestibilidade pelos ruminantes. Esses fatores negativos são contornados pela adição de suplementos alimentares na palha antes de ser destinada a alimentação. Esse procedimento tem sido realizado nos meses secos do ano, em que há falta de forragens verdes e conservadas.

Suramaythangkoo e Gheewala (2008) revelaram que a palha de arroz pode ser um recurso valioso para a geração de energia, em vez de ser desperdiçada. Gadde et al. (2009) avaliaram a quantidade de palha de arroz gerada e o seu potencial energético em três diferentes países: Tailândia, Filipinas e Índia. Segundo os autores, ambas regiões possuem grande potencial para aproveitamento da palha de arroz como combustível renovável. No entanto, apontam que a geração de energia diretamente da palha pode ser complexa, em razão de alguns fatores como a sua baixa densidade, o que gera dificuldades para a sua logística, além de alguns fatores associados com a combustão como os altos teores de cinza e o baixo ponto da sua fusão.

Chou et al. (2009) investigaram o processamento e a caracterização dos briquetes para serem utilizados como combustível, os quais demonstraram viabilidade.

Outra alternativa que tem sido investigada é a produção de bioetanol a partir da hidrólise dos altos conteúdos de celulose e hemicelulose em açúcares fermentáveis. No entanto, há algumas limitações para esta aplicação, em razão do alto teor de cinzas e a necessidade de pré-tratamento (BINOD et al., 2010).

2.2.2 Casca de arroz

A casca é um resíduo agroindustrial procedente dos processos de descascamento e separação durante o beneficiamento do arroz, que em parte é aproveitada na própria unidade de beneficiamento. A Fundação de Ciência e Tecnologia do estado do Rio Grande do Sul (CIENTEC) realizou um estudo e verificou que em torno de 40% da casca é destinada à

secagem do arroz durante a safra⁵, à geração de vapor, à produção de força motriz e a outras indústrias, principalmente cimenteiras, conforme apresentado na Tabela 2. O percentual de 60% equivale a biomassa excedente (CIENTEC, 1986 apud MAYER, 2009).

Tabela 2 – Uso da casca de arroz no estado do Rio Grande do Sul

Destinação da casca	Percentual (%)
Queima para secagem dos grãos	15,20
Geração de vapor	14,00
Indústria de cimento	7,00
Geração de força motriz	4,20
Excedente de casca	59,60

Fonte: CIENTEC (1986) apud Mayer (2009)

Vale destacar que a geração e a disponibilidade da casca de arroz ocorre durante todo o ano, visto que o armazenamento é realizado com o grão em casca para garantir boa qualidade ao produto final. Fator importante para garantir abastecimento periódico a unidade de produção de metanol.

2.2.2.1 Alternativas para aproveitamento da casca

Algumas propriedades da casca de arroz como abrasividade, baixas propriedades nutricionais, alto teor de sílica e baixa massa específica aparente dificultam a sua aplicação em vários setores. Segundo Almeida (2010) e Alfaro et al. (2013), as baixas propriedades nutricionais e o alto teor de sílica tornam a casca imprópria para alimentação animal.

A baixa massa específica aparente e a grande quantidade de volume de casca excedente tornam alto o custo do seu transporte até os aterros, de modo que, em muitos casos, seu descarte é realizado irregularmente em torno de estradas ou em solo agrícola (MORAES et al., 2014). Com a legislação ambiental mais rígida e o aumento das preocupações com o meio ambiente, esta prática de eliminação aleatória diminuiu e as alternativas para o seu aproveitamento vêm sendo investigadas com mais afinco. A principal alternativa de destino do excedente da casca de arroz no estado do Rio Grande do Sul tem sido para pequenas usinas

⁵ Período compreendido entre março e abril.

termoelétricas, na sua maioria anexada a própria unidade de beneficiamento, porém o número de unidades é insuficiente para atender toda a demanda.

Alguns pesquisadores dedicaram a estudar a conversão da casca de arroz em compostos químicos, como produção de furfural (SUXIA et al., 2012) e ácido levulínico (BEVILAQUA et al., 2013), produto de alto valor agregado muito utilizado no tabaco e nas indústrias farmacêuticas.

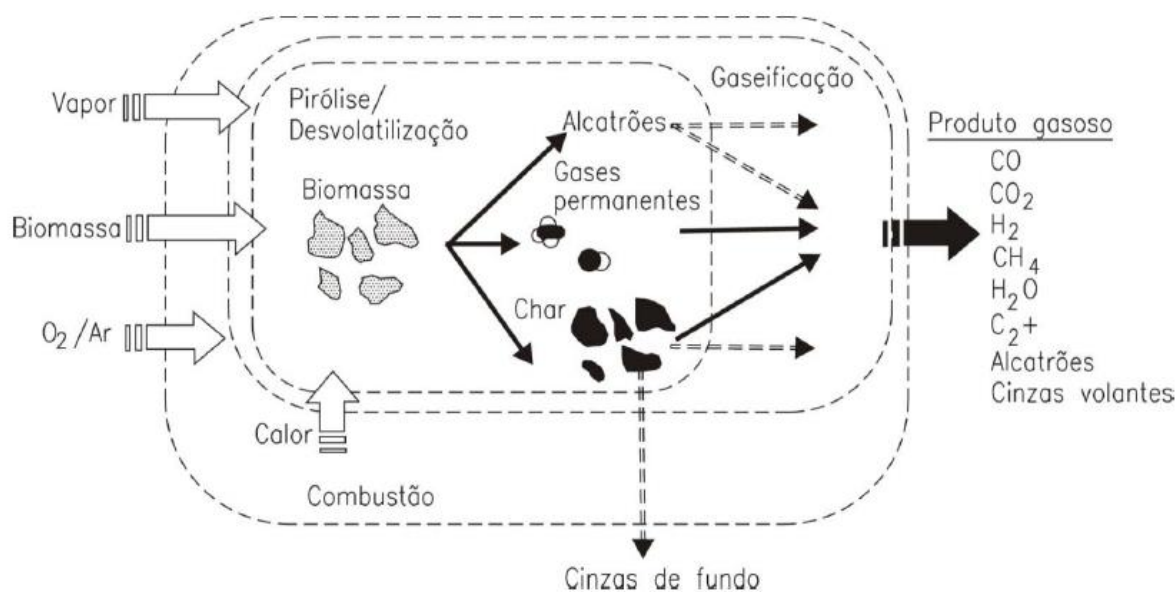
2.3 Gaseificação

A gaseificação é um processo termoquímico complexo que converte substâncias sólidas ou líquidas contendo carbono em gás de síntese por meio de reações químicas na presença de agentes gaseificantes como água, oxigênio ou ar. O mecanismo ocorre sob condições sub-estequiométricas de oxigênio, em pressões que variam entre 1 atm a 50 atm e temperaturas na faixa de 700 °C a 1500 °C, temperaturas inferiores das recomendadas para combustão e superiores a recomendadas para pirólise rápida (LORA, et al., 2008; ALAUDDIN et al., 2010; ALI et al., 2017).

O gás de síntese produzido consiste principalmente de hidrogênio (H_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4). Este gás pode ser explorado diretamente como combustível para produzir eletricidade ou vapor ou como uma matéria-prima básica para a indústrias química ou petroquímica convencionais, possibilitando a produção de vários produtos como metanol, hidrogênio, amônia, ácido acético, entre tantos outros (ALI et al., 2017). Na Figura 4 é apresentado um esquema geral dos principais processos e componentes presentes na gaseificação da biomassa.

O material carbonáceo submetido ao processo é aquecido inicialmente e, em seguida, ocorre a pirólise, formando alguns compostos no estado gasoso e sólido. Esses produtos reagem entre si e com o agente de gaseificação durante a etapa de redução para formação dos produtos finais. Tanto reações exotérmicas quanto reações endotérmicas ocorrem durante o processo termoquímico (GÓMEZ-BAREA e LECKNER, 2010).

Figura 4 – Esquema geral dos processos e componentes da gaseificação



Fonte: Rocha (2015)

2.3.1 Processos físico-químicos

O material carbonoso, seja carvão mineral seja biomassa, quando submetido a ação do calor ocorre pelo menos os processos físico-químicos apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Processos físico-químicos da gaseificação

Processo físico-químico	Temperatura (°C)
Secagem	> 150 °C
Pirólise (desvolatilização)	(150°C a 700°C)
Combustão (oxidação)	(700°C a 1500°C)
Redução (gaseificação)	(800°C a 1100°C)

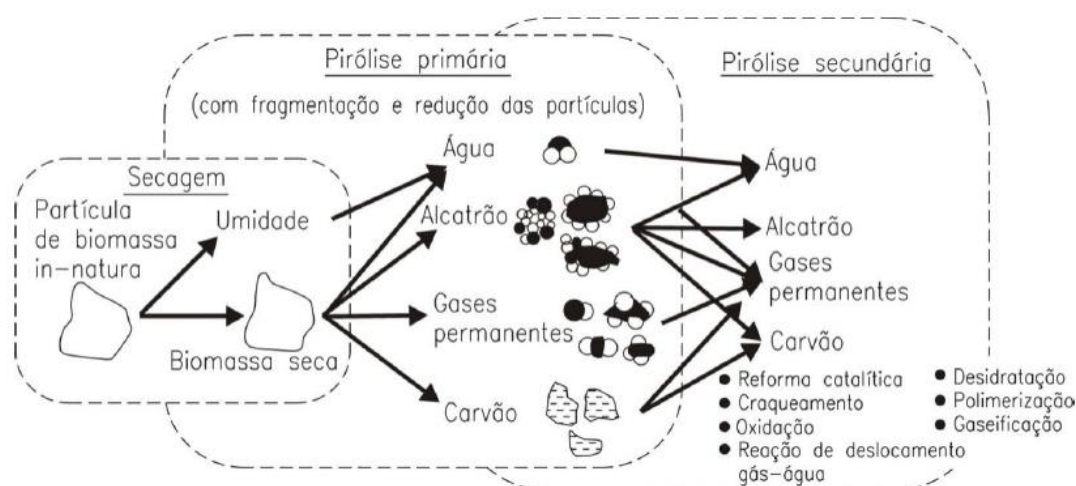
Fonte: Basu (2006)

Na secagem, a umidade e os compostos voláteis presentes no sólido são difundidos até a superfície e evaporados. Na temperatura em torno de 280 °C, inicia-se a pirólise, na qual uma série de processos físico-químicos complexos ocorrem resultando na separação dos líquidos orgânicos (alcatrão e ácidos), gases não condensáveis (H_2 , CO, CO_2 , CH_4) e o *char* (carbono sólido não decomposto e cinzas). O processo de pirólise (Figura 5) pode ocorrer em uma ou duas etapas, dependendo da composição do material carbonoso. Na pirólise de duas etapas, o primeiro ou o estágio primário, as grandes moléculas de hidrocarbonetos são divididas (quebradas) em gases condensáveis e *char*. Os gases condensáveis formam o alcatrão. No

segundo estágio da pirólise ou pirólise secundária, as moléculas de alcatrão são quebradas em moléculas menores que formam espécies gasosas, além disso, concomitantemente podem ocorrer os processos de reforma catalítica, craqueamento, oxidação, reação de deslocamento gás-água, desidratação e polimerização. A matéria sólida deixada após a liberação de todos os voláteis é chamada de *char*. Como o teor de carbono fixo do carvão é superior ao da biomassa, a formação de *char* durante a pirólise do carvão é significativamente maior que da biomassa (MALLICK et al., 2017).

A composição desses produtos depende de vários fatores como a composição da matéria carbonosa, taxa de aquecimento, composição dos gases durante a volatilização, da temperatura e pressão de processo (BASU, 2006).

Figura 5 – Esquema do processo da pirólise



Fonte: Rocha (2015)

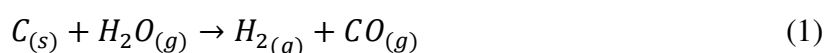
A combustão é uma das reações químicas mais importantes que ocorrem dentro de um gaseificador; a energia gerada alimenta praticamente toda as reações endotérmicas presentes nas etapas de secagem, pirólise e redução. O oxigênio fornecido ao sistema reage com as substâncias combustíveis presentes, resultando na formação de CO_2 e H_2O , que posteriormente poderão ser reduzidas após contato com o carvão produzido durante a pirólise (BASU, 2006; DOHERTY et al., 2009).

Os produtos mais importantes da etapa de redução, também denominada gaseificação, são os gases combustíveis como hidrogênio, monóxido de carbono e metano. As

principais reações desta etapa são: reação água-gás, reação de Boudouard, reação de deslocamento água-gás e metanação (BASU, 2006).

Reação gás-água

A reação água-gás (Equação 1) consiste na oxidação parcial do carbono pelo vapor, que pode ser proveniente dos diferentes processos físico-químicos ou da corrente de alimentação do sistema.



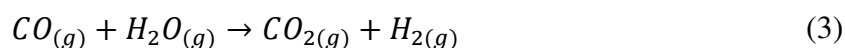
Reação de Boudouard

O dióxido de carbono reage com o carbono para produzir CO de acordo com a seguinte reação endotérmica (Equação 2).



Reação de deslocamento água-gás (*water gas-shift*)

Nesta reação endotérmica (Equação 3) ocorre a formação do hidrogênio, componente muito importante para aumentar o poder calorífico do gás de síntese e promover a síntese do metanol.



Metanação

A produção de metano é importante tanto para o sistema em que o gás de síntese é destinado para geração de energia quanto para produção de químicos. Esta reação (Equação 4) pode ser acelerada pela utilização de catalisadores a temperaturas em torno de 1100 °C e pressão entre 6 bar e 8 bar.



2.3.2 Principais parâmetros de processo

Os principais parâmetros que influenciam o sistema de gaseificação são as características do material carbonoso e do agente oxidante, além do regime de fluxo. No tocante a operação do sistema, os parâmetros que possuem maior influência são: relação de equivalência, relação vapor-biomassa, granulometria da biomassa, tempo de residência das partículas, velocidade de fluidização, utilização de catalisadores, eficiência a quente e a frio, temperatura e pressão. A seguir serão explicados sucintamente os principais parâmetros.

2.3.2.1 Relação vapor-material carbonáceo

O vapor adicionado ao reator pode atuar tanto como meio de fluidização quanto como reagente em várias reações de gaseificação, por exemplo, reações de reforma, reação de deslocamento gás-água, além de ser usado como agente controlador de temperatura do gaseificador. O parâmetro vapor-material carbonáceo (VMC) relaciona a quantidade de vapor em relação a quantidade de material carbonáceo alimentado no reator (Equação 5). Valores altos de VMC tendem a produzir mais hidrogênio, produto da reação de deslocamento água-gás e, também, a promoção do craqueamento dos hidrocarbonetos de alto peso molecular (ROCHA, 2015).

$$VMC = \frac{Q_{vapor} + Q_{mc-úmida}}{Q_{mc-seca}} \quad (5)$$

em que Q_{vapor} é a vazão de vapor (kg/h); $Q_{mc-úmida}$ é a vazão de material carbonáceo úmido (kg/h) e $Q_{mc-seca}$ é a vazão de material carbonáceo isento de umidade (kg/h).

2.3.2.2 Razão de equivalência

A razão de equivalência (RE) ou fator de ar é um parâmetro adimensional independente que regula a vazão do oxigênio puro ou presente no ar fornecido ao gaseificador. RE é definida como a relação da vazão mássica de ar (Q_{ar}) pela vazão mássica do material carbonáceo (Q_{mc}) real (utilizado durante a gaseificação) dividida pela relação de ar-material

carbonáceo estequiométrico, conforme mostrado pela Equação 6 (LORA, 2008). Esta relação estequiométrica pode ser determinada com base na análise elementar da matéria prima por meio da estequiometria da reação (ROCHA, 2015).

$$RE = \frac{\left(\frac{Q_{ar}}{Q_{mc}}\right)_{real}}{\left(\frac{Q_{ar}}{Q_{mc}}\right)_{estequiométrica}} \quad (6)$$

O valor de RE deve variar de 0 a 1; para a alimentação de RE igual a 1, o material será completamente queimado (combustão completa) e, quando RE for menor 0,20 o combustível será parcialmente queimado (zona de pirólise). Por outro lado, para alimentação na faixa de $0,20 < RE < 0,50$ o processo de conversão estará na zona de gaseificação (DAMARTZIS et al., 2012).

2.3.2.3 Temperatura de operação

A temperatura varia ao longo das diferentes zonas do gaseificador e depende de vários outros parâmetros, como tempo de residência, RE, composição do material carbonoso (principalmente voláteis e carbono fixo), temperatura do agente de gaseificação, isolamento do reator, entre tantos outros. Durante o processo, deve-se utilizar uma temperatura para possibilitar que o carbono do material carbonáceo seja convertido o máximo possível e não fique retido na cinza. Temperaturas relativamente altas favorecem a formação de H_2 e CO , enquanto a quantidade de metano decresce. Esse comportamento é justificado pelo princípio de L^ê Chatelier que estabelece que nas reações exotérmicas os reagentes são favorecidos nas maiores temperaturas, enquanto nas reações endotérmicas são favorecidos os produtos. Embora a temperatura favoreça a conversão do carbono, no caso de reatores de leito fluidizado, a temperatura máxima de operação está limitada a sinterização das cinzas, cujo valor está em torno de $950\text{ }^\circ\text{C}$ (LORA et al., 2008).

2.3.3 Gás de síntese

O termo gás de síntese é amplamente utilizado para se referir ao produto gasoso oriundo dos processos físico-químicos envolvidos na gaseificação de qualquer matéria-prima

carbonácea. Esse produto bruto possui várias impurezas procedentes da própria composição do material carbonáceo ou das reações incompletas da gaseificação como materiais particulados, alcatrão (hidrocarbonetos de alto peso molecular), álcalis (principalmente potássio e sódio), compostos nitrogenados, compostos sulfurados, ácido clorídrico e gás carbônico, compostos que podem provocar a corrosão dos equipamentos e também bloquear (envenenar) a ação dos catalisadores utilizados nas etapas seguintes. Desta forma, essas impurezas devem ser retiradas para atender aos requisitos do processo e, ainda, os regulamentos de controle de poluição.

2.3.3.1 Limpeza do gás de síntese

Para alcançar a qualidade desejada são utilizadas tecnologias de “limpeza” que são classificadas de acordo com a temperatura do gás na saída do sistema: sistema a quente ($T > 300$ °C) ou sistema a frio ($T < 100$ °C) (WOOLCOCK e BROWN, 2013).

A limpeza do gás a frio usa técnicas convencionais que são altamente efetivas, embora ocorra geração de efluentes líquidos e ineficiência na recuperação da energia térmica porque a maioria dessas técnicas baseiam-se no uso de lavadores (*wet scrubbers*). O sistema possui ciclones para remoção de partículas grosseiras, lavadores de gases para remoção de alcatrão, álcalis, materiais particulados, NH_3 e processos MDEA ou Rectisol para remoção das substâncias ácidas (COS , H_2S e CO_2) pela absorção por solventes químicos.

O processo MDEA, cujo nome comercial é Ucarsol, utiliza aminas como solvente, já o processo Rectisol, desenvolvido e patenteado pela Lurgi, utiliza o metanol a baixas temperaturas como solvente (ROCHA, 2015). Segundo Korens et al. (2002), o processo Rectisol é o mais usado quando o gás de síntese é destinado para síntese química. Uma vantagem da utilização deste processo numa unidade de produção de metanol é que o seu insumo é produzido na própria unidade. O solvente rico (metanol ou aminas) em gases ácidos são encaminhados para uma coluna de regeneração, o qual são separados dos gases e retornado para o processo. O gás carbônico removido pode ser comprimido e armazenado para utilização em outros processos industriais, já os compostos sulfurados podem ser encaminhados para unidades de recuperação de enxofre por meio do processo Claus.

Por outro lado, as tecnologias de limpeza a quente são atraentes porque evitam o resfriamento da corrente gasosa, ou seja, as temperaturas se mantêm elevadas, sendo possível alcançar maiores eficiências térmicas, principalmente quando a finalidade é produzir energia (elétrica ou térmica) pela combustão do gás de síntese. Esta tecnologia inclui equipamentos convencionais de remoção de partículas grosseiras, NH_3 e álcalis, juntamente com tecnologias

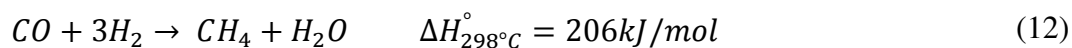
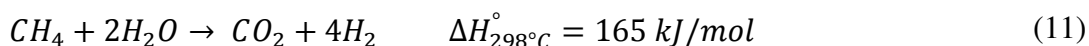
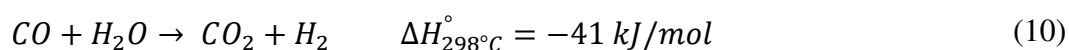
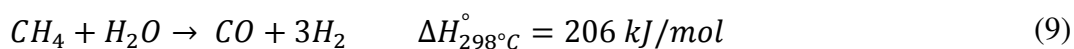
baseadas no craqueamento catalítico dos alcatrões e filtros cerâmicos para remoção de materiais particulados. A maior dificuldade de implantação deste sistema está relacionada a resistência dos materiais e dos catalisadores a elevadas temperaturas (WOOLCOCK E BROWN, 2013; ROCHA, 2015).

2.3.3.2 Condicionamento do gás de síntese

O condicionamento do gás de síntese consiste no ajuste dos seus componentes a fim de alcançar a composição ideal de H_2 , CO e CO_2 para a síntese do metanol. Os principais processos de condicionamento são reforma a vapor, oxidação parcial e reforma autotérmica (LIU et al., 2009).

O gás de síntese é composto basicamente por H_2 , CO_2 , CH_4 e CO . Na maioria dos processos industriais que utilizam o gás de síntese como insumo, o teor de CO é maior que o requerido para a síntese do metanol. Desta forma, há a necessidade do ajuste do CO e, também do CH_4 , em H_2 e CO_2 (LIU et al., 2009).

A reforma a vapor é o processo mais utilizado no condicionamento do gás de síntese; consiste na conversão de hidrocarbonetos em gases de H_2 e CO na presença de um catalisador (Equação 9), mas também envolve outras reações, como deslocamento de gás-água (*water-gas shift reaction*), reação favorecida em baixas temperaturas e pouco influenciada pela oscilação de pressão (Equação 10); e a reação de metanação (Equação 12), que é uma reação reversível da reforma de vapor ocorrida em algumas faixas de temperaturas com a finalidade de eliminar o CO residual (LIU et al., 2009; ROCHA, 2015).



2.4 Cogaseificação

Uma das principais barreiras para alcançar a gaseificação comercial da biomassa é a insegurança do seu abastecimento por causa de uma série de fatores como disponibilidade, heterogeneidade, coleta e sazonalidade, ainda há uma grande dependência da localização da

unidade de gaseificação em relação a fonte da biomassa, aspecto muito relevante devido a sua baixa massa específica que muitas vezes torna o seu transporte inviável para longas distâncias. No entanto, o mesmo não acontece com o carvão mineral que está disponível em grandes quantidades, concentradas em um local e pode ser facilmente transportado devido à sua maior massa específica.

Segundo Mallick et al. (2017), o principal problema da gaseificação do carvão está relacionada a conversão incompleta do *char*, resultante da pirólise do carvão, em produtos devido a cinética lenta da oxidação. A conversão incompleta não apenas diminui a eficiência energética global e o rendimento dos produtos gasosos, mas também aumenta as emissões de particulados e a produção de alcatrão. Com o propósito de melhorar a cinética da oxidação, catalisadores a base de metais alcalinos, metais alcalinos-terroso e catalisadores de metais de transição (Ni-Cu, Ni- γ -Al₂O₃) têm sido adicionados junto ao carvão durante a alimentação do gaseificador (PINTO et al., 2009 e LI et al., 2011).

Uma forma de solucionar os problemas relatados em relação à disponibilidade da biomassa e a cinética lenta das reações é por meio da gaseificação simultânea da biomassa e do carvão, conceito também conhecido como cogaseificação. Além de haver ganhos ambientais relevantes para o processo pelo fato de se utilizar uma matéria-prima renovável, há vários outros benefícios sinérgicos, os principais são descritos abaixo (MCKEE, 1983; HERNANDEZ et al., 2010; MASNADI-SHIRAZI, 2014; MALLICK et al., 2017):

- A biomassa é um recurso renovável, possui um ciclo neutro de CO₂ e baixas concentrações de cinzas, nitrogênio e enxofre. Desta forma, a adição de biomassa ao carvão mineral leva a redução das emissões de CO₂ e enxofre.
- Os metais alcalinos e alcalinos-terrosos presentes na biomassa (em maior concentração) podem atuar como catalisadores e promoverem o aumento da conversão (gaseificação) do *char* e a diminuição do teor de alcatrão nos produtos (MCKEE, 1983; MALLICK et al., 2017).
- Redução das incertezas derivadas do abastecimento de biomassa, aumentando assim a flexibilidade de operação e garantindo o retorno do alto investimento necessário para a construção e operação do gaseificador comercial, uma vez que o carvão pode atuar como um regulador nos casos em que a disponibilidade de biomassa seja insuficiente.
- A maior reatividade da biomassa em relação ao carvão (relacionada a maiores concentrações de matéria volátil e porosidade do material) promove um *upgrade* do processo de gaseificação sem afetar a estabilidade da operação da usina.

Vélez et al. (2009) realizaram experimentos em uma planta piloto de leito fluidizado e observaram que é possível realizar cogaseificação de carvão com casca de arroz, serragem e casca de café em até 15%. O gás combustível produzido era rico em hidrogênio (até 15%). Outros componentes combustíveis encontrados no gás de síntese foram monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) e hidrocarbonetos (alcatrões). Uma maior proporção de biomassa no combustível aumentou o teor de hidrogênio no gás, mas diminuiu a eficiência energética do processo. A redução da eficiência da cogaseificação foi menor com a serragem; provavelmente devido ao maior teor de carbono do que a casca de arroz e a casca de café. Em todos os experimentos observaram aglomeração de cinzas e deposição de alcatrão como pequenas desvantagens do processo.

2.5 Metanol

O Metanol (CH₃OH) ou álcool metílico, conhecido também por *espírito da madeira* é uma substância líquida, incolor, volátil e polar. A produção do metanol se iniciou no final do século XIX por meio da separação dos produtos obtidos na pirólise da madeira. Atualmente, a maior parte do metanol produzido industrialmente é por meio do gás de síntese proveniente da gaseificação do carvão mineral e, principalmente, da reforma a vapor do gás natural por processos catalíticos de alta atividade e seletividade, contudo pode ser utilizada outras matérias-primas para produção do gás de síntese, como a biomassa (SPATH e DAYTON, 2003).

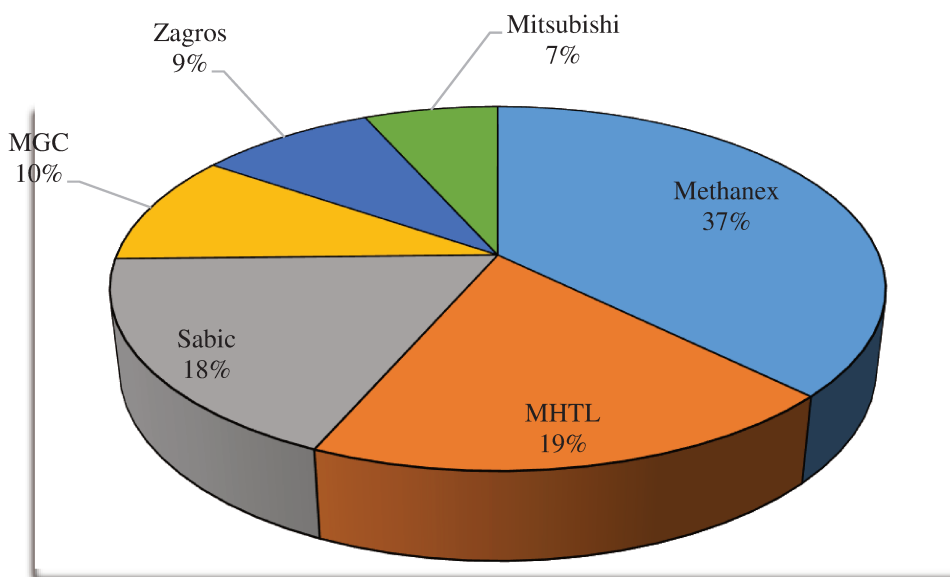
O grande interesse da produção do metanol é devido ao seu potencial como combustível e insumo químico. O metanol pode ser utilizado diretamente como combustível de transporte ou misturado com combustíveis derivados do petróleo, além de insumo químico intermediário para produção de vários produtos químicos como formaldeído, dimetiléter (DME), éter metil terc-butílico (MTBE), ácido acético, olefinas, metilaminas, fármacos, polímeros, celulose, entre tantos outros (SPATH e DAYTON, 2003). Ademais, o metanol possui ampla relação com alguns combustíveis renováveis como o biodiesel e o hidrogênio, posto que é largamente utilizado no processo de transesterificação de óleos vegetais e gorduras animais para produção de biodiesel, e considerado um potencial transportador de hidrogênio para aplicações em células a combustíveis.

O consumo mundial de metanol alcançou 62 milhões de toneladas⁶ no ano de 2016. A companhia canadense Methanex é a maior produtora e fornecedora do insumo no mundo; no

⁶ Exclui a demanda de metanol destinado a produção de olefinas (METHANEX, 2016).

ano de 2015 foi responsável por 37% da produção total. Esta companhia ainda possui unidades no Chile, Egito, Trinidad e Tobago, Nova Zelândia e Estados Unidos (METHANEX, 2016). A segunda maior produtora é a MHTL (Methanol Holdings Trinidad Limited) correspondendo a 19%, seguida da Sabc (18%), conforme apresentado pela Figura 6.

Figura 6 – Maiores produtores mundiais de metanol

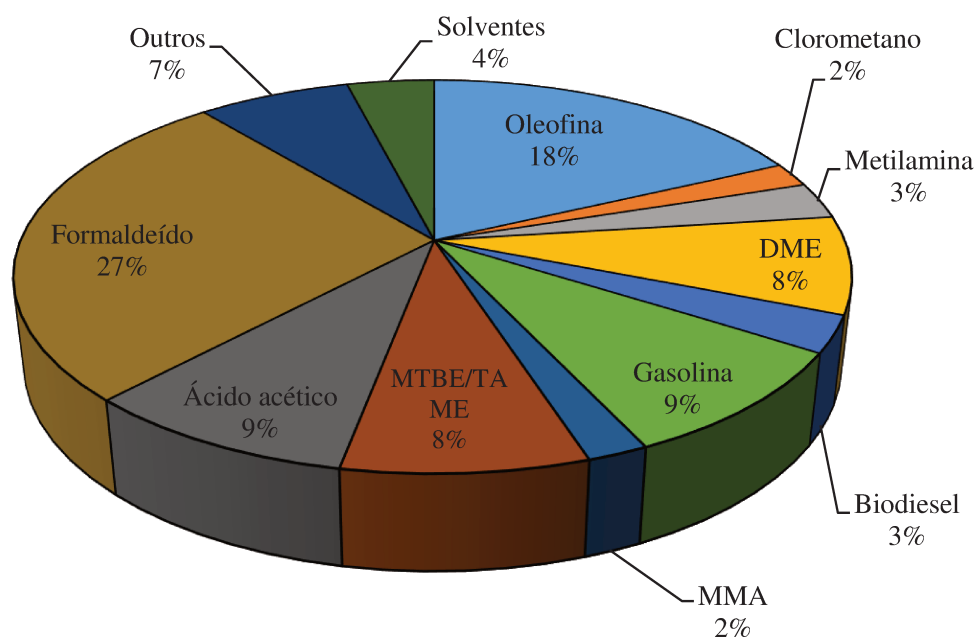


Fonte: Methanex (2016)

A Sasol é uma outra companhia de destaque no cenário internacional em relação a produção de insumos químicos por meio do gás de síntese gerado na gaseificação do carvão mineral. A África do Sul, país no qual está situada a companhia, produz cerca de 40% da sua gasolina e diesel usando tecnologias modernas de liquefação (MINCHENER, 2005).

Na Figura 7 é apresentada a demanda de metanol por segmento no cenário mundial, a maior quantidade é destinada para a produção de formaldeído (27%), seguido pela produção de olefinas.

Figura 7 – Demanda global de metanol por segmento



Fonte: IHS (2016)

2.5.1 Produção de metanol no Brasil

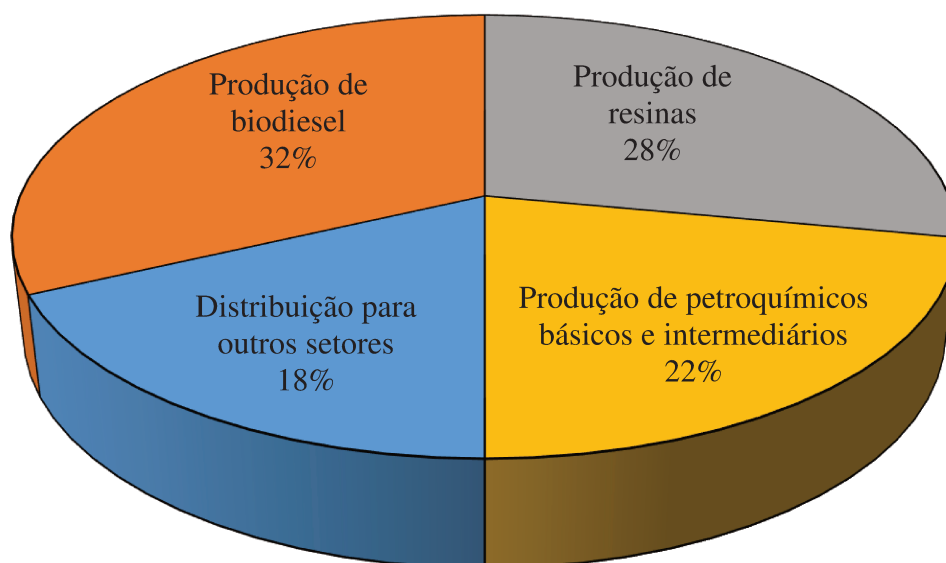
A produção de metanol no Brasil sempre foi insuficiente para atender o mercado interno. A Câmara de Comércio Exterior (Camex) do governo federal chegou a sancionar resoluções para suspender a alíquota do imposto de importação do metanol entre os anos de 2013 e 2016 com a finalidade de atender a demanda crescente no mercado interno. Em agosto de 2016, a situação tornou-se ainda mais difícil; a última unidade de produção de metanol nacional – Companhia Petroquímica do Nordeste (COPENOR) – interrompeu suas operações por tempo indeterminado em razão da diminuição do seu preço no mercado internacional sem a equivalente redução do preço do gás natural no Brasil (COPENOR, 2017). Em 2013 outra Companhia, GPC Química/Prosint, já havia desativado a planta de metanol.

A exploração do gás de xisto impulsionado pelos Estados Unidos nos últimos anos provocou uma redução do custo do gás natural (principal matéria prima) e tornou o metanol americano altamente competitivo, inviabilizando a produção no Brasil. Atualmente o país importa todo o metanol para atender a demanda do mercado interno.

Na Figura 8 é apresentada as principais demandas de metanol por segmento no Brasil. A maior quantidade é destinada para a produção de biodiesel, valor que irá aumentar devido a maior porcentagem do biocombustível na composição do óleo diesel determinada pelo governo federal. Segundo a lei sancionada pelo governo federal nº 13263/2016 (BRASIL,

2016), o percentual de adição obrigatória de biodiesel no óleo diesel comercializado no Brasil aumentou de 7% para 8% em março de 2017, o que representou um aumento de 14% na demanda por biodiesel e resultou na produção de 4,2 bilhões de litros e o consumo de aproximadamente 462 milhões de litros de metanol por ano. Ainda conforme a lei, o percentual deve alcançar 10% em 2019. O governo planeja aumentar o percentual para 15% em 2020 e 18% em 2030 (BRASIL, 2017).

Figura 8 – Demanda brasileira de metanol por segmento



Fonte: ANP (2015)

Na Tabela 4 é apresentado o consumo de metanol pelas unidades de produção de biodiesel por região e estados brasileiros. O Rio Grande do Sul destaca-se como o maior consumidor de metanol do país há alguns anos, posição justificada pela extensa área de cultivo de oleaginosas parcialmente utilizadas como matéria-prima na produção do biocombustível. O metanol produzido a partir do carvão e biomassa poderia atender a demanda destas unidades, além de outras indústrias químicas instaladas no estado.

Tabela 4 – Consumo de metanol (m³) na produção de biodiesel por região e estados brasileiros

Regiões e estados	Ano						
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Região Norte	8021	17816	15883	10742	7328	13857	10973
Rondônia	652	1371	504	1490	2598	2224	1011
Pará	985	695	-	-	-	-	-
Tocantins	6384	15750	15379	9252	4730	11633	9962
Região Nordeste	25319	23837	20186	32672	29840	26212	36539
Maranhão	6767	4084	-	-	-	-	-
Piauí	518	-	-	-	-	-	-
Ceará	5575	6912	5365	6685	8295	7122	8959
Rio Grande do Norte	-	-	-	-	-	-	161
Bahia	12459	12842	14821	25987	21544	19091	27420
Região Sudeste	43240	48441	47690	31074	32508	32962	34475
Minas Gerais	4223	8435	8277	8477	8881	8356	11002
Rio de Janeiro	901	2075	1171	1979	1056	2876	2758
São Paulo	38116	37931	38242	20619	22570	21730	20715
Região Sul	55845	79624	103538	102064	124969	139412	161068
Paraná	2823	8647	13728	14068	21521	29691	36651
Santa Catarina	-	-	-	-	3094	5730	2893
<u>Rio Grande do Sul</u>	<u>53022</u>	<u>70977</u>	<u>89810</u>	<u>87996</u>	<u>100354</u>	<u>103990</u>	<u>121525</u>
Região Centro-Oeste	66686	108932	114592	128681	138223	167509	196528
Mato Grosso do Sul	1011	1783	5029	9540	23747	27033	24705
Mato Grosso	39383	62959	60315	57165	49385	68042	93491
Goiás	26292	44190	49248	61976	65091	72434	78332
Brasil	199111	278650	301890	305233	332867	379953	439584

Fonte: ANP (2016). Nota: O consumo do metanol pode variar em função da tecnologia de produção biodiesel e das matérias-primas utilizadas.

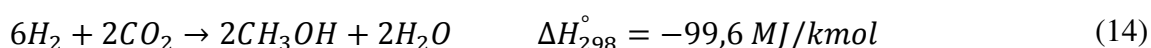
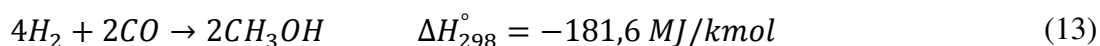
Percebendo a importância do metanol para o setor de biocombustíveis e combustíveis, a ANP resolveu incluí-lo no rol de produtos regulados pela Agência. Por meio da publicação da resolução n° 696/2017, foi alterada a regulamentação vigente para incluir o metanol na definição de solvente e tornar mais efetivo o controle da Agência sobre esse produto. Outra Resolução publicada (n° 697/2017) estabelece o registro dos terminais e dutos de

movimentação e armazenamento de metanol. A partir de agora, a ANP possui o controle de todas as normas que tratam da produção, importação, exportação, armazenamento, distribuição e movimentação do solvente, as quais devem ser observadas por todos os agentes envolvidos na comercialização e consumo deste produto no território nacional.

2.5.2 Síntese do metanol

Há basicamente duas rotas para a síntese do metanol: a rota de fase gasosa que domina o mercado, e a rota de fase líquida, ambos os processos utilizam catalisadores à base de cobre, que possuem alta seletividade (aproximadamente 99,5%). Na rota da fase gasosa, o gás de síntese alimenta um reator na presença de um catalisador para produzir metanol, vapor de água e outras substâncias em baixas concentrações como etanol, álcoois superiores, cetonas, éteres, entre outras. Esta corrente é encaminhada para um conjunto de colunas de destilação para separação do metanol. O gás de síntese não reagido é recirculado para o reator de metanol, resultando em uma eficiência de conversão global que pode alcançar 99% ou, também, pode ser encaminhado para um sistema de geração de eletricidade. Na Figura 9 é apresentado um fluxograma simplificado do processo (SPATH e DAYTON, 2003).

O metanol é produzido pela conversão catalítica do gás de síntese contendo H_2 , CO e CO_2 , a temperaturas e pressões elevadas, pelas reações Equação 13 e Equação 14.



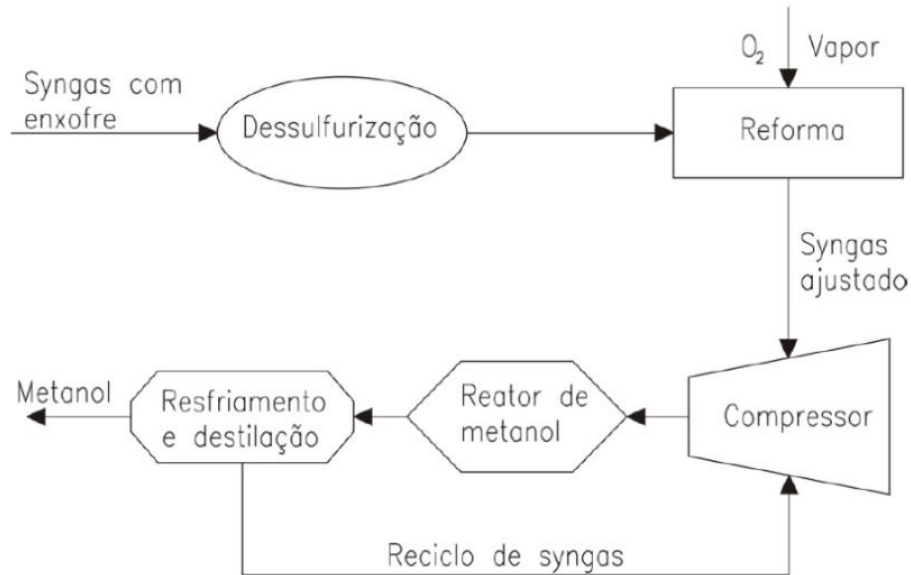
As principais tecnologias de síntese de metanol em fase gasosa no mundo são ICI (*Imperial Chemical Industries*) e a Lurgi. A ICI lidera o mercado mundial com aproximadamente 45% e a tecnologia Lurgi com 35% (LIMA NETO, 2009).

O processo Lurgi é constituído por um reator tipo casco e tubos (com catalisadores no interior dos tubos), operando em temperatura de 250-260°C e pressão entre 5-15 MPa. No lado do casco há circulação de água fria para remover o calor da reação, tornando o processo quase isotérmico, isso também gera vapor de alta pressão que pode ser utilizado para outros fins (ASP, 2007).

O processo ICI utiliza um reator adiabático com leito catalítico alimentado com gás de síntese frio com a finalidade de resfriar o reator, no entanto, esse ciclo de resfriamento e aquecimento diminui a eficiência do processo, mas, ainda assim, o reator é muito confiável e

por isso é a tecnologia dominante. A pressão de operação varia em torno de 50 bar a 100 bar e a temperatura entre 230 °C -265°C (ASP, 2007).

Figura 9 – Fluxograma simplificado da produção do metanol



Fonte: Rocha (2015)

2.6 Avaliação do ciclo de vida

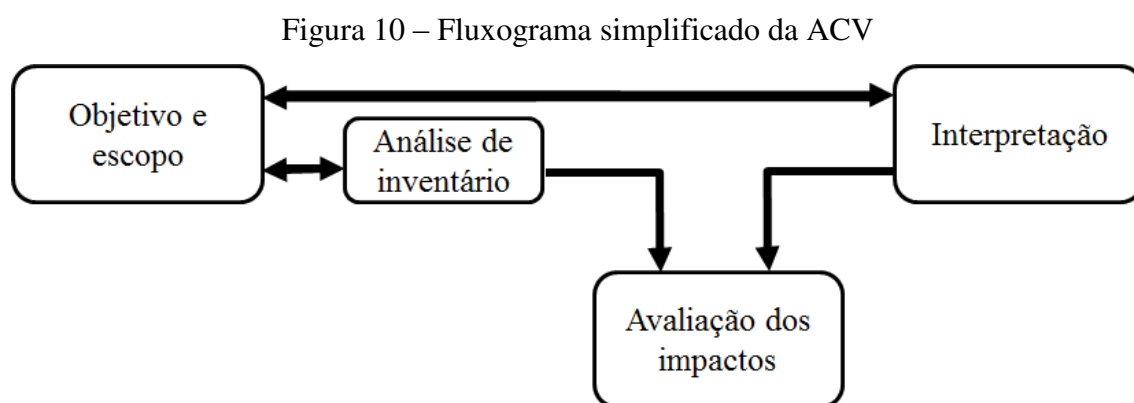
Os estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) abrangem os aspectos ambientais e os potenciais impactos ambientais associados (por exemplo, a liberação de produtos químicos em um rio e a possível mortandade de peixes) ao longo do ciclo de vida do produto, processo ou serviço, desde a extração de recursos naturais para o uso como matéria-prima, passando pelo transporte, fabricação, utilização (consumo), reciclagem e até sua disposição final. Em outras palavras, ACV é uma ferramenta de compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida.

2.6.1 Metodologia de avaliação do ciclo de vida

Neste Seção será apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento do estudo da ACV recomendado pelas normas ISO 14040:2006 – *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework* (ISO, 2006a) e ISO 14044:2006 –

Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines (ISO, 2006b).

A norma ISO 14040:2006 apresenta os princípios gerais e a estrutura para elaboração da ACV, descreve as principais etapas do estudo como definição do objetivo e escopo da ACV, a análise de inventário do ciclo de vida, avaliação dos impactos e interpretação dos resultados, conforme apresentado na Figura 10. Nas seções a seguir, serão explicadas resumidamente cada uma dessas etapas.



Fonte: Chehebe (2002)

Pela Figura 10 percebe-se a interatividade da execução da ACV por meio das setas em ambos os sentidos; à medida que o estudo avança, aumenta o conhecimento do sistema devido ao conjunto de informações e é possível verificar se os objetivos estão sendo alcançados. Em alguns casos, poderá haver a necessidade de modificar o escopo (CURRAN, 1996; ISO, 2006a).

O estudo de ACV é muito complexo porque envolve a coleta, identificação, quantificação, interação e manipulação de muitos dados; então, é necessária a transparência de todas as ações adotadas em cada etapa.

2.6.2 Definição do objetivo e do escopo

Nesta fase inicial deve ser informada quais as razões para a realização do estudo, a quem se pretende comunicar ou apresentar os resultados, a sua abrangência, os limites de caráter temporal e geográfico do sistema e as ações necessárias para garantir a qualidade do estudo.

Na definição do objetivo deve ser descrita qual a aplicação pretendida do estudo e a motivação para a sua realização, bem como o seu público alvo. Já o escopo deverá ser muito

bem elaborado para assegurar um nível de detalhe do estudo compatível e suficiente para alcançar os objetivos traçados. A fim de subsidiar o estudo, conforme a ISO 14044 (ISO, 2006a) e a ISO 14044 (ISO, 2006b), devem ser considerados e descritos os seguintes elementos no escopo:

i. **O sistema do produto a ser estudado** – Conjunto de processos elementares interligados por meio de fluxos de matéria e energia que desempenham uma ou mais funções e modelam o ciclo de vida de um produto. Os fluxos de matéria e energia que entram em cada processo podem ter ou não recebido transformações antrópicas, como também podem ser oriundos de outros sistemas.

ii. **A função do sistema de produto** – A função do produto estabelece a sua utilidade no contexto que será analisado. Em alguns casos, um produto pode ter mais de uma função, mas para estudos de avaliação de ciclo de vida, deve ser estabelecida a função do produto contextualizada no escopo e no objetivo.

iii. **A unidade funcional** – é a unidade quantificada (medida) da função. Quantifica a função definida ao produto de acordo com o escopo da ACV. Esse valor pode ser utilizado como base de cálculo para a quantificação de entradas e saída do sistema. O principal objetivo da unidade funcional é fornecer uma referência para relacionar as entradas e saídas de matéria e energia. Esta referência também é necessária para assegurar a comparabilidade dos resultados da ACV, caso seja realizado dois ou mais estudos de diferentes produtos que desempenham a mesma função.

iv. **Fluxo de referência** – determina a quantidade de produto necessária para cumprir a função na medida estabelecida pela unidade funcional. Para a sua determinação é preciso conhecer o desempenho do produto.

v. **Fronteiras do sistema do produto** - o estabelecimento das fronteiras do sistema do produto é de extrema importância para que o estudo seja eficiente em termos de custos e tempo. A fronteira do sistema define os processos que serão inclusos de acordo com os objetivos e o escopo do estudo, dos pressupostos, das restrições dos dados, dos critérios de exclusão, delimitação da extensão geográfica, da extensão temporal e do nível tecnológico.

A técnica de ACV pode ser aplicada em estudos que incluem apenas uma parte do ciclo de vida do produto. Na Tabela 5, são apresentados alguns tipos de ACV (ISO, 2006b).

Tabela 5 – Tipo de estudo da ACV

Tipo de estudo da ACV	Dimensão do estudo
Berço-ao-túmulo (<i>cradle-to-grave</i>)	Compreende todo o ciclo de vida do produto
Berço-ao-portão da fábrica (<i>cradle-to-gate</i>)	Compreende a extração de recursos naturais para utilização como matéria prima, transporte até a fábrica e fabricação do produto e subprodutos
Portão-ao-portão (<i>gate-to-gate</i>)	Compreende somente os processos presentes dentro da unidade da fábrica
Portão da fábrica ao túmulo (<i>gate to grave</i>)	Compreende a distribuição, o uso e a destinação final do produto (reciclagem, reuso, disposição em aterro, incineração, etc)
Parte específica do ciclo de vida	Compreende a gestão de resíduos ou componentes de um resíduo.

Fonte: ISO (2006a) e Curran (1996).

vi. **Requisitos da qualidade dos dados** – sempre que é desejado utilizar os resultados do estudo de ACV para comparação com diferentes sistemas de produto, devem ser cumpridos os seguintes requisitos de qualidade:

- Cobertura temporal: deve ser informado o período que os dados coletados representam.
- Cobertura geográfica: é a área geográfica considerados para a coleta de informações e os dados sobre os processos envolvidos no ciclo de vida do produto.
- Cobertura tecnológica: especifica a tecnologia do processo ou desenvolvimento do produto no qual os dados adquiridos correspondem.
- Consistência: análise qualitativa da uniformidade da metodologia aplicada no estudo em torno de todos os processos envolvidos no ciclo de vida do produto
- Reprodutibilidade: avaliação qualitativa da dimensão em que as informações sobre a metodologia e os dados apresentados poderão permitir que um indivíduo independente reproduza os resultados relatados no estudo.
- Fonte dos dados: informação da natureza dos dados, indicando se os dados obtidos foram medidos (dados primários), calculados, estimados ou adquiridos pelo uso de outras fontes.

2.6.3 Inventário do ciclo de vida

O inventário do ciclo de vida é a etapa de longe mais trabalhosa porque envolve a compilação de informações sobre as entradas e saídas de matéria e energia, bem como sobre resíduos (sólidos, líquidos e gasosos) gerados nos processos inclusos no sistema do produto. Esse processo é semelhante a um balanço contábil-financeiro, porém as medidas são em termos energéticos ou mássicos (CHEHEBE, 2002; ISO, 2006b). Esta fase basicamente se divide nas seguintes etapas:

- Coleta dos dados - os dados obtidos dos processos inclusos na fronteira do sistema, sejam eles medidos, calculados ou estimadas, são utilizados para quantificar as entradas e saídas. Caso os dados forem estimados, devem ser referenciados os modelos utilizados, o mesmo acontece se os dados forem obtidos por qualquer outra fonte. O procedimento da coleta dos dados deve seguir todos aqueles requisitos já discutidos no tópico anterior (escopo da ACV).

- Tratamento dos dados - são cálculos necessários para a sua validação, associação com os processos unitários e com a unidade funcional.

- Alocação dos dados - este procedimento distribui as contribuições dos fluxos de matéria e energia e dos aspectos ambientais entre os diferentes produtos produzidos. Nos processos industriais em que há a produção de múltiplos produtos ou subprodutos é necessária a aplicação do procedimento de alocação. Então, a cada produto ou subproduto atribui-se uma parte das entradas e saída que o sistema possui. Neste procedimento de alocação são utilizados critérios baseados em grandezas físicas, como massa e volume, ou econômicas.

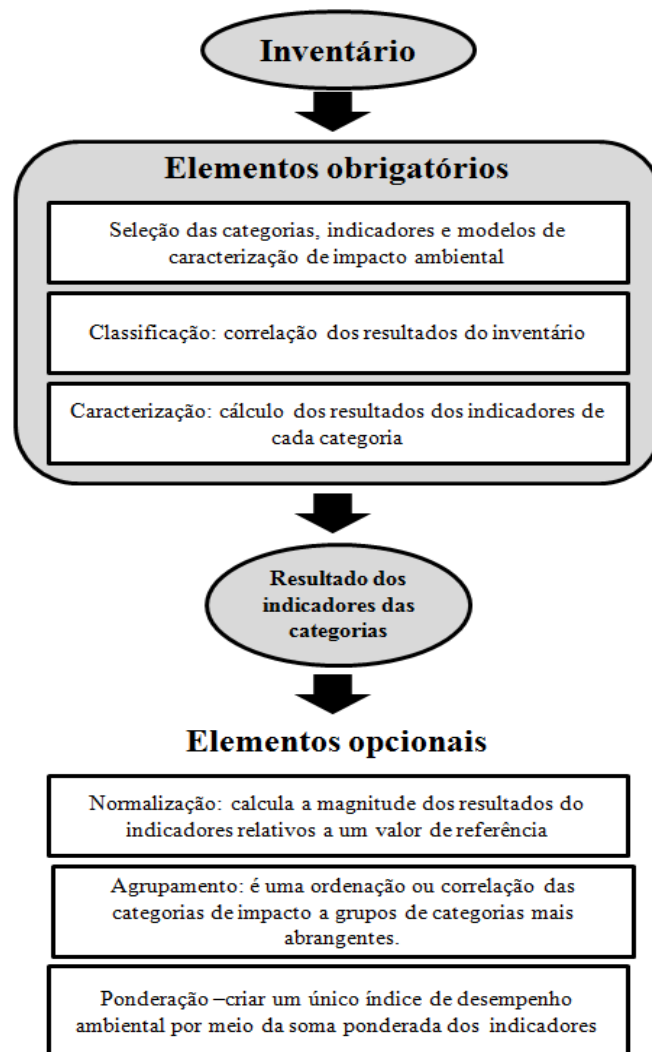
2.6.4 Avaliação dos impactos

No inventário ambiental do ciclo de vida do sistema em estudo são produzidas grandes quantidades de informações complexas por meio da coleta de dados sobre a utilização de recursos naturais e sobre a emissão de resíduos para o ambiente (atmosfera, solo e água). Nesta etapa de avaliação dos impactos é realizada uma associação desses aspectos ambientais com os indicadores de cada categoria ambiental, como, acidificação, aquecimento global, eutrofização, formação fotoquímica de ozônio, entre outras (CURRAN, 1996).

Segundo a ISO (2006b), a etapa de avaliação de impactos do ciclo de vida é composta por elementos obrigatórios e opcionais (Figura 11). Os elementos obrigatórios constituem:

- Seleção das categorias, indicadores e modelos de caracterização de impacto ambiental - consiste em definir quais categorias e indicadores de impacto ambiental serão considerados no estudo, além dos respectivos modelos de caracterização.
- Classificação - relacionar os aspectos ambientais (intervenção ambiental) identificados na etapa do inventário com as respectivas categorias de impacto selecionadas.
- Caracterização - consiste em quantificar a contribuição de cada aspecto ambiental relacionado à determinada categoria ambiental. Essa quantificação é realizada em termos de uma unidade comum para a categoria considerada, permitindo depois o agrupamento em um único valor, o indicador da categoria.

Figura 11 – Elementos da fase de avaliação do impacto do ciclo de vida



Fonte: adaptado da ISO (2006a)

Já como elementos opcionais, a norma estabelece os seguintes:

- Normalização - como os indicadores das categorias de impacto são medidos em unidades diferentes, isso impossibilita uma análise de comparação. Para viabilizar isso, os valores dos indicadores podem ser normalizados (SILVA E KULAY, 2006). A normalização (Equação 15) calcula a magnitude dos resultados do indicador de categoria de impacto relativos a um valor de referência, que por sua vez pode ser global ou regional. Sua principal finalidade é compreender melhor a magnitude relativa do resultado de cada indicador do sistema em estudo, permitindo a verificação das inconsistências e o quão significativo são resultados; e também a comparação entre as categorias de impacto (CHEHEBE, 2002).

$$N_i = \frac{I_i}{I_i'} \quad (15)$$

em que N_i é o indicador normalizado da categoria do impacto ambiental i ; I_i' é o valor de referência para o indicador da categoria do impacto ambiental i e I_i é o indicador da categoria do impacto ambiental i .

- Agrupamento - procedimento em que as categorias de impacto são agregadas em um ou mais conjuntos para facilitar a interpretação. A norma ISO (2006b) sugere as seguintes maneiras para realização do agrupamento: ordenar as categorias de impacto que apresentem características comuns, por exemplo, de caráter regional ou global ou, ainda, compreendido em uma área de proteção; (b) hierarquizar as categorias de impacto de acordo com algum critério de importância, por exemplo, prioridade alta, média ou baixa. O agrupamento pode acrescentar benefícios quanto a apresentação dos dados, reorganizando as informações de uma forma mais compreensível.

- Ponderação - possui a finalidade de criar um único indicador de desempenho, conferindo pesos aos indicadores de cada categoria em termos de sua importância e depois é realizada a soma desses resultados ponderados (Equação 16). A ponderação dos indicadores é baseada em diferentes critérios como localidade, decisões políticas, fatores monetários e padrões ambientais (CHEHEBE, 2002; GUINÉE, 2002). A escolha dos critérios é subjetiva; não é realizada com base científica.

$$P = \sum_i I_i N_i \quad (16)$$

em que P é o índice de impacto ambiental (-); N_i é o peso da categoria do impacto ambiental i (-) e I_i é o valor do indicador da categoria de impacto ambiental normalizado (-).

Como os critérios de ponderação são muito subjetivos, visto que depende das preferências de cada organização envolvida no desenvolvimento da ACV, diferentes resultados podem ser encontrados com os mesmos indicadores. Por isso, todos os dados obtidos antes da ponderação devem estar disponíveis para eventuais consultas.

2.6.5 Interpretação do ciclo de vida

O objetivo da etapa de interpretação do ciclo de vida é a avaliação do conjunto de resultados obtidos no decorrer do estudo, apresentando conclusões de forma clara, consistente, compreensível e em concordância com o escopo e os objetivos definidos. Além disso, são apresentadas as recomendações para melhorar o desempenho ambiental do sistema em estudo.

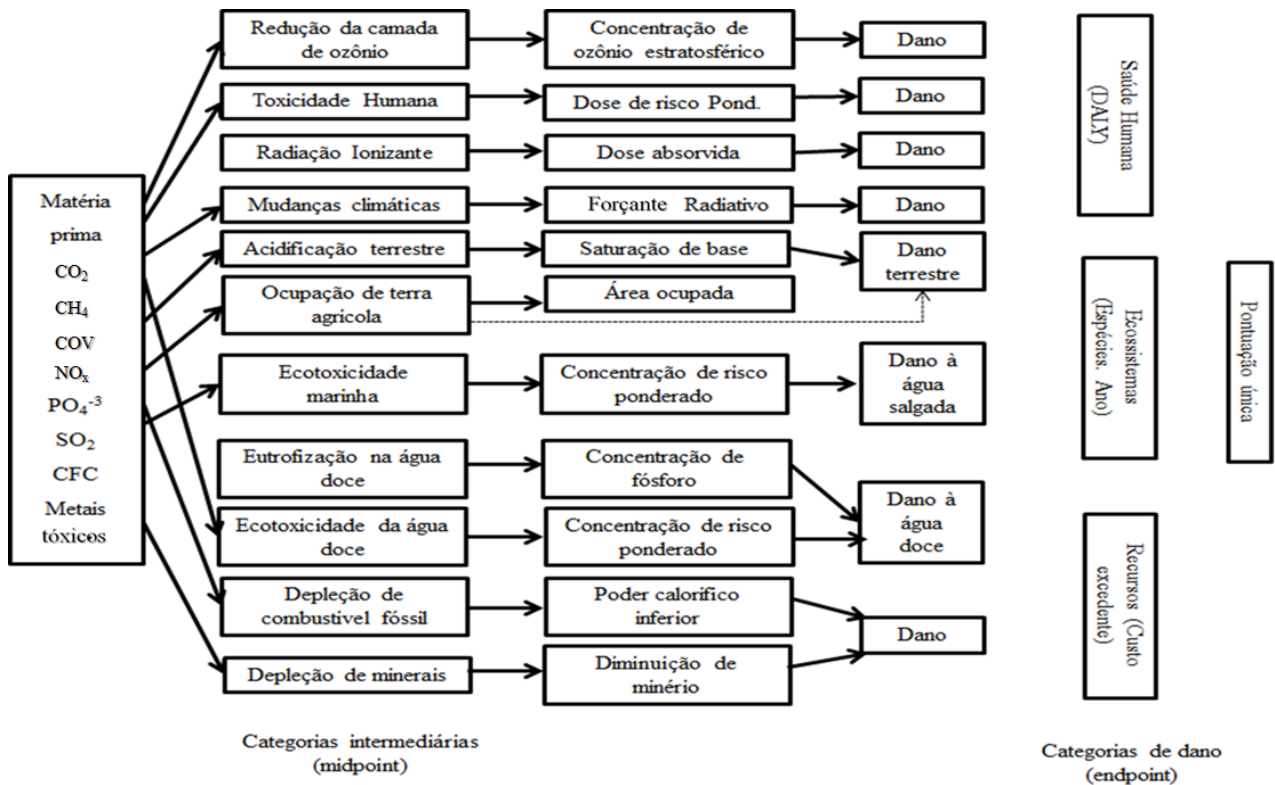
2.7 Categorias de impacto e fatores de caracterização

Para entender melhor o procedimento envolvido na avaliação ambiental dos dados inventariados, no qual são utilizados modelos de caracterização que derivam de diferentes mecanismos ambientais, torna-se necessário o conhecimento desses termos de forma mais detalhada. Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos dos elementos constituintes da classificação e caracterização das categorias de impacto ambiental.

2.7.1 Classificação dos dados do inventário do ciclo de vida

As normas ISOs não especificam as categorias de impacto que devem ser incluídas no estudo de ACV, visto que novos modelos e categorias são propostos com o avanço do conhecimento. A seleção das categorias deve refletir um conjunto abrangente de questões ambientais relacionadas com o sistema em estudo, levando em consideração o objetivo e o escopo da ACV. Na Figura 12 é ilustrado um esquema do procedimento da associação do inventário com as categorias de impacto ambiental.

Figura 12 – Relação entre as categorias de impacto e o inventário do ciclo de vida



Fonte: adaptado de Goedkoop et al. (2008)

2.7.2 Categoria de impacto

As categorias ambientais são representadas quantitativamente por meio de indicadores, que por sua vez estão ligados aos fatores de caracterização que expressam os potenciais impactos ambientais das emissões ou extração de recursos em relação a uma referência (normalmente uma substância) para aquela categoria de impacto ou dano.

Os fatores de caracterização são determinados por meio de modelos de caracterização que estabelecem relações com as categorias de impacto por meio de um mecanismo ambiental causa-efeito. Esses modelos matemáticos representam diferentes níveis da cadeia de impacto (intervenção ambiental até o dano final).

Segundo Guinée et al. (2002), os indicadores de categoria ambiental mais usados são *midpoint* e *endpoint*. *Midpoint* são os indicadores baseados em pontos médios da cadeia causa-efeito, também conhecidos como abordagem orientada ao problema. *Endpoint* são os indicadores baseados em modelos que representam pontos finais da cadeia causa-efeito, também conhecidos como abordagem orientada ao dano. Como exemplo, para entender melhor esta relação, é a emissão de gases de clorofluorcarbono que causam depleção da camada de

ozônio na estratosfera (*midpoint*), resultando um aumento dos níveis de radiações que eventualmente podem causar a morte de certo número de pessoas por câncer de pele (*endpoint*) dependendo da exposição e sensibilidade da pessoa afetada. Na Figura 12 foi apresentado um esquema da cadeia de impacto em que é possível verificar a diferença entre os dois modelos.

Bare et al. (2000) relataram que ambos modelos são relevantes para os estudos de ACV pois a forma da categoria de impacto intermediária permite uma observação separada dos potenciais impactos ambientais e as categorias de dano permitem que sejam mais facilmente entendidas por pessoas não especialistas e pelos tomadores de decisão. A maior discussão é em torno do aumento das incertezas adicionadas a modelagem das categorias de dano, por representar os níveis de efeito final.

2.7.3 Caracterizações de impactos intermediários (*midpoint*)

Na caracterização dos impactos intermediários são quantificadas as contribuições das intervenções ambientais em cada categoria de impacto. Os valores das intervenções ambientais são multiplicados pelos fatores de caracterização para se obter o resultado do impacto na forma de um indicador, como mostra a Equação 17 (GUINEÉ, 2002).

$$I_i = \sum_j C_{ij} \cdot m_j \quad (17)$$

em que, I_i é o indicador do impacto ambiental da categoria i (kg equivalente da substância de referência/ano); C_{ij} é o fator de caracterização da categoria de impacto i para substância j (kg equivalente da substância de referência/kg substância j) e m_j é a intervenção ambiental da substância j (kg da substância j /ano).

Os fatores de caracterização indicam quanto uma substância contribui a determinada categoria de impacto em relação à outra substância de referência (CHEHEBE, 2002). Esses fatores são determinados por meio de modelos matemáticos que estabelecem relações com as categorias (aquecimento global, acidificação, destruição da camada de ozônio, eutrofização, etc) por meio de um mecanismo ambiental.

Existe um consenso com relação aos modelos e fatores de algumas categorias intermediárias como aquecimento global, acidificação, oxidação fotoquímica e redução da camada de ozônio estratosférico. Porém, para outras categorias como o uso da terra, toxicidade

humana e ruído, vários métodos estão em discussão pela comunidade científica e em alguns casos ainda há a necessidade do desenvolvimento de novos modelos. A Tabela 6 apresenta os principais fatores de caracterização.

Tabela 6 – Principais fatores de categorias de impacto intermediários e substâncias de referência

Categoria de impacto intermediária (midpoint)	Fator de caracterização	Indicador da categoria de impacto	Modelos de caracterização
Aquecimento global	Potencial de aquecimento global	kg de CO ₂ equiv. / ano	IPCC
Redução da camada de ozônio	Potencial de redução da camada de ozônio	kg de CFC-11 equiv./ ano	EPA; WMO, Goedkoop e Spriensma (2001)
Acidificação	Potencial de acidificação	kg de SO ₂ equiv./ ano	EPA/USA
Eutrofização aquática	Potencial de eutrofização aquática	kg PO ₄ ⁻³ equiv./ ano	Guinée et al. (2002)
Formação de oxidantes fotoquímicos	Potencial de oxidação fotoquímica	kg de C ₂ H ₄ equiv./ ano	Goedkoop e Spriensma (2001)
Ecotoxicidade aquática	Potencial de ecotoxicidade aquática	kg trietilenoglicol equiv./ ano	Pennington et al. (2006)
Ecotoxicidade terrestre	Potencial de ecotoxicidade terrestre	kg trietilenoglicol equiv./ ano	Pennington et al. (2006)

2.7.4 Caracterização de danos (*Endpoint*)

Esta caracterização modela os pontos finais da cadeia causa-efeito das categorias de dano aos recursos naturais, saúde humana e ecossistemas, avaliando a contribuição de cada uma das categorias de impacto intermediárias (JOLLIET et al., 2003). A expressão matemática utilizada na caracterização de danos é muito semelhante à utilizada para impactos intermediários (Equação 18).

$$D_p = \sum_i C_{ip} \cdot I_i \quad (18)$$

em que D_p é o indicador de dano p (unidade varia com a categoria de dano), C_{ip} é o fator de danos (*endpoint*) da categoria i em relação a categoria de dano p e I_i é o indicador do impacto ambiental da categoria i (kg equivalente da substância de referência/ano).

2.8 Estudos de avaliação do ciclo de vida

Vários estudos sobre as emissões dos GEE da cadeia produtiva do carvão mineral têm sido realizados, tanto para setor energético quanto no setor carboquímico, utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida. Burmistrz et al. (2016) avaliaram a pegada carbono do hidrogênio produzido a partir do carvão sub-betuminoso e linhito, abrangendo as etapas de mineração, processamento, transporte e duas tecnologias de gaseificação de fluxo arrastado - GE Energy/Texaco e Shell. Para o estágio de mineração, os resultados indicaram as menores emissões para o carvão sub-betuminoso igual a 1,94 kg CO_{2eq}/GJ contra 3,24 kg CO_{2eq}/GJ de carvão linhito. Restrepo et al. (2015) realizou um estudo de ACV da produção de carvão obtido de uma mina subterrânea no estado de Santa Catarina/RS. A fronteira do sistema foi limitada as etapas de lavra subterrânea por meio da técnica de câmeras e pilares, transporte do carvão bruto e beneficiamento. Para a categoria de impacto ambiental de aquecimento global, os resultados mostraram que 0,086 kg de CO_{2eq}/kg de carvão energético são emitidos durante a mineração.

Atilgan e Azapagic (2015) realizaram o primeiro estudo de impacto ambiental do ciclo de vida da energia elétrica gerada nas usinas termelétricas a combustíveis fósseis (antracito, linhito e gás natural) na Turquia, responsáveis pelo abastecimento de três quartos da

demanda nacional. Na fronteira do sistema, foram consideradas as etapas da mineração e processamento, transporte, geração de eletricidade, construção e descomissionamento da planta de geração. Os resultados do estudo indicaram que a eletricidade a partir do gás natural possui menor carga ambiental comparado com linhito e antracito para a maioria das categorias de impacto consideradas. Na avaliação da categoria de aquecimento global, o antracito é o maior poluidor.

Liang et al. (2013) desenvolveram uma modelagem completa do ciclo de vida e uma avaliação comparativa de quatro tecnologias de geração de energia a carvão na China – ciclo combinado de gaseificação integrada, geração por ciclo de vapor subcrítico, supercrítico e ultra-supercrítico. O trabalho abrangeu, para avaliação ambiental, as etapas desde a mineração até a geração de energia, além da construção e desativação das termelétricas. A tecnologia de ciclo combinado de gaseificação integrada demonstrou ser a tecnologia mais limpa para a maioria das categorias de impacto ambiental analisadas, porém classifica-se como a tecnologia de mais alto custo de capital devido à sua complexidade. Em média, considerando todas as tecnologias de geração de energia avaliadas, na fase da mineração são emitidos aproximadamente 70,8 kg CO_{2eq}/kWh.

Do mesmo modo, Babbitt e Lindner (2005) produziram um inventário do ciclo de vida do carvão mineral compreendendo os insumos, energia e materiais representativos de 4 usinas termelétricas a carvão da Florida, envolvendo as etapas de mineração (60% lavra subterrânea e 40% lavra a céu aberto), processamento do carvão, combustão e disposição final dos resíduos sólidos. Segundo os autores, a mineração e processamento do carvão foram responsáveis pela liberação de 554,28 kg de CO_{2eq} por tonelada de carvão mineral produzido.

Pelo que pôde ser observado, vários estudos de ACV de carvão mineral foram encontrados na literatura, os quais na maioria das vezes consideraram a etapa de mineração na fronteira do sistema, entretanto, raramente detalhes essenciais das atividades da mineração que afetam o impacto do aquecimento global foram levados em conta, ou seja, a mineração é representada como uma caixa-preta. Algumas omissões importantes incluem o método de mineração, atividades e processos utilizados na mineração e as emissões fugitivas.

Qin et al. (2016) desenvolveram um estudo da pegada de carbono do ciclo de vida do metanol produzido pelo carvão mineral na China. O escopo estabelecido foi *cradle-to-gate*, compreendendo as etapas da mineração, cominuição e separação do carvão, transporte do carvão e, por fim, produção do metanol. Os dados foram obtidos por fontes secundárias e por meio da simulação no *software* Aspen Plus. Os autores concluíram que a pegada de carbono do ciclo de vida foi igual a 2,971 kg CO_{2eq}/kg de metanol, sendo que a etapa de produção de

metanol foi a maior contribuinte para as emissões, com uma participação de 92,86%, seguido pelo processo de mineração de carvão com 4,34%. As etapas de gaseificação e condicionamento foram as principais geradoras de gases de efeito estufa, representando 21,26% e 52,80% da emissão do ciclo de vida, respectivamente; enquanto a unidade de síntese de metanol mostrou o potencial de utilização de CO₂ e redução de emissões. Este trabalho apresentou de forma detalhada as emissões oriundas da etapa da produção do metanol, entretanto, o mesmo nível de detalhamento não foi realizado na etapa de mineração e transporte.

Xiao et al. (2009) desenvolveram um trabalho sobre o desempenho ambiental da produção do metanol da palha de arroz na China. O escopo definido no estudo foi *gate to grave*, compreendendo as etapas desde o cultivo do arroz, transporte, produção do metanol e consumo do metanol em veículos. Os dados são oriundos de fontes secundárias e por meio da simulação no *software* Aspen Plus. Os resultados indicaram que as emissões do ciclo de vida do metanol da palha de arroz é igual a 2,4 kg CO_{2eq}/kg metanol. Na análise dos resultados, os autores não consideraram as emissões de CO₂ oriundas do processamento da palha como neutra na etapa de produção do metanol.

Outros trabalhos sobre avaliação das emissões dos GEE no ciclo de vida do biometanol⁷ produzido pela rota termoquímica (gaseificação) foram encontrados na literatura (XIAO et al., 2009; SUNTANA et al., 2009; RENO et al., 2011; ISAKSSON et al., 2012; PEDUZZI et al., 2013), no entanto, algumas fontes de emissões de GEE relevantes não foram consideradas, como emissões indiretas, emissões de CH₄ evitadas pela decomposição da biomassa (no caso de biomassa residual), emissões do carbono neutro procedente da processamento da biomassa na etapa da produção do metanol, e a real disponibilidade da biomassa em função da distância até a planta de metanol.

⁷ Metanol produzido por biomassa

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA GERAL

Neste capítulo é apresentada a metodologia geral realizada para alcançar os objetivos desta tese de doutorado. O trabalho investiga o impacto ambiental da cadeia do metanol produzido a partir do carvão mineral e biomassa com base na metodologia de ACV da ISO 14040 e 14044 (ISO, 2006a, ISO, 2006b). A ACV aborda os aspectos ambientais e os potenciais impactos ambientais associados ao ciclo de vida de produtos, processos ou serviços, ou seja, é uma ferramenta que compila e avalia os insumos, saídas e possíveis impactos ao longo do seu ciclo de vida, conforme foi explicado na Seção 2.6.

O estudo foi estruturado com base no aproveitamento do carvão mineral da jazida de Candiota⁸, maior reserva de carvão da América Latina, localizada no sul do estado do Rio Grande do Sul, e com o aproveitamento da biomassa residual disponível nas lavouras de arroz e pelas unidades de beneficiamento do cereal na região próxima a jazida, visto que esta região é responsável por uma parcela importante da produção de arroz no cenário nacional. Ambas matérias-primas são destinadas a uma planta de metanol hipotética localizada ao lado da Jazida.

O estudo emprega o escopo do berço-ao-portão de fábrica (*cradle-to-gate*), desta forma, a análise inicia-se pela coleta das matérias primas até a produção do metanol, já as etapas de distribuição e consumo do metanol não são consideradas. Todas as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O oriundas tanto de fontes biogênicas quanto do consumo de insumos (fertilizantes) agrícolas e energéticos para o plantio, cultivo, coleta, transporte e processamento do arroz são correspondentes ao ciclo de vida do arroz beneficiado; ou seja, essas emissões não fazem parte da cadeia das biomassas residuais (casca e palha).

A fim de atender aos objetivos propostos, foram realizados seis estudos de ACV:

- 1) Carvão mineral extraído a céu aberto
- 2) Rota da palha de arroz
- 3) Rota da casca de arroz
- 4) Cenário A: produção do metanol – 100% carvão
- 5) Cenário B: produção do metanol – 70% carvão mineral e 30% palha de arroz
- 6) Cenário C: produção do metanol – 70% carvão mineral e 30% casca de arroz

As ACVs das matérias-primas (1, 2 e 3) foram realizadas com a finalidade de conhecer de forma detalhada todos os processos, atividades e insumos relevantes em relação as

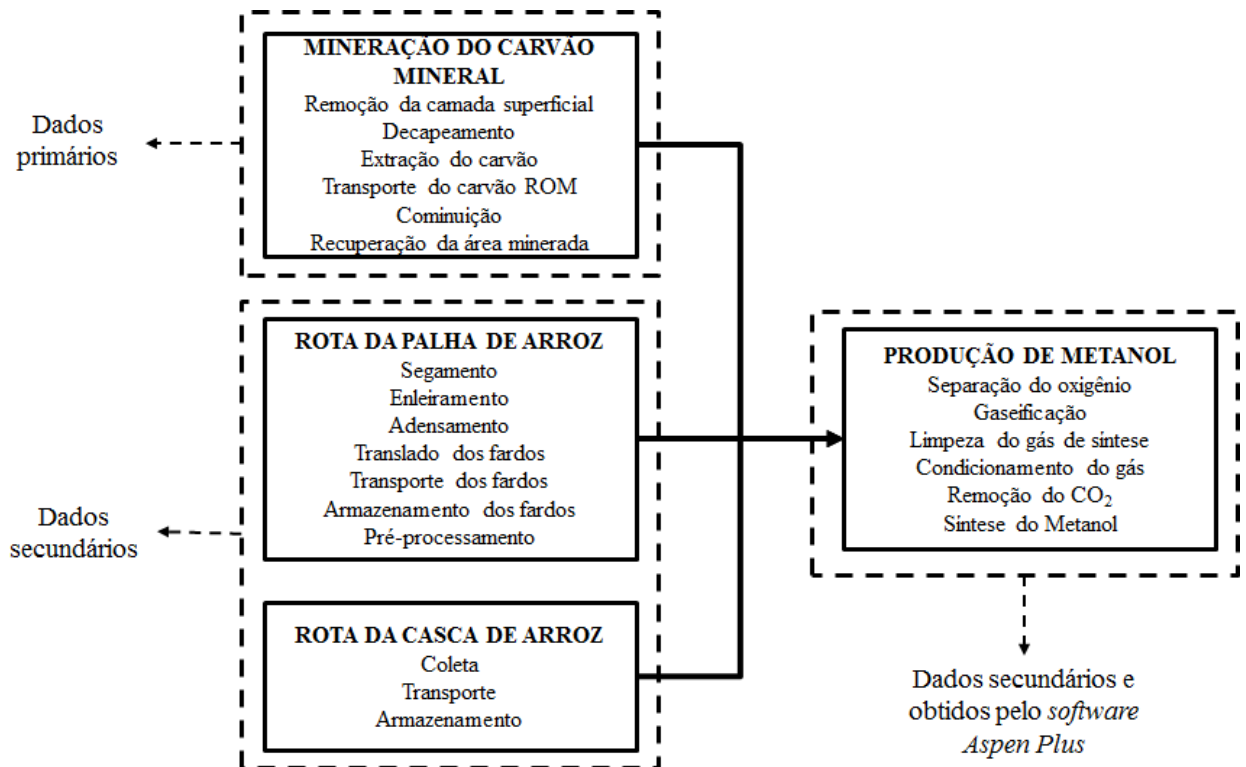
⁸ Mais informações sobre a Jazida de Candiota e a sua mineração são apresentados na Seção 4.1.

emissões dos GEE, embora o foco do trabalho seja avaliar as medidas de mitigação propostas nos modelos 5 e 6 e compará-las com o modelo de referência (4). A definição das fronteiras diretas e indiretas do sistema, qualidade dos dados, cobertura geográfica e temporal, unidade funcional, critérios de corte, gases emitidos, fatores de emissões, entre outros elementos importantes, são inerentes de cada sistema. Por esse motivo, nos Capítulos 4 e 5 serão explicados minuciosamente cada um deles.

3.1 Dados de entrada e condições de contorno

O inventário do ciclo de vida do metanol é baseado em dados coletados in situ, em pesquisas na literatura e simulações computacionais (Figura 13). A construção do inventário do carvão minerado a céu aberto foi baseado em dados primários, fornecidos pela maior Companhia de Mineração de Carvão do Brasil, importante contribuição desta tese devido à ausência de tal informação na literatura com nível de detalhamento realizado aqui. O inventário das biomassas baseou-se em dados da literatura e da região na qual está sendo realizado o estudo.

Figura 13 – Fonte dos dados do inventário do ciclo de vida



Em todos os sistemas foi dada atenção aos principais insumos energéticos, insumos químicos e agrícolas consumidos. Foram consideradas também as etapas de produção e transporte desses insumos das unidades fornecedoras até a unidade de metanol hipotética. A identificação do consumo de óleo diesel foi realizada minuciosamente, dado que a sua contribuição para as emissões dos GEE é muito relevante.

As emissões oriundas dos diferentes processos e atividades em cada sistema foram estimadas, em sua grande maioria, utilizando os métodos propostos pelo IPCC e por pesquisadores que retratam as condições brasileiras. O método utilizado em cada ACV é apresentado no Capítulo 4.

A avaliação do impacto ambiental do ciclo de vida possui a finalidade de transformar os aspectos ambientais (neste estudo são as emissões dos GEE) descritos no inventário do ciclo de vida em potenciais impactos ambientais. Para tanto, é necessário utilizar metodologias que modelam o caminho da emissão de uma substância dentro de um mecanismo ambiental (EC-JRC, 2010). Nesta tese foi analisada a categoria de impacto ambiental de aquecimento global e utilizada a metodologia e os fatores de caracterização (GWPs) do IPCC, proposta no 5º Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2013). Os GWPs indicam o quanto um GEE específico contribui para o aquecimento global em comparação com o CO₂ (substância de referência). Os principais GEEs considerados no presente estudo foram o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Para um horizonte de 100 anos (GWP-100), o GWP para CO₂, CH₄ e N₂O são 1 kg CO₂/kg CO₂, 34 kg CO₂/kg CH₄ e 298 kg CO₂/kg N₂O, respectivamente. Deste modo, é possível expressar todos os GEEs com base em CO_{2eq}, conforme a Equação 19:

$$E_{GEE} = \sum_j GWP_j \cdot m_j \quad (19)$$

em que E_{GEE} é o indicador de emissão dos GEE (kg CO_{2eq}); GWP_j é o fator de caracterização do GEE (kg CO_{2eq}/kg GEE) e m_j é a quantidade do GEE (kg).

Todos os cálculos referentes ao inventário e avaliação dos impactos foram realizados no *software Microsoft Excel 2013*.

3.2 Mitigação das emissões

Foi analisada a mitigação das emissões que podem ocorrer no sistema alimentado com as matérias-primas renováveis. Para determinar a mitigação foram consideradas as emissões evitadas de CH₄ pela decomposição anaeróbica das biomassas que deixaram de ser depositada no solo, e pelas emissões evitadas de CO₂ pela substituição do carvão mineral por biomassa na etapa de produção do metanol. Importante destacar que para realizar o balanço do CO_{2eq}, deve-se considerar todas as etapas envolvidas, desde a coleta da biomassa até a etapa de conversão do gás de síntese em metanol, dado que, muitos insumos e processos demandados constituem-se como fontes de emissões e, desta forma, não podem ser desconsiderados na avaliação global.

O aproveitamento da palha de arroz como matéria prima para um determinado processo, por exemplo, combustão, geração de gás de síntese, entre tantos outros, evita a sua decomposição microbiana na lavoura e, conseqüentemente, a liberação dos GEE produzidos como CO₂, CH₄ e traços de N₂O biogênicos para atmosfera. Segundo Agostinetti et al. (2002), apenas uma parcela do carbono constituído na biomassa é emitida para a atmosfera; a outra parte é transferida para o solo. Neste trabalho somente o CH₄ foi contabilizado para a análise das emissões evitadas, pois o CO₂ biogênico faz parte do ciclo natural e não contribui para o aumento do aquecimento global. Já o N₂O não foi considerado em razão da sua baixa concentração gerada na decomposição⁹ em comparação com o CH₄ e, também, porque não foi encontrado um modelo matemático para a sua estimativa (IPCC, 2006c).

Há basicamente dois modelos para estimativa das emissões evitadas de CH₄ pela decomposição de resíduos sólidos orgânicos: método de balanço de massa e o método de decaimento de 1º ordem (Equação 20), sendo que este último fornece resultados mais precisos, o que justificou a sua escolha para aplicação neste trabalho (IPCC, 2006c).

$$BE_{CH_4,y} = GWP_{CH_4} \cdot \varphi \cdot (1 - OX) \cdot \frac{16}{12} \cdot F \cdot DOC_f \cdot MCF \cdot \sum_{x=1}^y \sum_j W_{j,x} \cdot DOC_j \cdot e^{-kj \cdot (y-1)} \cdot (1 - e^{-kj})$$

(20)

⁹ Embora as emissões de N₂O da decomposição das biomassas residuais sejam baixas, se fossem estimadas, as emissões evitadas seriam ainda maiores, principalmente porque o fator de caracterização (potencial de aquecimento global) do N₂O é muito superior ao do CH₄.

em que $BE_{CH_4,y}$ é a quantidade de emissões de metano evitado da decomposição da biomassa pelo período y (kg CO_{2eq}), GWP_{CH_4} é o potencial de aquecimento global do metano (34 kg CO_2/kg CH_4), φ é o fator de correção devido as incertezas do modelo, OX é fator de oxidação do metano no local em que está disposto (-), F é a fração volumétrica de metano no gás gerado na decomposição (-), DOC_f é a fração do carbono orgânico degradável que se decompõe em condições anaeróbica (-), MCF é fator de correção do metano para decomposição aeróbica (-), $W_{j,x}$ é a quantidade da biomassa j (kg), DOC_j corresponde a fração de carbono orgânico degradável (fração mássica) da biomassa j , k_j é a taxa de decaimento da biomassa j (1/ano), j corresponde ao tipo de resíduo/biomassa e y é o período para o qual as emissões de metano são calculadas (ano). Mais detalhes sobre a definição de cada parâmetro são apresentados no Apêndice A.

Este modelo de decaimento de 1° ordem pressupõe que o carbono orgânico degradável dos resíduos sólidos descartados em um determinado local decompõe-se lentamente durante algumas décadas, formando o CH_4 . Se as condições forem constantes, a taxa de produção de CH_4 depende unicamente da quantidade de carbono restante no resíduo sólido. Como resultado, as emissões de CH_4 são mais elevadas nos primeiros anos após o descarte, depois diminuem gradualmente à medida que o carbono degradável no resíduo é consumido pelas arqueas responsáveis pela sua decomposição. A transformação dos compostos degradável em CH_4 e CO_2 é por uma cadeia de reações em paralelo. Um modelo completo provavelmente seria muito complexo, no entanto, estudos laboratoriais e de campo sobre a geração de CH_4 indicaram que o processo geral de decomposição pode ser representado pela cinética de primeira ordem (IPCC, 2006c).

3.3 Software Aspen Plus

Aspen Plus é um programa de simulação de processo utilizado para prever o desempenho real dos processos químicos. Neste trabalho, o ASPEN é empregado para simular o processo de gaseificação e a rota tecnológica de produção de metanol e, ainda, para analisar o fluxo de CO_{2eq} nas correntes de processo. Muitos pesquisadores recorrem ao programa Aspen Plus para simular a gaseificação e a produção de metanol. Nikoo e Mahinpey (2008) desenvolveram um modelo para a gaseificação de biomassa em um gaseificador de leito fluidizado atmosférico. O modelo apresenta expressões cinéticas e hidrodinâmicas que foram desenvolvidas baseadas em dados experimentais e implementadas por sub-rotinas em Fortran.

Doherty et al. (2009) simulou a gaseificação de um leito fluidizado circulante utilizando um modelo composto pelas etapas de secagem, pirólise, oxidação e redução. Ramzan et al. (2011) simularam uma rota tecnológica composta por três etapas: secagem da biomassa, decomposição da biomassa em compostos elementares e gaseificação baseado na minimização de energia livre de Gibbs. Sreejith et al. (2013) também desenvolveram um modelo de equilíbrio com base na minimização da energia livre de Gibbs para modelar a gaseificação da madeira. Moghadam et al. (2014) simularam um gaseificador de leito fixo com base no equilíbrio químico.

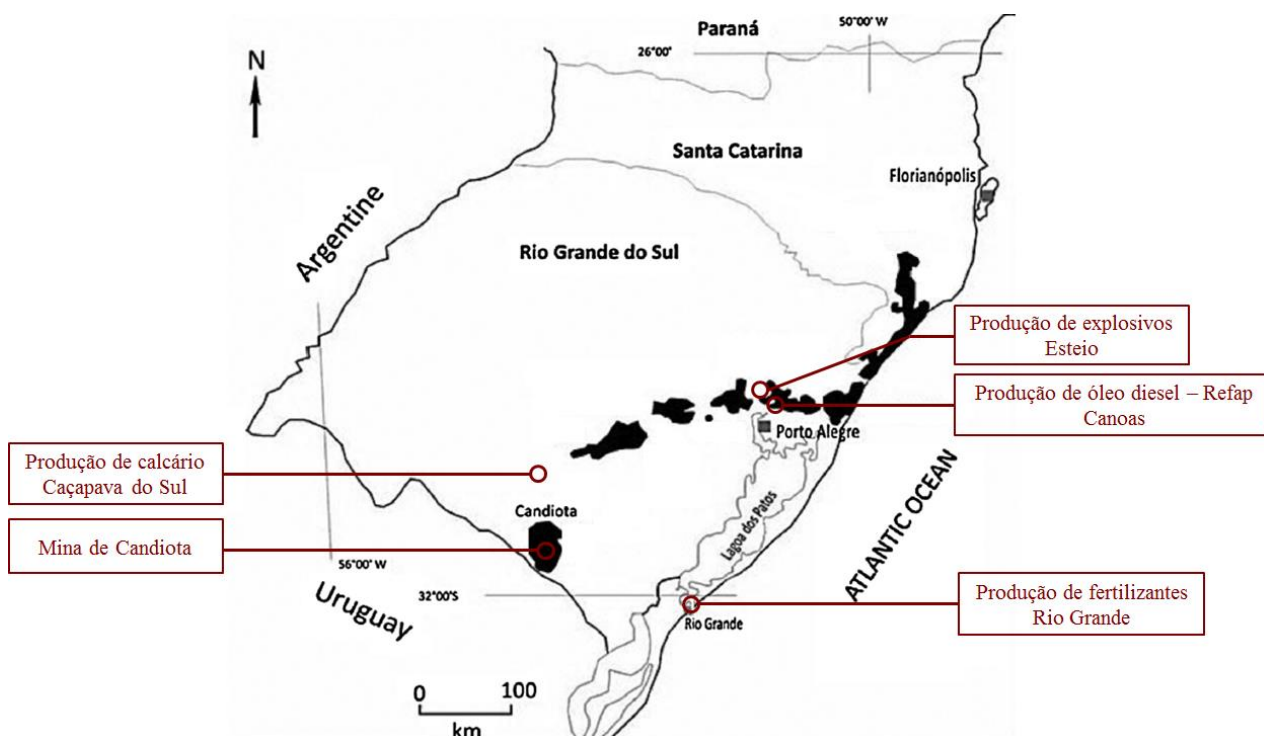
Todas as premissas assumidas para o desenvolvimento do modelo de gaseificação e síntese de metanol são explicadas no capítulo 4.4.

CAPÍTULO 4 – ANÁLISE GERAL DOS PROCESSOS

4.1 Ciclo de vida do carvão mineral

Nesta Seção é apresentada a análise geral da rota do carvão mineral, que será utilizado para produção de metanol, baseada em informações e dados primários fornecidos¹⁰ pela Companhia Riograndense de Mineração (CRM), maior empresa de mineração de carvão do Brasil, que possui capacidade instalada de produção de $3,30 \times 10^6$ t/ano de carvão mineral, localizada no município de Candiota (Figura 14), no sul do estado do Rio Grande do Sul.

Figura 14 – Localização da mina de Candiota e unidades de produção dos insumos consideradas no ciclo do carvão mineral



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2010)

A extração de minérios de carvão envolve técnicas de mineração superficial (a céu aberto) ou subterrâneas. O método selecionado depende de uma variedade de fatores, incluindo a natureza, localização, tamanho e profundidade da jazida (NORGATE and HAQUE, 2010). A operação de mineração de superfície constitui basicamente em dois estágios distintos, remoção

¹⁰ As informações e os dados primários foram obtidos por meio de relatórios técnicos de gerenciamento e visitas *in situ* na CRM – Unidade de Candiota.

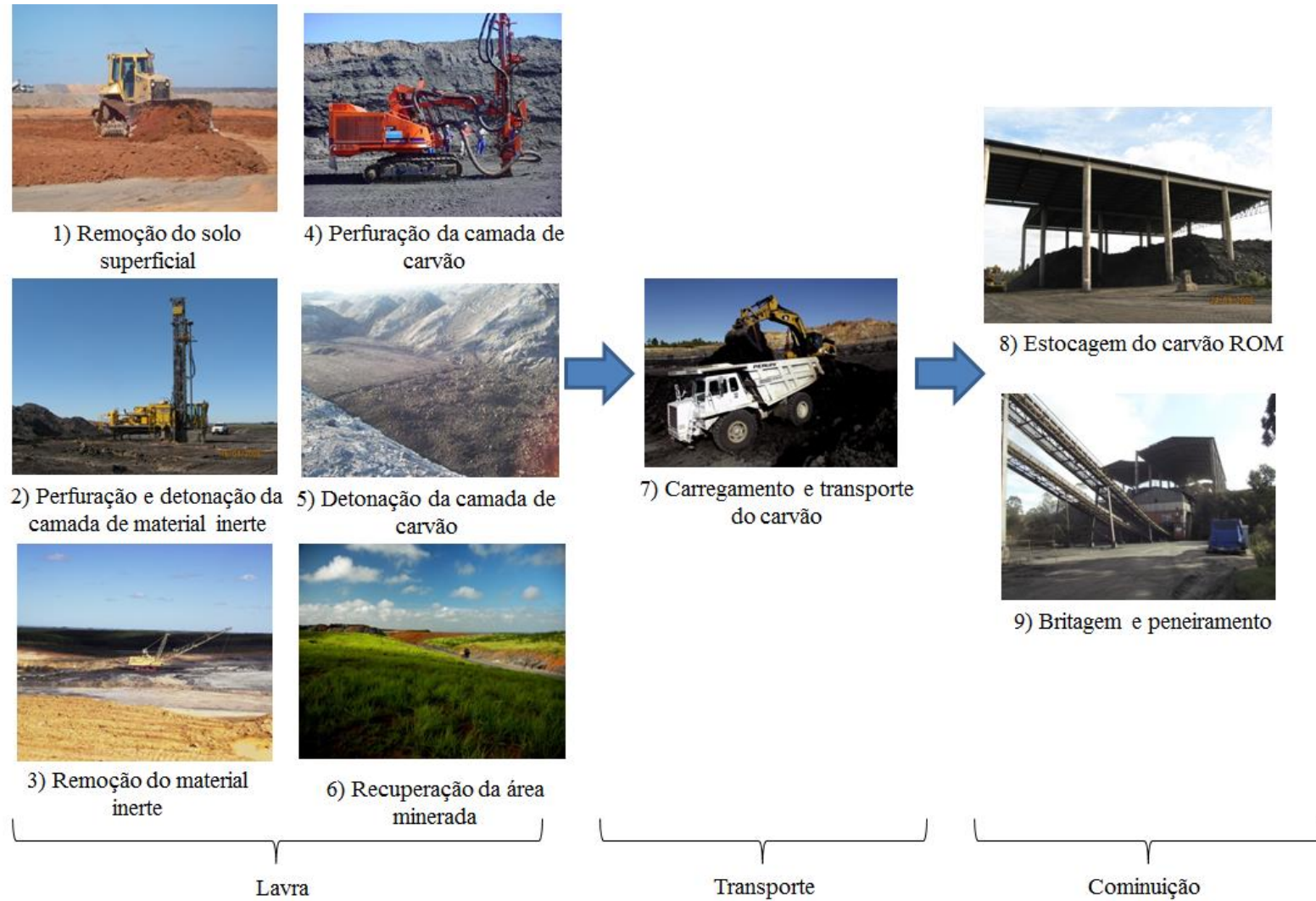
de sobrecarga e exploração de carvão, além da recuperação da área. Há uma série de equipamentos e métodos de mineração utilizados para ambos os propósitos, que dependem de uma série de fatores para uma determinada mina.

A jazida de Candiota possui espessura média de leitos de carvão de 4,5 m e coberturas menores que 50 m, conjuntura que permite a utilização da mineração a céu aberto pelo método de lavra em tiras (*strip mining*), o que facilita a sua extração em relação aos aspectos econômicos. Nesse método são movimentados grandes volumes de estéril por tonelada de carvão que podem provocar sérios impactos ambientais negativos caso a lavra e a recuperação da área degradada não sejam planejadas e executadas adequadamente.

4.1.1 Descrição dos processos de mineração

Uma descrição da rota tecnológica da mineração do carvão a céu aberto foi realizada nas próximas Seções para facilitar a identificação, quantificação e análise dos principais aspectos ambientais de entrada e saída relacionados ao aquecimento global. A extração do carvão é composta basicamente pelas etapas de mineração, transporte e cominuição e subdividida em: (1) remoção do solo superficial, (2) perfuração e detonação da camada de material inerte, (3) remoção do material inerte, (4) perfuração da camada de carvão, (5) detonação da camada de carvão, (6) recuperação da área minerada, (7) carregamento e transporte do carvão bruto, (8) estocagem do carvão bruto e (9) britagem e peneiramento. Na Figura 15 são apresentadas as principais etapas da mineração que serão detalhadas nas próximas seções.

Figura 15 – Etapas da mineração superficial e processamento do carvão



4.1.1.1 Caracterização físico-química

As características físico-químicas do carvão mineral dependem dos eventos ocorridos durante a acumulação vegetal na turfeira e da sua história orogênica (WCA, 2017). Cada jazida possui suas peculiaridades, refletindo nas características do carvão *in situ* e nos produtos beneficiados. A Tabela 7 mostra os valores médios da composição físico-química do carvão expedido (em base seca). Segundo a classificação da ASTM, o carvão é do tipo sub-betuminoso C (GAVRONSKI, 1997; KALKREUTH et al., 2006; SILVA et al., 2010).

Tabela 7 – Caracterização físico-química do carvão mineral

<i>Análise imediata</i>	<i>MD±DP</i>	<i>Unidade</i>
Umidade total	16±0,00	%
Cinza	54,04±2,03	%
Matéria volátil	21,55±2,46	%
Carbono fixo	24,36±2,95	%
Poder calorífico superior	12878,35±831,6	kJ/kg
<i>Análise elementar</i>		
Carbono	33,72±1,26	%
Hidrogênio	2,34±0,06	%
Nitrogênio	0,66±0,12	%
Enxofre total	1,35±0,36	%
Enxofre pirítico	0,84±0,38	%
Enxofre sulfático	0,11±0,07	%
Enxofre orgânico	0,44±0,22	%
Oxigênio	8,96±0,92	%

Dados médios referentes ao carvão extraído pelo período de 10 anos. Fonte: Gavronski (1997).

O elevado teor em cinza dificulta o transporte para locais muito distante da mina por se tornar muito oneroso; desta forma, a unidade de produção de metanol hipotética deve ser instalada próxima a mina, como já acontece com as usinas termelétricas na região.

4.1.1.2 Remoção da camada superficial

A primeira etapa da mineração do carvão é a remoção superficial, cuja camada é de aproximadamente 40 cm, e separação do solo orgânico para que não seja misturado com o material inerte nas demais operações de lavra, pois posteriormente será utilizado como base orgânica para a recuperação da camada vegetal em outras áreas mineradas com topografia já reconstituída. As operações de remoção ocorrem com trator esteira e escavadeira hidráulica e o transporte com caminhão de pequeno porte.

4.1.1.3 Decapeamento

No decapeamento ocorre a remoção do material inerte constituído de argilitos, folhetos e arenitos, processo que antecede a lavra da primeira camada de carvão. Nesta etapa são utilizados explosivos para detonar em média 780 t de material/mês; as malhas são executadas de 5 x 8 m de furação de 0,19 m de diâmetro, realizadas por meio de perfuratrizes rotativas. A relação média de estéril/minério é inferior a 2 m³/t de carvão bruto. Todo o material inerte fragmentado é removido pela draga de arraste (escavadeira *dragline*), com auxílio do trator esteira, e colocado sobre uma cava adjacente de onde o carvão já foi extraído.

4.1.1.4 Extração do carvão

Depois da operação de decapeamento, os dois bancos de carvão que formam a camada Candiota são extraídos em operações separadas, após o desmonte com explosivos. O consumo anual de explosivo, considerando o desmonte da cobertura e das camadas de carvão, é em média igual a 1095460 t. Para a perfuração da camada de carvão são utilizadas carretas roto-percussivas para perfurar aproximadamente 8000 m/mês, com profundidade média de 2,65 m, e detonados em média 150000 m³ de carvão mensalmente, com malha de furação para desmonte de 3 x 6 m com diâmetro de 0,10 m. O material estéril intermediário (basicamente argilito) é escarificado com trator de esteira e transportado, em caminhões fora-de-estrada basculantes, até uma área já minerada para recuperação topográfica. A drenagem é realizada por gravidade, porém na ocorrência de precipitação, são utilizadas bombas hidráulicas.

4.1.1.5 Transporte do carvão bruto

Após o desmonte do carvão, o seu carregamento é realizado por escavadeiras hidráulicas e transportado por caminhões fora-de-estrada e caminhões tipo rodoviário até a unidade de cominuição. A distância percorrida pela frota depende de onde esteja localizada a mina; neste estudo foi assumido 10 km, considerando o percurso de ida e volta.

4.1.1.6 Cominuição e transporte do carvão

A etapa de cominuição possui a finalidade de homogeneizar o tamanho do carvão mediante os processos de britagem e peneiramento por meio de britadores primários e secundários e um conjunto de peneiras. O carvão é encaminhado para uma moega que alimenta o britador primário de mandíbulas; o produto é conduzido por gravidade para um circuito composto pela sequência: peneira primária, britador secundário de duplo rolo dentado; peneira secundária; britador terciário de duplo rolo dentado. Todos os equipamentos estão em série e são alimentados por energia elétrica. Na sequência, o carvão é enviado à planta de metanol por correias transportadoras. A capacidade nominal da unidade de cominuição é de 400 t/h e o produto final é um carvão com granulometria menor que 50 mm. Nota-se que todo o carvão bruto é expedido, pois não ocorre geração de rejeitos no processo.

4.1.1.7 Recuperação da área minerada

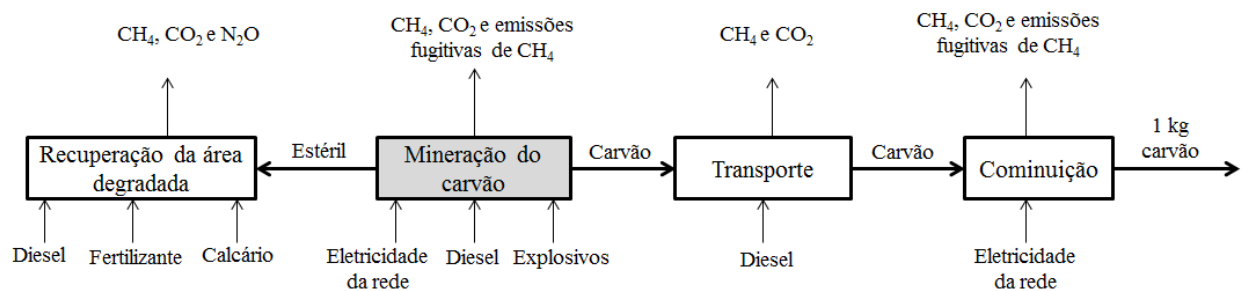
A recuperação da área minerada ocorre de forma sistemática e concomitantemente ao desenvolvimento da lavra, sendo que a cava primeiramente é impermeabilizada com material argiloso, logo é preenchida com cinza proveniente da planta de metanol (resíduos sólidos da gaseificação e da fornalha da caldeira) e recoberta por camadas de material do decapeamento (folhetos e arenitos) e solo vegetal e, por último, ocorre a revegetação com gramíneas e árvores nativas da região. Para a correção do pH e macronutrientes do solo são utilizados calcário dolomítico e fertilizante NPK 5,20,20 (nitrogênio, fósforo e potássio), respectivamente. Na recomposição topográfica, procura-se deixar o terreno com os contornos mais próximo possível do original ou característico da região.

4.1.2 Escopo do estudo

O escopo do ciclo de vida do carvão está compreendido numa análise *cradle-to-gate*, considerando as etapas de mineração a céu aberto, transporte do carvão, cominuição do carvão e recuperação da área minerada, assim como as etapas de produção e transporte dos insumos. Em relação ao escopo espacial, na Figura 14 é mostrada a localização aproximada da mina de Candiota e das instalações industriais que fornecem os principais insumos (óleo diesel, explosivo, calcário e fertilizante) para a mineradora. No que se refere ao escopo temporal, os dados são relativos aos anos de operação de 2015 e 2016, com uma produção média de 183500 t/mês de carvão, operando em três turnos, 24 horas/dia, de segunda a sexta-feira e em sábados alternados. Os insumos e emissões referentes a construção de infraestrutura e fabricação de materiais não foram consideradas. A unidade funcional definida foi 1 kg de carvão mineral expedido.

A mineração de carvão é um processo complexo que envolve um número importante de suprimentos em cada etapa. Por esta razão, é importante identificar quais entradas são mais representativas do ponto de vista do impacto de aquecimento global. Como resultado desta análise, na Figura 16 é mostrado um fluxograma com as principais entradas e emissões dos GEE dos processos da mineração.

Figura 16 – Fluxograma dos insumos e emissões na mineração do carvão



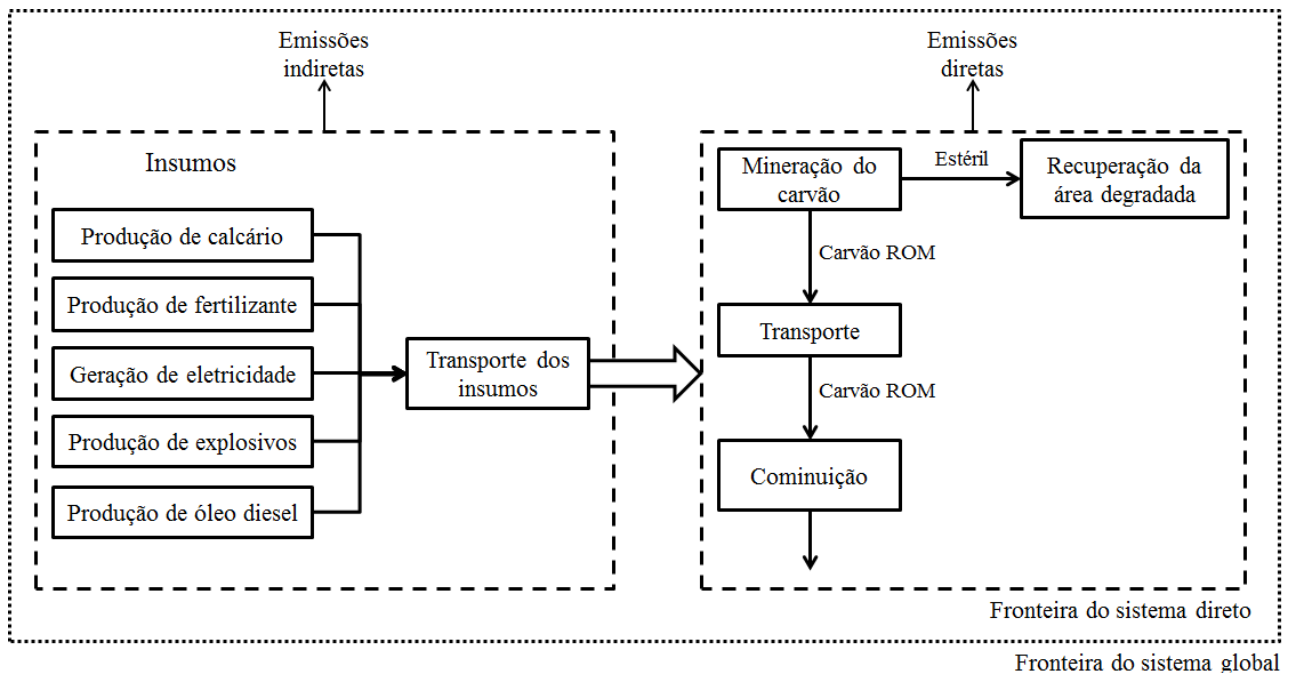
A fim de realizar uma análise das emissões diretas e indiretas, os processos compreendidos no escopo do estudo foram identificados e classificados nas fronteiras do sistema, conforme apresentado na Figura 17. A classificação das emissões em diretas e indiretas foi definida de acordo com as recomendações da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2017):

- Emissões diretas: emissões relativas ao consumo de combustível nas operações de mineração e transporte do carvão bruto; emissões procedentes da detonação dos explosivos;

emissões procedentes da aplicação do fertilizante nitrogenado e do calcário dolomítico no solo e emissões fugitivas dos leitos de carvão e nas etapas de cominuição.

- Emissões indiretas: emissões relativas a produção dos insumos (fertilizante NPK, calcário, óleo diesel e explosivo); emissões procedentes do consumo de combustível pelos caminhões durante o transporte dos insumos e emissões procedentes da geração da eletricidade consumida nas operações de mineração.

Figura 17 – Fronteiras do sistema da produção do carvão mineral



4.1.3 Inventário do ciclo de vida do carvão

Nas Tabelas 8 e 9 são resumidas as quantidades médias dos insumos consumidos na mineração do carvão pelo período de dois anos de operação da CRM. Na Tabela 8 é mostrado o consumo de óleo diesel e eletricidade por equipamento em cada estágio, e na Tabela 9 é apresentada a quantidade total consumida ao longo do ciclo, ambos para produção de 1 kg de carvão. Detalhes dos equipamentos e consumo energético podem ser consultados no APÊNDICE B.

Tabela 8 – Consumo¹ de óleo diesel e eletricidade por equipamento de mineração para produção de 1 kg de carvão bruto

Etapa	Fonte	Indicador	Unidade
Mineração	Perfuratriz	$6,12 \times 10^{-05}$	kg
	Trator esteira	$1,51 \times 10^{-04}$	kg
	Pás carregadeiras	$8,25 \times 10^{-05}$	kg
	Escavadeira hidráulica	$1,25 \times 10^{-04}$	kg
	Motobomba	$2,13 \times 10^{-05}$	kg
	Escavadeira <i>Dragline</i>	$1,15 \times 10^{-03}$	kWh
	Escavadeira <i>Shovel</i> P&H	$4,00 \times 10^{-05}$	kWh
Transporte do carvão bruto	Caminhão basculante (30 t)	$4,93 \times 10^{-05}$	kg
	Caminhão fora-de-estrada (65 t)	$3,03 \times 10^{-04}$	kg
Revegetação	Trator agrícola	$8,50 \times 10^{-07}$	kg
Cominuição	Britadores e peneiras	$4,80 \times 10^{-04}$	kWh

¹O consumo dos insumos foram estimados por meio dos dados de operação fornecidos pela CRM.

Tabela 9 – Insumos consumidos¹ na mineração para produção de 1 kg de carvão bruto

Insumos	Indicador	Unidade
Carvão mineral bruto	1,00	kg
Eletricidade	$1,67 \times 10^{-03}$	kWh
Explosivos	$0,46 \times 10^{-04}$	kg
Óleo diesel	$0,83 \times 10^{-04}$	kg
Calcário	$0,11 \times 10^{-04}$	kg
Nitrogênio (N)	$2,26 \times 10^{-07}$	kg
Fósforo (P ₂ O ₅)	$9,05 \times 10^{-07}$	kg
Potássio (K ₂ O)	$9,05 \times 10^{-07}$	kg

¹O consumo dos insumos foram estimados por meio dos dados de operação fornecidos pela CRM.

A avaliação das emissões dos GEE inclui emissões provenientes do consumo de combustível nas operações de minerações, transporte do carvão e dos insumos, consumo de eletricidade, aplicação dos insumos agrícolas, detonação dos explosivos e emissões fugitivas. Os métodos e fatores de emissão usados para determiná-las são discutidos nas próximas seções.

4.1.3.1 Emissões do consumo de diesel nos processos de mineração

As emissões associadas ao consumo de óleo diesel por equipamentos de mineração e caminhões (incluindo frota *off-road*) foram estimadas (Equação 21) pelos fatores de emissão padrão para os gases CH₄, N₂O e CO₂ (Tabela 10), de acordo com a metodologia do IPCC (2006a).

$$E = \sum (fuel_i \cdot EF_i) \quad (21)$$

em que E é a emissão dos GEE (kg), $fuel_i$ é o tipo de combustível i consumido (kg), EF_i é o fator de emissão do tipo de combustível i (kg GEE/kg).

Tabela 10 – Fatores de emissão dos equipamentos a óleo diesel

GEE	Padrão (kg GEE/kg diesel)	Baixo (kg GEE/kg diesel)	Alto (kg GEE/kg diesel)
CO ₂	3,10	3,03	3,13
CH ₄	$1,73 \times 10^{-04}$	$6,98 \times 10^{-05}$	$4,35 \times 10^{-04}$
N ₂ O	$1,20 \times 10^{-03}$	$5,98 \times 10^{-04}$	$3,59 \times 10^{-03}$

Fonte: Adaptado do IPCC (2006a). Nota: Os valores na tabela foram convertidos de kg/TJ de diesel, que é a unidade apresentada pelo IPCC, para kg de GEE/kg de diesel, empregando o PCI do diesel igual a 41.8 MJ/kg.

4.1.3.2 Emissões da detonação dos explosivos

A detonação dos explosivos para o desmonte das rochas e camadas de carvão promovem a liberação dos GEE. A quantidade emitida dos GEE (Equação 21) foi estimada utilizando o fator de emissão apresentado na Tabela 11 (AGO, 2006).

Tabela 11 – Fatores de emissão de CO₂ da detonação de explosivos

Fonte	Fator de emissão (kg CO ₂ /kg explosivo)
Explosivo	0,17

Fonte: AGO (2006)

4.1.3.3 Emissões relativas ao consumo de energia elétrica

Para determinar a quantidade de gases procedentes do consumo de eletricidade, utilizou-se o fator de emissão da matriz de energia elétrica inserida no sistema interligado brasileiro igual a 125 kg CO_{2eq}/MWh, correspondente ao ano de 2012 (MIRANDA, 2012). Importante destacar a utilização deste indicador porque a matriz elétrica nacional é predominantemente baseada em fonte renovável (hídrica), panorama que reflete em baixas emissões de GEE por unidade de eletricidade gerada, diferentemente dos indicadores estabelecidos por alguns países europeus e asiáticos, como 912 kg CO_{2eq}/MWh para a Polônia (BURMISTRZ et al., 2016), 976 kg CO_{2eq}/MWh para Holanda (KOORNNEEF et al., 2008), 531 kg CO_{2eq}/MWh para a Áustria (RESTREPO et al., 2015) e 974 kg CO_{2eq}/MWh para a China (QIN et al., 2016), cuja matriz elétrica é majoritariamente de fonte fóssil.

4.1.3.4 Emissões fugitivas

Além das emissões procedentes do consumo de energia, também precisam ser contabilizadas as emissões oriundas das etapas da extração propriamente dita, denominadas emissões fugitivas de gases de efeito estufa. As emissões fugitivas das minas de carvão são responsáveis por cerca de 8% do metano antropogênico emitido no mundo (SU et al., 2011).

O metano é produzido por processos de coalificação, que consiste basicamente em reações anaeróbicas do material vegetal durante a formação do carvão, e é armazenado nas costuras e camadas do carvão. A quantidade liberada de metano depende de vários parâmetros, os mais importantes são o *rank* do carvão, a profundidade da camada do carvão e o método de mineração empregado (IPCC, 1996). Na maioria das vezes, a quantidade de metano formada durante o processo de coalificação é maior do que a quantidade que pode ser armazenada dentro da própria costura de carvão. Desta forma, o excesso migra para os estratos circundantes. O metano é mantido pelas costuras de carvão e pelas camadas de solo adjacentes. Enquanto o metano é mantido sob pressão e assumindo que nenhum processo violou as camadas geológicas, ele permanece retido; porém, quando as operações de mineração são aplicadas, a pressão é aliviada e o metano é liberado para atmosfera (IPCC, 1996; BRANCO et al., 2013).

O IPCC (2006b) recomenda 3 abordagens para estimar as emissões de CH₄ das minas de carvão, com diferentes níveis de detalhes e disponibilidade de dados. A abordagem *Tier 1* apresenta intervalos de valores para os fatores de emissão conforme o método de

mineração (superficial ou subterrânea); a *Tier 2* é baseada em fatores de emissão específicos das jazidas e tipo de carvão e a *Tier 3* envolve um método específico de medição por mina. Nas duas primeiras abordagens utilizam-se a Equação 22.

$$E_{CH_4} = Q \cdot EF_{CH_4} \quad (22)$$

em que E_{CH_4} é a emissão de CH₄ (kg), Q é a produção de carvão mineral (t) e EF_{CH_4} é o fator de emissão (kg CH₄/kg carvão). Pela indisponibilidade de fatores específico da mina em estudo, foi utilizado o método *Tier 1* com os fatores de emissões para mineração a céu aberto e para pós-mineração (Tabela 12). É indicado utilizar o menor fator de emissão para minas com profundidades até 25 m e o maior fator para minas com profundidades superiores a 50 m, para profundidades intermediárias, deve-se utilizar os fatores médios.

Tabela 12 – Fatores de emissão de metano na mineração a céu aberto

Fonte	Baixo (kg CH ₄ /kg carvão)	Padrão (kg CH ₄ /kg carvão)	Alto (kg CH ₄ /kg carvão)
Mineração a céu aberto	$2,00 \times 10^{-04}$	$7,99 \times 10^{-04}$	$1,33 \times 10^{-03}$
Pós mineração	0	$6,66 \times 10^{-05}$	$1,33 \times 10^{-04}$

Fonte: Adaptado do IPCC (2006b). Nota: Os valores da tabela foram convertidos de m³/t de carvão, unidade apresentada pelo IPCC, para kg de CH₄/kg de carvão, empregando a massa específica do metano igual a 0,654 kg/m³ (25°C e 1 atm).

A combustão espontânea nas pilhas do carvão é suscetível de ocorrer, porém não foram consideradas porque suas emissões são insignificantes comparadas com as emissões fugitivas de metano (IPCC, 2006b).

4.1.3.5 Emissões oriundas da aplicação dos insumos agrícolas

Embora a quantidade de insumos agrícolas utilizados para a recuperação das áreas mineradas seja baixa frente aos insumos energéticos, cerca de 6 t/ha e 250 kg/ha para calcário e fertilizante (NPK 5,20,20), respectivamente, as emissões devidas as suas aplicações no solo foram estimadas.

Os insumos agrícolas utilizados para recuperação do solo minerado potencializam as emissões de CO₂ e N₂O. A adição de fertilizantes nitrogenados aumenta a produção de N₂O por meio de processos microbiológicos de nitrificação e desnitrificação e, conseqüentemente,

aumenta a quantidade liberada para a atmosfera (CARDENAS et al., 2010). As emissões do N_2O foram calculadas (Equação 23) pelo fator de emissão padrão mostrado na Tabela 13, conforme metodologia proposta pelo IPCC (2006b).

$$E_{N_2O} = N_{FERT} \cdot EF_{N_2O} \quad (23)$$

em que E_{N_2O} é a emissão de N_2O associada à aplicação de fertilizantes nitrogenados sintéticos (kg N_2O); N_{FERT} é a quantidade de nitrogênio aplicado como fertilizante nitrogenado (kg N) e EF_{N_2O} é o fator de emissão do N_2O do nitrogênio aplicado (kg N_2O -N/kg fertilizante N).

Da mesma forma que ocorre com a aplicação do fertilizante nitrogenado no solo, ocorre com o calcário dolomítico, porém a substância emitida é o CO_2 , cuja quantidade liberada foi estimada pela Equação 24 e pelo fator de emissão (Tabela 13), o qual é equivalente ao conteúdo de carbonato de carbono no calcário dolomítico (IPCC, 2006b).

$$E_{CO_2} = C_d \cdot EF_{CO_2} \quad (24)$$

em que E_{CO_2} é a emissão de CO_2 associada à aplicação de calcário no solo (kg CO_2); C_d é a quantidade de calcário dolomítico ($CaMg(CO_3)_2$) aplicado ao solo (kg) e EF_{CO_2} é o fator de emissão do calcário (kg CO_2 /kg calcário).

Tabela 13 – Fatores de emissão de CO_2 e N_2O na aplicação de insumos agrícolas

Fonte de emissão	Fator de emissão	Unidade
Aplicação de fertilizante nitrogenado no solo	$1,60 \times 10^{-02}$	kg N_2O /kg fertilizante nitrogenado
Calcário dolomítico	0,48	kg CO_2 /kg calcário dolomítico

Fonte: IPCC (2006b)

4.1.3.6 Emissões relativas a produção dos insumos

Para determinação das emissões dos GEE da produção dos insumos do ciclo do carvão (Tabela 14) foram utilizados dados relativos a estudos realizados no território brasileiro. O fator de emissão da produção de calcário é relativamente baixo, porque para o seu cálculo não é considerado o processo de calcinação, processo responsável pela grande liberação de CO_2 .

O fator de emissão da produção do diesel considera as etapas envolvidas na extração até o refino do petróleo para obtenção do diesel, não engloba a distribuição. Este fator é mais baixo que alguns encontrados na literatura internacional, muito provável em razão de uma quantidade relevante de petróleo ser importado e o fator de emissão da eletricidade ser superior ao do Brasil. A produção de fertilizantes recebeu uma atenção especial, especialmente o nitrogênio mineral que possui elevado fator de emissão devido as emissões de N₂O durante sua produção.

Tabela 14 – Fator de emissão do CO_{2eq} na produção dos insumos

Insumo	Fator de emissão (kg CO _{2eq} /kg)	Fonte
Calcário	0,03	Branco (2013)
Óleo diesel	0,32	Viana (2008)
Fertilizante - Nitrogênio (N)	3,97	Macedo et al. (2008)
Fertilizante - Fósforo (P ₂ O ₅)	1,30	Macedo et al. (2008)
Fertilizante - Potássio (K ₂ O)	0,71	Macedo et al. (2008)

Nota: Não foi encontrado fator de emissão para produção de explosivo.

4.1.3.7 Emissões do transporte dos insumos

O transporte dos insumos químicos e agrícolas das unidades fornecedoras, localizadas no estado do Rio Grande do Sul, ocorre por modal rodoviário por meio de caminhão diesel até a mina de Candiota. Na Tabela 15 é mostrada a distância média de transporte de cada insumo, abrangendo o percurso de ida e volta pelas principais rodovias federais do estado. O consumo de diesel pelos caminhões utilizados foi igual a 0,0306 kg/t.km (XIAO et al., 2009). A estimativa das emissões (Equação 21) foi baseada nos fatores de emissão para transporte rodoviário recomendados pelo IPCC *guidelines* (Tabela 16).

Tabela 15 – Distância para o transporte dos insumos

Insumo	Percurso médio (km)	Localidade da unidade fornecedora
Óleo diesel	800	Canoas
Explosivo	812	Esteio
Calcário	340	Caçapava do Sul
Fertilizante (NPK)	540	Rio Grande

Tabela 16 – Fatores de emissão para transporte rodoviário

GEE	Padrão (kg GEE/kg diesel)	Baixo (kg GEE/kg diesel)	Alto (kg GEE/kg diesel)
CO ₂	3,10	3,03	3,13
CH ₄	$1,63 \times 10^{-04}$	$6,69 \times 10^{-05}$	$3,97 \times 10^{-04}$
N ₂ O	$1,63 \times 10^{-04}$	$5,43 \times 10^{-05}$	$5,02 \times 10^{-04}$

Fonte: Adaptado do IPCC (2006a). Nota: Os valores na tabela foram convertidos de kg/TJ de diesel, que é a unidade apresentada pelo IPCC, para kg de GEE/kg de diesel, empregando o PCI do diesel igual a 41.8 MJ/kg.

4.2 Ciclo de vida da palha de arroz

Nesta Seção é apresentada a análise geral da rota da palha de arroz para ser aproveitada como matéria-prima na unidade de produção de metanol. O modelo definido foi baseado no sistema de aproveitamento da palha de arroz implantado pela Usina Termelétrica Jorge Lacerda, localizada no município de Capivari de Baixo, no estado de Santa Catarina (RESTREPO, 2012; BAZZO et al, 2013).

4.2.1 Descrição dos processos da rota da palha do arroz

A coleta da palha ainda é o maior desafio para utilizá-la como matéria-prima. A palha precisa ser coletada do campo e compactada em fardos para facilitar seu transporte. A rota da palha de arroz é composta basicamente pelas etapas de coleta da lavoura e transporte da palha até a planta de metanol, sendo subdividida nos estágios denominados: (1) segamento, (2) enleiramento, (3) adensamento, (4) traslado dos fardos da lavoura até o centro de carregamento, (5) carregamento e transporte dos fardos até a planta de metanol, (6) armazenamento da biomassa e (7) processamento da biomassa. Na Figura 18 são apresentadas as principais etapas da rota da palha que serão explicadas nas próximas seções.

Figura 18 – Etapas da rota da palha de arroz



Fonte: Restrepo (2012)

4.2.1.1 Caracterização físico-química

As características físico-químicas da palha de arroz dependem de diferentes eventos como o manejo de cultivo da planta, fertilizantes utilizados, condições climáticas, período de colheita e local (SHEN et al.,1998). Nas Tabelas 17, 18 e 19 são apresentados os valores da análise imediata, análise elementar e composição química das cinzas da palha de arroz em base seca cultivada no sul do estado de Santa Catarina¹¹ (BAZZO et al., 2011).

Tabela 17 – Caracterização físico-química da palha de arroz

Análise imediata ¹	Valor	Unidade
Umidade total	7,60	%
Cinza	12,90	%
Matéria volátil	65,70	%
Poder calorífico Inferior	13,57	MJ/kg
Poder calorífico Superior	14,84	MJ/kg

Fonte: Bazzo et al. (2011)

Tabela 18 – Análise elementar da palha de arroz

Análise elementar	Valor	Unidade
Carbono	39,00	%
Hidrogênio	5,33	%
Nitrogênio	0,71	%
Enxofre total	0,20	%
Oxigênio	34,30	%
Cloro	0,10	%
Flúor	2,00	%

Fonte: Bazzo et al. (2011)

¹¹ Não foi encontrada a caracterização físico-química da palha de arroz cultivada no estado do Rio Grande do Sul, por conseguinte, foram utilizados os valores da biomassa oriunda do sul do estado catarinense, uma vez que ambos estados possuem manejos de cultivo e condições climáticas semelhantes.

Tabela 19 – Composição química da cinza da palha de arroz

Composição química	Valor	Unidade
Na ₂ O	0,20	%
K ₂ O	10,70	%
MgO	1,10	%
CaO	5,10	%
Fe ₂ O ₃	0,40	%
Al ₂ O ₃	0,10	%
SiO ₂	79,20	%
TiO ₂	0	%
P ₂ O ₅	1,50	%

Fonte: Bazzo et al. (2011)

A palha de arroz é um material fibroso lignocelulósico típico da maioria dos resíduos agrícolas, no entanto, difere da maioria dos outros resíduos por seu elevado teor de dióxido de silício (SiO₂), segundo estudo realizado por Fock et al. (2012).

4.2.1.2 Segamento

No sistema atual da colheita do arroz, a colheitadeira corta a parte superior da planta, remove o cereal e a palha é descartada pela parte traseira da colheitadeira na forma de leiras ou dispersa na lavoura, dependendo da tecnologia utilizada. A fim de aumentar o aproveitamento da biomassa disponível na lavoura, uma operação de corte adicional, denominada segamento é executada na parte inferior da planta, numa altura próxima ao solo. Esta operação é realizada pela segadeira, máquina agrícola composta por uma série de discos rotativos de corte alinhados lado a lado, acoplada a barra de tração de um trator agrícola para tomada de força.

A palha ceifada possui elevado teor de umidade (60% a 70%). Assim, torna-se necessário deixá-la na lavoura por pelo menos 7 dias após o segamento para que a umidade possa ser evaporada, o que certamente depende da incidência de precipitação e umidade do solo (KADAM et al., 2000). O excesso de umidade corresponde a uma massa não aproveitável para o processamento na usina e ainda prejudica o mecanismo do enfardamento, além de aumentar a carga transportada e promover a aceleração da biodegradação por meio de micro-organismos durante seu armazenamento (KADAM et al., 2000; BAZZO et al., 2011).

4.2.1.3 Enleiramento

A biomassa cortada e rejeitada pela colheitadeira é totalmente dispersa na lavoura; para aumentar o rendimento da coleta por área, a operação de enleiramento é realizada por um implemento agrícola tracionado por um trator, chamado de enleiradeira. Este equipamento possui carretéis giratórios que direcionam a palha no mesmo sentido para formação de leiras.

4.2.1.4 Adensamento

O objetivo do adensamento é coletar e enfardar a palha para facilitar o seu manuseio e transporte. A definição da tecnologia de adensamento depende basicamente da distância entre a produção e o consumo da biomassa, o uso de técnicas como briquetagem e peletização viabilizam cenários com distâncias elevadas, enquanto o enfardamento favorece cenários com distâncias mais curtas (MICHELAZZO e BRAUNBECK, 2008), em razão disso, essa técnica foi utilizada no modelo deste estudo. Além do mais, segundo Kargbo et al. (2009) e Chou et al. (2009), o método de enfardamento é o de menor custo.

Com as leiras formadas no processo de enleiramento, a palha já pode ser enfardada. Neste processo, a biomassa é recolhida das leiras passando por uma prensa que produz fardos cilíndricos ou retangular de diferentes tamanhos, dependendo do modelo de equipamento utilizado. Neste sistema foi utilizado enfardadoras de grande capacidade, capazes de produzir fardos retangulares de até 400 kg.

4.2.1.5 Translado dos fardos

Os fardos são produzidos e simultaneamente dispersos na lavoura, sendo necessário o seu translado até um local de fácil acesso (centro de carregamento) para os caminhões que realizarão o transporte até a usina de produção de metanol. Essa remoção ocorre por meio de plataformas de carregamento acopladas a tratores agrícolas.

4.2.1.6 Carregamento e transporte dos fardos

O carregamento dos fardos ocorre por meio de tratores acoplados a plataformas de carregamento e o seu transporte até a unidade de armazenamento da usina é realizado através de caminhões.

4.2.1.7 Armazenamento da palha de arroz

O armazenamento dos fardos é necessário para garantir a autonomia da operação da usina de gaseificação durante todo o ano, visto que o período de coleta da palha é limitado ao período da colheita do cereal, compreendida nos meses de fevereiro a maio no Rio Grande do Sul, podendo oscilar em razão das condições climáticas.

Vale ressaltar que o local armazenamento deve possuir boa aeração e baixa umidade para evitar a sua absorção pela matéria prima e condições anaeróbicas que podem favorecer a geração de metano.

4.2.1.8 Processamento da palha de arroz

Os fardos de palha necessitam ser processados antes de alimentar o gaseificador. Segundo Basu (2006), a alimentação de gaseificadores de leito fluidizado deve ser realizada com partículas com granulometria na ordem de 10 mm para alcançar maior eficiência de operação, visto que um dos parâmetros limitante do tempo de gaseificação é a troca de calor da biomassa e o ambiente interno do reator; partículas menores trocam calor mais rapidamente e aceleram a volatilização e a combustão.

Os fardos são descarregados e armazenados numa unidade anexa à usina, onde há boa ventilação e baixa umidade para garantir a inexistência de condições anaeróbicas. O processamento inicia-se pela movimentação dos fardos por meio de uma empilhadeira até as esteiras transportadoras, que os encaminhará ao desfardador, equipamento que possui a finalidade de soltar e picar a palha para alimentar uma mesa vibratória responsável por eliminar impurezas, como pedras e metais misturados no interior dos fardos, que possam interferir ou deteriorar equipamentos utilizados nas operações seguintes. Na terceira etapa o material é transportado e seco por um sistema pneumático alimentado com ar quente até alcançar a umidade de aproximadamente 12 % (base úmida), teor recomendado para gaseificação da biomassa.

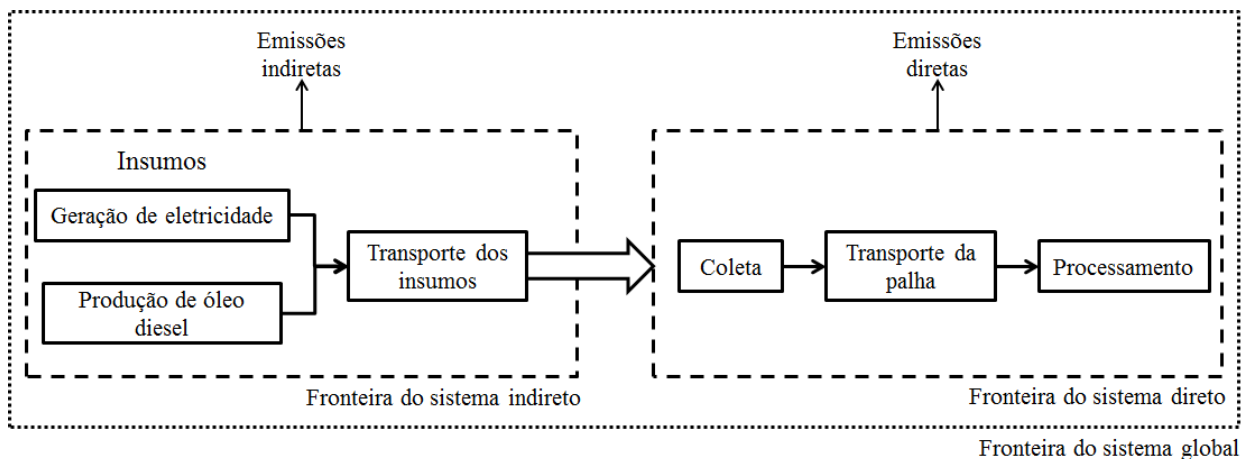
A palha seca é enviada para moinhos capazes de alcançar granulometrias de até 1 mm. A palha moída é conduzida por meio de uma rosca transportadora e elevador de canecas para o silo de armazenamento que possui uma moega com 4 saídas para alimentar a planta (BAZZO et al., 2013). Mais detalhes dos equipamentos utilizados na rota da palha podem ser consultados no Apêndice C.

4.2.2 Escopo do estudo

O escopo do ciclo de vida da palha é constituído pelas etapas de coleta, transporte e processamento da palha, além das etapas de produção e transporte dos principais insumos. No que se refere ao escopo espacial, o estudo foi realizado para aproveitamento da palha proveniente do cultivo de arroz nas proximidades da mina de Candiota, na região da campanha, no sul do estado do Rio Grande do Sul. Em relação ao escopo temporal, os dados são relativos ao sistema de coleta e processamento da palha do ano de 2012, com uma produção média de 4,13 t de biomassa por hora (Restrepo, 2012). Os insumos e emissões referentes a construção de infraestrutura e fabricação de materiais não foram consideradas no escopo do estudo. A unidade funcional definida foi 1 kg de palha de arroz.

Na Figura 19 são apresentados os processos considerados no escopo do ciclo de vida da palha classificados nas fronteiras do sistema direto e indireto, sendo que os processos de geração de eletricidade, produção e transporte do óleo diesel são responsáveis pelas emissões indiretas. Por outro lado, o consumo de óleo diesel nas etapas de coleta e transporte da palha na etapa do processamento são responsáveis pelas emissões diretas.

Figura 19 – Fronteiras do ciclo de vida da palha de arroz



4.2.3 Inventário do ciclo de vida da palha

Os principais insumos do manuseio da biomassa são o óleo diesel na etapa de coleta e transporte da biomassa e a eletricidade na etapa de processamento. Para determinar o óleo diesel consumido pelos caminhões para transportar a biomassa é necessário primeiro avaliar a

sua distribuição espacial e verificar a distância média que será percorrida entre o local de coleta e a planta de metanol hipotética.

O local definido para instalação da planta de metanol neste modelo é ao lado da mina de Candiota, uma vez que, devido ao alto teor de cinzas e baixo poder calorífico do carvão mineral, com conseqüente redução do seu valor econômico, torna o seu transporte inviável economicamente a longas distâncias (GAVRONSKI, 1997). Na região próxima a Candiota há uma grande disponibilidade de palha de arroz, segundo o relatório de produtividade de arroz – safra 2016, publicado pelo Instituto Riograndense de Arroz (IRGA). Foi estabelecido que a usina será abastecida apenas pela palha coletada na região limitada a um raio de 160 km. Esta distância considera o escoamento da biomassa pela BR-293, rodovia que interliga as cidades produtoras de arroz a planta de metanol. Na Tabela 20 são mostrados os municípios presentes na região delimitada e a respectiva geração de palha.

Tabela 20 – Geração de palha nos municípios compreendidos na área de estudo

Município	¹ Área colhida (ha/ano)	² Produtividade da colheita (kg/ha.ano)	³ Produção de arroz (t/ano)	Palha de arroz recuperada (t/ano)	Distância (km)
Candiota	655	5199	3405,35	2383,74	20
Pinheiro Machado	66	5000	330,00	231,00	45
Pedras Altas	1790	5095	9120,05	6384,04	72
Hulha Negra	933	6777	6322,94	4426,06	38
Bagé	10679	7318	78148,92	54704,25	64
Dom Pedrito	45836	7399	339140,56	237398,39	133
Aceguá	10262	7130	73168,06	51217,64	119
Arroio Grande	41936	7430	311584,48	218109,14	160
Pelotas	8244	7682	63330,41	44331,29	150
Capão do Leão	6464	8164	52772,10	36940,47	137
Pedro Osório	3549	7791	27650,26	19355,18	117
Total	130414	74985	964973,13	675481,19	-

^{1,2,3} Fonte: Relatório de produtividade do arroz da safra 2015/2016 do estado do Rio Grande do Sul (IRGA, 2017).

A relação mássica da geração de palha e o arroz colhido varia de 0,75 a 1,35 (Tabela 21), utilizou-se neste trabalho a relação 1:1 (BAZZO et al., 2011). Assim, a quantidade gerada depende da produtividade da colheita, que oscila em torno de 5,0 a 8,2 t/ha.ano (Tabela 20).

Nem toda a palha é coletada devido à dificuldade de acesso em algumas lavouras muito alagadas, às perdas durante o seu manuseio e, ainda, uma parte deve ser deixada no solo para proporcionar os benefícios agrônômicos (AGOSTINETTO et al., 2002). Considerando esses fatores, foi definido que 75% da palha disponível na lavoura é colhida, 5% é perdida nas operações manuseio e 70% é efetivamente aproveitada na produção de metanol, chegando a um montante de 675481,00 t/ano.

Tabela 21 – Produção da palha em relação ao arroz colhido

Pais	Razão (kg palha/kg arroz)	Referência
Brasil (Santa Catarina)	1,00	Bazzo et al. (2011)
China	0,90	Xiao et al. (2009)
Tailândia	0,75	Gadde et al., (2009)
EUA	1,35	Kadam et al. (2000)

Na Tabela 22 é apresentado o consumo dos insumos energéticos por etapa e na Tabela 23 a quantidade total consumida no ciclo para produção de 1 kg de palha de arroz. Nas etapas de coleta e processamento, os indicadores foram determinados baseando-se no estudo de Restrepo (2012). Em relação ao indicador da etapa de transporte da palha, foi considerado o consumo de combustível do caminhão vazio, partindo da planta de metanol até o local de coleta, e seu retorno transportando a palha, como mostrado na Equação 23.

$$C_v = C_c \cdot (Carga + P_c) \cdot d + C_c \cdot P_c \cdot d \quad (23)$$

em que C_v é consumo de combustível por viagem (L), C_c corresponde ao consumo específico de combustível no transporte pelo caminhão (L/t.km), $Carga$ é a carga transportada (t), d é a distância do local de carregamento até a planta de metanol (km) e P_c é o peso do caminhão vazio (t).

Para o transporte considerou-se a utilização de um caminhão com capacidade máxima de carga de 48 toneladas, peso do caminhão vazio (P_c) igual a 9,1 t e volume útil¹² igual a 160 m³. O valor da massa específica aparente do fardo de palha usado para determinar

¹² O volume útil foi calculado baseando-se nos limites máximos para dimensões de caminhão, tipo veículo simples de carga, estabelecido pelo DNIT (2018).

a carga transportada (*Carga*) é igual a 123 kg/m^3 , assim, a carga transportada por viagem é igual a 19,7 t. O consumo específico de óleo diesel pelo caminhão (C_c) foi igual a 0,036 L/t.km (Xiao et al., 2009). Os resultados do consumo de combustível e o número de viagem para cada cidade são mostrados no Apêndice D.

Tabela 22 – Consumo de óleo diesel e eletricidade por etapa do ciclo de vida da palha

Etapa	Equipamento	Indicador	Unidade
Coleta da palha ¹	Segadeira	$2,75 \times 10^{-2}$	kg
	Enleiladeira		
	Enfardadeira		
	Tratores		
	Trator – traslado e carregamento dos fardos		
Transporte dos fardos até a usina	Caminhão	$7,91 \times 10^{-3}$	kg
Processamento da palha ¹	Transportador de correias	$1,11 \times 10^{-1}$	kWh
	Desenfardador		
	Mesa vibratória		
	Ventilador e picador		
	Ciclone		
	Moinhos		
	Silo, rosca e elevador de		
	Canecas		
	Compressor		
	Ventilador soprador		
Ventilador despoeiramento			
Filtro manga			

¹O consumo dos insumos foi estimado baseando-se no trabalho de Restrepo (2012).

Tabela 23 – Insumos consumidos no ciclo de vida da palha

Insumos ¹	Indicador	Unidade
Palha de arroz	1,00	kg
Eletricidade	$1,11 \times 10^{-01}$	kWh
Óleo diesel	$3,56 \times 10^{-02}$	kg

¹O consumo dos insumos foi estimado baseando-se no trabalho de Restrepo (2012).

Os métodos e fatores de emissão utilizados para determinar as emissões dos GEE são apresentados nas próximas seções.

4.2.3.1 Emissões do consumo de diesel nos implementos agrícolas

As emissões dos GEE procedentes do consumo de diesel nos implementos agrícolas durante os processos de coleta foram estimadas (Equação 21) utilizando os fatores de emissão padrão (Tabela 16), conforme metodologia do IPCC.

4.2.3.2 Emissões do transporte da palha de arroz

A estimativa das emissões (Equação 21) foi baseada nos fatores de emissão para transporte rodoviário recomendados pelo IPCC (Tabela 10).

4.2.3.3 Emissões do consumo de eletricidade

As emissões dos GEE do consumo de eletricidade foram estimadas pela metodologia apresentada na Seção 4.1.3.3.

4.2.3.4 Emissões relativas a produção de óleo diesel

As emissões dos GEE da produção de óleo diesel foram estimadas utilizando a metodologia da Seção 4.1.3.6.

4.2.3.5 Emissões do transporte do insumo (óleo diesel)

A fim de estimar as emissões relativas ao transporte do insumo (óleo diesel) consumido nas etapas de coleta e transporte da palha, é necessário especificar a distância entre a unidade fornecedora, Refinaria Riograndense localizada na cidade de Rio Grande/RS, e a cidade em que a palha está disponível, conforme apresentado na Tabela 24. Para o transporte considerou-se a utilização de um caminhão tanque, com capacidade máxima de carga de 57 t, peso do caminhão vazio (P_c) igual a 18,75 t e volume útil igual a 45 m³, desta forma, a carga (*Carga*) transportada por viagem é igual a 38,25 t. O consumo específico de óleo diesel pelo caminhão (C_c) foi igual a 0,0138 L/t.km (BOVOLENTA E BIAGGIONI, 2016). O consumo foi determinado pela Equação 23 e a estimativa das emissões (Equação 21) foi baseada nos fatores de emissão para transporte rodoviário recomendados pelo IPCC (Tabela 10).

Tabela 24 – Distância para o transporte do insumo partindo de Rio Grande/RS

Município	Distância de ida e volta (km)
Candiota	430
Hulha Negra	465
Pinheiro Machado	360
Bagé	515
Pedras Altas	450
Pedro Osório	260
Aceguá	630
Dom Pedrito	660
Capão do Leão	206
Pelotas	160
Arroio Grande	340

Os resultados do consumo de combustível e o número de viagem para cada cidade são mostrados no Apêndice D.

4.2.3.6 Emissões evitadas da decomposição da palha

A incorporação da palha no solo, após a colheita do arroz, favorece a sua decomposição por processos de metagênese (anaeróbicos) que promovem a geração e emissão de metano (YE, 2015). As arqueas metanogênicas apresentam máxima população em solos

completamente reduzidos e o seu metabolismo é potencializado pela disponibilidade de materiais fermentativos, como a palha (AGOSTINETTO et al., 2002).

As emissões evitadas de CH₄ da decomposição da palha aproveitada foi estimada pelo modelo mostrado na Equação 20. Na Tabela 25 são especificados os valores dos parâmetros empregados no modelo e os critérios utilizados para definição desses valores são mostrados no Apêndice A.

Tabela 25 – Parâmetros do modelo de emissões evitadas de CH₄ para a palha de arroz

Parâmetro	Palha	Unidade
GWP_{CH_4}	34,00	kg CO _{2eq} /kg CH ₄
φ	0,90	-
OX	0	-
F	0,50	-
DOC_f	0,50	-
MCF	0,80	-
$W_{j,x}$	$6,75 \times 10^8$	kg
DOC_j	0,20	-
k_j	0,03	1/ano
y	1	ano

4.3 Ciclo de vida da casca do arroz

4.3.1 Descrição dos processos da rota da casca do arroz

Diferentemente do modelo da rota da palha de arroz, a casca é composta por um número menor de etapas, visto que este resíduo já se encontra disponível em grandes quantidades concentradas nas unidades de beneficiamento de arroz. Desta forma, a rota constitui-se basicamente pelas etapas de (1) transporte da casca até a planta de metanol e (2) processamento. Os dados utilizados nesta análise foram obtidos da literatura (SELLITTO et al., 2013) referente a empresas que aproveitam a casca em seus processos e, também, obtidos por meio de visita a unidade de beneficiamento de arroz.

4.3.1.1 Transporte da casca

Segundo Sellitto et al. (2013) e o relato de funcionários de beneficiadoras de arroz, o transporte da casca de arroz para alimentar fornos de fábricas de cimento e termelétricas ocorre sem submetê-la a operações de adensamento e por meio de veículos de carga simples, principalmente tipo *graneleiros*. Alguns ensaios foram feitos com máquinas briquetadoras nas unidades beneficiadoras de arroz, porém o investimento era demasiado e não se justificou economicamente, pelo menos para esses destinos. Desta forma, neste estudo foi considerado que o transporte da casca ocorre na sua forma *in natura* em veículos de carga simples.

A logística de abastecimento da casca em fábricas de cimento é realizada por empresas transportadoras terceirizada, que se deslocam até as unidades, carregam e transportam a casca até as cimenteiras. A inspeção ocorre no momento do descarregamento, eventuais contaminantes são rejeitados e retornam com o transportador. A fábrica de cimento estabelece a remuneração conforme o ganho que era possível auferir com a substituição do combustível ou conforme a quilometragem percorrida pela transportadora.

Dentro da fábrica, o processo de manejo da casca de arroz ocorre da seguinte forma: a casca chega em veículos do tipo graneleiro, devido à facilidade de carga e descarga. A carga é descarregada em uma tremonha, que leva a um pavilhão industrial para armazenamento; do pavilhão, a casca é retomada por transportadores horizontais e verticais (*redler* e elevador), e encaminhada a uma moega próxima ao queimador, que funciona como pulmão. Um soprador pneumático retira a casca da moega e injeta sob pressão no forno.

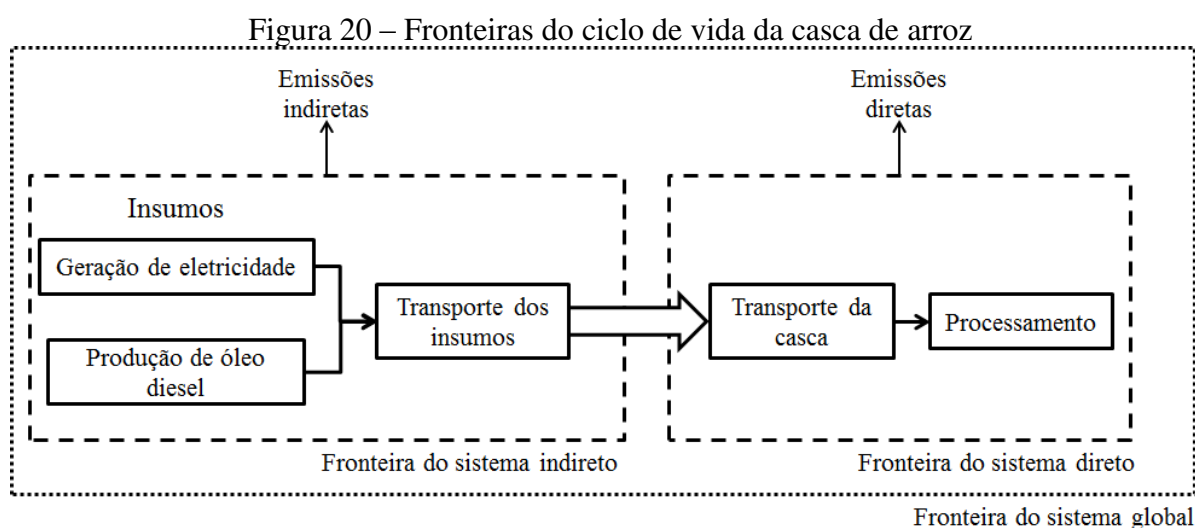
4.3.1.2 Armazenamento e processamento da casca de arroz

O armazenamento da casca é necessário para garantir a autonomia da operação da usina de gaseificação. Uma vantagem em relação a palha é que a casca é disponibilizada pelas beneficiadoras durante todo o ano porque o armazenamento do arroz nos silos ocorre em casca. Conforme relato de um funcionário de uma unidade beneficiadora, a casca armazenada por muito tempo pode compacta e dificultar o seu manuseio, principalmente se houver muito pó misturado.

Conforme os trabalhos desenvolvidos por Mani et al. (2004), Kobayashi et al. (2008) e Caula (2011), a biomassa deve ser triturada até 3,0 mm de diâmetro em um triturador do tipo moinho de martelo, cujo consumo elétrico é cerca de 23,85 kWh/t e para sua pulverização no reator é igual a 70 kWh/t.

4.3.2 Escopo do estudo

Tanto a etapa do cultivo e produção do arroz quanto o uso da casca como combustível nas unidades de beneficiamento foram excluídos da fronteira do sistema, pois essas etapas são parte da cadeia produtiva do arroz. Embora os impactos ambientais causados pelo cultivo do arroz sejam considerados significativos, eles não influenciam na utilização da casca (PRASARA-A e GRANT, 2010). Assim, o limite do sistema deste estudo abrange apenas o transporte, armazenamento e processamento da casca, além das etapas de produção e transporte dos principais insumos. Em relação ao escopo espacial, apenas a casca disponível nas unidades de beneficiamento próximas a mina de Candiota serão aproveitadas (raio de 160 km). Em referência ao escopo temporal, os dados utilizados para estimar a quantidade de casca gerada são relativos ao ano de 2016. Os insumos e emissões associados a infraestrutura e fabricação dos equipamentos utilizados não foram considerados no escopo. A redução das emissões dos GEE pelo término do transporte da casca de arroz entre a unidade de beneficiamento até o local de descarte, quando não era aproveitada, não foram estimados, em virtude da dificuldade de definir o local em que era realizado o descarte e a distância percorrida para todas as unidades de beneficiamento consideradas. Definiu-se como unidade funcional 1 kg de casca de arroz. O limite das fronteiras do sistema direto e indireto é apresentado na Figura 20.



4.3.3 Inventário do ciclo de vida da casca de arroz

O óleo diesel é o principal insumo na rota da casca de arroz, utilizado na etapa de transporte. Para estimar a quantidade consumida pelos caminhões, primeiro deve ser

estabelecido a distância média entre a unidade de beneficiamento e a planta de metanol, que será abastecida pela casca excedente das unidades localizadas na região limitada a um raio de 160 km, da mesma forma que foi realizado para a palha. Na Tabela 26 é mostrada a produção de arroz por unidade referente ao ano de 2016, publicada pelo IRGA, a estimativa da casca excedente e a distância entre a planta de metanol e unidade de beneficiamento. Mais informações sobre outras unidades no estado do Rio Grande do Sul podem ser consultadas no Anexo A.

Tabela 26 – Casca de arroz excedente por unidade de beneficiamento

Cidade	Unidade de beneficiamento	¹ Arroz beneficiado (t/ano)	Casca de arroz gerada (t/ano)	Excedente de casca (t/ano)	Distância (km)
Arroio Grande	Coop. prod. arroz pré-germinado				
	arroio grande ltda	17060,00	5255,00	3117,83	160
	Macrosul alimentos ltda.	97,00	30,00		
	Ceolin & cia. ltda.	38318,00	11802,00		
Bagé	Cerealista Coradini ltda.	50249,00	15477,00		
	Cooperativa agrícola mista			89992,64	64
	Acegua ltda.	10382,00	3198,00		
	Coradini alimentos ltda.	36913,00	11369,00		
Capão do Leão	Pillon indústria e comercio de arroz ltda.	16669,00	5134,00		
	Arrozeira ADB Peixoto ltda.	37596,00	11580,00		
	SLC alimentos s/a	216042,00	66541,00	149765,75	137
	E & M alimentos ltda	202,00	62,00		
Dom Pedrito	Coradini alimentos ltda.	64572,00	19888,00		
	Cotrijui - Cooperativa agropecuária & industrial	62760,00	19330,00	140020,84	133
	Engenho Coradini ltda.	8181,00	2520,00		
	Engenho Coradini ltda. – filial	76174,00	23461,00		
Dom Pedrito	Hening & Cia. ltda.	2642,00	814,00		
	Roberto Coradini e cia. ltda.	22995,00	7082,00		

¹Fonte: Relatório do *Ranking* das beneficiadoras de arroz do ano de 2016 no estado do Rio Grande do Sul (IRGA, 2017).

Tabela 26 – Casca de arroz excedente por unidade de beneficiamento (continuação)

Cidade	Unidade de beneficiamento	¹ Arroz beneficiado (t/ano)	Casca de arroz gerada por unidade (t/ano)	Excedente de casca (t/ano)	Distância (km)
	Arrozeira Pelotas indústria e comercio de cereais ltda.	214512,00	66070,00		
	Arrozeira Perola ltda.	8405,00	2589,00		
	Cerealista Polisul tda.	31837,00	9806,00		
	Barz e cia. ltda.	9030,00	2781,00		
	Cerealista Obelisco ltda.	35701,00	10996,00		
	Cooperativa arrozeira extremo sul ltda.	37698,00	11611,00		
	Ehlert indústria e comercio ltda.	2292,00	706,00		
	Engenho Santa Terezinha ltda.	728,00	224,00		
Pelotas	Engenho São Joaquim ind. e com. ltda.	22901,00	7053,00	495403,41	150
	Br-sul indústria e comercio ltda.	47739,00	14704,00		
	Josapar - Joaquim Oliveira s/a participacoes	219383,00	67570,00		
	Nelson wendt & cia. ltda.	119266,00	36734,00		
	Krolow & cia. ltda.	3100,00	955,00		
	Puro grão indústria e comércio de arroz e soja ltda.	11728,00	3612,00		
	Produtos alimenticios				
	Orlandia s/a com. indústria	50949,00	15692,00		
	Rubens Perleberg & cia. ltda.	24399,00	7515,00		
	Total	1500518,00	462159,00	1488645,00	878300,47

¹Fonte: Relatório do *Ranking* das beneficiadoras de arroz do ano de 2016 no estado do Rio Grande do Sul (IRGA, 2017).

Para determinar a quantidade da casca gerada a partir dos valores do arroz beneficiado (sem casca), mostrado na Tabela 26, foi necessário analisar a proporção da casca obtida no processamento do arroz bruto (24%), como apresentado pela Tabela 27. Conforme relatado na Seção 2.2.2, 60% deste montante equivale a casca excedente, que alcançou o montante igual a 877612,12 t/ano.

Tabela 27 – Proporção dos elementos gerados no processamento do arroz com casca

Elemento ¹	Proporção (%)
Arroz branco, incluindo grãos inteiros, quebrados e canjição	65,50
Quirera	3,50
Farelo de arroz	7,00
Casca de arroz	24,00

¹Valores referentes ao beneficiamento do arroz por empresa situada no Rio Grande do Sul (MAYER, 2009)

Na Tabela 28 é apresentado o consumo dos insumos energéticos por etapa. O indicador do consumo de óleo diesel na etapa de transporte, igual $7,96 \times 10^{-3}$ kg CO_{2eq}/kg de casca, foi calculado baseando-se na coleta de toda casca excedente na região limitada pelo raio de 160 km e na Equação Equação 23. O caminhão empregado no transporte possui capacidade máxima de carga de 48 t, peso do caminhão vazio (P_c) igual a 9,1 t e volume útil¹³ igual a 160 m³. O valor da massa específica aparente da casca de arroz usado para determinar a carga transportada (*Carga*) é igual a 125 kg/m³, assim, a carga transportada por viagem é igual a 19,7 t (Coltro et al., 2017). O consumo específico de óleo diesel pelo caminhão (C_c) foi igual a 0,036 L/t.km (Xiao et al., 2009). Os resultados do consumo de combustível e o número de viagem para cada cidade são mostrados no Apêndice A.

Tabela 28 – Consumo de óleo diesel e eletricidade por etapa do ciclo da casca

Etapa	Indicador	Unidade
Transporte da casca	$7,96 \times 10^{-3}$	kg
Processamento	$9,38 \times 10^{-2}$	kWh

O consumo total dos insumos energéticos é mostrado na Tabela 29. Observa-se que o indicador do óleo diesel é superior ao apresentado na Tabela 28 porque foi acrescentado à

¹³ O volume útil foi calculado baseando-se nos limites máximos para dimensões de caminhão, tipo veículo simples de carga, estabelecido pelo DNIT (2018).

quantidade de óleo diesel consumido durante o seu transporte entre a Refinaria e a unidade de beneficiamento, como explicado com mais detalhe na Seção a seguir (4.3.3.3).

Tabela 29 – Insumos consumidos no ciclo de vida da casca de arroz

Etapa	Indicador	Unidade
Casca de arroz	1,00	kg
Eletricidade	$9,38 \times 10^{-2}$	kWh
Óleo diesel	$7,99 \times 10^{-3}$	kg

4.3.3.1 Emissões do transporte da casca de arroz

A estimativa das emissões (Equação 21) foi baseada nos fatores de emissão para transporte rodoviário recomendados pelo IPCC (Tabela 10).

4.3.3.2 Emissões relativas a produção de óleo diesel

As emissões dos GEE da produção do óleo diesel foram estimadas utilizando o método da Seção 4.1.3.6.

4.3.3.3 Emissões do transporte do insumo (óleo diesel)

O procedimento para estimar as emissões relativas ao transporte do óleo diesel consumido na etapa transporte da casca foi o mesmo utilizado para a palha. A distância entre a Refinaria de Petróleo Riograndense e os municípios das unidades de beneficiamento são mostrados na Tabela 30. Utilizou-se um caminhão tanque, com capacidade máxima de carga de 57 t, peso do caminhão vazio (P_c) igual a 18,75 t e volume útil¹⁴ igual a 45 m³, assim, a carga transportada por viagem é igual a 38,25 t. O consumo específico de óleo diesel pelo caminhão (C_c) foi igual a 0,0138 L/t.km (BOVOLENTA E BIAGGIONI, 2016). O consumo foi determinado pela Equação 23 e a estimativa das emissões (Equação 21) foi baseada nos fatores de emissão para transporte rodoviário recomendados pelo IPCC (Tabela 10).

¹⁴ O volume útil foi calculado baseando-se nos limites máximos para dimensões de caminhão, tipo veículo simples de carga, estabelecido pelo DNIT (2018).

Tabela 30 – Distância para o transporte do insumo

Município	Distância ida e volta (km)
Arroio Grande	320
Bagé	128
Capão do leão	274
Dom Pedrito	266
Pelotas	300

Os resultados do consumo de combustível e o número de viagem para cada cidade são mostrados no Apêndice D.

4.3.3.4 Emissões do consumo de eletricidade

As emissões dos GEE do consumo de eletricidade foram estimadas pela metodologia apresentada na Seção 4.1.3.3.

4.3.3.5 Emissões evitadas da decomposição da casca de arroz

O principal destino do excedente da casca de arroz das unidades de beneficiamento, que não possuem pequenas centrais termelétricas, é a disposição em aterros sanitários ou no solo para sua decomposição, embora seja um procedimento incorreto segundo a legislação ambiental. Os gases oriundos da sua decomposição dependente muito das condições do local em que foi disposto o resíduo, no qual pode ocorrer degradação aeróbica, anaeróbica ou ambas. Contudo, a degradação anaeróbica predomina devido a baixa ou nula circulação de ar nas pilhas formadas. As emissões de CH₄ evitadas da decomposição da casca aproveitada foi estimada pelo modelo mostrado na Equação 20. Na Tabela 31 são discriminados os valores dos parâmetros empregados no modelo e os critérios utilizados para definição desses valores são mostrados no Apêndice A.

Tabela 31 – Parâmetros do modelo de emissões evitadas de CH₄ para a casca de arroz

Parâmetros	Valor	Unidade
GWP_{CH_4}	34	kg CO _{2eq} /kg CH ₄
φ	0,90	-
OX	0	-
F	0,50	-
DOC_f	0,50	-
MCF	0,4	-
$W_{j,x}$	$8,78 \times 10^8$	kg
DOC_j	0,49	-
k_j	0,03	-
y	1	ano

4.4 Ciclo de vida da produção de metanol

A análise do metanol produzido a partir do carvão mineral e das biomassas foi baseada em dados secundários obtidos da literatura e pela simulação dos principais processos utilizando o *software* Aspen Plus. O modelo proposto foi baseado no trabalho desenvolvido por Rocha (2015) e Hegazy et al. (2017).

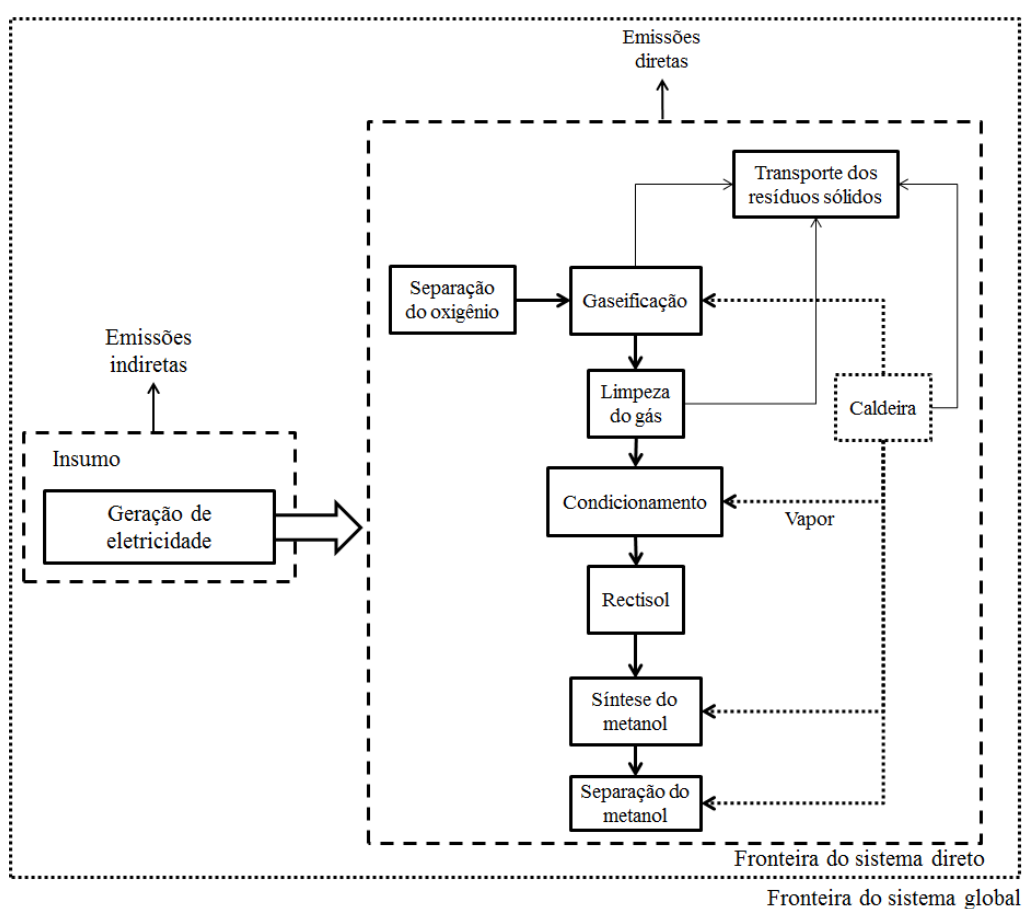
4.4.1 Escopo do estudo

O escopo do ciclo de vida da produção de metanol está compreendido numa análise *gate-to-gate*, o qual compreende basicamente o processo de gaseificação e síntese do metanol que podem ser divididos nas seguintes etapas: preparação da matéria prima, separação do oxigênio do ar, gaseificação, limpeza do gás (processo Rectisol), condicionamento (deslocamento de gás-água), remoção de CO₂ (processo Rectisol), síntese do metanol, separação do metanol, caldeira e equipamentos elétricos (XIAO, et al., 2009; TROP, et al., 2014; QIN, et al., 2016). A produção e o transporte dos insumos químicos foram excluídos do escopo, pois ao contrário dos sistemas anteriores, as quantidades utilizadas são muito baixas. Os insumos e emissões referentes a construção de infraestrutura e fabricação dos equipamentos não foram consideradas, visto que em trabalhos anteriores essas emissões representaram menos de 1% (QIN et al. 2016). A unidade funcional definida foi 1 kg de metanol produzido.

Com o propósito de analisar as emissões diretas e indiretas, os processos foram identificados e classificados na fronteira do sistema, conforme apresentado na Figura 21.

- Emissões diretas: emissões geradas nos processos físico-químicos na unidade de metanol e emissões relativas ao consumo de combustível (carvão mineral) na caldeira de utilidade.
- Emissões indiretas: emissões procedentes da geração da eletricidade consumida nos processos da unidade de metanol.

Figura 21 – Fronteiras do sistema da produção convencional de metanol-carvão



4.4.2 Descrição dos processos simulados

Os processos simulados foram gaseificação, limpeza do gás (processo Rectisol), condicionamento (reação de deslocamento gás-água), remoção de CO₂ (processo Rectisol), síntese do metanol e separação do metanol. Optou-se por esses processos porque são aqueles em que ocorre um maior fluxo de CO_{2eq} nas correntes. Os dados referentes aos outros processos e ao consumo energético foram obtidos da literatura.

Na simulação assumiu-se a hipótese que a planta possui a capacidade de processar 255 t/h de matéria-prima, sendo que no cenário A esse montante é condicionado apenas ao carvão e nos cenários B e C, 30% da carga é abastecida com palha e casca de arroz, respectivamente. Os valores das cargas foram determinados com base na quantidade média do carvão expedido pela CRM nos anos de 2015/2016 e pelas biomassas disponíveis na área de abrangência de coleta, cujo raio é de 160 km.

Os componentes presentes na simulação devem ser especificados no Aspen Plus; a maioria deles como O₂, CO, H₂, CO₂, CH₄, H₂O, N₂, C, S, Cl₂, HCl, H₂S, COS e CH₄O estão contidos na base de dados do *software*, classificados como componentes convencionais (CONVEN), assim não é necessário introduzir as suas propriedades. No entanto, o carvão mineral (característico da jazida de Candiota) e as biomassas não existem na base de dados, desta forma, é necessário adicioná-los como componente “não-convencional” (NC) e estimar as suas propriedades por meio da inserção das suas composições químicas.

Os componentes não-convencionais são sólidos heterogêneos que não participam no equilíbrio químico ou de fases, sendo necessário determinar apenas a massa específica e a entalpia; para tanto, foram selecionados no Aspen Plus os modelos HCOALGEN e DCOALIGT, respectivamente (ROCHA, 2015; ARDILA, 2016). A composição elementar (PROXANAL), composição imediata (ULTANAL) e análise de compostos sulfurados¹⁵ (SULFANAL) são atributos (Tabela 32) requeridos para os modelos adotados.

Analisando os dados da Tabela 32, a principal distinção entre as composições do carvão mineral e da biomassa é em termos de material volátil, carbono fixo, enxofre e cinzas. As biomassas contêm maior teor de matéria volátil, enquanto o carvão mineral possui mais carbono fixo. O teor de cinzas do carvão é superior à biomassa em torno de 3 vezes.

O pacote termodinâmico Peng-Robinson com Boston-Mathias (PR-BM) foi adotado para estimar as propriedades termodinâmicas, pois é o modelo mais recomendado para mistura de gases leves (ALI et al., 2017; FAN et al., 2017).

¹⁵Compostos orgânicos, piríticos e sulfáticos

Tabela 32 – Caracterização físico-química das matérias primas

Análise imediata	Carvão		Casca de	Umidade
	mineral ¹	Palha de arroz ²	arroz ³	
Umidade total, b.u.	11,00	8,60	12,00	%
Cinza, b.s.	46,75	12,74	18,60	%
Matéria volátil, b.s.	18,65	64,97	67,80	%
Carbono fixo, b.s.	23,55	13,69	13,60	%
Análise elementar				
Carbono	31,52	38,83	38,3	%
Hidrogênio	3,45	5,27	4,00	%
Nitrogênio	0,47	0,70	0,50	%
Enxofre total	0,96	0,20	-	%
Enxofre pirítico	0,84	-	-	%
Enxofre sulfático	0,11	-	-	%
Enxofre orgânico	0,44	-	-	%
Oxigênio	17,50	33,92	38,60	%
Cloro	-	0,10	-	%
Poder calorífico				
PCS	12,98	15,73	15,49	MJ/kg
PCI	11,05	14,45	14,28	MJ/kg

Fonte: ¹Kalkreuth et al. (2006), ²Bazzo et al. (2011), ³Hoffmann (1999)

4.4.2.1 Preparação da matéria prima

O processamento da matéria prima é necessário antes da gaseificação porque o tamanho das partículas influencia significativamente na cinética das reações no reator. Partículas com menor granulometria possuem uma área de contato específica maior, resultando em reações mais rápidas (BASU, 1985). O carvão procedente da companhia de mineração possui uma granulometria em torno de 50 mm, tamanho insuficiente para alimentar o gaseificador; desta forma, é necessário submetê-lo ao processo de moagem (moinho de bolas) e classificação de partículas com tamanho abaixo de 0,2 mm (QIU et al., 2007; HOWANIEC e SMOLINSKI, 2014). O principal insumo desta etapa é a eletricidade, cujo consumo é aproximadamente 7

kWh/t de carvão mineral (ESTEBAN e CARRASCO, 2006). Em relação ao pré-tratamento das biomassas, na Seção 4.2.1.8 foram relatadas as operações e o respectivo consumo energético.

4.4.2.2 Separação do oxigênio

A fim de obter um gás de síntese com maiores teores de H_2 e CO , componentes importantes para a síntese de metanol, o agente de gaseificação utilizado foi o oxigênio puro obtido pelo processo de separação criogênica do ar, que consiste em etapas de compressão, purificação, refrigeração e destilação. O consumo energético considerado foi igual a 0,25-0,27 kWh/kg oxigênio produzido (95% de O_2 , 4,2% de Ar, 0,8% de N_2) (KUNZE E SPLIETHOFF, 2010).

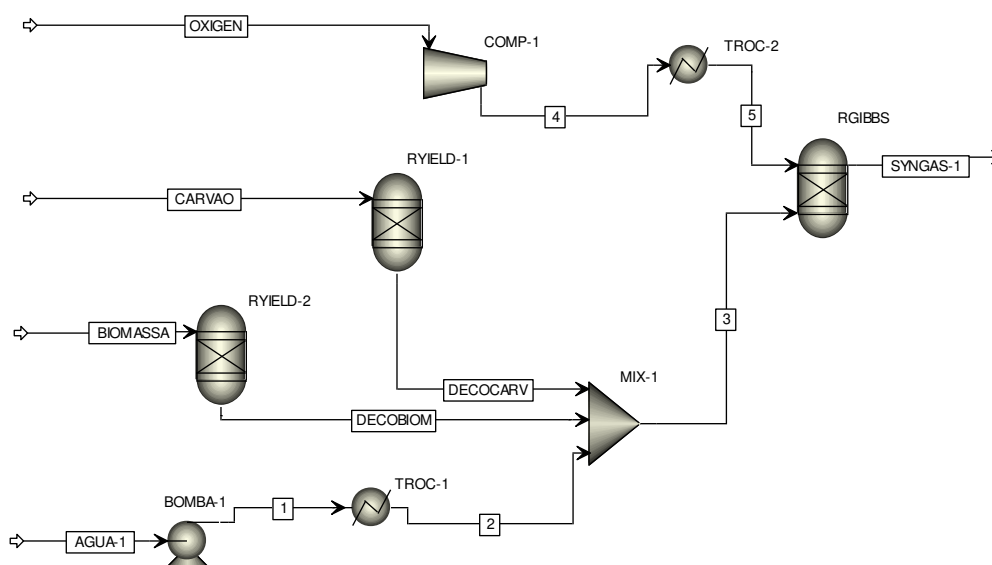
4.4.2.3 Gaseificação

Foi desenvolvido um modelo simples de gaseificação baseada no equilíbrio químico das espécies, fundamentado na minimização da energia livre de Gibbs (TROP, et al., 2014; PARVEZ, et al., 2016; ALI et al., 2017; FAN et al., 2017). Esse modelo calcula a concentração teórica máxima das componentes envolvidas, de modo que o equilíbrio seja alcançado, obedecendo às restrições termodinâmicas e de transferência de calor (ROCHA, 2015). Ainda, as seguintes hipóteses foram assumidas para a realização da simulação.

- (1) A gaseificação ocorre em estado estacionário, e o tempo de permanência foi longo o suficiente para que as reações atingissem o equilíbrio.
- (2) As cinzas do carvão e das biomassas não participam das reações químicas.
- (3) Os produtos da gaseificação considerados na simulação foram CO , H_2 , CO_2 , CH_4 , H_2O , N_2 , H_2S e COS .
- (4) A perda de pressão no gaseificador é desprezada.
- (5) A temperatura do reator é uniforme e não há gradiente de temperatura.

Ao realizar este tipo de análise é possível identificar o fluxo dos GEE nos processos, que é a principal finalidade desta simulação. O modelo global de gaseificação do carvão e das biomassas foi representado pela combinação em série de dois reatores do Aspen Plus, RYield e RGibbs (HEGAZY et al., 2017), conforme o fluxograma mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Diagrama de fluxo do modelo de gaseificação no Aspen Plus



As vazões de alimentação de carvão (CARVÃO), biomassa (BIOMASSA), oxigênio (OXIGEN) e água (AGUA-1) foram ajustadas conforme o cenário simulado (Tabela 33). A razão de equivalência e a relação entre vapor e material carbonáceo utilizadas em todas as simulações foram iguais a 0,53 e 1,1, respectivamente (GIL et al., 1999; NIKOO e MAHINPEY, 2008; GÓMEZ-BAREA e LECKNER, 2010).

Tabela 33 – Parâmetros de entrada para simulação da gaseificação

Corrente	Cenário A (kg/h)	Cenário B (kg/h)	Cenário C (kg/h)
Carvão	255000,00	178500,00	178500,00
Palha de arroz	0	76500,00	0
Casca de arroz	0	0	76500,00
Oxigênio	106423,46	114888,50	112855,12
Vapor	5014,57	3000,00	5857,22

O carvão mineral e as biomassas, especificados como componentes não-convencionais, alimentam o reator de rendimento (RYIELD 1 e 2) por meio das correntes CARVAO e BIOMASSA, cuja finalidade é decompô-los nas componentes convencionais especificados inicialmente e existente na base de dados do Aspen Plus (O₂, H₂, H₂O, C, S, N₂

e Cl₂). Esta decomposição foi realizada mediante a execução de uma sub-rotina em FORTRAN, baseado nas análises elementar e imediata das matérias primas. As sub-rotinas para as simulações do carvão e biomassa são apresentadas nas Tabelas A.21 e A.22, respectivamente, no apêndice E.

Os produtos do reator RYield são encaminhados ao reator RGibbs para ocorrer a formação dos produtos da gaseificação, considerando o equilíbrio a partir da minimização da energia livre de Gibbs. A descrição de cada bloco de operação e os parâmetros de processo utilizados no modelo de gaseificação no Aspen Plus são apresentadas na Tabela 34.

Tabela 34 – Descrição dos blocos de operações para gaseificação do carvão e cogaseificação do carvão e biomassas

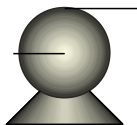

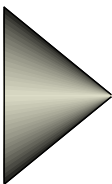

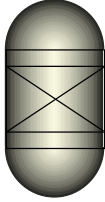
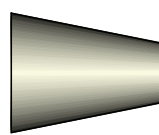


Bloco	Nome no Aspen Plus	Descrição	Parâmetro de operação
BOMBA-1 	Pump	Simula a compressão da água que será utilizada para gerar vapor e alimentar o RGIBBS	P= 3 MPa (MARTELLI et al., 2011)
TROC-1 	Heater	Simula o aquecimento e geração do vapor	T= 473,15 K P= 3 MPa (MARTELLI et al., 2011)
MIX-1 	Mixer	Executa a mistura das correntes da matéria prima (decompostas) e do vapor antes de alimentar o RGIBBS	$\Delta P = 0$ $\Delta T = 0$
RYIELD-2 	Ryield	Executa a decomposição da biomassa em seus constituintes fundamentais	T= 323,15 K

Tabela 34 – Descrição dos blocos de operações para gaseificação do carvão e cogaseificação do carvão e biomassas (Continuação)

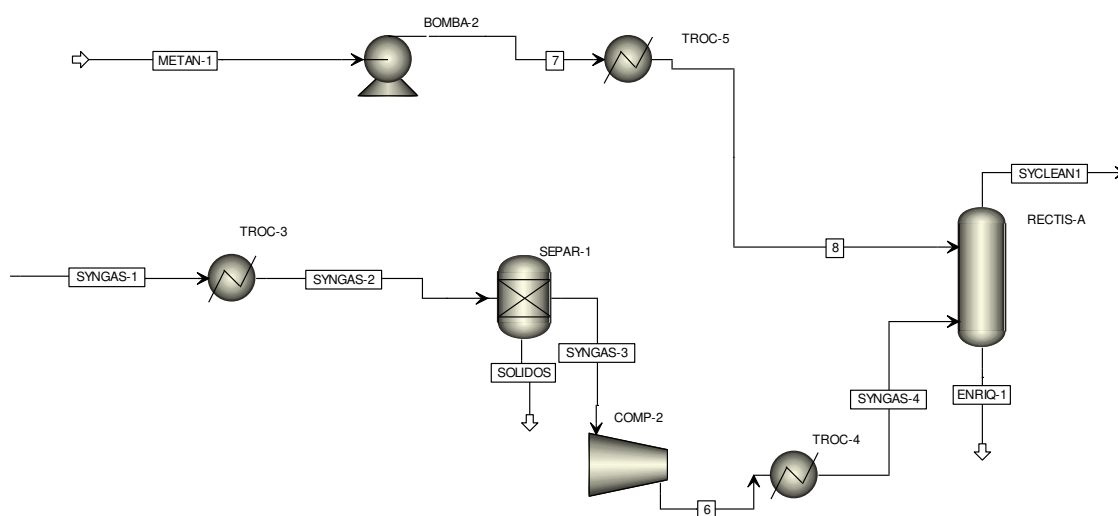
Bloco	Nome no Aspen Plus	Descrição	Parâmetro de operação
	Ryield	Executa a decomposição do carvão em seus constituintes fundamentais	T= 323,15 K
	Compr	Simula a compressão do oxigênio para a gaseificação	P= 5 MPa Eficiência=90%
	Heater	Simula o aquecimento do oxigênio antes de alimentar o reator RGIBBS	P= 5 MPa T= 303,15 K (MARTELLI et al., 2011)
	RGibbs	Simula a gaseificação da Biomassa pela minimização da energia livre de Gibbs	P= 3 MPa T= varia com a alimentação

4.4.2.4 Limpeza do gás de síntese

O gás de síntese bruto contém algumas impurezas, tais como material particulado, compostos ácidos (H_2S , COS e HCl) que devem ser removidos a fim de evitar a desativação dos catalisadores utilizados nos processos seguintes de deslocamento gás-água e síntese de metanol. O gás de síntese possui uma elevada temperatura e deve ser resfriado para possibilitar a realização das operações de limpeza, principalmente no processo de remoção dos compostos sulfurados, em que o metanol é utilizado como solvente a temperaturas abaixo de zero.



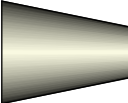

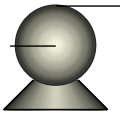


O modelo é composto basicamente por um equipamento de separação (SEPAR-1) que simula a remoção das partículas e uma coluna de absorção (RECTIS-A) para remoção dos compostos sulfurados por meio do processo Rectisol, que utiliza metanol resfriado como solvente (Figura 23). Segundo Korens et al. (2002), esta tecnologia é a mais utilizada quando o propósito é removê-los completamente, razão pela qual foi escolhido. A eficiência de remoção em ambos os processos é igual a 100%.

Figura 23 – Diagrama de fluxos dos processos de limpeza do gás de síntese no Aspen Plus



A descrição de cada bloco de operação e os parâmetros de processo utilizados no modelo de gaseificação no Aspen Plus são apresentadas na Tabela 35.

Tabela 35 – Descrição dos blocos de operações da limpeza do gás de síntese para remoção das partículas e dos gases ácidos

Bloco	Nome do Aspen Plus	Descrição	Parâmetro de operação
TROC-3 	Heater	Simula o resfriamento do gás de síntese gerado no RGIBBS	$T= 423,15\text{ K}$
SEPAR-1 	Sep	Separa as partículas (cinzas) com eficiência de 100%	$\Delta T=0$ $\Delta P=0$
COMP-2 	Compr	Simula a compressão do gás de síntese para alimentar o processo Rectisol (RECTIS-A)	$P= 4\text{ MPa}$ (SUN e SMITH, 2013)
TROC-4 	Heater	Simula o resfriamento do gás de síntese para alimentar o processo Rectisol (RECTIS-A)	$T= 293,15\text{ K}$ $P= 4\text{ MPa}$
BOMBA-2 	Pump	Simula o aumento de pressão de injeção do metanol na coluna de absorção (Rectis-A)	$P= 4\text{ MPa}$ (LARSON et al., 2006)
TROC-5 	Heater	Simula o resfriamento da corrente de metanol (METAN-1) antes de alimentar a coluna	$T= 238,15\text{ K}$ (KOYTSOUMPA et al., 2015)
RECTIS-A 	Radfrac	Simula uma coluna de absorção de gases ácidos utilizando metanol como solvente – Processo Rectisol	$P= 4\text{ MPa}$ (SUN e SMITH, 2013)

4.4.2.5 Condicionamento do gás

A reação de deslocamento gás-água (*water-gas shift*) é muito importante para o processo no geral, pois é usada para aumentar a proporção de H₂, elemento indispensável para a síntese do metanol. Como a gaseificação produz baixas concentrações de H₂ comparada com o CO, parte deste deve ser convertida em H₂ e CO₂ por meio da inserção de vapor (Equação 10). Na Tabela 36 é apresentada a descrição dos blocos de operações utilizados na simulação e na Figura 24 o modelo desenvolvido.

Tabela 36 – Descrição dos blocos de operações de condicionamento do gás de síntese

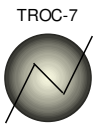

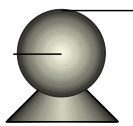

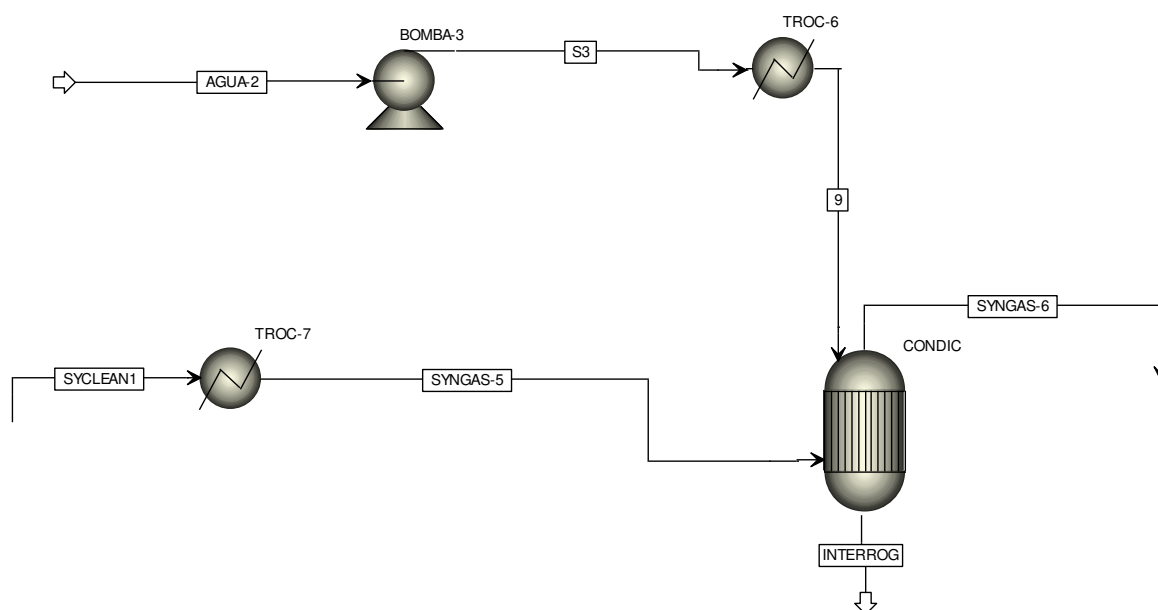
Bloco	Nome do Aspen Plus	Descrição	Parâmetro de operação
	Heater	Simula o aumento de temperatura da corrente procedente do processo Rectisol	T= 523,15 K P= 2 MPa (BOYANO et al., 2011)
	REquil	Simula a reação de deslocamento gás-água $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	T= 523,15 K P= 2 MPa (BOYANO et al., 2011)
	Pump	Simula o aumento de pressão de injeção do água no reator CONDIC 1	P= 2 MPa
	Heater	Simula o aquecimento e geração de vapor	T= 523,15 K P= 2 MPa

Figura 24 – Diagrama de fluxos da etapa de condicionamento do gás de síntese no Aspen Plus



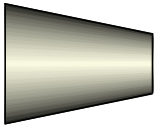
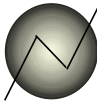
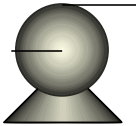


4.4.2.6 Remoção do CO₂

Na etapa anterior, ocorreu a formação tanto de H₂ quanto de CO₂. Este último deve ser removido até alcançar uma relação molar (Equação 23) que favorece a síntese do metanol, compreendida na faixa de 2,0 e 2,15. (PEDUZZI et al., 2013; ZHANG et al., 2014, BOZZANO e MANENTI, 2016).

$$R_{HC} = \frac{H_2 - CO_2}{CO + CO_2} \quad (23)$$

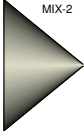
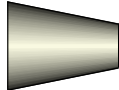


O modelo utilizado na simulação desta Seção é ilustrado na Figura 25, o qual também utiliza o processo Rectisol para remoção do CO₂. Conforme a carga alimentada (cenário A, B e C) no sistema, a vazão de metanol encaminhada para o reator (RECTIS-B) foi ajustada para garantir a relação molar (Equação 23) na faixa informada. A descrição dos blocos de operações utilizados na simulação é apresentada na Tabela 37.

Tabela 37 – Descrição dos blocos de operações de remoção CO₂ do gás de síntese

Bloco	Nome do Aspen Plus	Descrição	Parâmetro de operação
COMP-3 	Compr	Simula a compressão do gás de síntese	P = 6 MPa
TROC-8 	Heater	Simula o resfriamento do gás de síntese antes de alimentar a coluna de absorção (RECTIS-B)	T = 293,15 K
BOMBA-4 	Pump	Simula o aumento de pressão de injeção do metanol na coluna de absorção (Rectis-B)	P = 6 MPa
TROC-9 	Heater	Simula o resfriamento da corrente de metanol (METAN-1) antes de alimentar a coluna de absorção (Rectis-A)	T = 238,15 K (KOYTSOUMPA et al., 2015)
RECTIS-B 	Radfrac	Simula uma coluna de absorção de gases ácidos utilizando metanol como solvente – Processo Rectisol	P = 6 MPa

O solvente enriquecido pode ser encaminhado para um processo no qual o CO₂ possa ser expandido, separado, comprimido e armazenado para ser utilizado como matéria-prima em outros processos ou encaminhado para armazenamento geológico.

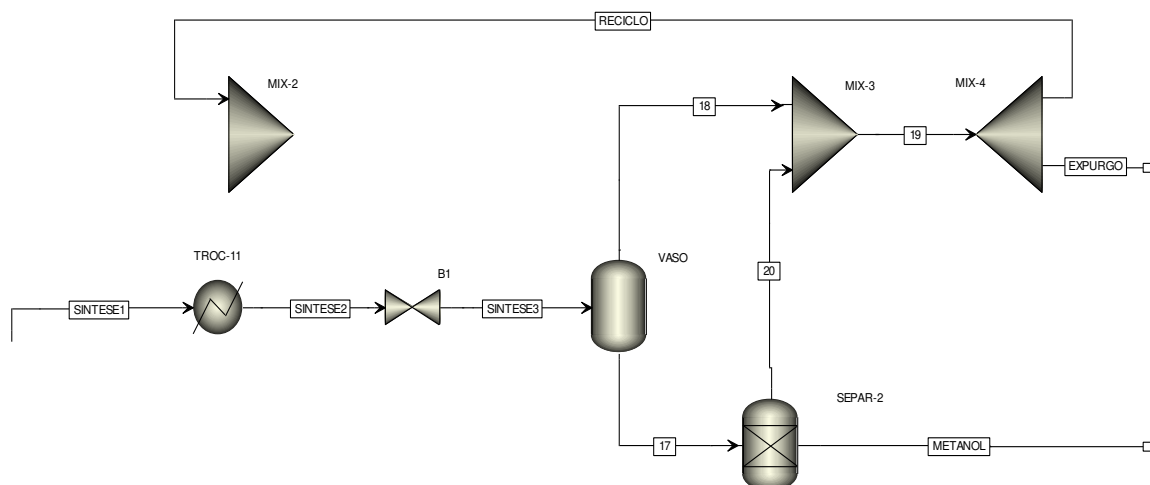
Tabela 38 – Descrição dos blocos das operações de síntese do metanol

Bloco	Nome do Aspen Plus	Descrição	Parâmetro de operação
	Mixer	Bloco simula um misturador de correntes do gás de síntese não reagido com a corrente proveniente do reator RECTISOL-B	$\Delta T=0$ $\Delta P=0$
	Compr	Simula a compressão do gás de síntese para alimentar o reator SYNTES	$P=9 \text{ MPa}$
	Heater	Simula a troca de calor da corrente de gás de síntese	$T=523,15 \text{ K}$ $P=9 \text{ MPa}$
	REquil	Bloco simula as reações síntese de metanol: $2H_2 + CO \rightarrow CH_3OH$ $3H_2 + CO_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$	$T = 523,15 \text{ K}$ $P=9 \text{ MPa}$ (ROCHA, 2015)

4.4.2.8 Separação do metanol

A corrente rica em metanol proveniente do reator de síntese é enviada para a etapa de separação composta por um vaso flash (VASO) e um equipamento (SEPAR-2) que simula a separação do metanol (Figura 27).


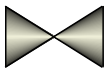


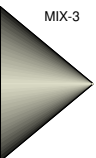
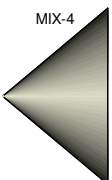
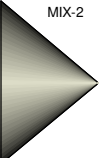
Figura 27 – Diagrama de fluxo dos processos de separação do metanol no Aspen Plus



O gás de síntese não reagido sai pelo todo do vaso e retorna ao processo pela corrente de RECICLO. Cerca de 15% desta corrente é purgada do processo com a finalidade de reduzir a quantidade de gases inertes no circuito e, posteriormente, é encaminhada para combustão.

A corrente do fundo, mistura composta predominantemente por metanol e água em fase líquida, é encaminhada ao SEPAR-2 para obtenção de um produto de pureza de aproximadamente 99%. Detalhes dos blocos e parâmetros de operação utilizados na simulação são apresentados na Tabela 39.

Tabela 39 – Descrição dos blocos das operações de separação do metanol

Bloco	Nome do Aspen Plus	Descrição	Parâmetro de operação
TROC-11 	Heater	Simula o resfriamento do gás de síntese para posterior separação do metanol no VASO flash	T= 303,15 K
VALV 	Valve	Simula uma válvula redutora de pressão	P= 4,5 MPa
VASO 	Flash	Simula a separação ds fração líquida de metanol e os gases não reagidos no reator de síntese	T= 303,15 K P=4,5 MPa (KISS et al., 2016)
SEPAR-2 	Sep	Simula um separador simples para remoção da fração do metanol contida no gás de síntese	Split fraction Metanol =0,99
MIX-3 	Mixer	Simula um misturador das correntes do gás de síntese não reagido procedentes do VASO flash e do SEPAR-2	$\Delta T=0$ $\Delta P=0$
MIX-4 	FSplit	Simula a separação da corrente de gás de síntese não reagido (12% da vazão é expurgado)	$\Delta T=0$ $\Delta P=0$
MIX-2 	Mixer	Simula o misturador das correntes do gás de síntese não reagido com o gás oriundo do reator RECTIS-B	$\Delta T=0$ $\Delta P=0$

4.4.2.9 Caldeira e equipamentos elétricos

A energia fornecida para toda a planta de metanol é proveniente basicamente de duas fontes: carvão mineral e eletricidade. O carvão é usado para alimentar a caldeira de vapor de processo, enquanto a eletricidade alimenta os equipamentos elétricos (bombas, compressores, válvulas, separação do O₂, preparação da matéria prima, etc). O carvão consumido na fornalha da caldeira para abastecer toda a unidade de produção de metanol¹⁶ corresponde a 0,4 – 0,46 kg/kg metanol, considerando a eficiência da caldeira igual a 86% (QIN et al., 2016; HAO et al., 2017), e o consumo de eletricidade é igual a 184,6 kWh/t metanol (LI et al., 2010).

4.4.2.10 Transporte dos resíduos sólidos

Os resíduos sólidos gerados na gaseificação e separadas nos processos de limpeza do gás de síntese, somado as cinzas da fornalha da caldeira são encaminhadas para a mina de carvão para recuperação das áreas mineradas, conforme relatado na Seção 4.1.1.7. Atualmente esta prática é frequente com as cinzas geradas na termelétrica a carvão mineral da região. A distância percorrida depende da localização da mina; assumiu-se a distância de 15 km.

4.4.2.11 Emissões pela combustão do carvão mineral-vapor

As emissões associadas a combustão do carvão mineral na fornalha para produção de vapor foram estimadas (Equação 21) pelos fatores de emissão padrão para os gases CH₄, N₂O e CO₂ (Tabela 40), de acordo com a metodologia do IPCC (2006d).

Tabela 40 – Fatores de emissão da combustão do carvão

GEE	Padrão (kg GEE/kg carvão)	Baixo (kg GEE/kg carvão)	Alto (kg GEE/kg carvão)
CO ₂	1,25	1,20	1,30
CH ₄	1,30×10 ⁻⁰⁵	3,89×10 ⁻⁰⁶	3,89×10 ⁻⁰⁵
N ₂ O	1,95×10 ⁻⁰⁵	6,49×10 ⁻⁰⁶	6,49×10 ⁻⁰⁵

Fonte: Adaptado do IPCC (2006d). Nota: Os valores na tabela foram convertidos de kg/TJ de carvão, que é a unidade apresentada pelo IPCC, para kg de GEE/kg de carvão, empregando o PCI do diesel de 11,05 MJ/kg.

¹⁶ O carvão mineral foi utilizado como combustível na caldeira em todos cenários avaliados.

4.4.2.12 Emissões pelo transporte dos resíduos sólidos

Para estimar as emissões procedentes do transporte dos resíduos sólidos da planta de metanol é necessário determinar o consumo de óleo diesel. O caminhão que vem sendo utilizado para o transporte das cinzas das termelétricas, operação semelhante a que está sendo abordada aqui, é o tipo basculante. Estimou-se o consumo do combustível com um caminhão de capacidade máxima de 63 t, volume útil de 22 m³ e 45 t de carga líquida. O valor da massa específica aparente da cinza utilizado para determinar a carga transportada e o número de viagens (*Carga*) é igual a 672 kg/m³ (MARGON, 2002), assim, a carga transportada por viagem é igual a 14,78 t. O consumo específico de óleo diesel pelo caminhão (C_c) é igual a 0,355 L/t¹⁷. Os resultados do consumo de combustível e o número de viagem são mostrados no Apêndice A.

¹⁷ O valor foi estimado pelos dados referentes ao transporte do carvão mineral bruto, visto que o modelo de caminhão utilizado é o mesmo.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação do impacto do carvão mineral

Na Tabela 41 é apresentado o inventário detalhado das emissões estimadas de CO_{2eq} de todas as atividades consideradas na fronteira do sistema do ciclo de vida do carvão mineral. A soma das emissões foi de $3,29 \times 10^{-2}$ CO_{2eq}/kg de carvão expedido, resultado na mesma ordem de magnitude dos estudos sobre ACV do carvão mineral encontrados para a China (QIN et al., 2016), Polônia (BURMISTRZ et al., 2016), Holanda (KOORNNEEF et al., 2008), e Austrália, Ucrânia e EUA (EPA, 2005), conforme a Figura 28. As emissões da Austrália, Ucrânia e EUA apenas incluíram emissões fugitivas da mineração do carvão a céu aberto; outros estudos não relataram detalhes dos insumos e processos durante o ciclo de mineração, como realizado nesta tese. Uma das possíveis razões para os estudos que apresentaram os maiores indicadores é a alta emissão de GEE associada a matriz elétrica de seus países em comparação com o Brasil, conforme discutido na Seção 4.1.3.3. Já para os estudos que apresentaram os menores indicadores em relação ao obtido nessa tese pode estar relacionado ao baixo valor do GWP do metano usado, uma vez que aqui foi utilizado o GWP atualizado (34 kg de CO_{2eq}/ kg de CH₄), publicado no 5º relatório do IPCC.

Na Figura 29 é mostrada a distribuição das emissões estimadas no ciclo de vida do carvão. Observa-se que a principal fonte de emissões de CO_{2eq} não é derivada do consumo dos insumos energéticos, mas das emissões fugitivas de metano, correspondentes a 89,51 % (0,0294 kg CO_{2eq}/kg de carvão) das camadas de carvão lavradas (92,3%) e das etapas pós-mineração (7,7%). As outras emissões dominantes provêm das etapas de mineração (5,1%) e transporte do carvão bruto (3,71%). Isso ocorreu em função das operações de manuseio da grande quantidade de material inerte e do transporte do carvão bruto realizadas pelos equipamentos *off-road* alimentados por motores a diesel e eletricidade. As outras emissões das etapas de produção e transporte de insumos, detonação de explosivos, cominuição, aplicação de insumos agrícolas e recuperação da área minerada contribuíram muito pouco para os impactos do ciclo do carvão, com proporções de 1,06%; 0,45%; 0,3%; 0,24%; 0,21% e 0,01%, respectivamente.

Tabela 41 – Emissões¹ estimadas dos GEE do ciclo de vida do carvão mineral

Etapa	Fonte	Emissões (kg CO _{2eq} /kg de carvão)
Mineração	Perfuratriz	$2,12 \times 10^{-04}$
	Trator esteira	$5,24 \times 10^{-04}$
	Pás carregadeiras	$2,86 \times 10^{-04}$
	Escavadeira hidráulica	$4,33 \times 10^{-04}$
	Motobomba	$7,36 \times 10^{-05}$
	Escavadeira <i>dragline</i>	$1,44 \times 10^{-04}$
	Escavadeira <i>shovel</i> P&H	$5,00 \times 10^{-06}$
Transporte do carvão bruto	Caminhão (30 t)	$1,71 \times 10^{-04}$
	Caminhão fora-de-estrada (65 t)	$1,05 \times 10^{-03}$
Revegetação	Trator agrícola	$2,94 \times 10^{-06}$
Cominuição	Britadores e peneiras	$6,00 \times 10^{-05}$
Transporte dos insumos	Óleo diesel	$6,14 \times 10^{-05}$
	Explosivos	$3,61 \times 10^{-05}$
	Calcário	$3,58 \times 10^{-06}$
	Fertilizante (NPK)	$2,36 \times 10^{-10}$
Explosivos	Detonação	$7,64 \times 10^{-05}$
Aplicação dos insumos agrícolas	Aplicação do calcário dolomítico	$5,20 \times 10^{-05}$
	Aplicação do fertilizante Nitrogenado	$1,06 \times 10^{-06}$
Emissões fugitivas	Mineração a céu aberto	$2,72 \times 10^{-02}$
	Pós-mineração	$2,26 \times 10^{-03}$
Emissões da produção dos insumos	Óleo diesel	$2,54 \times 10^{-04}$
	Calcário	$3,27 \times 10^{-06}$
	Nitrogênio (N)	$8,98 \times 10^{-07}$
	Fósforo (P ₂ O ₅)	$1,18 \times 10^{-06}$
	Potássio (K ₂ O)	$6,43 \times 10^{-07}$
Total		$3,29 \times 10^{-02}$

¹Emissões estimadas por meio dos dados de operação fornecidos pela CRM.

Figura 28 – Comparação do impacto do aquecimento global pela mineração do carvão

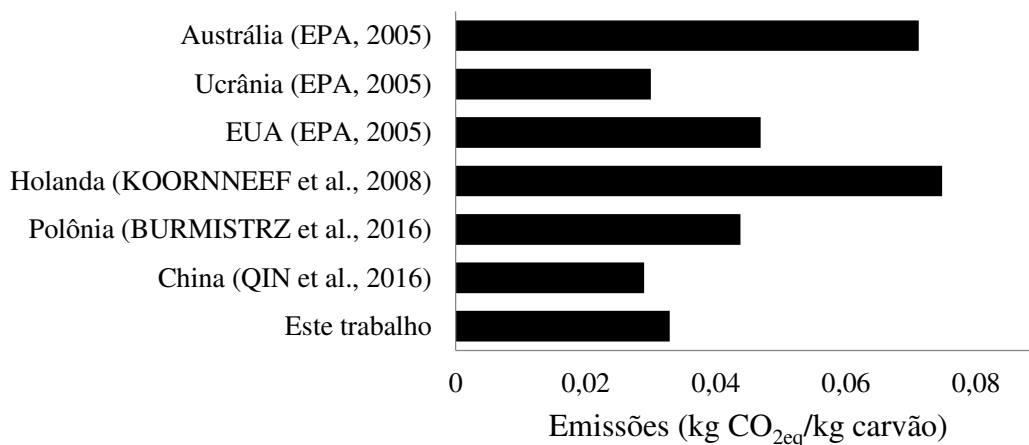
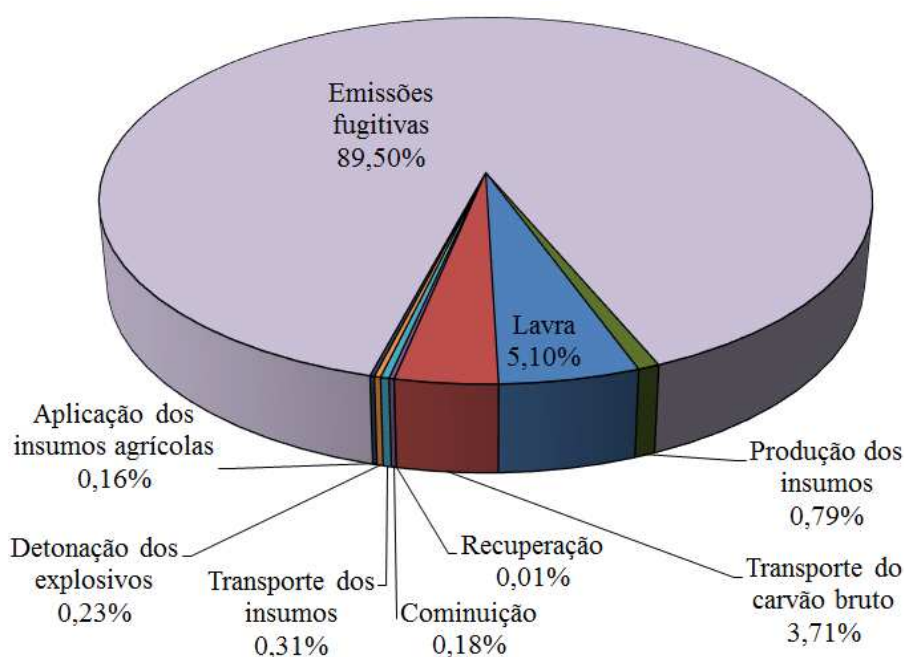


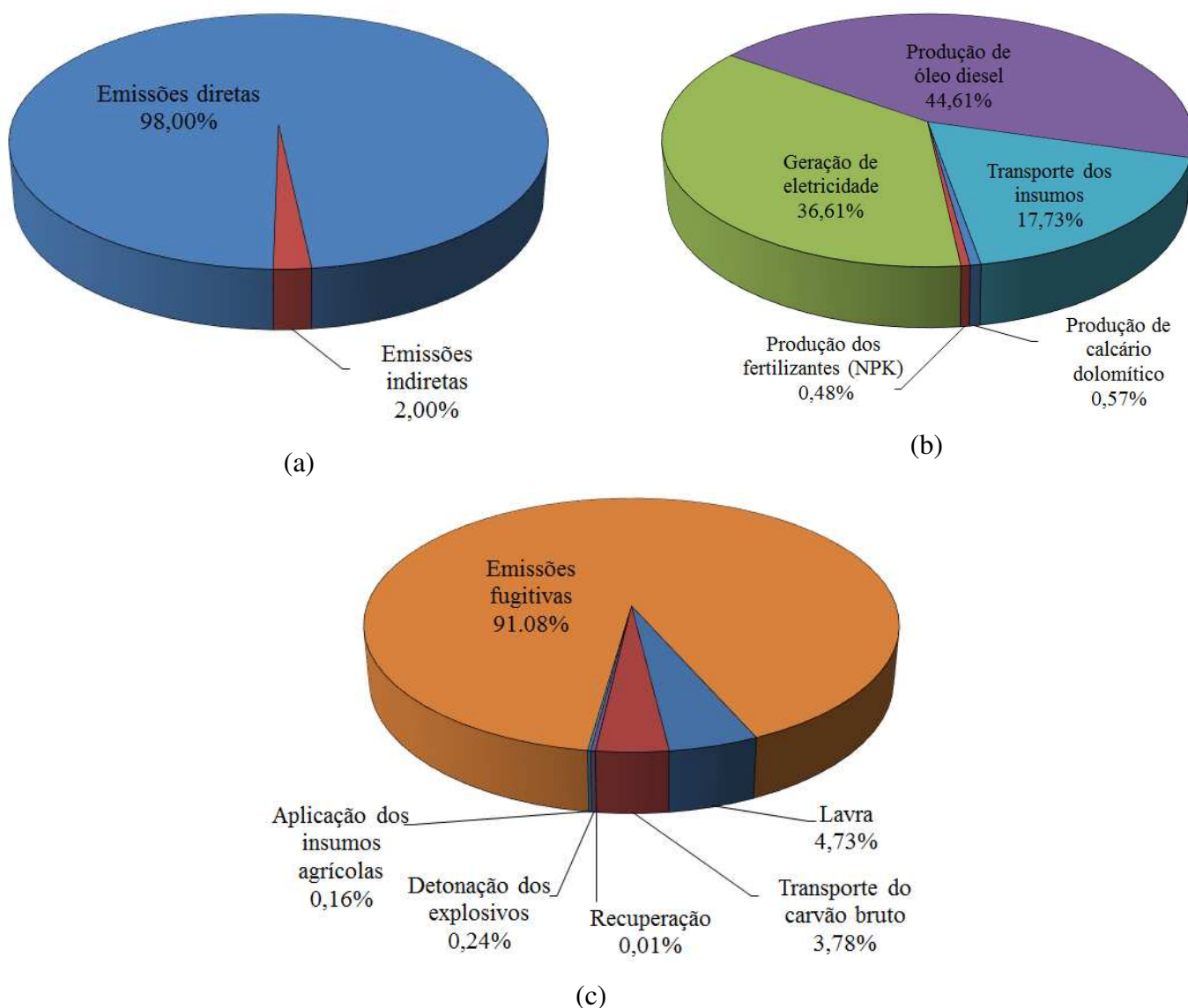
Figura 29 – Distribuição das emissões estimadas dos GEE no ciclo de vida do carvão mineral



Com o propósito de investigar as emissões diretas e indiretas, os resultados foram organizados de acordo com a Figura 30. Verifica-se que as emissões diretas são predominantes na cadeia de produção, representando 98% (Figura 30 - a), o que já era esperado porque as emissões fugitivas (Figura 30 - c) estão incluídas nesta classificação. Na análise das emissões indiretas (Figura 30 - b), a produção de diesel contribuiu com a maior porcentagem de emissões (44,61%), seguida da geração de eletricidade (36,61%), ambos insumos são os mais representativos na produção de carvão - cerca de 0,827 kg de óleo diesel e 1,67 kWh são consumidos por tonelada de carvão expedido. As emissões provenientes da produção de

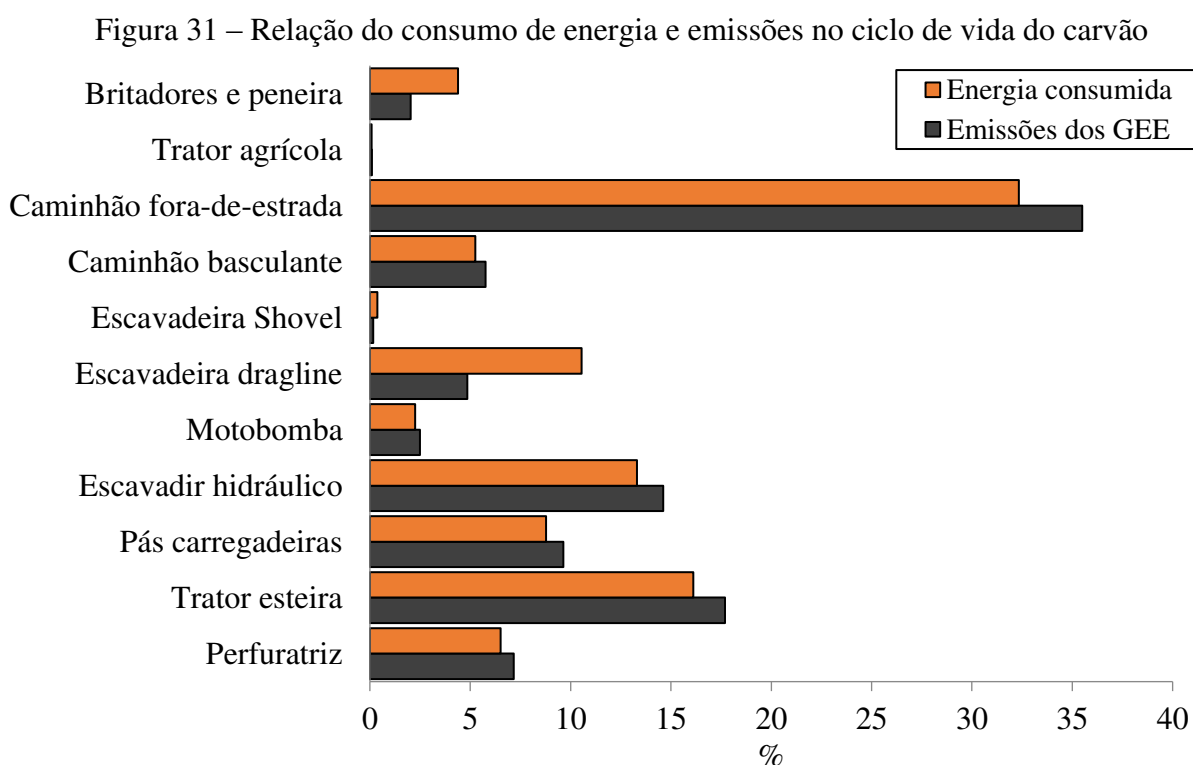
calcário e fertilizantes foram desprezíveis, em razão das baixas quantidades utilizadas comparadas aos outros insumos. A etapa de transporte de insumos apresenta valores modestos, cerca de 18% das emissões indiretas, devido à baixa carga transportada e à curta distância percorrida.

Figura 30 – Distribuição das emissões dos GEE no ciclo de vida do carvão – total (a), emissões indiretas (b) e emissões diretas (c)



Na Figura 31 é mostrado os dados sobre o consumo de energia dos equipamentos *off-road* e suas respectivas emissões. Os caminhões fora de estrada consomem a maior proporção de energia (32%) e, conseqüentemente, liberam a maior quantidade de CO_{2eq} ($1,05 \times 10^{-3}$ CO_{2eq}/kg de carvão), seguido do trator de esteira (16%), escavadeira hidráulica (13%), escavadeira *dragline* (10,55%), pás carregadeiras (8,78%), perfuratriz (6,52%), caminhão

(5,25%), britadores e peneiras (4,40%), bomba de motor (2,26%), escavadeira Shovel P&H (0,37%) e trator agrícola (0,09%). Ainda é possível notar que os britadores, escavadeira *dragline* e a escavadeira *shovel* possuem baixas emissões de CO_{2eq} por consumo de energia, pois são alimentadas por eletricidade, que possui um baixo indicador, estimado em 0,0347 kg CO_{2eq}/MJ de energia de entrada. Em contraste, o indicador dos equipamentos alimentado com óleo diesel é aproximadamente duas vezes maior, igual a 0,0828 kg CO_{2eq}/MJ de energia de entrada.

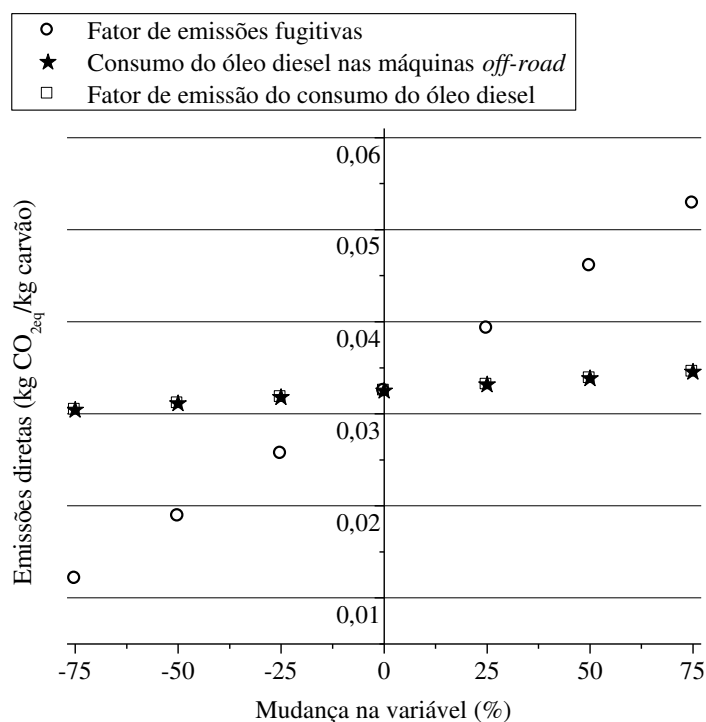


Uma análise de sensibilidade foi realizada para investigar os efeitos dos parâmetros que mais contribuíram para as emissões diretas e indiretas: fator de emissão fugitiva, consumo de óleo diesel em máquinas *off-road*, fator de emissão da combustão de óleo diesel, distância de transporte dos insumos, fator de emissão de eletricidade e produção de óleo diesel. Os valores desses parâmetros foram alterados para 25%, 50% e 75% para análise da sensibilidade.

Conforme mostrado na Figura 32, as emissões diretas do ciclo do carvão são altamente sensíveis ao fator de emissão fugitiva; o aumento de 75% do fator de emissão levou a elevação das emissões em cerca de 62%, indicando que deve ser dada especial atenção a esse fator na construção de inventários de emissões. Os parâmetros do consumo de óleo diesel nas máquinas *off-road* (consumo durante as etapas de mineração, transporte de carvão bruto e recuperação) e o fator de emissão da combustão de óleo diesel têm efeitos relativamente baixos

nas emissões, ambos apresentaram a mesma variação porque são diretamente proporcionais às emissões de GEE.

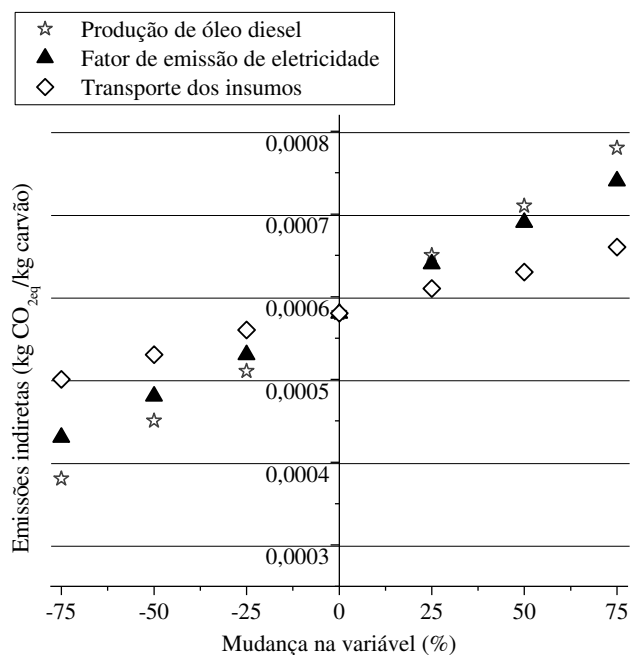
Figura 32 – Análise de sensibilidade das emissões diretas



Considerando a análise de sensibilidade das emissões indiretas (Figura 33), a produção de óleo diesel teve o maior efeito, pois a diminuição do seu consumo em 50% provoca uma redução das emissões em aproximadamente 23%, indicando que é um parâmetro importante para o desenvolvimento de estratégias de mitigação. O fator de emissão de eletricidade teve o segundo maior efeito, enquanto o transporte de insumos teve o terceiro. Mesmo quando a distância de transporte de cada insumo foi aumentada em 75%, a contribuição para as emissões indiretas foi baixa (14%).

Na mineração subterrânea, os impactos das emissões fugitivas de metano são mitigados pela sua coleta e combustão (QIN et al., 2016). Por outro lado, isso não é possível na mineração a céu aberto devido à sua dispersão em ambiente aberto, tornando difícil a sua coleta. Portanto, embora seja muito modesta, a redução das emissões pode ser alcançada pela redução do consumo do óleo diesel, pois isso causa redução das emissões de três fontes: emissões do consumo de diesel em máquinas *off-road*, emissões oriundas da produção de diesel e emissões oriundas do consumo de diesel pelos caminhões rodoviários para o seu transporte, considerando o cenário de emissões totais.

Figura 33 – Análise de sensibilidade das emissões indiretas



5.2 Avaliação do impacto da palha de arroz

As emissões ligadas a rota da palha são apresentadas na Tabela 42. Os processos foram responsáveis pela emissão de $1,48 \times 10^{-1}$ kg CO_{2eq}/kg de palha, porém contabilizando as emissões de CH₄ evitadas pela decomposição da palha na lavoura, as emissões diminuem até a quantidade líquida igual a $9,85 \times 10^{-2}$ kg CO_{2eq}/kg de palha, redução de 34%.

Tabela 42 – Emissões estimadas dos GEE no ciclo de vida da palha de arroz

Etapa	Emissões (kg CO _{2eq} /kg palha)
Coleta da palha	$9,52 \times 10^{-2}$
Transporte da palha	$2,74 \times 10^{-2}$
Processamento da palha	$1,38 \times 10^{-2}$
Produção do insumo (óleo diesel)	$1,13 \times 10^{-2}$
Transporte do insumo (óleo diesel)	$6,64 \times 10^{-4}$
Emissões evitadas da decomposição da palha ¹⁸	$- 5,00 \times 10^{-2}$
Emissões líquidas	$9,85 \times 10^{-2}$

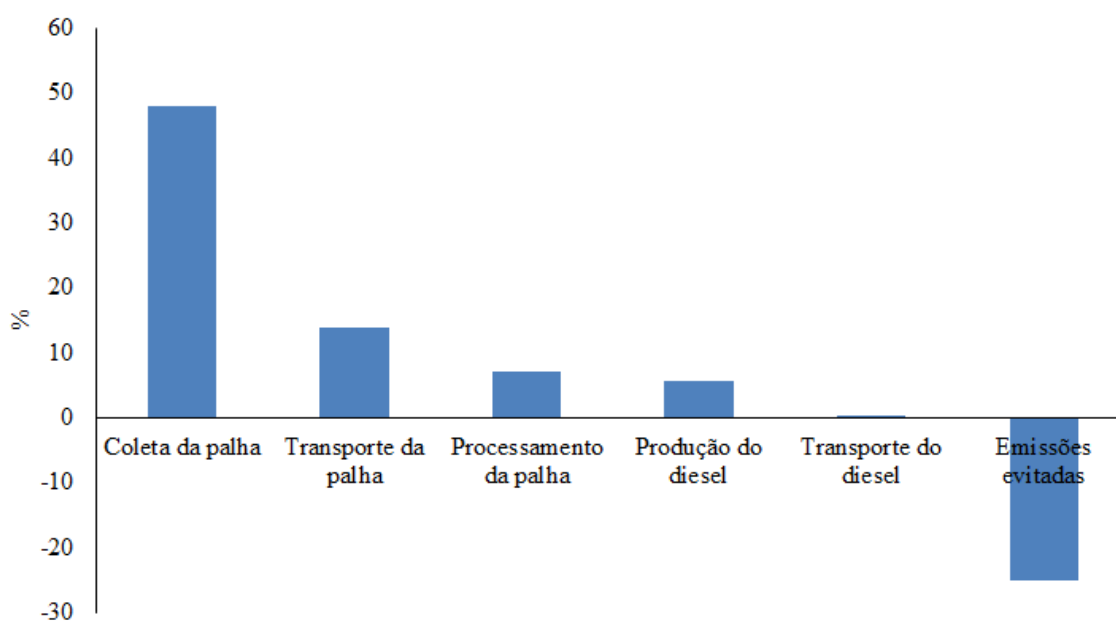
¹⁸ O sinal negativo indica que o GEE deixou de ser liberado para a atmosfera.

Para facilitar a interpretação dos resultados, na Figura 34 é apresentada a distribuição das emissões totais. A etapa de coleta é predominantemente a maior poluidora (47,99%), indicando que esforços ainda devem ser realizados de modo a reduzir o consumo de combustível ou o número de operações, por exemplo, pela aplicação da colheita integrada do arroz e a palha, em que pelo menos as operações de segamento e enleiramento seriam excluídos e, conseqüentemente, refletiria no menor consumo do combustível.

Em seguida, aparece a etapa de transporte, correspondendo a 13,80%, processamento da palha (6,97%), produção do óleo diesel (5,71%) e transporte do óleo diesel consumido (0,33%). No trabalho desenvolvido por Delivand et al. (2015), que compreende análise do custo econômico e ambiental na logística da palha, na etapa de transporte também foi encontrada uma contribuição menor em relação às emissões das atividades de coleta. Ainda analisando a Figura 34, observa-se que as emissões evitadas alcançaram uma parcela relevante, igual a 25,19%, contudo não foi possível anular totalmente as emissões ligadas a rota da palha.

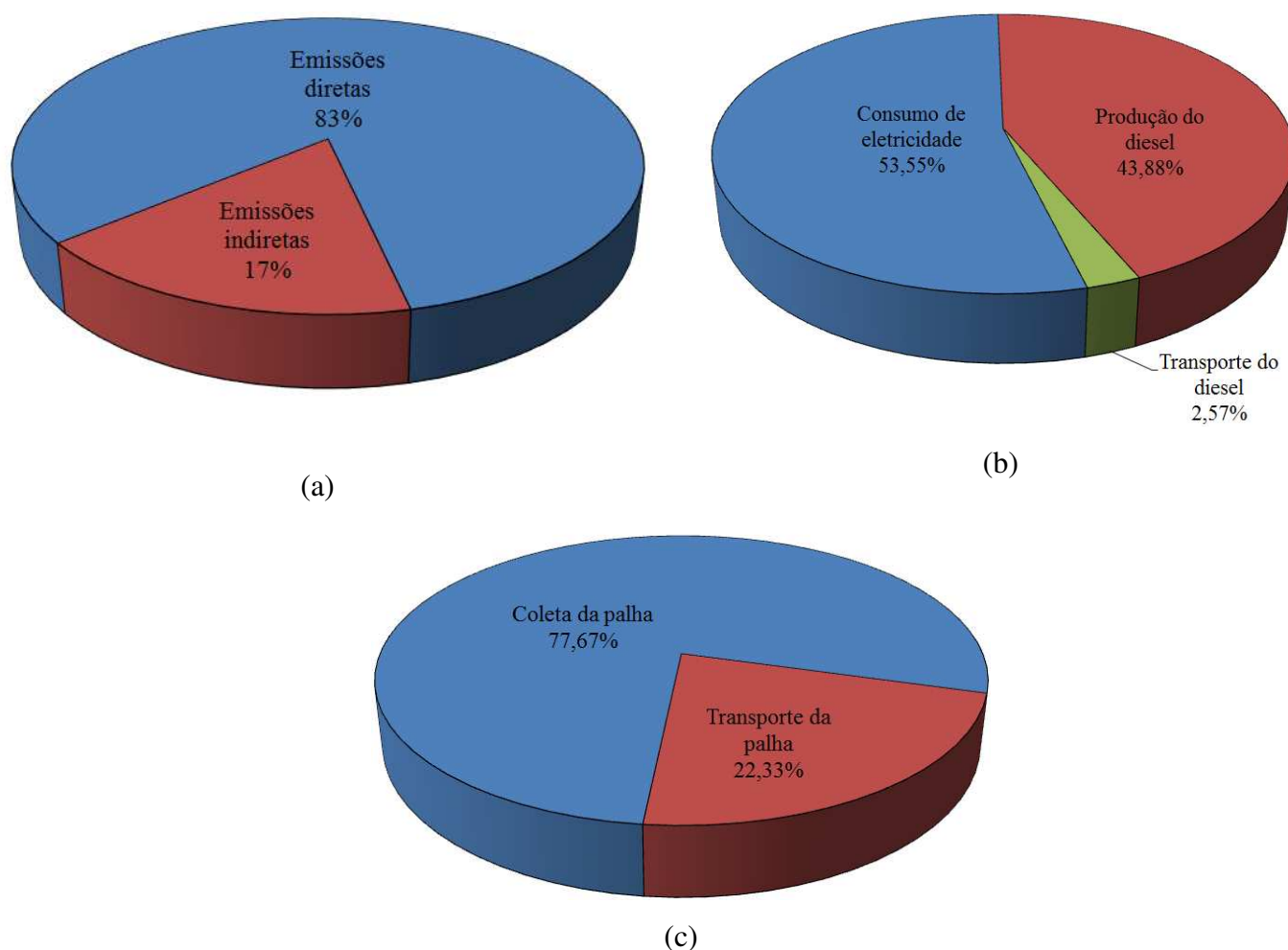
No estudo realizado por Silalertruksa e Gheewala (2013), os resultados das emissões de GEE associadas aos processos de coleta e transporte de palha foram iguais a $1,10 \times 10^{-2}$ kg CO_{2eq} por kg de palha, valor inferior ao obtido neste estudo, correspondente a $1,22 \times 10^{-1}$ kg CO_{2eq} por kg de palha. Isto certamente está associado ao maior número de atividades incluídas no escopo deste estudo, como o corte adicional de palha, transporte e produção de insumos, e a maior cobertura da área de coleta.

Figura 34 – Distribuição das emissões estimadas dos GEE no ciclo de vida da palha



Na Figura 35 são ilustradas as contribuições percentuais das emissões procedentes das atividades e processos classificados nas fronteiras diretas e indiretas. A participação das emissões indiretas (Figura 35 – a) foi modesta, correspondendo a 17,39%, representada quase que exclusivamente pelas emissões do consumo de eletricidade (53,55%) e produção do óleo diesel (43,88%). A baixa emissão oriunda do transporte do principal insumo (2,57%) foi em decorrência da região analisada esta localizada próxima a uma unidade fornecedora.

Figura 35 – Distribuição das emissões estimadas dos GEE no ciclo de vida da palha - total (a), emissões indiretas (b) e emissões diretas (c)



Poucos trabalhos foram encontrados na literatura com detalhes sobre as emissões de GEE nas etapas ligadas a logística da palha de arroz e a maior dificuldade de realizar análises de comparação é porque os escopos são completamente diferentes, principalmente em relação a distância de transporte, uma vez que a análise foi desenvolvida sob condições reais de logística e cultivo do cereal da região.

5.3 Avaliação do impacto da casca de arroz

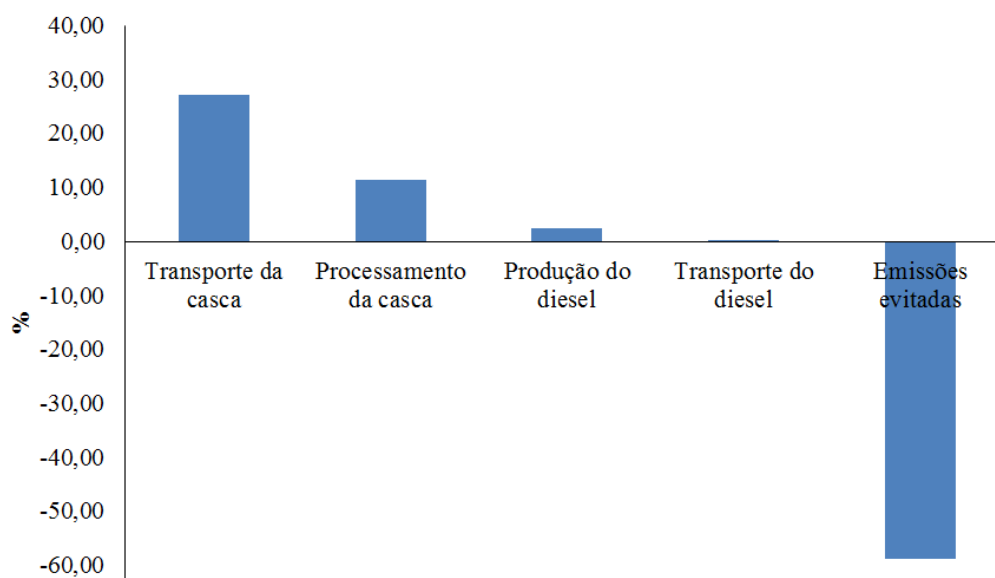
Os resultados do cômputo das emissões associadas a rota da casca de arroz são apresentados na Tabela 43. O somatório referente aos processos alcançaram o montante de $4,19 \times 10^{-2}$ kg CO_{2eq}/kg de casca, e considerando as emissões evitadas da decomposição da casca iguais a $6,00 \times 10^{-2}$ kg CO_{2eq} /kg casca, as emissões dos processos envolvidos foram completamente anuladas, sendo que restaram ainda o *crédito* de $1,81 \times 10^{-2}$ kg CO_{2eq}. Isso significa que os benefícios ambientais são evidentes já neste estágio, diferente do encontrado para a palha.

Tabela 43 – Emissões dos GEE no ciclo de vida da casca de arroz

Etapa	Emissões (kg CO _{2eq} /kg casca)
Transporte da casca	$2,76 \times 10^{-2}$
Processamento da casca	$1,17 \times 10^{-2}$
Produção do insumo (óleo diesel)	$2,55 \times 10^{-3}$
Transporte do insumo (óleo diesel)	$9,03 \times 10^{-5}$
Emissões evitadas da decomposição da casca	$-6,00 \times 10^{-2}$
Total	$-1,81 \times 10^{-2}$

Na Figura 36 são mostradas as parcelas percentuais das emissões totais. As emissões evitadas ocuparam a maior parcela das emissões (58,86%), seguido da etapa do transporte (27,05%), processamento da casca (11,50%), produção (2,50%) e transporte do diesel (0,09%).

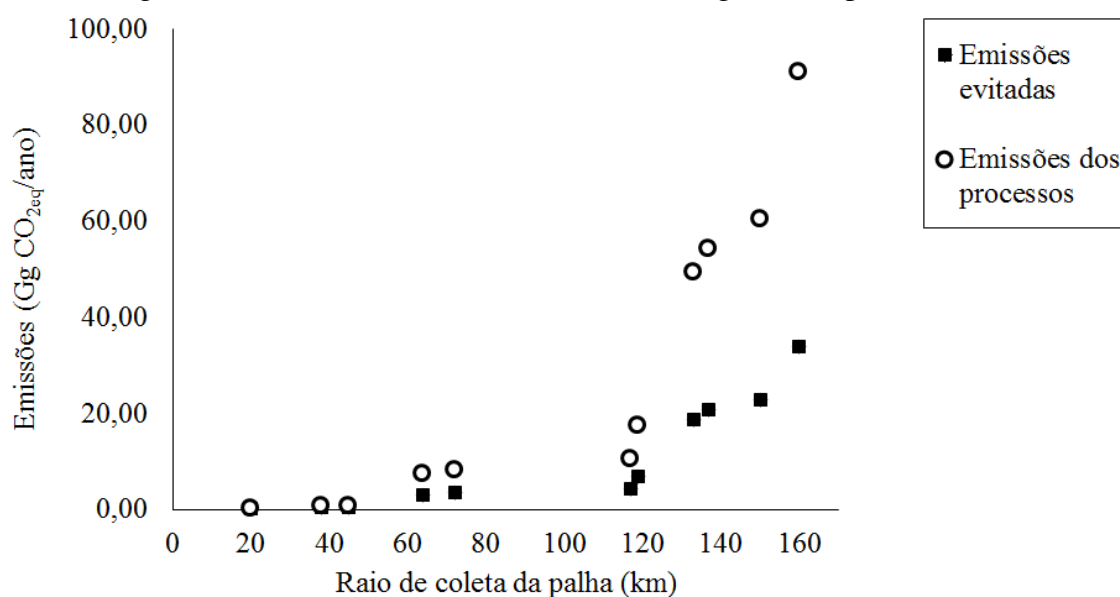
Figura 36 – Distribuição das emissões dos GEE no ciclo de vida da casca de arroz



5.4 Emissões na logística das biomassas

A logística da biomassa é um fator determinante tanto no desempenho econômico quanto ambiental para qualquer empresa que a utiliza no seu processo, especialmente para aquelas que possuem baixa massa específica, caso da palha e casca do arroz. Na Figura 37 e 38 são ilustradas as emissões dos processos logísticos e as emissões evitadas¹⁹ em função do raio de cobertura, os quais estão diretamente relacionados com a quantidade de biomassa recolhida.

Figura 37 – Emissões estimadas dos GEE na logística da palha de arroz

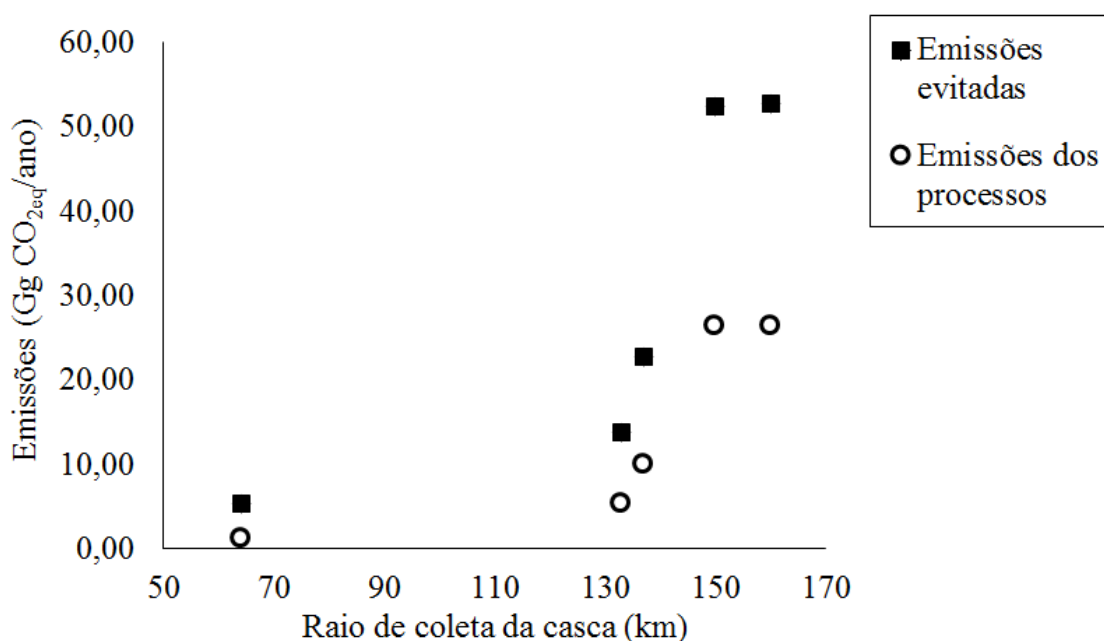


¹⁹ Essas emissões são relativas as quantidades de biomassas recuperadas acumuladas ao longo do raio de cobertura.

Avaliando as Figuras 37 e 38, verifica-se que as emissões no geral aumentam acentuadamente após 120 km, em razão das maiores áreas de cultivo do cereal para o caso da palha (município de Dom Pedrito) e a maior concentração de unidades de beneficiamento para a casca (cidade de Pelotas). Para o caso da palha (Figura 37), embora a quantidade aproveitada aumente com a distância e, conseqüentemente, as emissões evitadas de CH₄ pela decomposição também aumente, não foram o bastante para superar as emissões provocadas pelos processos. No entanto, o inverso acontece com o aproveitamento da casca (Figura 38), cujas emissões evitadas aumentam com a distância, atingindo o valor máximo no raio de 150 km, local que está concentrada o maior número de beneficiadoras de arroz (cidade de Pelotas).

A ampla vantagem da casca em relação à palha é que grandes quantidades estão disponíveis em um mesmo local (unidade de beneficiamento), não sendo necessário fazer uso das operações de coleta (segamento, enleiramento e enfardamento), o que reflete no menor consumo de combustível e, por conseguinte, menor emissões. Assim, considerando apenas a análise da logística, não há dúvidas que o menor impacto do aquecimento global é alcançado pelo aproveitamento da casca de arroz, considerando o escopo (fronteiras do sistema) deste estudo.

Figura 38 – Emissões dos GEE na logística da casca de arroz



5.5 Avaliação do impacto da produção de metanol

5.5.1 Resultados da simulação dos cenários

Os principais resultados da simulação dos cenários (descritos na Seção 4.4.2) no Aspen Plus são apresentados na Tabela 44. Analisando os dados verifica-se que não houve grandes divergências na quantidade do metanol produzido. No cenário B, cuja alimentação é realizada com 70% de carvão e 30% de palha, foi obtido a maior produção, provavelmente devido a composição da biomassa que possui maior quantidade de carbono e menor presença de cinza (Tabela 32) comparado com o carvão e a casca do arroz. Já no cenário C obteve-se a menor produção, isso pode estar associado a menor concentração de H₂ e CO na corrente do gás de síntese; como na composição elementar da casca há uma concentração superior de O₂ (38,6%) comparado com a palha (33,92%) e o carvão mineral (17,5%), pode ter promovido uma maior conversão do CO em CO₂.

O rendimento do metanol obtido no cenário A (0,30 kg metanol/ kg carvão mineral) foi comparado com outros valores reportados pela literatura, como mostrado na Figura 39. Verifica-se que há diferenças entre os rendimentos, no entanto, na mesma ordem de grandeza. O baixo rendimento encontrado pode estar associado a principal desvantagem do carvão brasileiro, que é a alta quantidade de cinza presente na sua composição (aproximadamente 47%) comparado aos carvões utilizados nos estudos citados (aproximadamente 9,7%), todos de origem chinesa. Analisado os valores, percebe-se que se fosse desconsiderada a cinza do carvão nacional, o rendimento seria muito semelhante ao obtido pelos outros carvões.

Figura 39 – Comparação do rendimento do metanol obtido no cenário A com outros estudos

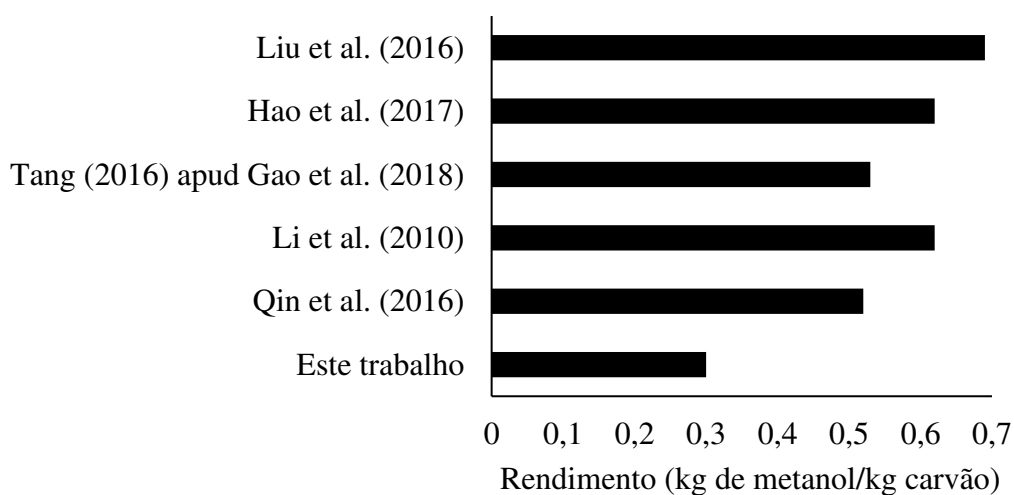


Tabela 44 – Metanol produzido nos cenários simulados no Aspen Plus

Parâmetro	Cenário A	Cenário B	Cenário C	Unidades
O ₂	$7,42 \times 10^{-09}$	$2,55 \times 10^{-03}$	$7,09 \times 10^{-03}$	kg/h
N ₂	6783,76	7257,68	7003,17	kg/h
CO	156073,00	161057,00	151731,00	kg/h
CO ₂	45831,55	50205,50	59836,90	kg/h
H ₂	5356,85	5003,14	4191,99	kg/h
CH ₄	48,21	0,10	$4,6 \times 10^{-03}$	kg/h
H ₂ S	3266,28	2389,85	2228,73	kg/h
COS	384,98	342,92	361,90	kg/h
H ₂ O	23723,09	44418,50	48363,00	kg/h
S	$3,78 \times 10^{-3}$	3,29	4,93	kg/h
CL ₂	0	$4,01 \times 10^{-07}$	0	kg/h
HCl	0	71,92	0	kg/h
Gás de síntese (total)	241467,73	270749,93	273721,67	kg/h
Cinzas do gaseificador	124957,00	99991,1	102139,00	kg/h
Metanol produzido	75490,90	78011,20	70139,92	kg/h

Com a finalidade de investigar os GEE gerados, foi realizada uma análise das correntes dos processos simulados no Aspen Plus, conforme é apresentado nas Tabelas 45,46 e 47.

Tabela 45 – Geração dos GEE nos processos simulados – Cenário A

Etapa	Corrente de entrada (kg CO _{2eq} /h)	Corrente de saída (kg CO _{2eq} /h)	Geração líquida (kg CO _{2eq} /h)	Distribuição (%)
Gaseificação	0	45831,60	45831,60	24,95
Limpeza do gás de síntese	45831,60	45831,60	0	0
Condicionamento	4984,16	146539,00	141554,80	77,06
Remoção de CO ₂	146539,00	146539,00	0	0
Síntese	114365,00	110663,00	-3702,00	-2,02
Separação do metanol	110663,00	110663,00	0	0
Total	422382,80	606067,20	183684,44	100,00

A parcela dos GEE nas correntes de entrada e saída consiste basicamente em CO₂ e traços de CH₄. Verifica-se que a corrente de saída em alguns casos é maior do que a corrente de entrada da etapa seguinte, isso é resultado da remoção de uma parte do CO₂ na unidade anterior. Na gaseificação, o carbono é convertido principalmente em CO, CO₂ e CH₄. No cenário C (Tabela 47) foi encontrado a maior geração líquida de CO₂, certamente devido a maior concentração de O₂ na composição elementar da casca de arroz, conforme relatado anteriormente.

Tabela 46– Geração dos GEE nos processos simulados – Cenário B

Etapa	Corrente de entrada (kg CO _{2eq} /h)	Corrente de saída (kg CO _{2eq} /h)	Geração líquida (kg CO _{2eq} /h)	Distribuição (%)
Gaseificação	0	50209,18	50209,18	21,06
Limpeza do gás de síntese	50209,18	50209,18	0	0
Condicionamento	12457,70	156187,00	143729,30	60,28
Remoção de CO ₂	156187,00	156187,00	0	0
Síntese	82241,48	80485,08	-1756,40	-0,74
Separação do metanol	80485,08	80485,08	0	0
Total	381580,43	573762,52	192182,08	100,00

A fim de aumentar a concentração do H₂ no gás de síntese, na etapa de condicionamento, aproximadamente 57% do gás CO foi convertido em CO₂ e H₂ pela reação de deslocamento de gás-água ($CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$), resultando na geração de mais de 140000 kg de CO₂ em todos os cenários. Montante que torna esta etapa a maior gerador de GEE do sistema.

Na etapa da síntese, a geração líquida dos GEE é negativa em função de uma das reações de formação de metanol ($3H_2 + CO_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$). Em todos os cenários, esta conversão foi muito baixa, alcançando no máximo 2% no balanço geral, indicando um baixo potencial de fixação de carbono para as condições operacionais utilizadas na simulação.

Ainda analisando as Tabelas 45,46 e 47 observa-se que nas demais etapas que envolvem o processo Rectisol (limpeza do gás de síntese e remoção do CO₂) e a separação do metanol não há geração de CO₂. Em resumo, no processo de condicionamento ocorreu a maior geração líquida de CO_{2eq} em todos os cenários (60,28 - 77,06 %), seguido da etapa de gaseificação (21,06 - 30,07 %).

Tabela 47 – Geração dos GEE nos processos simulados – Cenário C

Etapa	Corrente de entrada (kg CO _{2eq} /h)	Corrente de saída (kg CO _{2eq} /h)	Geração líquida (kg CO _{2eq} /h)	Distribuição (%)
Gaseificação	0	59838,44	59838,44	30,07
Limpeza do gás de síntese	59838,44	59838,44	0	0
Condicionamento	13766,74	154489,05	140722,31	70,71
Remoção de CO ₂	154489,05	154489,05	0	0
Síntese	57622,18	56061,48	-1560,70	-0,78
Separação do metanol	56061,48	56061,48	0	0
Total	341777,89	540777,93	199000,05	100,00

As emissões evitadas procedentes da substituição do carvão pelas biomassas foram estimadas pela Equação 24 e os resultados são apresentados na Tabela 48.

$$ES_{if} = E_f - Q_C \cdot I_{CO_2/C} \quad (24)$$

em que, ES é emissão da biomassa i no cenário f (kg/h); E corresponde a emissão total da produção do metanol no cenário f (kg/h), Q_C é a vazão do carvão no cenário f e $I_{CO_2/C}$ é o indicador de emissão do GEE da produção de metanol do cenário A.

Tabela 48 – Balanço das emissões dos GEE nos cenários simulados

Parâmetro	Cenário A (kg CO _{2eq} /h)	Cenário B (kg CO _{2eq} /h)	Cenário C (kg CO _{2eq} /h)
Carvão	183684,44	192182,08	199000,05
Palha de arroz	0	-63602,97	0
Casca de arroz	0	0	-70420,94
Emissões líquidas	183684,44	128579,11	128579,11

Por meio da Equação 24, estimou-se que 63602,97 kg CO_{2eq}/h e 70420,94 kg CO_{2eq}/h são derivados dos processos associados a palha e a casca de arroz, respectivamente, e o restante são oriundas do carvão mineral, desta forma, as emissões líquidas nos cenários B e C simulados correspondem a 128579,11 kg CO_{2eq}/h.

5.5.2 Inventário das emissões do ciclo de produção do metanol

O inventário detalhado das emissões dos GEE provenientes dos processos simulados e das outras atividades consideradas nas fronteiras do sistema (Figura 21) são mostrados na Tabela 49, cuja unidade funcional equivale a 1 kg de metanol.

Tabela 49 – Emissões dos GEE estimados no ciclo de vida da produção do metanol

Fonte	Emissões (kg CO _{2eq} /kg metanol)		
	Cenário A	Cenário B	Cenário C
Processos simulados	2,43	2,46	2,84
Consumo de eletricidade	$2,31 \times 10^{-02}$	$2,31 \times 10^{-02}$	$2,31 \times 10^{-02}$
Caldeira	$5,74 \times 10^{-01}$	$5,74 \times 10^{-01}$	$5,74 \times 10^{-01}$
Transporte dos resíduos sólidos	$1,74 \times 10^{-03}$	$1,35 \times 10^{-03}$	$1,53 \times 10^{-03}$
Emissões evitadas pela substituição do carvão mineral	0	- 0,82	- 1,00
Emissões líquidas	3,03	2,25	2,43

Analisando os valores da Tabela 49, observa-se que os processos simulados no Aspen Plus, representado exclusivamente pelos processos de gaseificação e condicionamento, são majoritariamente os maiores poluidores da etapa de produção do metanol, ocupando cerca de 80% da parcela das emissões no cenário A e 63% nos cenários B e C, menor nestes últimos porque as emissões evitadas correspondem a 21,03% para o cenário B e 22,61% para o cenário C.

As emissões evitadas foram superiores no cenário C (Tabela 49), todavia não foram suficientes para atingir o menor indicador de emissões líquidas, posto que as emissões oriundas dos processos simulados (gaseificação e condicionamento) somadas as emissões do transporte dos resíduos sólidos foram maiores comparadas ao cenário B. No caso do transporte dos resíduos, as emissões foram superiores porque a carga transportada foi maior em razão da maior quantidade de cinza presentes na composição da casca (Tabela 32). As emissões estimadas provenientes da caldeira e do consumo de eletricidade são iguais porque foi utilizado o mesmo fator de emissão por metanol produzido para ambos cenários (Seção 4.4.1.9).

5.6 Avaliação do impacto da cadeia carvão/biomassa – metanol

As emissões de cada etapa do ciclo do metanol, relacionadas com a mineração do carvão, rota da palha de arroz, rota da casca de arroz e produção de metanol, já vem sendo discutida. Nesta Seção todos os inventários de emissões foram convertidos em unidade de metanol produzido para cada cenário e agrupados com a finalidade de avaliar e estimar a contribuição efetiva do uso das biomassas residuais do arroz. Como já foi explicado, este estudo partiu da hipótese que o cômputo das emissões relacionada a cadeia (logística) das biomassas são importantes para verificar a real mitigação, visto que encargos ambientais são atribuídos as biomassas até chegarem na planta de metanol.

Ao considerar a utilização da biomassa residual do arroz é possível obter pelo menos dois benefícios ambientais relacionados ao aquecimento global. O aproveitamento das biomassas evita a geração de CH₄ proveniente da sua decomposição no solo. O segundo benefício ocorre na etapa da produção do metanol, ao substituir parte do carvão mineral pela biomassa, ocorre uma redução das emissões diretas, pois o CO₂ emitido pela biomassa nos processos de gaseificação e condicionamento foi previamente (ou será) absorvido pela planta por meio da fotossíntese, podendo ser considerada como uma fonte neutra de carbono.

Na Tabela 50 são apresentados os resultados do cenário A que servem como modelo de referência para comparação com os demais cenários. Analisando os dados percebe-se que o somatório das emissões alcançou 3,14 kg CO_{2eq}/kg metanol²⁰, resultado de acordo com outros trabalhos encontrados na literatura, conforme é mostrado na Figura 40. Embora o escopo e o nível de detalhamento dos estudos apresentem divergências em relação ao que está sendo desenvolvido nesta tese, os resultados não variam muito porque as etapas mais relevantes foram consideradas em todos. Trop et al. (2014) não abrangeram a etapa de mineração do carvão, que pode justificar o menor indicador comparado com os demais. Já no estudo de Sliwinska et al. (2017) foi adicionado a fronteira do sistema uma unidade de geração de energia elétrica alimentada com parte do gás de síntese, isso pode explicar o maior indicador apresentado.

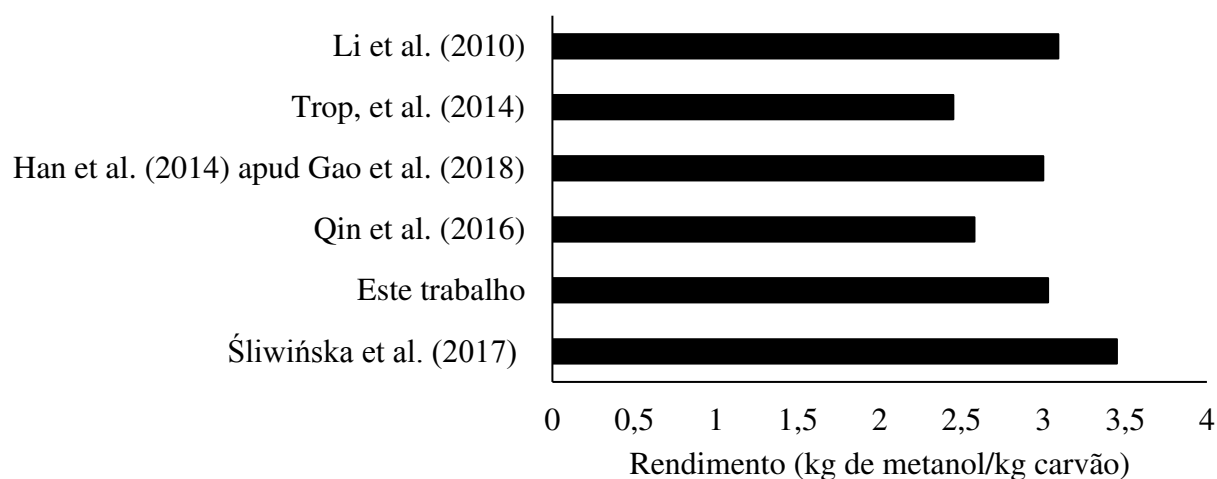
Nas Tabelas 51 e 52 são resumidos os resultados do ciclo do metanol nos cenários B e C, os quais alcançaram os valores iguais a 2,41 e 2,50 kg CO_{2eq}/kg de metanol, respectivamente. Na Figura 41 é apresentado um resumo dos resultados para facilitar a análise.

²⁰ Esse valor foi comparado com o indicador de impacto de aquecimento global do ciclo de vida do alumínio primário (*cradle-to-gate*), um dos produtos responsáveis pelas maiores emissões de GEE. Embora o indicador do metanol seja alto, ainda está distante do alumínio, que se encontra na faixa de 12,04 – 21,6 kg CO₂/kg alumínio primário (SAUR et al., 2003; GAO et al., 2009).

Tabela 50 – Emissões totais dos GEE no ciclo de vida do metanol - cenário A

Etapa	Fonte	Emissões (kg CO _{2eq} /kg metanol)
Mineração do carvão	Mineração	$7,91 \times 10^{-03}$
	Transporte do carvão bruto	$4,13 \times 10^{-02}$
	Revegetação	$9,93 \times 10^{-06}$
	Cominuição	$2,03 \times 10^{-04}$
	Transporte dos insumos	$3,41 \times 10^{-04}$
	Explosivos	$2,58 \times 10^{-04}$
	Aplicação dos insumos agrícolas	$1,79 \times 10^{-04}$
	Emissões fugitivas	$9,95 \times 10^{-02}$
	Emissões da produção dos insumos	$8,78 \times 10^{-04}$
	Produção do metanol	Processos simulados
Equipamentos elétricos		$2,31 \times 10^{-02}$
Caldeira		$5,74 \times 10^{-01}$
Transporte dos resíduos sólidos		$1,74 \times 10^{-3}$
Total		3,14

Figura 40 – Comparação das emissões do ciclo de vida do metanol obtido no cenário A com outros estudos



Como era esperado as emissões líquidas foram menores nas alternativas tecnológicas em que há participação das biomassas. As emissões evitadas da decomposição das biomassas no solo somadas as oriundas da substituição parcial do carvão mineral na cogaseificação foi maior no cenário C, com o valor igual a 1,07 kg CO_{2eq}/kg metanol contra

0,87 kg CO_{2eq}/kg metanol do cenário B, contudo foi insuficiente para torna-lo na alternativa de menor impacto de aquecimento global. Isso está diretamente relacionado as emissões elevadas procedentes da gaseificação e condicionamento (processos simulados) da etapa de produção do metanol. Mas ainda assim, a diferença entre as alternativas tecnológicas é muito baixa, no cenário B ocorreu uma redução das emissões de 23,25% e no cenário C foi igual 20,38%.

Tabela 51 – Emissões totais dos GEE no ciclo de vida do metanol - cenário B

Etapa	Fonte	Emissões (CO _{2eq} /kg metanol)
Mineração do carvão	Mineração	$5,35 \times 10^{-03}$
	Transporte do carvão bruto	$2,79 \times 10^{-03}$
	Revegetação	$6,73 \times 10^{-06}$
	Cominuição	$1,37 \times 10^{-04}$
	Transporte dos insumos	$2,31 \times 10^{-04}$
	Explosivos	$1,75 \times 10^{-04}$
	Aplicação dos insumos agrícolas	$1,21 \times 10^{-04}$
	Emissões fugitivas	$6,74 \times 10^{-02}$
	Emissões da produção dos insumos	$5,95 \times 10^{-04}$
	Rota da palha	Coleta da palha
Transporte da palha		$2,69 \times 10^{-02}$
Processamento da palha		$1,35 \times 10^{-02}$
Produção do insumo (óleo diesel)		$1,11 \times 10^{-02}$
Transporte do insumo (óleo diesel)		$6,51 \times 10^{-04}$
Emissões evitadas da decomposição da palha		$-4,90 \times 10^{-02}$
Produção do metanol	Processos simulados	2,46
	Equipamentos elétricos	$2,31 \times 10^{-02}$
	Caldeira	$5,74 \times 10^{-01}$
	Transporte dos resíduos sólidos	$1,35 \times 10^{-03}$
	Emissões evitadas da substituição do carvão	$-8,20 \times 10^{-01}$
Total		2,41

Vale relatar que caso não fosse contabilizado as emissões evitadas, as emissões totais provenientes das alternativas com biomassa (iguais a 3,28 e 3,57 kg CO_{2eq}/kg metanol

para os cenários B e C, respectivamente) seriam superiores ao ciclo do metanol produzido apenas por carvão (3,14 kg CO_{2eq}/kg metanol), em razão das operações ligadas a rota das biomassas. Na rota da palha, as emissões (1,45 × 10⁻¹ kg CO_{2eq}/kg metanol) são quase o dobro daquelas oriundas da mineração do carvão (7,68 × 10⁻² kg CO_{2eq}/kg metanol).

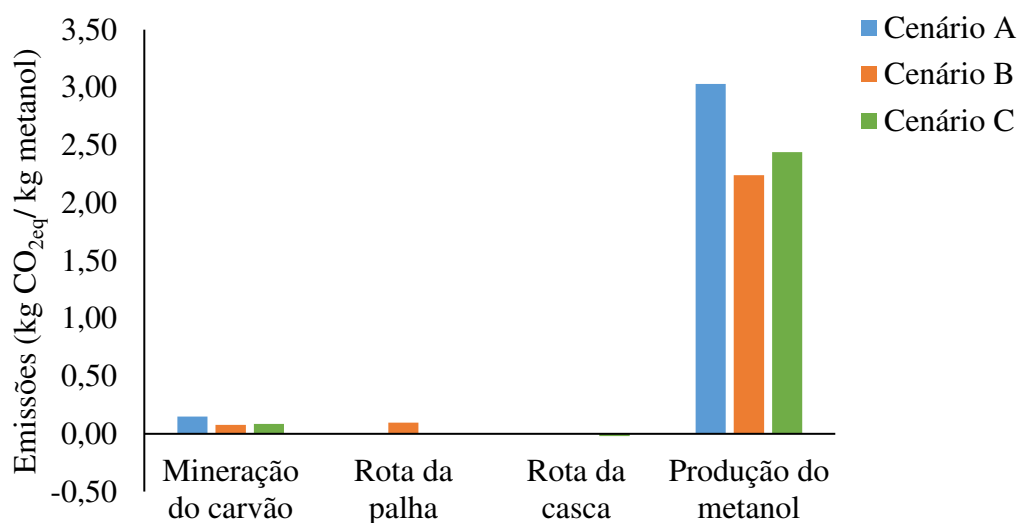
Tabela 52 – Emissões totais dos GEE no ciclo de vida do metanol - cenário C

Etapa	Fonte	Emissões (kg CO _{2eq} /kg metanol)
Mineração do carvão	Mineração	5,96 × 10 ⁻⁰³
	Transporte do carvão bruto	3,11 × 10 ⁻⁰³
	Revegetação	7,48 × 10 ⁻⁰⁶
	Cominuição	1,53 × 10 ⁻⁰⁴
	Transporte dos insumos	2,57 × 10 ⁻⁰⁴
	Explosivos	1,94 × 10 ⁻⁰⁴
	Aplicação dos insumos agrícolas	1,35 × 10 ⁻⁰⁴
	Emissões fugitivas	7,50 × 10 ⁻⁰²
	Emissões da produção dos insumos	6,62 × 10 ⁻⁰⁴
	Rota da casca	Transporte da casca
Processamento da casca		1,28 × 10 ⁻⁰²
Produção do insumo (óleo diesel)		2,78 × 10 ⁻⁰³
Transporte do insumo (óleo diesel)		9,85 × 10 ⁻⁰⁵
Emissões evitadas da decomposição da casca		-6,54 × 10 ⁻⁰²
Produção do metanol	Processos simulados	2,84
	Equipamentos elétricos	2,31 × 10 ⁻⁰²
	Caldeira	5,74 × 10 ⁻⁰¹
	Transporte dos resíduos sólidos	1,53 × 10 ⁻⁰³
	Emissões evitadas da substituição do carvão	-1,00
Totais		2,50

A partir da Figura 41 é possível verificar que a etapa da produção de metanol é predominantemente responsável pelo maior encargo ambiental, ocupa uma parcela em torno de

92 a 96 %, causado principalmente pelos processos de gaseificação e condicionamento, conforme discutido na Seção anterior. Qin et al. (2016) desenvolveram uma análise semelhante para a ciclo de vida do metanol do carvão mineral, os resultados obtidos apresentaram um perfil semelhante ao encontrado aqui, cuja etapa de produção de metanol ocupou 82 - 86% das emissões totais.

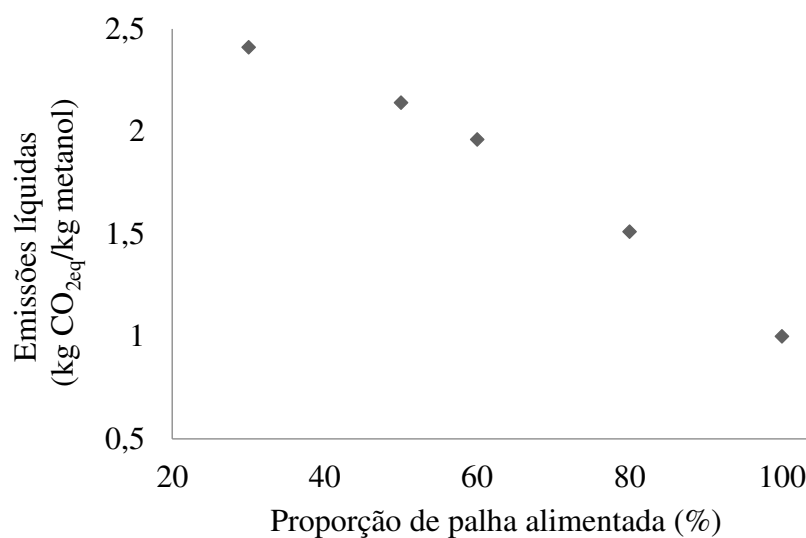
Figura 41 – Emissões dos GEE no ciclo de vida do metanol obtidos nos cenários avaliados



A fim de verificar o potencial máximo de mitigação desta alternativa tecnológica no ciclo de vida do metanol foi efetuada uma análise preliminar das emissões líquidas em função da variação da composição da biomassa alimentada na cogaseificação (Figura 42). Esta análise foi realizada apenas para o cenário com palha porque resultou no menor indicador de impacto do aquecimento global.

Avaliando a Figura 42, observa-se que as emissões líquidas do ciclo de vida do metanol diminuem linearmente com o aumento da participação da palha. No cenário em que o sistema atua somente com palha, é alcançada a emissão mínima correspondente a 1 kg CO₂eq/kg metano, cerca de 3 vezes menor que o metanol fóssil (cenário A). Esse resultado destaca uma das hipóteses desta tese sobre a importância da contabilização de toda a cadeia para avaliar o benefício ambiental efetivo do aproveitamento da biomassa para produção de metanol, embora utilizado um recurso renovável em que é possível anular as emissões em dois pontos do ciclo, ainda, assim, mesmo baixo, há um potencial poluidor.

Figura 42 – Variação das emissões líquidas no ciclo de vida do metanol em função da proporção da palha alimentada na cogaseificação²¹



²¹ Esta curva foi construída fixando o valor da quantidade da palha alimentada igual a 76500 kg/h, quantidade máxima disponível na área de coleta de raio igual a 160 km, e alterando a porcentagem de alimentação apenas por meio da variação da quantidade de carvão mineral.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

A análise ambiental do ciclo de vida do metanol produzido a partir da gaseificação do carvão mineral e cogaseificação do carvão mineral e biomassa residual do arroz foi realizada. O escopo do estudo considerou os principais processos envolvidos na mineração do carvão a céu aberto, na rota da palha de arroz, na rota da casca de arroz e na produção do metanol.

Um inventário dos principais equipamentos e insumos utilizados na mineração do carvão a céu aberto foi desenvolvido com base em dados coletados in situ, o qual é uma importante contribuição desta tese devido à ausência de tal informação na literatura. Somado a isso, uma análise das emissões também foi desenvolvida. As emissões totais do ciclo do carvão mineral foram iguais a $3,29 \times 10^{-2}$ kg CO_{2eq}/kg de carvão, sendo que as emissões fugitivas foram a fonte que mais contribuíram para o aquecimento global, representando 89,51% das emissões totais.

Por meio dos dados levantados sobre produção de arroz por unidade de beneficiamento e produtividade do arroz cultivado por município no estado do Rio Grande do Sul foi possível estimar o potencial espacial do aproveitamento das biomassas residuais geradas nessas atividades numa área limitada a um raio de 160 km da Jazida de Candiota. Nesta área a quantidade máxima de palha de arroz que pode estar disponível nas lavouras de cultivo para aproveitamento é aproximadamente 675481,19 t/ano e a quantidade de casca disponível nas beneficiadoras de arroz é em torno de 1488645 t/ano. A casca de arroz possui uma vantagem em virtude de haver um polo industrial alimentício, dentro da área analisada, que recebe arroz cultivado em outras regiões do estado.

Em relação ao desenvolvimento do inventário das emissões oriundas da rota das biomassas, procurou-se elaborar um escopo e utilizar dados mais próximos possíveis da realidade da região avaliada. Na análise dos resultados, foi visto que a capacidade de mitigação das emissões dos GEE é maior para a rota da casca de arroz porque as emissões procedentes dos processos e atividades envolvidas são completamente neutralizadas pelas emissões evitadas pela sua decomposição no solo, restando ainda um crédito de $-1,81 \times 10^{-2}$ kg CO_{2eq}/kg casca. Em contrapartida, as emissões totais da rota da palha totalizaram $9,85 \times 10^{-2}$ kg CO_{2eq}/kg palha, em razão do maior número de operações na etapa de coleta que demandam mais combustível fóssil.

O inventário das emissões procedentes da produção de metanol foi construído predominantemente por meio da análise dos resultados obtidos pela simulação no Aspen Plus. Em todos os cenários a etapa de condicionamento do gás de síntese, em que ocorre a reação de

deslocamento de gás-água, foi majoritariamente a maior responsável pela liberação dos GEE, seguida da etapa de gaseificação.

Por fim, as emissões oriundas do ciclo de vida do metanol obtido no sistema alimentado apenas com carvão (cenário A) totalizaram 3,14 kg CO_{2eq}/kg metanol, valor semelhante aos encontrados em outros estudos da literatura. Na análise dos resultados do ciclo de vida do metanol dos cenários alternativos, após contabilização das emissões evitadas, foi possível verificar que o cenário alimentado com 70% de carvão e 30% de palha alcançou a maior redução das emissões dos GEE, igual a 23,25 %, comparado com os 20,38% alcançados pelo cenário com casca, na mesma proporção de alimentação. Em ambos os cenários, a etapa correspondente a produção do metanol apresentou as emissões mais representativas, o que está relacionado aos processos de gaseificação e condicionamento.

Portanto, as hipóteses levantadas nesta tese foram satisfeitas, isto é, o metanol produzido a partir da cogaseificação do carvão mineral e biomassa residual do arroz é vantajoso ambientalmente em relação ao metanol produzido apenas pelo carvão mineral, sendo que a maior capacidade de mitigação é obtida pelo uso da palha. E a quantificação das emissões derivadas da rota das biomassas residuais é essencial para avaliação do benefício líquido da produção de metanol, visto que, embora o sistema seja alimentado apenas com biomassa (palha), sendo possível evitar emissões em dois pontos do ciclo, ainda, assim, mesmo baixo, há um potencial poluidor.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Desenvolver o estudo de ACV empregando o escopo do berço ao túmulo (*cradle-to-grave*) para possibilitar a análise das emissões dos GEE derivadas das etapas de distribuição e consumo do metanol em cada cenário.
- Complementar o estudo com uma avaliação econômica a fim de estimar os principais fatores técnicos e econômicos em cada cenário.
- Desenvolver a simulação da produção do metanol considerando as etapas de separação e armazenamento do CO₂ para utilização como matéria-prima em outros processos.
- Avaliar o aproveitamento da biomassa residual do arroz utilizando os métodos de adensamento como peletização e briquetagem, além do método de colheita integral para o caso da palha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOARRAGE, A. M., LOPES, R. C. Projeto a borda leste da bacia do Paraná: integração geológica e avaliação econômica: Relatório final. Departamento nacional de produção mineral. **Ministério de Minas e Energia**, Porto Alegre, DNPM/CPRM. v.1, 15 p, 1986.

AGO, Australian greenhouse office. **Department of the environment and heritage**. Factors and methods workbook for use in Australian greenhouse emissions reporting. Canberra, Australia, 2006.

AGOSTINETTO, D. et al. Potencial de emissão de metano em lavouras de arroz irrigado. **Ciência Rural**, v. 32, n. 6, 2002.

ALAUDDIN, Z. A. B. Z. et al. Gasification of lignocellulosic biomass in fluidized beds for renewable energy development: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 2852-2862, 2010.

ALFARO, E. F. et al. The study of ionizing radiation effects on polypropylene and rice husk ash composite. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 84, p. 163-165, 2013.

ALI, D. A. et al. Co-gasification of coal and biomass wastes in an entrained flow gasifier: Modelling, simulation and integration opportunities. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 37, p. 126-137, 2017.

ALMEIDA, S. R. **Pirólise rápida de casca de arroz: estudo de parâmetros e caracterização de produtos**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Curso de Pós-graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2010.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Rio de Janeiro, 2016.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Comercio exterior e controle das informações de movimentação. Fórum do Setor de Solventes**. Rio de Janeiro,

2015. Disponível em: <www.anp.gov.br/wwwanp/?dw=76033>. Acesso em 26 de setembro de 2017.

ARDILA, Y. C. **Gaseificação da biomassa para a produção de gás de síntese e posterior fermentação para bioetanol: modelagem e simulação do processo.** Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

ASP, B. **Biomass-and coke oven gas based methanol production.** Tese (Master Thesis) – Programmes in Engineering Mechanical Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, 2007.

ATILGAN, B., AZAPAGIC, A. Life cycle environmental impacts of electricity from fossil fuels in Turkey. **Journal Cleaner Production.** v. 106, 555 - 564, 2015.

BABBITT, C.W., LINDNER, A. S. A life cycle inventory of coal used for electricity production in Florida. **Journal Cleaner Production.** v. 13, 903-912, 2005.

BARE, J. C.; et. al. Midpoints versus Endpoints: The Sacrifices and Benefits. **The International Journal of Life Cycle Assessment.** v. 5, n. 6, p. 319 – 326, 2000.

BASU, P. **Combustion and gasification in fluidized beds.** Canada: Taylor and Francis Group, LLC, 2006.

BAZZO, E. et al. Utilização da palha de arroz em processo co-firing com carvão pulverizado. In: VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), Fortaleza. **Anais do Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, Fortaleza, 17 – 19 agosto., 2011.

BAZZO, E. et al. Resultados da utilização de palha de arroz em processo de co-firing com carvão pulverizado. In: VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VII CITENEL). 2013, Rio de Janeiro. **Anais do VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VII CITENEL)**, Rio de Janeiro, 05 - 07 de agosto, 2013.

BEUTLER, A. N. et al. Manejo do solo, palha residual e produtividade de arroz irrigado por inundação. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, 1153-1161, 2014.

BINOD, P.; et al. Bioethanol production from rice straw: An overview. **Bioresource Technology**, v. 101, 4767–4774, 2010.

BEVILAQUA, D. B. et al. Cleaner production: levulinic acid from rice husks. **Journal of cleaner production**, v. 47, 96-101, 2013.

BORBA, R. F. **Carvão Mineral. Balanço Mineral Brasileiro 2001**. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-carvao-mineral/@@download/file/BALANCO_MINERAL_006_2001.pdf>. Acesso em 26 de setembro de 2017.

BOVOLENTA, F. C.; BIAGGIONI, M. A. M. Diagnóstico energético de rotas de escoamento do etanol da região centro-oeste do Brasil para exportação. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 3, 2016.

BOYANO, A. et al. Exergoenvironmental analysis of a steam methane reforming process for hydrogen production. **Energy**, v. 36, 2202-2214, 2011.

BOZZANO, G.; MANENTI, F. Efficient methanol synthesis: perspectives, technologies and optimization strategies. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 56, 71-105, 2016.

BRANCO, D. A. C. et al. Emissions reduction potential from CO₂ capture: a lifecycle assessment of a Brazilian coal-fired power plant. **Energy Policy**, v. 61, 1221-1235, 2013.

BRASIL. **Lei federal nº 13263, de 23 de março de 2016**. Altera a Lei nº 13.033, de 24 de setembro de 2014, para dispor sobre os percentuais de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado no território nacional, Brasília, 2016.

BRASIL. **Secretaria Especial de Agricultura Familiar e do Desenvolvimento Agrário**, Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.mda.gov.br/sitemda/noticias/progress%C3%A3o-do-biodiesel-mistura-b8-%C3%A9-lei-para-2017>>. Acesso em 26 de setembro de 2017.

BRAUNBECK, O. A., MAGALHÃES, P. S. G., GARCIA, M. O. Colheita e Recuperação da Biomassa. In: Cortez, L. A. B.; Lora, E. E. S.; Gomez, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora Unicamp, 2008.

BURMISTRZ et al. Carbon footprint of the hydrogen production process utilizing subbituminous coal and lignite gasification. **Journal of Clean Production**, v. 139, 858-865, 2016.

CARDENAS, L. M. et al. Quantifying annual N₂O emission fluxes from grazed grassland under a range of inorganic fertiliser nitrogen inputs. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 136, 218-226, 2010.

CARVALHO, D. J. **Geração de bioeletricidade em usina sucroalcooleira utilizando bagaço, palha de cana e sorgo biomassa**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica, área térmica e fluidos) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

CAULA, A. S. **Are European bioenergy targets achievable? An evaluation based on thermoeconomic and environmental indicators**. Tese de Doutorado. Technische Universiteit Eindhoven (Eindhoven University of Technology), p. 283, 2011.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do ciclo de vida de produtos: Ferramenta Gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

CHOU, C.; LIN, S.; LU, W. Preparation and characterization of solid biomass fuel made from rice straw and rice bran. **Fuel Processing Technology**, v. 90, 980-987, 2009.

CLAUSEN, L. R. **Design of novel DME/methanol synthesis plants based on gasification of biomass**. Tese (Doctor of Philosophy). Technical University of Denmark, 2011.

COLTRO, L. et al. Environmental profile of rice production in Southern Brazil: A comparison between irrigated and subsurface drip irrigated cropping systems. **Journal of cleaner production**, v. 153, 491-505, 2017.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **A cultura do arroz**. Brasília, 2015.

COPENOR. Companhia Petroquímica do Nordeste. **Relatório da Administração**. Bahia, p. 45, mar. 2017.

CRM. **Companhia Rio Grandense de Mineração**. Superintendência da Mina de Candiota. Relatório Gerencial Mensal, 2015.

CRM. **Companhia Rio Grandense de Mineração**. Superintendência da Mina de Candiota. Relatório Gerencial Mensal, 2016.

CRM. **Companhia Rio Grandense de Mineração**. Inaugurada a primeira etapa da UTE Pampa Sul em Candiota, 2016. Disponível em: <<http://www.crm.rs.gov.br/conteudo/2852/?Inaugurada-a-primeira-etapa-da-UTE-Pampa-Sul-em-Candiota#.Wcqr7PmGMdU>>. Acesso em 26 de setembro de 2017.

CURRAN, M. A. **Environmental life-cycle assessment**. New York: McGraw-Hill, 1996.

DAMARTZIS, T. H.; MICHAIOLOS, S.; ZABANIOTOU, A. Energetic assessment of a combined heat and power integrated biomass gasification–internal combustion engine system by using Aspen Plus. **Fuel Processing Technology**, 95, 37–44, 2012.

DELIVAND, M. K. et al. Optimal locations of bioenergy facilities, biomass spatial availability, logistics costs and GHG (greenhouse gas) emissions: a case study on electricity productions in South Italy. **Journal of Cleaner Production**, v. 99, 129-139, 2015.

DNIT. Departamento nacional de infraestrutura de transportes. **Ministério dos Transportes**: Disponível em <http://www1.dnit.gov.br/Pesagem/qfv%20pdf.pdf>>. Acesso em 15 de dezembro de 2017.

DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2015**, Brasília, 2015.

DOHERTY, W.; REYNOLDS, A.; KENNEDY, D. The effect of air preheating in a biomass CFB gasifier using ASPEN Plus simulation. **Biomass and bioenergy**, v. 33, 1158-1167, 2009.

EC-JRC. Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook**. First edition. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.

EPA, Environmental Protection Agency. **U.S. SURFACE MINES EMISSIONS ASSESSMENT**, 2005.

EPE. Empresa de Pesquisas Energética. Energia Termelétrica: gás natural, biomassa, carvão, nuclear. **Ministério de Minas e Energia**. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

ESTEBAN, L. S.; CARRASCO, J. E. Evaluation of different strategies for pulverization of forest biomasses. **Powder technology**, v. 166, 139-151, 2006.

EUCLIDES, V. P. et al. Efeito da suplementação com feno de rama de mandioca e grão de sorgo sobre a utilização da palha de arroz por novilhos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 23, 631-643, 1988.

FAN, J. et al. Thermodynamic and environmental evaluation of biomass and coal co-fuelled gasification chemical looping combustion with CO₂ capture for combined cooling, heating and power production. **Applied energy**, v. 195, 861-876, 2017.

FEIL, N. F. **Estudo tecnológico para beneficiamento do carvão da camada Bonito, SC**. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas) – Curso de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2011.

GADDE, B.; MENKE, C.; WASSMANN, R. Rice straw as a renewable energy source in India, Thailand, and the Philippines: Overall potential and limitations for energy contribution and greenhouse gas mitigation. **Biomass and bioenergy**, v. 33, 1532-1546, 2009.

GAO, F. et al. Greenhouse gas emissions and reduction potential of primary aluminum production in China. **Science in China Series E: Technological Sciences**, v. 52, 2161-2166, 2009.

GAO, D. et al. Life cycle analysis of coal based methanol-to-olefins processes in China. **Computers & Chemical Engineering**, v. 109, 112-118, 2018.

GAVRONSKI, J. D. **Mina de Candiota: Alternativas de produção. Dissertação de mestrado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-graduação em Engenharia de Mina, Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 1997.

GIL, J. et al. Biomass gasification in atmospheric and bubbling fluidized bed: Effect of the type of gasifying agent on the product distribution. **Biomass & Bioenergy**, v. 17, 389-403, 1999.

GOEDKOOOP, M.; SPRIENSMA, R. **The Eco-indicator 99 A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment.** Methodology Report. Amersfoort, 2001.

GOEDKOOOP, M. et al. **Recipe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level.** First edition Report I – characterisation, 2008.

GÓMEZ-BAREA, A.; LECKNER, B. Modeling of biomass gasification in fluidized bed. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, 444-509, 2010.

GUINÉE, J. B. et al. **Handbook on Life Cycle Assessment - Operational Guide to the ISO Standards.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, v. 7, 2002.

HAO, H. et al. Coal-derived alternative fuels for vehicle use in China: A review. **Journal of cleaner production**, v. 141, 774-790, 2017.

HEGAZY, A.; GHALLAB, A. O.; ASHOUR, F. H. Integrated gasification combined cycle using Egyptian Maghara coal–rice straw feedstock. **Waste Management & Research**, v. 35, 656-668, 2017.

HERNÁNDEZ, J. J.; ARANDA-ALMANSA, G.; SERRANO, C. Co-gasification of biomass wastes and coal– coke blends in an entrained flow gasifier: An experimental study. **Energy & Fuels**, v. 24, 2479-2488, 2010.

HOFFMANN, R. **Método avaliativo da geração regionalizada de energia, em potências inferiores a 1 MWe, a partir da gestão dos resíduos de biomassa – O caso da casca de arroz.** Tese (Doutor em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

HOWANIEC, N.; SMOLIŃSKI, A. Effect of fuel blend composition on the efficiency of hydrogen-rich gas production in co-gasification of coal and biomass. **Fuel**, v. 128, 442-450, 2014.

IEA. **International Energy Agency**. Excerpt from electricity information (2015 edition). 2015. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/electricitytrends.pdf>. Acesso em 10 de abril de 2017.

IHS. **Information Handling Services**, 2016. Disponível em: <<http://www.methanol.org/wp-content/uploads/2016/07/Marc-Alvarado-Global-Methanol-February-2016-IMPCA-for-upload-to-website.pdf>> Acesso em 26 de setembro de 2017.

IPCC Report. **Intergovernmental Panel on Climate Change**. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories - CH₄ Emissions: Coal Mining and Handling. Cambridge University Press, New York, US, 1996.

IPCC Report. **2006 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Volume 2: Energy - chapter 3: Mobile Combustion. Institute for Global Environmental Strategies, Japan, 2006a.

IPCC Report. **2006 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Volume 2: Energy - chapter 4: Fugitive Emission. Institute for Global Environmental Strategies, Japan, 2006b.

IPCC Report. 2006 **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Volume 5: Waste - chapter 3: solid waste disposal. Institute for Global Environmental Strategies, Japan, 2006c.

IPCC Report. 2006 **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Volume 2: Energy - chapter 3: Stationary Combustion. Institute for Global Environmental Strategies, Japan, 2006d.

IPCC Report. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change - Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

IRGA. **Instituto Rio Grandense do Arroz**. Disponível em :<<http://www.irga.rs.gov.br/conteudo/6911/safras>>. Acesso em 20 de outubro de 2017.

ISAKSSON, J. et al. Integration of biomass gasification with a Scandinavian mechanical pulp and paper mill—Consequences for mass and energy balances and global CO₂ emissions. **Energy**. v. 44, 420-428, 2012.

ISO 14040. **International Organization for Standardization 14040:2006. Gestão Ambiental. Avaliação do ciclo de vida – Princípios e enquadramento**. Norma Portuguesa, 2006a.

ISO 14044. **International Organization for Standardization 14044:2006. Gestão Ambiental. Avaliação do ciclo de vida – Princípios e enquadramento**. Norma Portuguesa, 2006b.

JOLLIET, O. et al. Impact 2002+: a new Life Cycle Impact Assessment methodology. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 8, 324-330, 2003.

KADAM, K. L.; FORREST, L. H.; JACOBSON, W. A. Rice straw as a lignocellulosic resource: collection, processing, transportation, and environmental aspects. **Biomass and Bioenergy**, v. 18, 369-389, 2000.

KALKREUTH, W. et al. Petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 1. Santa Terezinha, Leão-Butiá and Candiota Coalfields, Rio Grande do Sul, Brazil. **Int. J. Coal Geol.** v. 68, 79-116, 2006.

KARGBO, F. R.; XING, J.; ZHANG, Y. Pretreatment for energy use of rice straw: A review. **African Journal of Agricultural Research**, v. 4, 1560-1565, 2009.

KISS, A. A. et al. Novel efficient process for methanol synthesis by CO₂ hydrogenation. **Chemical engineering journal**, v. 284, 260-269, 2016.

KOBAYASHI, N. et al. A new pulverized biomass utilization technology. **Powder Technology**; 180:272–283, 2008.

KOORNNEEF, J. et al. Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO₂. **Int. J. Greenh. Gas Control.** v. 2, 448-467, 2008.

KORENS, N. et al. **U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory Pittsburgh, NETL Project Manager.** DOE Gasification Technologies Product Manager, Pennsylvania, 2002.

KOYTSOUMPA, E. I.; et al. Modelling and assessment of acid gas removal processes in coal-derived SNG production. **Applied Thermal Engineering**, v. 74, 128–135, 2015.

KUNZE, C.; SPLIETHOFF, H. Modelling of an IGCC plant with carbon capture for 2020. **Fuel processing technology**, v. 91, 934-941, 2010.

LARSON, E. D. et al. **Cost-Benefit Assessment of Gasification-Based Biorefining in the Kraft Pulp and Paper Industry.** United States Department of Energy Report (DOE). DE-

FC26-04NT42260. Washington, DC: US Department of Energy, Volume 2: Detailed Biorefinery Design and Performance Simulation, 145 pp., 2006.

LI, Z. et al. Coal-derived methanol for hydrogen vehicles in China: energy, environment, and economic analysis for distributed reforming. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 88, 73-80, 2010.

LIANG, X., et al. Up-to-date life cycle assessment and comparison study of clean coal power generation technologies in China. **Journal Cleaner Production**. v. 39, 24-31, 2013.

LIMA NETO, E. P. **Perspectivas de reestruturação das indústrias da química e da energia: a via metanol**. Tese (Doutor em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos (TPQB) da Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

LIU, K.; SONG, C.; SUBRAMANI, V. **Hydrogen and syngas production and purification technologies**. John Wiley & Sons, 2009.

LIU, X. et al. A proposed coal-to-methanol process with CO₂ capture combined Organic Rankine Cycle (ORC) for waste heat recovery. **Journal of cleaner production**, v. 129, 53-64, 2016.

LORA et al. Gaseificação. In: Cortez, L. A. B.; Lora, E. E. S.; Gómez, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora Unicamp, 2008.

MACEDO, I. C. et al. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass Bioenergy**, v. 32, 582-595, 2008.

MAKWANA, J. P. et al. Air gasification of rice husk in bubbling fluidized bed reactor with bed heating by conventional charcoal. **Bioresource technology**, v. 178, 45-52, 2015.

MALLICK, D.; MAHANTA, P.; MOHOLKAR, V. S. Co-gasification of coal and biomass blends: Chemistry and engineering. **Fuel**, v. 204, 106-128, 2017.

MANI, S.; TABIL, L.G.; SOKHANSANJ, S. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. **Biomass and Bioenergy**; v. 27, 339–352, 2004.

MARGON, P. V. **Influência do uso das cinzas de carvão mineral de termelétrica em argamassas de revestimento: dosagem por curvas granulométricas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Civil) – Curso de Pós-graduação em Engenharia de Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2002.

MARTELLI, E. et al. Shell coal IGCCS with carbon capture: Conventional gas quench vs. innovative configurations. **Applied Energy**; v. 88, 3978–3989, 2011.

MASNADI-SHIRAZI, M. S. **Biomass/fossil fuel co-gasification with and without integrated CO₂ capture**. Tese de Doutorado. University of British Columbia, 2014.

MAYER, F. D. **Aproveitamento da casca de arroz em uma micro central termoelétrica avaliação dos impactos econômicos e ambientais para o setor arrozeiro do rio grande do sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Curso de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2009.

MCKEE, Douglas W. Mechanisms of the alkali metal catalysed gasification of carbon. **Fuel**, v. 62, 170-175, 1983.

METHANEX. **Methanex Investor Presentation**, 2016. Disponível em: <<https://www.methanex.com/sites/default/files/investor/MEOH%20Presentation%20-%20May.pdf>>. Acesso em 26 de setembro de 2017.

MICHELAZZO, M. B.; BRAUNBECK, O. A. Análise de seis sistemas de recolhimento do palhiço na colheita mecânica da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2008.

MINCHENER, A. J. Coal gasification for advanced power generation. **Fuel**, v. 84, 2222-2235, 2005.

MIRANDA, M. M. **Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Curso de Pós-graduação em Ciência da Engenharia Ambiental. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MOGHADAM, R. A. et al. Investigation on syngas production via biomass conversion through the integration of pyrolysis and air–steam gasification processes. **Energy conversion and management**, v. 87, 670-675, 2014.

MORAES, C. A. M. et al. Review of the rice production cycle: By-products and the main applications focusing on rice husk combustion and ash recycling. **Waste Management & Research**, v. 32, 1034-1048, 2014.

NIKOO, M. B. MAHINPEY, N. Simulation of biomass gasification in fluidized bed reactor using ASPEN PLUS. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, 1245-1254, 2008.

NORGATE, T.; HAQUE, N. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, 266-274, 2010.

NUGROHO, S. G. et al. Three-year measurement of methane emission from an Indonesian paddy field. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 181, 287-293, 1996.

PARVEZ, A. M.; MUJTABA, Iqbal M.; WU, T. Energy, exergy and environmental analyses of conventional, steam and CO₂-enhanced rice straw gasification. **Energy**, v. 94, 579-588, 2016.

PATEL, M.; ZHANG, X.; KUMAR, A. Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: **A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, 1486-1499, 2016.

PEDUZZI, E. et al. Thermo-economic evaluation and optimization of the thermo-chemical conversion of biomass into methanol. **Energy**, v. 58, 9-16, 2013.

PENNINGTON, D. W. et al. Risk and Regulatory Hazard Based Toxicological Effect Indicators in Life Cycle Assessment (LCA). **Human and Ecotoxicological Risk Assessment Journal**, v. 12, 450-475, 2006.

PINTO, F. et al. Co-gasification of coal and wastes in a pilot-scale installation 1: Effect of catalysts in syngas treatment to achieve tar abatement. **Fuel**, v. 88, 2392-2402, 2009.

PRASARA-A, J.; GRANT, T. Comparative life cycle assessment of uses of rice husk for energy purposes. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 16, 493-502, 2011.

QIN, Z. et al. Carbon footprint evaluation of coal-to-methanol chain with the hierarchical attribution management and life cycle assessment. **Energy Conversion and Management**, v. 124, 168-179, 2016.

RAMZAN, N., ASHRAF, A., NAVEED, S. MALIK, A. Simulation of hybrid biomass gasification using Aspen plus: A comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, 3962-3969, 2011.

RENÓ, M. L. G. et al. A LCA (life cycle assessment) of the methanol production from sugarcane bagasse. **Energy**, v. 36, 3716-3726, 2011.

RESTREPO, A. **Metodologia de análise e avaliação exergoambiental de plantas termoelétricas operando em combustão combinada carvão-bioma**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2012.

RESTREPO, Á.; BAZZO, E.; MIYAKE, R. A life cycle assessment of the Brazilian coal used for electric power generation. **Journal of Cleaner Production**, v. 92, 179-186, 2015.

RIO GRANDE DO SUL. Governo do estado do Rio Grande do Sul. **Protocolo de Intenções - Copelmi/Posco, 2014**. Disponível em: < <http://www.rs.gov.br/lista/1822/copelmi---posco/foto207955#imagemprincipal>>. Acesso em 26 de setembro de 2017.

RIO GRANDE DO SUL. Governo do estado do Rio Grande do Sul. **Previsto investimento de US\$ 2,7 bilhões em Candiota, 2015.** Disponível em: <<http://www.rs.gov.br/conteudo/213321/previsto-investimento-de-us-27-bilhoes-em-candiota>. Acesso em 26 de setembro de 2017.

RIO GRANDE DO SUL. Governo do estado do Rio Grande do Sul. **Governador acredita na recuperação do carvão gaúcho, 2017.** Disponível em: <<http://www.rs.gov.br/conteudo/259697/governador-acredita-na-recuperacao-do-carvao-gaucha>>. Acesso em 26 de setembro de 2017.

ROCHA, M. H. **Avaliação Técnica de Biorrefinarias para a Produção de Biocombustíveis Líquidos e Eletricidade através da Gaseificação de Biomassa.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

SAUR, K. et al. Life cycle assessment of aluminium: inventory data for the worldwide primary aluminium industry. **International Aluminium Institute**, 2003.

SCOTT, B. et al. A review on existing opencast coal mining methods within Australia. **Journal of Mining Science**, v. 46, 280-297, 2010.

SELLITTO, M. A. et al. Coprocessamento de cascas de arroz e pneus inservíveis e logística reversa na fabricação de cimento. **Ambiente & Sociedade**, v. 16, n. 1, 2013.

SHEN, H. S.; NI, D. B.; SUNDSTØL, F. Studies on untreated and urea-treated rice straw from three cultivation seasons: 1. Physical and chemical measurements in straw and straw fractions. **Animal Feed Science and Technology**, v. 73, 243-261, 1998.

SILALERTRUKSA, T.; GHEEWALA, S. H. A comparative LCA of rice straw utilization for fuels and fertilizer in Thailand. **Bioresource technology**, v. 150, 412-419, 2013.

SILVA, A. G.; KULAY, L. A. Avaliação do ciclo de vida. In: Alcir, V. J.; Demajorovic, J. **Modelos e Ferramentas de Gestão Ambiental – Desafios e perspectivas para as organizações.** São Paulo: Senac, 313-336, 2006.

SILVA, R. et al. Monitoring light hydrocarbons in Brazilian coal mines and in confined coal samples. **Int. J. Coal Geol.**, v. 84, 269-275, 2010.

SIMS, R. et al. From 1st to 2nd Generation Biofuel Technologies: An Overview of Current Industry and RD&D Activities. **International Energy Agency (IEA)**, France, 2008.

ŚLIWIŃSKA, A.; BURCHART-KOROL, D.; SMOLIŃSKI, A.. Environmental life cycle assessment of methanol and electricity co-production system based on coal gasification technology. **Science of The Total Environment**, v. 574, 1571-1579, 2017.

SOSBAI. Sociedade Sul-Brasileira de arroz irrigado. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil**. Pelotas, 2016.

SPATH, P. L.; DAYTON, D. C. Preliminary screening—technical and economic assessment of synthesis gas to fuels and chemicals with emphasis on the potential for biomass—derived syngas. **National Renewable Energy Laboratory (NREL)**, NREL/TP-510-34929, Colorado, p. 142, 2003.

SREEJITH, C. C., MURALEEDHARAN, C. ARUN, P. Performance prediction of steam gasification of wood using an ASPEN PLUS thermodynamic equilibrium model. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 33, 416-434, 2013.

SU, S. et al. Fugitive coal mine methane emissions at five mining areas in China. **Atmospheric environment**, v. 45, 2220-2232, 2011.

SUBADIYASA, N., ARYA, N., KIMURA, M. Methane emissions from paddy fields in Bali Island, Indonesia. **Soil Science & Plant Nutrition**, Tokyo, v. 43, 387-394, 1997.

SUN, L.; SMITH, R. Rectisol wash process simulation and analysis. **Journal of Cleaner Production**; v. 39, 321–328, 2013.

SUNTANA, A. S. et al. Bio-methanol potential in Indonesia: forest biomass as a source of bio-energy that reduces carbon emissions. **Applied Energy**. v. 86, 215-221, 2009.

SURAMAYTHANGKOOR, T.; GHEEWALA, S. H. Potential of practical implementation of rice straw-based power generation in Thailand. **Energy Policy**, v. 36, 3193-3197, 2008.

SUXIA, R. et al. Furfural production from rice husk using sulfuric acid and a solid acid catalyst through a two-stage process. **Carbohydrate research**, v. 359, 1-6, 2012.

TROP, P.; ANICIC, B.; GORICANEC, D. Production of methanol from a mixture of torrefied biomass and coal. **Energy**, v. 77, 125-132, 2014.

USDA. United States Department of Agriculture. **Grain: World Markets and Trade**, 2017.

VÉLEZ, J. F. et al. Co-gasification of Colombian coal and biomass in fluidized bed: an experimental study. **Fuel**, v. 88, 424-430, 2009.

VIANA, M. M. **Inventário do ciclo de vida do biodiesel etílico do óleo de girassol**. Dissertação (Mestrado em Engenharia, área Engenharia Química) – Curso de Pós-graduação em Engenharia. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

WANG, Y.; WU, K.; SUN, Y. Effects of raw material particle size on the briquetting process of rice straw. **Journal of the Energy Institute**, v. 91, 153-162, 2018.

WCA. **World Coal Association**. Disponível em: <<https://www.worldcoal.org/coal/what-coal>>. Acesso em 26 de setembro de 2017.

WEC – World Energy Council. **Energy Resources Latin America & The Caribbean**. Disponível em: <https://www.worldenergy.org/data/resources/region/latin-america-the-caribbean/coal>. Acesso em 26 de setembro de 2017.

WOOLCOCK, P. J.; BROWN, R. C. A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas. **Biomass and bioenergy**, v. 52, 54-84, 2013.

WREGGE, Marcos Silveira et al. **Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2012.

XIAO, J. et al. Integrated analysis of energy, economic, and environmental performance of biomethanol from rice straw in China. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 48, 9999-10007, 2009.

YAGI, K., MINAMI, K. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. **Soil Science & Plant Nutrition**, v. 36, 599-610, 1990.

YE, R. et al. The effect of rice straw on the priming of soil organic matter and methane production in peat soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 81, 98-107, 2015.

YUAN, Q.; PUMP, J.; CONRAD, R. Straw application in paddy soil enhances methane production also from other carbon sources. **Biogeosciences**, v. 11, 237-246, 2014.

ZHANG, J. et al. The impact of system configuration on material utilization in the coal-based polygeneration of methanol and electricity. **Energy**, v. 75, 136-145, 2014.

APÊNDICE A – PARÂMETROS DO MODELO DE EMISSÕES EVITADAS DA DECOMPOSIÇÃO DA BIOMASSA

Abaixo são definidas resumidamente os parâmetros do modelo de emissões evitadas CH₄ da decomposição da biomassa e apresentados os critérios para escolha dos seus valores, conforme o IPCC (2006c).

Fator de correção do modelo (φ)

Dadas as incertezas associadas ao modelo e a fim de estimar as emissões de forma conservadora, uma redução de 10% é aplicado ao modelo. Desta forma, é utilizado o fator igual a 0,9.

Fator de oxidação (OX)

Este fator reflete a oxidação do metano ainda no solo ou por outro material, por exemplo, se existe algum tipo de cobertura do local de eliminação da biomassa.

Tabela A.1 – Fator de oxidação

Fator de oxidação	Tipo de local
0	Local sem gerenciamento de resíduos
0,1	Locais de descarte de resíduos sólidos orgânicos que recebem cobertura com material oxidante, como solo ou composto

Fonte: IPCC (2006c)

No modelo foi utilizado o fator igual a zero para ambas biomassas.

Fração volumétrica do metano no gás (F)

Esse parâmetro reflete a fração de carbono orgânico degradável não se degrada ou se degrada muito lentamente em condições anaeróbicas no local de descarte do resíduo. O valor padrão recomendado pelo IPCC (2006) é 0,5.

Fração de carbono orgânico degradável em condições anaeróbicas (DOC_f)

Fração de carbono orgânico degradável que se decompõe em condições anaeróbica. O valor padrão recomendado pelo IPCC (2006c) é 0,5.

Fator de correção de metano (MCF)

O fator de correção de metano (MCF) explica o fato de que os locais de descarte não gerenciados produzem menos metano a partir de uma determinada quantidade de resíduos do que os gerenciados, porque uma maior fração de lixo se decompõe aerobicamente nas camadas superiores.

Tabela A.2 – Fator de correção de metano

Fator	Tipo de local
1,0	Para locais em que ocorre gerenciamento dos resíduos sólidos orgânicos, incluindo controle de liberação de gases, controle do material de cobertura, compactação mecânica e nivelamento.
0,5	Para locais de eliminação de resíduos sólidos gerenciados parcialmente aeróbicos. Estes devem ter uma disposição controlada e incluir pelo menos as seguintes estruturas para a introdução de camadas de ar: (i) material de cobertura permeável; (ii) sistema de drenagem de lixiviação e (iii) controle da coleta de gases.
0,8	Para locais de descarte de resíduos sólidos orgânicos não gerenciados - profundos e/ou com altos níveis de água. Isso compreende todos os locais que não atendem aos critérios descritos acima e que têm profundidades superiores ou iguais a 5 metros e/ou a água ao nível próximo do solo.
0,4	Para locais de descarte de resíduos sólidos não gerenciados. Isso inclui todos os locais que não atendem aos critérios acima e que têm profundidades menores que 5 metros.

Fonte: IPCC (2006c)

No modelo foi utilizado o fator igual a 0,8 para a palha de arroz, uma vez que no cultivo de arroz utiliza-se um volume de água próximo ao nível do solo, que na maioria das vezes

permanece na lavoura após colheita. Já para casca de arroz foi utilizado o fator igual a 0,4 em razão de não atender os critérios dos outros fatores.

Fração de carbono orgânico degradável (DOC_j)

Esse fator está associado a fração de carbono orgânico degradável do resíduo sólido.

Tabela A.3 – Fator de carbônico orgânico degradável

Tipo de resíduo	Resíduo úmido (%)	Resíduo seco (%)
Madeira e produtos de madeira	43	50
Celulose, papel	40	44
Alimentos, desperdícios de alimentos, bebidas e tabaco (com exceção de lodo)	15	38
Têxteis	24	30
Desperdícios de jardim, quintal e parques	20	49
Vidro, plástico, metal, outros resíduos inertes	0	0

Se o resíduo não pode ser claramente atribuído a um dos tipos de resíduos na Tabela A.3, deve-se escolher aquele que possua característica semelhante e um fator que resulte em uma estimativa conservadora (baixas emissores), segundo o IPCC (2006).

Para utilização no modelo escolhido o fator igual a zero 20 % para a palha de arroz, visto que ela se encontra com elevada umidade na lavoura após a colheita, por outro lado, a casca possui baixa umidade pois foi submetida a operações de secagem na unidade de beneficiamento, assim, o fator escolhido é igual a 49%.

Taxa de decaimento (k_j)

A taxa de decaimento do modelo de 1º ordem varia com o tipo de resíduo e com as condições climáticas, como temperatura média anual (TMA), precipitação média anual (PMA) e potencial de evapotranspiração médio anual (PET) da região.

Tabela A.4 – Taxa de decaimento da decomposição do resíduo orgânico

Tipo de resíduo	Temperatura anual média ($\leq 20^{\circ}\text{C}$)		Tropical (TMA $> 20^{\circ}\text{C}$)	
	Seco	Úmido	Seco	Úmido
	(PMA/PET <1)	(PMA/PET >1)	(PMA < 1000mm)	(PMA > 1000mm)
Polpa, papel, papelão (exceto lamas), têxteis	0,04	0,06	0,045	0,07
Madeira, produtos de madeira e palha	0,02	0,03	0,025	0,035
Moderadamente degradante, resíduos de jardim e parque putrescíveis orgânicos (não alimentares)	0,05	0,10	0,065	0,17
Rapidamente degradante, resíduos alimentares, lamas de esgoto, bebidas e tabaco	0,06	0,185	0,085	0,40

Fonte: IPCC (2006c)

A TMA da região do Rio Grande do Sul no qual está realizando-se o estudo é igual a $15,9^{\circ}\text{C}$; e a razão de PMA/PET é igual a 1,85 (WREGGE, 2012); desta forma, as taxas de decaimento escolhidas para aplicação no modelo para as biomassas foi igual a 0,03.

Período de cálculo das emissões (y)

O período para estimativa das emissões de CH_4 foi de 1 ano, porque os cenários para produção de metanol foram desenvolvidos com dados referentes ao período de um ano. Assim, a mitigação das emissões refere-se apenas este período.

APÊNDICE B – MINERAÇÃO DO CARVÃO E CONSUMO ENERGÉTICO

Dados sobre os equipamentos da mineração a céu aberto, carvão expedido e consumo energético obtidos dos relatórios técnicos da CRM e por meio das visitas *in situ*.

Tabela A.5 – Perfuratrizes e consumo de óleo diesel (l)

Ano	Mês	Perfuratriz Sandvik Ranger 500	Perfuratriz Sandvik DX 500	Perfuratriz Sandvik DX 500	Perfuratriz Atlas copco DM 50	Perfuratriz Atlas copco DM 45	Perfuratriz Atlas copco DM 45
2015	jan	1207,00	1927,00	-	645,00	448,00	9882,00
	fev	862,00	2028,00	180,00	1588,00	-	6321,00
	mar	2165,00	1450,00	-	4255,00	-	6198,00
	abr	970,00	2636,00	-	11468,00	1710,00	3091,00
	mai	1292,00	1089,00	-	5496,00	1130,00	2862,00
	jun	2336,00	1904,00	-	3765,00	-	2024,00
	jul	2244,00	-	-	480,00	-	-
	ago	1972,00	-	-	4120,00	380,00	790,00
	set	2985,00	-	-	9005,00	4639,00	2670,00
	out	1901,00	-	-	7937,00	3048,00	-
	nov	2159,00	-	-	10294,00	9353,00	240,00
	dez	1086,00	-	-	5453,00	8580,00	-
2016	jan	1268,00	1809,00	-	8164,00	5713,00	175,00
	fev	1167,00	2094,00	-	4850,00	3767,00	-
	mar	236,00	3373,00	-	800,00	9930,00	330,00
	abr	550,00	3268,00	-	2624,00	5891,00	-
	mai	-	3917,00	-	10037,00	14289,00	-
	jun	919,00	2547,00	-	10176,00	5723,00	-
	jul	1665,00	3118,00	-	5072,00	5734,00	-
	ago	1423,00	2244,00	-	11296,00	-	-
	set	1279,00	1980,00	-	11825,00	-	-
	out	1672,00	1374,00	-	8330,00	-	-
	nov	1045,00	2442,00	-	1541,00	3061,00	166,00
	dez	1153,00	3338,00	-	6642,00	4948,00	-

Fonte: Relatório técnico da CRM (2015, 2016)

Tabela A.6 – Trator esteira e consumo de óleo diesel (l)

Ano	Mês	Trator esteira D8T	Trator esteira D8R	Trator esteira D8T	Trator esteira D8T	Trator esteira D8T	Trator esteira D8T	Trator esteira 824H	Trator esteira D8T
2015	jan	-	-	-	-	17178,00	1844,00	2953,00	6149,00
	fev	-	-	-	-	7636,00	8783,00	350,00	9174,00
	mar	-	-	-	-	8510,00	11775,00	6156,00	8860,00
	abr	3909,00	12491,00	-	-	10810,00	12276,00	6437,00	6145,00
	mai	5598,00	1432,00	-	-	12732,00	5083,00	4614,00	8860,00
	jun	-	-	-	-	10927,00	7508,00	3738,00	8010,00
	jul	5849,00	-	8053,00	-	5886,00	9636,00	4575,00	5824,00
	ago	3259,00	-	160,00	-	15618,00	10192,00	950,00	8288,00
	set	-	-	8013,00	-	16290,00	630,00	2915,00	8184,00
	out	4907,00	480,00	10873,00	-	13109,00	-	3253,00	7417,00
	nov	850,00	5774,00	8432,00	-	8525,00	-	2623,00	2482,00
	dez	2647,00	7497,00	5731,00	-	9963,00	-	502,00	5077,00
2016	jan	4841,00	4279,00	5925,00	-	11787,00	-	3669,00	404,00
	fev	8425,00	7120,00	5051,00	-	12049,00	-	3510,00	-
	mar	-	10377,00	200,00	-	14443,00	1740,00	5652,00	4630,00
	abr	-	7752,00	2274,00	-	14824,00	11243,00	5619,00	9302,00
	mai	-	-	3517,00	-	8513,00	13752,00	5715,00	8973,00
	jun	-	1019,00	2505,00	-	-	11527,00	6344,00	758,00
	jul	-	5077,00	3589,00	-	-	14547,00	5292,00	5694,00
	ago	-	13063,00	11188,00	228,00	-	14494,00	2785,00	-
	set	-	9632,00	9273,00	190,00	460,00	13750,00	4316,00	340,00
	out	-	4592,00	5892,00	-	7906,00	10310,00	3857,00	-
	nov	400,00	2220,00	5949,00	-	7785,00	8050,00	2277,00	4903,00
	dez	5813,00	-	4956,00	-	793,00	9623,00	1249,00	7708,00

Fonte: Relatório técnico da CRM (2015, 2016)

Tabela A.7 – Escavadeira hidráulica e consumo de óleo diesel (1)

Ano	Mês	Escavadeira hidraulica EC360B	Escavadeira hidraulica 365B	Escavadeira hidraulica 700B	Escavadeira hidraulica Liebherr
2015	jan	-	-	12367,00	7114,00
	fev	-	-	10507,00	12736,00
	mar	-	-	12631,00	17744,00
	abr	-	-	17795,00	18570,00
	mai	-	-	7064,00	13081,00
	jun	-	-	9843,00	20242,00
	jul	-	-	14749,00	12944,00
	ago	-	-	8281,00	11526,00
	set	370,00	-	9749,00	17825,00
	out	3464,00	-	10484,00	17321,00
	nov	5218,00	-	16721,00	7350,00
	dez	-	-	10262,00	19915,00
2016	jan	-	-	11802,00	22640,00
	fev	-	872,00	-	13304,00
	mar	-	1670,00	-	24390,00
	abr	570,00	340,00	1767,00	23850,00
	mai	4534,00	180,00	4890,00	25833,00
	jun	6411,00	270,00	-	19005,00
	jul	4170,00	-	3111,00	21328,00
	ago	3629,00	-	12422,00	22174,00
	set	3444,00	-	13971,00	16858,00
	out	2078,00	-	18501,00	17685,00
	nov	2669,00	5578,00	14967,00	16488,00
	dez	4256,00	10953,00	-	20392,00

Fonte: Relatório técnico da CRM (2015, 2016)

Tabela A.8 – Caminhão (30t) e consumo de óleo diesel (l)

Ano	Mês	Caminhão scania 1	Caminhão scania 2	Caminhão scania 3	Caminhão scania 4	Caminhão scania 5	Caminhão scania 6	Caminhão scania 7
2015	jan	461,00	1706,00	3862,00	3596,00	3715,00	-	3607,00
	fev	1140,00	-	2354,00	-	2881,00	310,00	3534,00
	mar	1764,00	-	2214,00	-	2665,00	2208,00	3462,00
	abr	3940,00	3862,00	592,00	-	3511,00	2858,00	3933,00
	mai	2525,00	2146,00	3375,00	-	3530,00	3223,00	290,00
	jun	1249,00	2049,00	2563,00	1402,00	1750,00	1611,00	1189,00
	jul	995,00	3004,00	4027,00	-	130,00	3218,00	-
	ago	1305,00	1951,00	2050,00	418,00	805,00	2162,00	-
	set	80,00	1082,00	-	1584,00	1868,00	1627,00	-
	out	-	3132,00	1275,00	3451,00	3052,00	2307,00	-
	nov	1410,00	301,00	2498,00	1763,00	2194,00	1652,00	-
	dez	711,00	-	2072,00	1424,00	1564,00	1731,00	-
2016	jan	936,00	722,00	3073,00	3367,00	3210,00	2058,00	-
	fev	-	-	2043,00	2468,00	2737,00	2434,00	-
	mar	-	-	505,00	4252,00	4806,00	4535,00	-
	abr	-	432,00	3323,00	4723,00	831,00	4485,00	-
	mai	-	225,00	-	3444,00	3764,00	3114,00	-
	jun	-	-	-	-	4000,00	3731,00	-
	jul	1086,00	880,00	1940,00	566,00	2806,00	2622,00	-
	ago	1801,00	1466,00	3898,00	594,00	2727,00	2395,00	-
	set	3226,00	2761,00	3751,00	2643,00	-	1398,00	-
	out	1415,00	1616,00	2397,00	2848,00	-	2583,00	-
	nov	1789,00	1454,00	2648,00	1916,00	-	2345,00	-
	dez	2311,00	-	2932,00	-	-	3417,00	-

Fonte: Relatório técnico da CRM (2015, 2016)

Tabela A.9 – Caminhão-fora-de-estrada (65t) e consumo de óleo diesel (l)

Ano	Mês	Caminhão						
		Perlini 1	Perlini 2	Perlini 3	Perlini 4	Perlini 5	Perlini 6	Perlini 7
2015	jan	5413,00	12552,00	3725,00	6991,00	27600,00	4629,00	13223,00
	fev	5720,00	2322,00	3911,00	1040,00	14580,00	8674,00	10752,00
	mar	11746,00	-	-	-	34030,00	11323,00	14264,00
	abr	13263,00	1399,00	3822,00	-	44580,00	11797,00	11401,00
	mai	9798,00	-	7618,00	-	25090,00	9464,00	7950,00
	jun	8236,00	4225,00	11552,00	-	30240,00	13812,00	7296,00
	jul	10414,00	5051,00	11124,00	-	10583,00	8440,00	636,00
	ago	7789,00	9598,00	8531,00	-	9679,00	10759,00	9508,00
	set	12215,00	10767,00	11484,00	-	12949,00	12975,00	12677,00
	out	10988,00	13186,00	11780,00	-	12910,00	15470,00	15041,00
	nov	10340,00	10042,00	10677,00	-	6004,00	10542,00	10468,00
	dez	7098,00	9146,00	4514,00	-	8268,00	9221,00	7753,00
2016	jan	14194,00	9771,00	-	-	13046,00	9364,00	12138,00
	fev	7095,00	4319,00	5005,00	-	7282,00	8372,00	7470,00
	mar	14207,00	10502,00	5805,00	-	13676,00	13452,00	12470,00
	abr	14719,00	7985,00	2854,00	-	13118,00	16842,00	15913,00
	mai	15544,00	-	16791,00	-	12819,00	6601,00	12197,00
	jun	14461,00	-	16076,00	-	12520,00	10472,00	5877,00
	jul	13777,00	-	14056,00	-	12642,00	7014,00	14030,00
	ago	13903,00	-	15157,00	-	2146,00	12956,00	13537,00
	set	12022,00	-	11999,00	-	4105,00	10003,00	11188,00
	out	10933,00	-	9443,00	-	8374,00	5481,00	11832,00
	nov	13204,00	-	9458,00	-	10193,00	9082,00	14477,00
	dez	9052,00	-	12658,00	-	7132,00	9235,00	13633,00

Fonte: Relatório técnico da CRM (2015, 2016)

Tabela A.10 – Pás carregadeiras e consumo de óleo diesel (l)

Ano	Mês	Pás carregadeiras		
		L22OE	L350F	98811
2015	jan	2723,00	14033,00	-
	fev	2103,00	8743,00	-
	mar	3721,00	8089,00	790,00
	abr	3952,00	7610,00	10791,00
	mai	1279,00	7058,00	12809,00
	jun	2064,00	5325,00	13338,00
	jul	1279,00	5487,00	11156,00
	ago	1952,00	6069,00	14692,00
	set	1035,00	6248,00	11828,00
	out	4628,00	3154,00	12180,00
	nov	80,00	7010,00	12326,00
	dez	1397,00	7046,00	12505,00
2016	jan	1711,00	4019,00	10976,00
	fev	1119,00	9836,00	14779,00
	mar	1805,00	9642,00	12923,00
	abr	2341,00	6880,00	14293,00
	mai	825,00	6086,00	12366,00
	jun	350,00	6826,00	11643,00
	jul	3238,00	5135,00	15249,00
	ago	1957,00	5949,00	12845,00
	set	1754,00	7822,00	8068,00
	out	999,00	3783,00	13887,00
	nov	879,00	721,00	12847,00
	dez	942,00	-	13177,00

Fonte: Relatório técnico da CRM (2015, 2016)

Tabela A.11 – Trator, moto bomba e consumo de óleo diesel (l)

Ano	Mês	Trator	Moto	Moto	Moto	Moto	Moto	Moto
		Agrícola	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3	Bomba 4	Bomba 5	Bomba 6
2015	jan	62,00	-	-	700,00	1536,00	1850,00	3777,00
	fev	199,00	370,00	-	460,00	574,00	1416,00	370,00
	mar	350,00	-	-	600,00	473,00	2648,00	800,00
	abr	248,00	-	-	-	-	549,00	613,00
	mai	244,00	-	105,00	-	879,00	400,00	1530,00
	jun	71,00	-	-	300,00	2640,00	2190,00	-
	jul	264,00	-	-	-	766,00	2505,00	434,00
	ago	80,00	186,00	-	1389,00	330,00	2051,00	546,00
	set	82,00	-	-	1236,00	-	1968,00	422,00
	out	-	112,00	-	1056,00	200,00	4372,00	1689,00
	nov	233,00	-	-	3289,00	542,00	710,00	1442,00
	dez	191,00	-	-	2866,00	-	690,00	713,00
2016	jan	350,00	140,00	225,00	2383,00	2000,00	179,00	1116,00
	fev	-	-	30,00	1034,00	2672,00	63,00	708,00
	mar	308,00	-	-	135,00	2853,00	470,00	1377,00
	abr	-	-	-	-	2804,00	1956,00	3589,00
	mai	77,00	-	-	-	793,00	4268,00	3672,00
	jun	165,00	-	-	-	405,00	4411,00	3437,00
	jul	60,00	-	-	-	440,00	443,00	-
	ago	258,00	-	-	120,00	857,00	2497,00	-
	set	51,00	-	-	-	3606,00	2678,00	-
	out	187,00	-	-	-	5122,00	860,00	-
	nov	220,00	140,00	200,00	-	3385,00	1429,00	-
	dez	148,00	-	-	60,00	1386,00	2290,00	-

Fonte: Relatório técnico da CRM (2015, 2016)

Tabela A.12 – Equipamentos elétricos e consumo de energia (kWh)

Ano	Mês	Britadores e peneiras	Escavadeira <i>dragline</i>	Escavadeira <i>shovel</i> P&H 1600 CL
2015	jan	96466,59	248136,11	5940,06
	fev	101887,91	231741,98	6127,42
	mar	115474,30	81710,21	5018,26
	abr	83003,94	351799,37	4885,44
	mai	107059,79	245236,83	5032,19
	jun	99390,15	82888,25	5410,45
	jul	96736,40	81701,75	4550,90
	ago	86188,10	282533,27	4593,36
	set	86264,96	364494,87	5023,66
	out	81935,17	236463,98	4914,61
	nov	102701,22	114471,81	4749,03
	dez	90351,23	20234,74	3941,61
2016	jan	96156,95	26278,65	5115,63
	fev	78074,19	182965,48	4586,69
	mar	102251,14	199013,02	4950,13
	abr	102195,83	290876,80	14998,89
	mai	114356,40	339638,52	6232,42
	jun	84730,46	358285,65	19309,13
	jul	100021,58	160792,74	21865,36
	ago	103609,95	404047,70	6285,06
	set	80485,95	300778,62	19369,05
	out	104595,64	311189,96	19946,67
	nov	72367,04	232236,71	5833,51
	dez	119463,65	325234,87	14459,91

Fonte: Relatório técnico da CRM (2015, 2016)

Tabela A.13 – Produção do carvão mineral no ano de 2015 e 2016

Ano	Mês	Carvão (t)
2015	jan	218328,00
	fev	146125,22
	mar	152986,66
	abr	169888,54
	mai	187518,20
	jun	157810,87
	jul	143368,29
	ago	159997,99
	set	204616,00
	out	196695,00
	nov	84909,33
	dez	157797,38
2016	jan	193571,34
	fev	199028,03
	mar	250493,75
	abr	215927,50
	mai	202835,00
	jun	225794,76
	jul	213378,73
	ago	190665,10
	set	168126,90
	out	179681,44
	nov	207716,47
	dez	175304,60

Fonte: Relatório técnico da CRM (2015, 2016)

APÊNDICE C – EQUIPAMENTOS DA ROTA DA PALHA DE ARROZ

Dados sobre os equipamentos utilizados na coleta e processamento da palha de arroz.

Tabela A.14 – Equipamentos utilizados na etapa de coleta da palha

Equipamento	Quantidade	Características	Fonte de energia
Segadeira	1	Marca: Vicon; Modelo: Extra 832 R; Dimensões: 8 discos de corte - 3,2 m de largura de corte, peso 1885 kg; Tractor: Case MX 135, 135 cv	Diesel
Enleiladeira	1	Marca e modelo: não identificada. Tractor: New Holland TL 55, 55 cv	Diesel
Enfardadeira	1	Marca: Vicon; Modelo: LB 12200 R; Dimensões: largura 2,76 m, altura 2,7 m e comprimento 7,8 m, peso 8.500 kg, Tractor: New Holland TM 180 - 180 cv	Diesel
Tratores	5	Porte médio, 3 Massey Ferguson 290, 1 Massey Ferguson 292 e 1 John Deere 5403	Diesel

Fonte: Restrepo (2012)

Tabela A.15 – Principais equipamentos da etapa de processamento da palha de arroz

Equipamento	Quantidade	Característica/ Potência nominal (KW)
Transportador de correias	1	4,40
Desenfundador	1	44,10
Mesa vibratória	1	5,70
Ventilador e picador	1	44,10
Ciclone	2	1,50
Moinhos	1	110,30
Silo, rosca e elevador de canecas	1	12,90
Compressor, transporte pneumático	1	22,10
Ventilador soprador	1	14,70
Ventilador despoeiramento	1	29,40
Filtro manga	1	1,30

Fonte: Restrepo (2012)

APÊNDICE D – CONSUMO DE ÓLEO DIESEL NAS OPERAÇÕES DE TRANSPORTE LIGADAS AS BIOMASSAS

Tabela A.16 – Consumo de óleo diesel estimado e número de viagens para o transporte da palha por cidade

Cidade	d (km)	Palha recuperada (t/ano)	C_v (kg diesel)	Nº de viagem (ano)	Consumo por cidade (kg diesel)
Candiota	20,00	2383,74	23,19	121,00	$2,81 \times 10^{03}$
Hulha Negra	38,00	4426,06	44,07	224,68	$9,90 \times 10^{03}$
Pinheiro Machado	45,00	231,00	52,19	11,73	$6,12 \times 10^{02}$
Bagé	64,00	54704,25	74,22	2776,91	$2,06 \times 10^{05}$
Pedras Altas	72,00	6384,04	83,50	324,07	$2,71 \times 10^{04}$
Pedro Osório	117,00	19355,18	135,69	982,51	$1,33 \times 10^{05}$
Aceguá	119,00	51217,64	138,01	2599,92	$3,59 \times 10^{05}$
Dom Pedrito	133,00	237398,39	154,24	12050,88	$1,86 \times 10^{06}$
Capão do Leão	137,00	36940,47	158,88	1875,18	$2,98 \times 10^{05}$
Pelotas	150,00	44331,29	173,96	2250,36	$3,91 \times 10^{05}$
Arroio Grande	160,00	218109,14	185,56	11071,71	$2,05 \times 10^{06}$
Total	1055,00	675481,19	1223,52	34289	$4,20 \times 10^{07}$
Consumo médio total (kg 0,007907 diesel/kg palha)					

Tabela A.17 – Consumo de óleo diesel estimado e número de viagens para o transporte da casca por cidade

Cidade	d (km)	Casca recuperada (t/ano)	C_v (kg diesel)	Nº viagem (ano)	Consumo por cidade (kg diesel)
Bagé	64	89992,64	74,85	4495,1	$3,36 \times 10^{05}$
Dom Pedrito	133	140020,84	155,55	6994,0	$1,09 \times 10^{06}$
Capão do Leão	137	149765,75	160,23	7480,8	$1,20 \times 10^{06}$
Pelotas	150	495403,41	175,43	24745,4	$4,34 \times 10^{06}$
Arroio Grande	160	3117,83	187,13	155,7	$2,91 \times 10^{04}$
Total	644	878300,47	753,18	43871	$6,99 \times 10^6$
Consumo médio total (kg diesel/kg palha) 0,007962					

Tabela A.18 – Consumo do óleo diesel estimado no transporte do insumo (óleo diesel) da refinaria até a cidade de recolhimento da palha

Cidade	d (km)	Palha recuperada (t/ano)	Consumido total do óleo diesel na coleta e transporte (kg/ano)	C_v (kg diesel)	Nº viagem (ano)	Consumo de óleo diesel no transporte do insumo (kg diesel)
Candiota	215,00	2383,74	$6,84 \times 10^{04}$	191,04	1,79	341,42
Hulha Negra	232,50	4426,06	$1,32 \times 10^{05}$	206,59	3,44	710,87
Pinheiro Machado	180,00	231,00	$6,96 \times 10^{03}$	159,94	0,18	29,12
Bagé	257,50	54704,25	$1,71 \times 10^{06}$	228,80	44,72	10231,60
Pedras Altas	225,00	6384,04	$2,03 \times 10^{05}$	199,92	5,30	1059,05
Pedro Osório	130,00	19355,18	$6,66 \times 10^{05}$	115,51	17,40	2009,99
Aceguá	315,00	51217,64	$1,77 \times 10^{06}$	279,89	46,20	12932,09
Dom Pedrito	330,00	237398,39	$8,39 \times 10^{06}$	293,22	219,27	64295,69
Capão do Leão	103,00	36940,47	$1,31 \times 10^{06}$	91,52	34,35	3143,51
Pelotas	80,00	44331,29	$1,61 \times 10^{06}$	71,08	42,11	2993,10
Arroio Grande	170,00	218109,14	$8,05 \times 10^{06}$	151,05	210,52	31799,86
Total	2238,00	675481,19	$2,39 \times 10^{07}$	1988,57	626	$1,30 \times 10^5$
Consumo médio total do óleo diesel na coleta e transporte (kg diesel/kg palha)			$3,54 \times 10^{-2}$			
Consumo médio do óleo diesel no seu transporte (kg diesel/kg palha)			$1,92 \times 10^{-4}$			

Tabela A.19 – Consumo do óleo diesel estimado no transporte do insumo (óleo diesel) da refinaria até a cidade da beneficiadora de arroz

Cidade	d (km)	Casca recuperada (t/ano)	Diesel consumido no transportado (kg/ano)	C_p (kg diesel)	Nº viagem	Consumo no transporte por cidade (kg diesel)
Bagé	64	89992,64	336461,21	56,867	8,79637	500,22
Dom Pedrito	133	140020,84	1087908,464	118,177	28,4421	3361,19
Capão do Leão	137	149765,75	1198618,865	121,731	31,3364	3814,62
Pelotas	150	495403,41	4341084,972	133,282	113,492	15126,51
Arroio Grande	160	3117,83	29142,07357	142,168	0,76188	108,32
Total	644	878300,47	6,99E+06	572,225	183	22910,86
Consumo médio total do óleo diesel na coleta e transporte (kg diesel/kg palha)		$7,96 \times 10^{-3}$				
Consumo médio do óleo diesel no seu transporte (kg diesel/kg arroz)		$2,61 \times 10^{-5}$				

Tabela A.20 – Consumo do óleo diesel estimado no transporte da cinza da planta de metanol até a mina de carvão

Parâmetro	Cenário A	Cenário B	Cenário C	Unidade
Metanol produzido	75490,9	78011,2	70139,92	kg/h
Cinza produzida	124957	99991,1	102139	kg/h
Consumo de diesel no transporte da cinza	$3,03 \times 10^{-04}$	$3,03 \times 10^{-04}$	$3,03 \times 10^{-04}$	kg diesel/kg cinza
Consumo de diesel por metanol	$5,02 \times 10^{-04}$	$3,88 \times 10^{-04}$	$4,41 \times 10^{-04}$	kg diesel/kg metanol
Nº viagens	9	7	7	h

APÊNDICE E – CÓDIGOS DE CÁLCULO DESENVOLVIDOS EM FORTRAN

Tabela A.21 – Definição dos parâmetros para a decomposição do carvão mineral em seus constituintes principais no Aspen Plus

Nome da variável	Definição da variável
ULT	Compattr-Vec Stream=COAL Substream=NC Component=COAL Attribute=ULTANAL
WATER	Compattr-Var Stream=COAL Substream=NC Component=COAL Attribute=PROXANAL Element=1
H2O	Block-Var Block=Ryield Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=WATER ID2=MIXED
ASH	Block-Var Block=Ryield Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=ASH ID2=NC
C	Block-Var Block=Ryield Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=CARBO-04 ID2=CISOLID
O2	Block-Var Block=Ryield Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=OXYGE-01 ID2=MIXED
H2	Block-Var Block=Ryield Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=HYDRO-01 ID2=MIXED
N2	Block-Var Block=Ryield Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=NITRO-01 ID2=MIXED
CL2	Block-Var Block=Ryield Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=CHLOR-02 ID2=MIXED
S	Block-Var Block=Ryield Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=SULFU-01 ID2=MIXED

Bloco de execução de cálculo no Fortran

C Fact is the factor to convert the ultimate analysis to a wet basis.

FACT = (100- WATER)/100

H2O = WATER/100

ASH = ULT(1)/100*FACT

C = ULT(2)/100*FACT

H2 = ULT(3)/100*FACT

N2 = ULT(4)/100*FACT

CL2 = ULT(5)/100*FACT

S = ULT(6)/100*FACT

O2 = ULT(7)/100*FACT

Sequência de execução do cálculo

Antes do bloco de operação Ryield-1

Tabela A.22 – Definição dos parâmetros para a decomposição das biomassas em seus constituintes principais no Aspen Plus

Nome da variável	Definição da variável
ULT	Compattr-Vec Stream=BIOMASSA Substream=NC Component=BIOMASSA Attribute=ULTANAL
WATER	Compattr-Var Stream=BIOMASSA Substream=NC Component=BIOMASSA Attribute=PROXANAL Element=1
H2O	Block-Var Block=RYIELD Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=WATER ID2=MIXED
ASH	Block-Var Block=RYIELD Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=ASH ID2=NC
C	Block-Var Block=RYIELD Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=CARBO-04 ID2=CISOLID
O2	Block-Var Block=RYIELD Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=OXYGE-01 ID2=MIXED
H2	Block-Var Block=RYIELD Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=HYDRO-01 ID2=MIXED
N2	Block-Var Block=RYIELD Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=NITRO-01 ID2=MIXED
CL2	Block-Var Block=RYIELD Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=CHLOR-02 ID2=MIXED
S	Block-Var Block=RYIELD Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=SULFU-01 ID2=MIXED
Bloco de execução de cálculo no Fortran	
C	Fact is the factor to convert the ultimate analysis to a wet basis. FACT = (100- WATER)/100 H2O = WATER/100 ASH = ULT(1)/100*FACT C = ULT(2)/100*FACT H2 = ULT(3)/100*FACT N2 = ULT(4)/100*FACT CL2 = ULT(5)/100*FACT S = ULT(6)/100*FACT O2 = ULT(7)/100*FACT
Sequência de execução do cálculo	
Antes do bloco de operação Ryield-2	

ANEXO A – PRODUÇÃO DE ARROZ POR UNIDADE DE BENEFICIAMENTO

Quadro B.1 – Produção de arroz (sacos de 50kg) – ano 2016

Engenho	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
COOP. AGRICOLA MISTA AGUDENSE LTDA.	28225	26539	22998	36110	32958	39376	29407	24143	25251	23901	24.686	24521	338115
DICKOW & CIA. LTDA.	192508	170357	194021	183565	209034	240933	185834	181837	204858	179349	215.913	184327	2342536
CEREALISTA FUMACENSE LTDA.	78038	77190	81183	51275	59705	63683	53096	57159	72413	76952	69.862	52244	792800
COOPERATIVA AGROINDUSTRIAL ALEGRETE LTDA.	253834	251096	276273	248985	264370	263505	226931	217709	168873	147768	183.142	182326	2684812
PILECO & CIA. LTDA.	241810	193739	191277	285198	230687	282201	280243	214188	197379	186151	216.447	224086	2743406
COOP.PROD. ARROZ PRÉ-GERMINADO ARROIO GRANDE LTDA	29795	27520	34916	22538	30826	31119	38315	19615	34789	20880	26.803	24091	341207
MACROSUL ALIMENTOS LTDA.	0	0	0	0	0	1069	0	0	0	0	871	0	1940
CEOLIN & CIA. LTDA.	56262	57565	68974	87494	71118	66727	78056	68972	50077	68080	40.526	52512	766363
CEREALISTA CORADINI LTDA.	63982	58091	87620	95806	102664	104000	76272	68612	52825	78757	106.344	110001	1004974
COOPERATIVA AGRICOLA MISTA ACEGUA LTDA.	16602	18148	18440	16366	19007	18231	17310	18199	16365	16986	15.180	16800	207634
CORADINI ALIMENTOS LTDA.	69682	75279	49931	45131	50673	85482	62310	70658	62996	63386	47.567	55161	738256

Fonte: 'Fonte: Relatório do *Ranking* das beneficiadoras de arroz do ano de 2016 no estado do Rio Grande do Sul (IRGA, 2017).

Quadro B.1 – Produção de arroz (sacos de 50 kg) – ano 2016 (continuação)

Engenho	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
PILLON INDUSTRIA E COMERCIO DE ARROZ LTDA.	27398	27126	36002	27791	28081	29052	27321	20531	26824	28976	27033	27236	333371
ENGENHO MORIN LTDA.	459	398	464	353	459	473	362	459	442	459	288	378	4994
COM. BENEF. ARROZ NETTE LTDA.	461	177	390	385	330	370	498	385	492	752	578	780	5598
DJM IND. E COM. DE CEREAIS LTDA.	63141	53443	80405	86112	68743	62136	105481	73825	59500	75576	74843	58960	862165
H C S JUNIOR CEREAIS LTDA.	3450	2728	2773	3522	4232	1094	1711	2961	1832	1619	2752	1157	29831
CEREAIS BUTIA LTDA	0	44	0	1036	0	1941	0	0	0	0	0	0	3021
COOPERATIVA TRITÍCOLA CAÇAPAVANA LTDA.	80434	82834	73669	74799	92415	82627	83551	54339	28195	63370	53093	47940	817266
IND.&COM. DE CER. BEIJAFLORES LTDA. - MATRIZ	12528	17725	19975	25029	27900	19852	30805	14801	14803	14263	16092	10150	223923
ALFREDO A. TREICHEL & CIA. LTDA.	55049	53968	51603	42698	56031	62309	55791	45057	53914	38867	44467	30657	590411
ENGENHO MORAES LTDA.	15231	18523	21945	15183	16814	15337	17801	15657	11747	8099	11082	16208	183627
IRMAOS TREVISAN S/A. IND. COM. E AGRIC.	24700	28560	26417	30250	23200	31714	19371	18620	15850	20300	20100	27200	286282

¹Fonte: Relatório do *Ranking* das beneficiadoras de arroz do ano de 2016 no estado do Rio Grande do Sul (IRGA, 20