

AVALIAÇÃO DA TORREFAÇÃO E DENSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS NO BRASIL

Fábio Teixeira Ferreira da Silva

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

Orientadores: Alexandre Salem Szklo
Joana Portugal Pereira

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2017

AVALIAÇÃO DA TORREFAÇÃO E DENSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS
AGRÍCOLAS NO BRASIL

Fábio Teixeira Ferreira da Silva

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

Examinada por:

Prof. Alexandre Salem Szklo, D.Sc.

Profa. Joana Portugal Pereira, Ph.D.

Prof. Roberto Schaeffer, Ph.D.

Prof. Joaquim Eugênio Abel Seabra, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
FEVEREIRO DE 2017

Silva, Fábio Teixeira Ferreira da

Avaliação da Torrefação e Densificação de Resíduos Agrícolas no Brasil/ Fábio Teixeira Ferreira da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE. 2017.

XVI, 198 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Joana Correia de Oliveira de Portugal
Pereira

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 148-159

1. Bioenergia. 2. Pré-tratamento de Biomassa. 3. Cadeia de Suprimentos. 4. Resíduos Agrícolas. I. Szklo, Alexandre Salem, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

À memória de meu avô Antônio Pedro, que muito se orgulharia em me ver mestre.

AGRADECIMENTOS

A meus orientadores pelo acompanhamento ao longo do árduo percurso. Ao prof. Alexandre Szklo por todas as ideias e sugestões antes e durante o trabalho e, mesmo sendo talvez a pessoa mais brilhante que já conheci, por sempre estar disposto a ouvir meus contrapontos. À profa. Joana Portugal Pereira por me passar um pouco de sua vasta experiência em bioenergia e por suas valiosas contribuições desde os primeiros momentos do trabalho, sempre de forma absolutamente precisa e atenciosa.

Aos professores do PPE, especialmente ao prof. Roberto Schaeffer e ao prof. André Lucena, que muito me ensinaram sobre o setor energético. Também à equipe administrativa do PPE, em particular à Sandrinha, Paulo, Fernando e Queila, que em todas as oportunidades atenderam às minhas demandas e questionamentos com agilidade e boa vontade.

A meus pais e irmão, cujo apoio incondicional foi minha maior fonte de força nessa caminhada.

A minha namorada Bruna, sempre dosando firmeza e ternura para me estimular a seguir trabalhando e fazer meus dias mais felizes. Também pela compreensão em meus momentos de ausência e pela paciência (principalmente quando o assunto é casamento).

Aos colegas de turma do PPE e companheiros do Cenergia pelas boas conversas, trocas de ideia e descontração. Destes, destaco as minhas amigas Fran, parceira de estudos, trabalhos, pesquisas e viagens pela Ponte Rio-Niterói, e Isabela, que muito me auxiliaram no trabalho. Vida longa ao Clube da Biomassa!

A todos os meus familiares e queridos amigos por me apoiarem e torcerem por mim.

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

AVALIAÇÃO DA TORREFAÇÃO E DENSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS NO BRASIL

Fábio Teixeira Ferreira da Silva

Fevereiro/2017

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Joana Correia de Oliveira de Portugal Pereira

Programa: Planejamento Energético

O Brasil é um dos principais países produtores agrícolas no mundo, gerando uma grande quantidade de resíduos no campo, a qual se associa um considerável potencial de produção de vetores energéticos. Contudo, o aproveitamento desse recurso enfrenta barreiras técnicas e logísticas. A torrefação da biomassa converte-a em um produto similar ao carvão e a densificação concentra sua massa por unidade de volume, simplificando a logística da cadeia bioenergética. Nesse prisma, objetiva-se propor uma metodologia para avaliar os benefícios da torrefação e peletização de resíduos agrícolas na cadeia de suprimentos de sua gasificação. Primeiramente, o trabalho levanta os potenciais de energia primária advindos das palhas de cana-de-açúcar, soja, milho, arroz e trigo e mapeia-os sobre o território brasileiro com auxílio de ferramenta GIS, localizando *clusters* para cada biomassa. Após, simulam-se custos de cadeias de suprimentos para a gasificação desses resíduos com diferentes configurações, cada qual definindo um estudo de caso. Foi encontrado um potencial de 2,6 EJ de energia primária para a soma de todas as palhas nos municípios brasileiros e de 214 PJ apenas para os *clusters*. Na cadeia produtiva, constatou-se que o processo TOP reduz sensivelmente os custos da cadeia bioenergética de gasificação de palhas, seja por permitir ganhos de escala na conversão ou por reduzir custos logísticos, sobretudo na etapa de armazenamento.

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

ASSESSMENT OF AGRICULTURAL RESIDUES TORREFACTION AND DENSIFICATION IN BRAZIL

Fábio Teixeira Ferreira da Silva

February/2017

Advisors: Alexandre Salem Szklo
Joana Correia de Oliveira de Portugal Pereira

Department: Energy Planning

Brazil is one of the major agricultural producers in the World. This large-scale production leads to a vast amount of residues left in the field, which ultimately carry a considerable potential to produce energy vectors. Nonetheless, the energy usage of this resource face technical and logistical challenges. The torrefaction of biomass converts it into a coal-like product, while the densification concentrates its mass per unit of volume. Hence, these pretreatments simplify the bioenergy supply chain logistics. Therefore, this dissertation aims to develop a methodology to assess the benefits of torrefaction and pelletization to the syngas production from straw supply chain in Brazil. Firstly, it is calculated the primary energy potential of straws from sugarcane, soybean, maize, rice and wheat production, which is afterwards mapped over the Brazilian, determining clusters for each biomass. Then, the gasification process for each straw is simulated with different configurations of the supply chain, leading to different cases of study. Findings indicate a potential of 2.6 EJ in primary energy terms associated with the sum of all straws in Brazil and 214 PJ only for the clusters. Regarding the production chain, findings show that the combination of both torrefaction and pelletization pretreatments reduce substantially the total cost of the straw-based bioenergy supply chain, by allowing higher scales at final conversion and reducing logistical costs, especially on storage.

Índice

1.	<i>Introdução.....</i>	<i>1</i>
1.1	Contextualização	1
1.2	Relevância do tema	4
1.3	Objetivos.....	6
1.3.1	Objetivo Geral	6
1.3.2	Objetivos Específicos	6
1.4	Estrutura da dissertação	7
2.	<i>Caracterização dos resíduos agrícolas.....</i>	<i>9</i>
2.1	Biomassa como insumo energético	9
2.2	Composição química, estrutura e classificação da biomassa.....	15
2.3	Sistemas de produção dos resíduos.....	20
2.3.1	Logística	20
2.3.2	Coleta dos resíduos agrícolas	20
2.3.3	Resíduos agrícolas considerados no estudo	21
3.	<i>Caracterização das rotas tecnológicas empregadas</i>	<i>23</i>
3.1	Processos de pré-tratamento	23
3.1.1	Peletização	24
3.1.2	Torrefação	29
3.2	Conversão da biomassa em energia final	35
4.	<i>Mapeamento de resíduos agrícolas no território brasileiro</i>	<i>39</i>
4.1	Metodologia.....	39
4.2	Premissas da modelagem	43
4.3	Resultados	44
4.4	Discussões.....	61
5.	<i>Modelagem da cadeia de suprimentos da bioenergia.....</i>	<i>65</i>
5.1	Metodologia.....	65
5.1.1	Cálculo de Sazonalidade	70
5.1.2	Colheita	73
5.1.3	Armazenamento	76

5.1.4	Carga e Descarga	78
5.1.5	Pré-tratamento.....	79
5.1.6	Transporte da biomassa	89
5.1.7	Conversão Final	90
5.2	Premissas da modelagem	97
5.3	Resultados	100
5.3.1	Caso G1.....	102
5.3.2	Caso G2A	107
5.3.3	Caso G2B	113
5.3.4	Caso G3A	119
5.3.5	Caso G3B	125
5.3.6	Comparação entre os casos	131
5.4	Discussões.....	133
6.	<i>Considerações finais e recomendações para trabalhos futuros.....</i>	<i>142</i>
6.1	Conclusão.....	142
6.2	Limitações dos resultados e recomendações para trabalhos futuros	145
	<i>Referências Bibliográficas</i>	<i>148</i>
	<i>Anexo I – Municípios Fornecedores de biomassa</i>	<i>160</i>
	<i>Anexo II – Tabelas Completas das Simulações.....</i>	<i>163</i>

Lista de Figuras

Figura 1.1: Organograma da dissertação	8
Figura 2.1: Produção de energia primária no Brasil em 2015	13
Figura 2.2: Estrutura química do polímero celulose	17
Figura 2.3: Exemplo de estrutura química do polímero hemicelulose	18
Figura 3.1. Fluxograma do processo de peletização.	24
Figura 3.2: Esquematização de uma prensa peletizadora de matriz anelar	26
Figura 3.3: Forma final dos pellets	27
Figura 3.4: Evolução da produção mundial de pellets	28
Figura 3.5: Produção de pellets no Brasil	29
Figura 3.6: Casca de arroz torrefeita a diferentes temperaturas	29
Figura 3.7. Fluxograma do processo de torrefação.	32
Figura 3.8: Biomassas, processos e produtos nas cadeias bioenergéticas	35
Figura 4.1: Distribuição do potencial energético no Brasil por resíduo agrícola	45
Figura 4.2: Distribuição do potencial energético por região do Brasil	45
Figura 4.3: Mapa de distribuição do potencial de energia primária da palha de cana-de-açúcar no território brasileiro	47
Figura 4.4: Mapa de distribuição do potencial de energia primária da palha de soja no território brasileiro	48
Figura 4.5: Mapa de distribuição do potencial de energia primária da palha de milho no território brasileiro	49
Figura 4.6: Mapa de distribuição do potencial de energia primária da palha de arroz no território brasileiro	50
Figura 4.7: Mapa de distribuição do potencial de energia primária da palha de trigo no território brasileiro	51
Figura 4.8: Mapa de distribuição do somatório do potencial de energia primária de todos os resíduos em cada município	52
Figura 4.9: Mapa de calor com o somatório de todos os resíduos e o posicionamento de cada cluster no território do Brasil	54
Figura 4.10: Ampliação do cluster de palha de cana-de-açúcar	55

Figura 4.11: Ampliação do cluster de palha de soja e milho	56
Figura 4.12: Ampliação do cluster de palha de arroz	57
Figura 4.13: Ampliação do cluster de palha de trigo	58
Figura 5.1: Fluxograma das cadeias de suprimentos bioenergéticas com armazenamento a jusante do pré-tratamento (Casos “A”)	67
Figura 5.2: Fluxograma das cadeias de suprimentos bioenergéticas com armazenamento a montante do pré-tratamento (Casos “B”)	67
Figura 5.3. Sequência de operações para o Caso G1	102
Figura 5.4: Divisão absoluta do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G1	105
Figura 5.5: Divisão relativa do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G1	106
Figura 5.6. Sequência de operações para o Caso G2A	107
Figura 5.7: Divisão absoluta do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G2A	111
Figura 5.8: Divisão relativa do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G2A	112
Figura 5.9. Sequência de operações para o Caso G2B	113
Figura 5.10: Divisão absoluta do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G2B	117
Figura 5.11: Divisão relativa do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G2B	118
Figura 5.12. Sequência de operações para o Caso G3A	119
Figura 5.13: Divisão absoluta do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G3A	123
Figura 5.14: Divisão relativa do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G3A	124
Figura 5.15. Sequência de operações para o Caso G3B	125
Figura 5.16: Divisão absoluta do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G3B	129

Figura 5.17: Divisão relativa do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G3B _____	130
Figura 5.18: Comparação entre os custos nivelados totais das cadeias dos cinco casos _____	132
Figura 5.19: Discussão qualitativa dos sistemas de produção das biomassas _____	133

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Poluentes da queima inadequada da biomassa	10
Tabela 2.2: Classificações da biomassa	19
Tabela 3.1: Tecnologias existentes de torrefação de biomassa	34
Tabela 4.1: Parâmetros para cálculo dos potenciais em massa e energia dos resíduos	40
Tabela 4.2: Premissas do cálculo de potencial bioenergético municipal dos resíduos agrícolas	43
Tabela 4.3: Potencial de energia primária nas regiões do Brasil por resíduo agrícola	44
Tabela 4.4: Municípios fornecedores de biomassa para cada cluster	59
Tabela 4.5: Potencial em massa e energia para os municípios fornecedores de biomassa	60
Tabela 4.6: Percentuais de participação do potencial dos clusters	60
Tabela 5.1: Descrição dos estudos de caso	68
Tabela 5.2: Parâmetros auxiliares à modelagem	69
Tabela 5.3: Sazonalidade das culturas selecionadas	71
Tabela 5.4: Acúmulo mensal da biomassa ao longo do ano	72
Tabela 5.5: Parâmetros-base para a operação de colheita	73
Tabela 5.6: Custos do Sistema-Base de colheita e transporte das palhas	74
Tabela 5.7: Produtividade das biomassas	75
Tabela 5.8: Custos unitários de armazenamento	77
Tabela 5.9: Custos de carga e descarga por natureza de biomassa	78
Tabela 5.10: Parâmetros técnicos do processo TOP	79
Tabela 5.11: Componentes do custo de investimento na planta TOP	81
Tabela 5.12: Componentes do custo anual de O&M fixo da planta TOP	82
Tabela 5.13: Componentes do custo variável da planta TOP	82
Tabela 5.14: Poder calorífico inferior do bio-carvão	84
Tabela 5.15: Parâmetros técnicos do processo de peletização	85
Tabela 5.16: Componentes do custo de investimento na planta de peletização	86
Tabela 5.17: Componentes do custo anual de O&M fixo da planta de peletização	87
Tabela 5.18: Componentes do custo variável da planta de peletização	88

Tabela 5.19: Resultado das regressões lineares com os custos de frete	90
Tabela 5.20: Parâmetros técnicos do processo de gasificação	92
Tabela 5.21: Componentes do custo de investimento da planta de gasificação.	93
Tabela 5.22: Componentes do custo de fixo anual da planta de gasificação.	94
Tabela 5.23: Componentes do custo variável da planta de gasificação.	94
Tabela 5.24: Premissas da simulação técnico-econômica das cadeias de suprimentos bioenergéticas	98
Tabela 5.25: Custos da etapa de colheita da biomassa	101
Tabela 5.26: Custos da etapa de carga e descarga da biomassa crua	101
Tabela 5.27: Custos da etapa de armazenamento da biomassa crua	103
Tabela 5.28: Custos da etapa de gasificação da biomassa para o Caso G1	104
Tabela 5.29: Custo nivelado da cadeia de suprimentos da bioenergia para o Caso G1	104
Tabela 5.30: Custos do processo TOP para o Caso G2A	108
Tabela 5.31: Custos da etapa de armazenamento da bio-carvão para o Caso G2A	108
Tabela 5.32: Custos da etapa de carga e descarga do bio-carvão para o Caso G2A	109
Tabela 5.33: Custos da etapa de transporte do bio-carvão para o Caso G2A	109
Tabela 5.34: Custos da etapa de gasificação da biomassa para o Caso G2A	110
Tabela 5.35: Custo nivelado da cadeia de suprimentos bioenergética para o Caso G2A	110
Tabela 5.36: Custos do processo TOP para o Caso G2B	114
Tabela 5.37: Custos da etapa de carga e descarga do bio-carvão para o Caso G2B	114
Tabela 5.38: Custos da etapa de transporte do bio-carvão para o Caso G2B	115
Tabela 5.39: Custos da etapa de gasificação da biomassa para o Caso G2B	115
Tabela 5.40: Custo nivelado da cadeia de suprimentos bioenergética para o Caso G2B	116
Tabela 5.41: Custos do processo de peletização para o Caso G3A	120
Tabela 5.42: Custos da etapa de armazenamento dos pellets para o Caso G3A	120
Tabela 5.43: Custos da etapa de carga e descarga dos pellets para o Caso G3A	121
Tabela 5.44: Custos da etapa de transporte do bio-carvão para o Caso G3A	121
Tabela 5.45: Custos da etapa de gasificação da biomassa para o Caso G3A	122

Tabela 5.46: Custo nivelado da cadeia de suprimentos bioenergética para o Caso G3A_____	122
Tabela 5.47: Custos do processo de peletização para o Caso G3B _____	126
Tabela 5.48: Custos da etapa de carga e descarga dos pellets para o Caso G3B _____	126
Tabela 5.49: Custos da etapa de transporte dos pellets para o Caso G3B _____	127
Tabela 5.50: Custos da etapa de gasificação da biomassa para o Caso G3B _____	127
Tabela 5.51: Custo nivelado da cadeia de suprimentos bioenergética para o Caso G3B_____	128

Lista de Acrônimos

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis
BEN – Balanço Energético Nacional
BB – Banco Central do Brasil
CEPCI – Chemical Engineering Plant Cost Index
CF – Custo fixo anual em operação e manutenção
CI – Custo de investimento
CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento
CV – Custo variável
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
GIS – Sistema de Informação Geográfica
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA – International Energy Agency
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Changes
IRENA – International Renewable Energy Agency
LC – Custo nivelado
O&M – Operação e Manutenção
PCI – Poder Calorífico Inferior
SIFRECA – Sistema de Informações de Fretes
SRC – Sistema de Referência de Coordenadas
TOP – Torrefação e Peletização combinadas
UNICA – União da Indústria Nacional de Cana-de-Açúcar
USDA – United States Department of Agriculture
WHO – World Health Organization

1. Introdução

1.1 Contextualização

A biomassa é definida pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) como material de origem biológica, vegetal ou animal, excluindo as substâncias incorporadas em formações geológicas e transformadas em turfa ou combustíveis fósseis (MYHRE *et al.*, 2013). Sua utilização com finalidade energética ocorre através de sua combustão direta, no estado sólido, para produção de energia térmica e/ou eletricidade, ou como insumo na produção de outros combustíveis, como o etanol e o biodiesel (CHUM *et al.*, 2012). Assim, a bioenergia em suas diversas formas constitui uma alternativa ao uso de recursos fósseis, com a vantagem de ser uma fonte renovável de energia e um potencial agente de mitigação da emissão de gases de efeito estufa (GEE), uma vez que o dióxido de carbono (CO₂) emitido na bioenergia é reintegrado ao ciclo de crescimento da matéria vegetal através do processo fotossintético, sendo então as emissões de CO₂ biogênico consideradas neutras¹ (MYHRE *et al.*, 2013; PORTUGAL-PEREIRA *et al.*, 2015; TSALIDIS *et al.*, 2014).

Nesse contexto, assume-se um papel de destaque à bioenergia na busca por um futuro com menor intensidade de carbono no setor energético. A *International Renewable Energy Agency* (IRENA, 2014) projetou um aumento da oferta mundial de energia primária advinda da biomassa de 50 EJ em 2011 para 97 a 147 EJ no ano de 2030.

O Brasil já possui tradição na produção e uso da bioenergia, sobretudo em razão da produção em larga escala do etanol e bioeletricidade a partir da cana-de-açúcar (GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008; SEABRA, 2008) e mais recentemente pelo Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (RATHMANN; SZKLO; SCHAEFFER, 2012). Segundo o Balanço Energético Nacional do ano de 2016 (EPE, 2016b), tendo como base o ano de 2015, 16,9% da oferta de energia interna proveio dos produtos da cana-de-açúcar e 8,2% de lenha e carvão vegetal.

O setor agrícola brasileiro tem protagonismo mundial. Além de ser o maior produtor de cana-de-açúcar, o país figura como segundo maior produtor de soja e grande

¹ Vale ressaltar que esta premissa só pode ser verdadeira para os casos em que o cultivo da biomassa dá-se de maneira sustentável, conforme é discutido no capítulo 2.

produtor de outras commodities agrícolas (USDA, 2016). Assim sendo, é natural que se gere uma grande quantidade de resíduos na colheita e processamento desses produtos, sem competição para uso. PORTUGAL-PEREIRA *et al.* (2015) calcularam para o Brasil um potencial de aproveitamento sustentável de resíduos agrícolas e agroindustriais para geração elétrica, sob restrições técnicas, econômicas e ambientais, de 141 TWh por ano, correspondendo a 27% do montante de eletricidade gerada no país em 2010.

O aproveitamento energético de biomassa residual, contudo, nem sempre é trivial. Sobretudo para os resíduos agrícolas, que são gerados no campo e dependem de uma operação logística própria para serem levados a locais de aproveitamento. Sua heterogeneidade de tipos e formas dificulta a utilização em equipamentos projetados para lidar com combustíveis fósseis (BATIDZIRAI *et al.*, 2013). Ademais, o fato de a biomassa encontrar-se dispersa e, em muitos casos, distante dos centros de consumo, somado a algumas de suas características desfavoráveis, designadamente o baixo poder calorífico, a baixa densidade a granel², o alto conteúdo de água, a higroscopicidade e a susceptibilidade à degradação microbiológica, elevam o custo logístico com estocagem, transporte e manuseio desse insumo energético (BATIDZIRAI *et al.*, 2013; SVANBERG *et al.*, 2013). Assim, um pré-tratamento capaz de homogeneizar a biomassa e concentrá-la em massa e energia é desejável.

A torrefação é um processo de natureza termoquímica realizado à pressão atmosférica, no qual a biomassa é submetida a temperaturas na faixa de 200-300° C em uma atmosfera não oxidante. Tem como produto um sólido uniforme, com baixa umidade, hidrofóbico, de alto poder calorífico e de fácil granulação, contendo tipicamente 70% de sua massa inicial e 90% do conteúdo energético da biomassa crua (USLU; FAAIJ; BERGMAN, 2008). A densificação consiste em um pré-processamento mecânico da biomassa, no qual esta é triturada e comprimida posteriormente, resultando em um sólido com maior densidade mássica e uniforme, na forma de pellets ou briquetes (DIAS *et al.*, 2012). Há ainda importantes co-benefícios na integração entre os processos de torrefação e densificação. Primeiramente, por a torrefação facilitar a moagem da biomassa há uma

² Há três formas de representação da densidade de um sólido. A densidade a granel corresponde à massa do material contida em um cubo de volume 1 m³. A densidade aparente é a razão da massa da substância e o volume por ela ocupado, descontando os espaços vazios entre as partículas. A densidade verdadeira desconta do volume do sólido também o espaço de sua porosidade interna (BRITO *et al.*, 1982). Para cálculos de sistemas logísticos, a densidade a granel é a representação mais adequada.

menor necessidade de esforço mecânico na etapa de moagem da densificação, reduzindo penalidade energética do processo (USLU; FAAIJ; BERGMAN, 2008). Além disso, a torrefação prévia elimina a necessidade da etapa de secagem da densificação, uma vez que a carga já tem sua umidade reduzida durante a própria torrefação, sem riscos de recuperação do teor de umidade no intervalo entre os dois processos por ter adquirido caráter hidrofóbico (SHIE *et al.*, 2011).

Assim sendo, submeter a biomassa a um pré-tratamento, dado na forma de um processo de torrefação e densificação combinados, pode configurar-se como uma importante estratégia para reduzir barreiras de natureza sazonal e logística e aumentar o potencial de exploração desse recurso no Brasil.

Contudo, a decisão de implementação de plantas de pré-tratamento da biomassa tem como um dos principais fatores no viés estratégico a sua localização geográfica ótima, uma vez que o retorno sobre o investimento de projetos de bioenergia está fortemente associado à localização das plantas (PANICHELLI; GNANSOUNOU, 2008). Sistemas de Informação Geográfica (GIS) são uma útil ferramenta para auxílio nesse objetivo, pois além de permitirem o processamento e a visualização dos dados de entrada e dos resultados, seus atributos computacionais possibilitam cálculo de distâncias de transporte, determinação da menor rota entre dois pontos, visualização de barreiras geográficas, como rios e montanhas, e definição de localizações potenciais para construção de instalações industriais (DE MEYER *et al.*, 2014).

1.2 Relevância do tema

O pré-tratamento da biomassa via torrefação e densificação é um tema atual e amplamente discutido no ambiente científico e industrial. Segundo CHEN; PENG e BI (2015), o número de artigos publicados relacionados à torrefação e peletização de biomassa segue tendência crescente desde o ano de 2006. Além disso, diversas instituições de pesquisa possuem suas próprias instalações em escala piloto de torrefação, oferecendo serviços de teste para organizações externas (CREMERS *et al.*, 2015). Isso evidencia um aumento do interesse por parte da academia em promover a pesquisa e o apoio à inovação no setor.

Diversas empresas também seguem investindo em torrefação de biomassa. KOPPEJAN *et al.* (2012) realizaram um levantamento sobre o panorama europeu e norte-americano da tecnologia de torrefação de biomassa, elencando cerca de 50 empresas envolvidas no desenvolvimento da tecnologia. CREMERS *et al.* (2015) fizeram em seguida uma atualização desse panorama, no qual o número de empresas basicamente foi mantido, porém registrando a saída de agentes do setor assim como novos entrantes. Nesse último relatório também foi identificada a existência de plantas operando em escala comercial.

Sistemas de informação geográfica (GIS) aparecem como uma ferramenta bastante utilizada em trabalhos científicos relacionados a logística de biomassa, sobretudo como suporte na parametrização de modelos de otimização da cadeia de suprimentos de biomassa (MEYER *et al.*, 2014). FROMBO *et al.* (2009) utilizaram uma interface em GIS combinada com uma base de dados e um módulo de otimização na arquitetura de seu modelo de uso ótimo de biomassa lenhosa e seleção otimizada de escala de planta, posteriormente aplicando-o a um estudo de caso regional na comunidade de Val Bormida, na Itália. PANICHELLI e GNANSOUNOU (2008) também utilizaram os recursos de software GIS para desenvolvimento de seu modelo de suporte à tomada de decisão para selecionar a localização ótima de sistemas de bioenergia, empregando-o em um estudo de caso no qual resíduos de indústria madeireira são torrefeitos e enviados a uma unidade de gaseificação no norte da Espanha.

Para o Brasil, PORTUGAL-PEREIRA *et al.* (2015) utilizaram metodologia com georreferenciamento para determinação de potencial de geração de energia elétrica a partir de resíduos agrícolas e agroindustriais advindos das principais culturas brasileiras,

segregando o potencial em nível técnico, econômico e sustentável. OLIVEIRA (2011) fez um estudo de viabilidade econômica da geração distribuída de eletricidade a partir de resíduos agrícolas, considerando diversas rotas tecnológicas. LEÃO (2009) fez um estudo de otimização de arranjos produtivos de óleos vegetais para suprimento de uma usina produtora de biodiesel considerando aspectos logísticos, agrícolas e industriais. USLU, FAAIJ e BERGMAN (2008) analisaram custos de cadeias de suprimentos bioenergéticas considerando o pré-tratamento de biomassa no Brasil e seu transporte até a Holanda para a conversão final. Contudo, não foram encontrados na literatura estudos de cadeias de suprimentos bioenergéticas abordando a possibilidade de pré-tratamento via torrefação e densificação com todas as etapas realizadas no Brasil e com levantamento de potenciais locais. Uma tecnologia capaz de reduzir custos com transporte e possibilitar a ampliação do período de armazenamento da biomassa, como a torrefação em conjunto com a densificação, tem o potencial de aumentar a oferta desse recurso a unidades de conversão em energia final e, por conseguinte, prover ganhos de escala a essas plantas. Portanto, há uma solução de compromisso que envolve o investimento em pré-tratamento dos insumos e os ganhos de escala na conversão, permeada pelos custos com logística. Vale ressaltar que para o Brasil, país com grande vocação agrícola e no qual as principais culturas (soja e cana-de-açúcar) são lavouras temporárias, os elementos de sazonalidade e dispersão geográfica das fontes de biomassa são cruciais para o planejamento do uso energético desses insumos, sendo assim relevante a análise da introdução do pré-tratamento na cadeia bioenergética para avaliação do real potencial de aproveitamento da biomassa residual no país.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo Geral*

A dissertação tem como objetivo geral o desenvolvimento de uma metodologia que permita a comparação dos custos de cadeias de suprimentos bioenergéticas, baseadas no uso de resíduos agrícolas sem competição para uso e na gasificação como tecnologia de conversão final, com e sem o uso dos pré-tratamentos de peletização e torrefação.

1.3.2 *Objetivos Específicos*

Como objetivos específicos, almeja-se:

- Levantar e mapear o potencial energético advindo dos resíduos agrícolas no território brasileiro;
- Localizar geograficamente os clusters para cada resíduo;
- Caracterizar técnico-economicamente e o calcular os custos de cadeias de suprimentos bioenergéticas baseadas em resíduos agrícolas sem competição para uso no Brasil.

1.4 Estrutura da dissertação

Além deste capítulo introdutório, a dissertação conta com mais 5 capítulos, brevemente descritos nos próximos parágrafos.

O capítulo 2 traz uma revisão da literatura no que diz respeito à biomassa como recurso energético, destacando as classificações de biomassa pertinentes ao estudo e os sistemas produtivos dos resíduos presentes no escopo da metodologia.

O capítulo 3 versa sobre formas de pré-tratamento possíveis para a biomassa, detalhando as tecnologias de torrefação e peletização, e de processos de conversão da biomassa em energia final, com foco na gasificação.

O capítulo 4 aborda a primeira parte da análise, que consistiu no mapeamento dos resíduos agrícolas advindos dos cultivos de cana-de-açúcar, soja, milho, arroz e trigo no território brasileiro. Faz um detalhamento da metodologia dessa etapa do trabalho, exhibe as premissas adotadas na modelagem, apresenta seus resultados e os traz à discussão em seguida, apresentando suas principais informações, conclusões e limitações.

O capítulo 5 trata da segunda parte da análise, na qual foram modeladas cadeias de suprimentos da bioenergia baseadas no aproveitamento em resíduos agrícolas e na conversão final via gasificação. As informações de potenciais utilizadas neste capítulo foram subsidiadas pelos resultados obtidos no capítulo 3. As seções do capítulo 5 descreveram a metodologia em detalhes, apresentaram as premissas da modelagem, os resultados obtidos os discutiram de forma qualitativa, mostrando as principais conclusões, informações e limitações da etapa.

O capítulo 6 revisita os resultados obtidos nas etapas anteriores do trabalho, resumizando as principais conclusões a partir das informações obtidas. Também foram feitas recomendações de temas para estudos futuros, visando um maior refinamento dos resultados obtidos e o avanço da pesquisa científica na temática abordada.

A Figura 1.1 apresenta um organograma da estrutura da dissertação de forma gráfica.

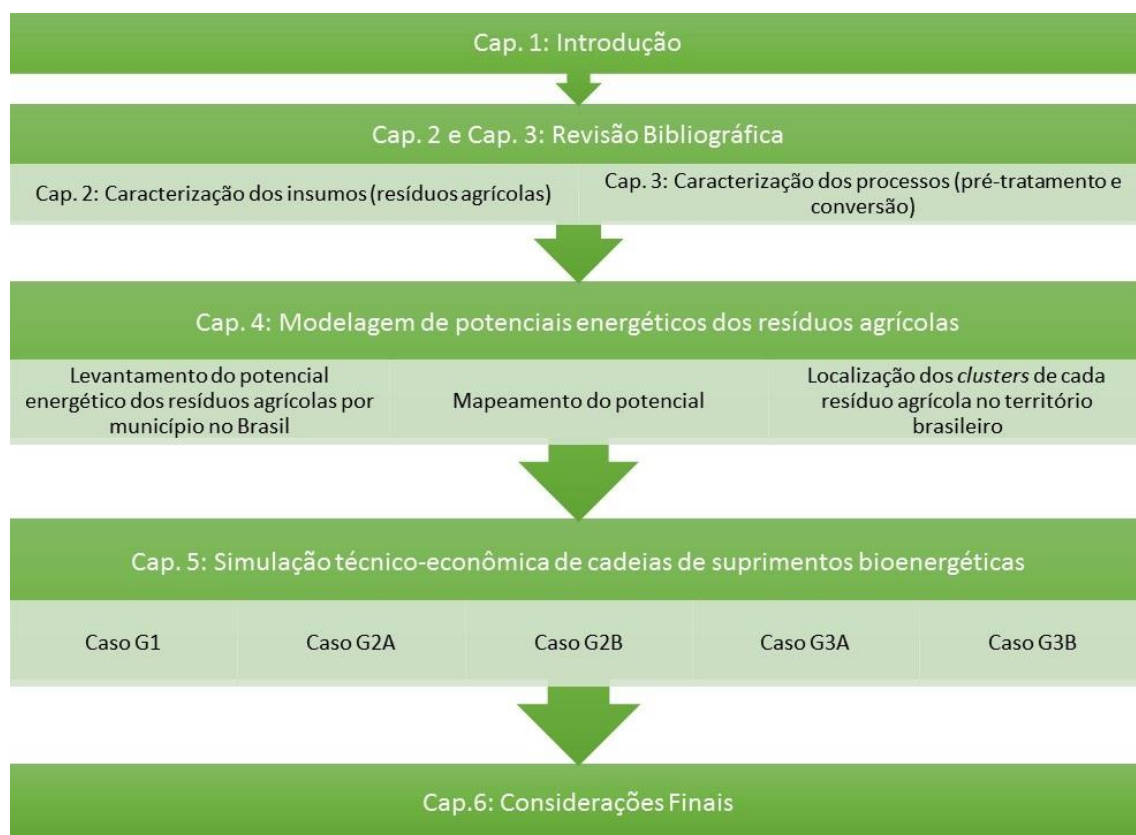


Figura 1.1: Organograma da dissertação

2. Caracterização dos resíduos agrícolas

2.1 Biomassa como insumo energético

Como insumo energético, a biomassa é utilizada desde a Antiguidade para fins de cocção e aquecimento residencial (SIMS, 2003), constando como a principal fonte de energia primária no mundo até o início do Século XX, quando o carvão atingiu a participação de 50% na matriz energética mundial (SMIL, 2010). Atualmente, a energia primária advinda da biomassa ocupa cerca de 10% da matriz energética mundial (IEA, 2015).

A energia química armazenada na biomassa advém da irradiação solar, que por meio de processos de fotossíntese captura moléculas de gás carbônico (CO_2) da atmosfera, produzindo uma série de compostos baseados principalmente em ligações entre átomos de carbono, hidrogênio e oxigênio. A liberação dessa energia ocorre com a quebra das ligações intra e intermoleculares, que pode ser feita por meio de processos químicos, bioquímicos ou termoquímicos (SIMS *et al.*, 2010). Dessa forma, o aproveitamento da energia proveniente da biomassa, ou bioenergia, representa, desde que não baseada em desmatamento de floresta nativa, uma opção com emissões baixas ou mesmo nulas de CO_2 , já que o gás carbônico emitido na ponta final da cadeia – pela oxidação completa dos compostos de carbono em reações exotérmicas de produção de energia – já houvera sido retirado da atmosfera no crescimento do vegetal (MYHRE *et al.*, 2013; PORTUGAL-PEREIRA *et al.*, 2015; SIMS, 2003). Isso configura-se como uma grande vantagem sob o ponto de vista da mudança climática, um problema de poluição em escala global. Similarmente, a biomassa pode ser considerada um recurso renovável, já que seu ciclo de vida ocorre em um período relativamente curto em relação à percepção antrópica do tempo (ANGELIS-DIMAKIS *et al.*, 2011).

Grande parte da participação da biomassa na matriz energética mundial deve-se ainda a seu uso doméstico, sobretudo em países em desenvolvimento para fins de cocção e aquecimento com o uso de sistemas rudimentares (SMITH; MEHTA, 2003). Apesar das vantagens do recurso enquanto combustível no que tange a poluição global, sua queima sem os devidos controles leva à emissão de substâncias poluentes em nível local (WHO, 2014). Os principais poluentes encontram-se relacionados na Tabela 2.1, juntamente a seus respectivos potenciais nocivos à saúde humana.

Tabela 2.1: Poluentes da queima inadequada da biomassa

Poluente	Efeitos potenciais à saúde humana
Sistemas particulados (tamanho de partícula de até 10 µm)	Asma, infecções respiratórias, bronquite crônica, doença de obstrução pulmonar crônica
Monóxido de carbono	Baixo peso de nascimento, aumento nas mortes perinatais
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos	Câncer de pulmão, boca, faringe e laringe
Dióxido de nitrogênio	Asma, infecções respiratórias, função pulmonar reduzida em crianças
Dióxido de enxofre	Asma, doença de obstrução pulmonar crônica, doenças cardiovasculares
Condensados de fumaça de biomassa	Catarata

Fonte: Adaptado de KIM, JAHAN e KABIR (2011)

Sob este prisma, GOLDEMBERG e COELHO (2004) introduziram os conceitos de “biomassa tradicional” e “biomassa moderna”. Como tradicional, entende-se a biomassa produzida de forma rudimentar e utilizada como uma fonte de energia não comercial, em geral em fornos de baixa eficiência para cocção de alimentos. Biomassa moderna, por sua vez, engloba os usos do recurso de maneira sustentável na produção de calor, eletricidade e biocombustíveis para transporte.

A discussão da sustentabilidade³ da biomassa enquanto recurso energético está intrinsecamente associada a seu sistema de produção. Uma cadeia de bioenergia que tenha como resultado uma elevação no índice de desmatamento de florestas naturais, por exemplo, perde o aspecto renovável do recurso, além de causar prejuízos à biodiversidade local, não podendo assim ser considerada uma rota sustentável (WICKE *et al.*, 2011). Um exemplo emblemático que ilustra tal situação é a produção de óleo de palma no Sudeste Asiático, sobretudo na Malásia e na Indonésia, que, induzida pela política de expansão da

³ O conceito de sustentabilidade foi introduzido no ano de 1987 pelo Relatório Brundtland – *Our common future*, dando início a uma preocupação com as gerações futuras quanto ao modelo de desenvolvimento da sociedade, sobretudo na questão das alterações climáticas (BRUNDTLAND, 1987).

produção de biodiesel na Europa, causou a conversão direta e indireta⁴ de milhões de hectares de floresta nativa em áreas de cultivo (GERASIMCHUK; YAM KOH, 2013; WICKE *et al.*, 2011). Semelhantemente, o aumento no cultivo de soja e cana-de-açúcar para a produção de biocombustíveis, estimulado por incentivos governamentais, foi responsável pelo desmatamento de grandes áreas dos biomas cerrado e floresta amazônica, tal como para os Estados Unidos, onde atribui-se ao cultivo do milho para a produção de etanol a responsabilidade pelo desmatamento de áreas naturais de pradaria na porção central do país (FARGIONE *et al.*, 2008; RATHMANN; SZKLO; SCHAEFFER, 2010, 2012).

Para além das discussões dos usos da biomassa enquanto poluente local e da sustentabilidade de sua cadeia produtiva, há na literatura a controvérsia sobre os efeitos das correlações entre os cultivos dedicados ao setor energético e a produção de alimentos. Críticos apontam que a competição por terra entre ambas as modalidades produtivas é favorável às culturas energéticas, cujo retorno sobre o investimento ao agricultor é superior. Consequentemente, isso leva a uma elevação nos preços dos alimentos, o que explicaria, por exemplo, a crise de pico dos preços das *commodities* alimentares de 2008 (MUELLER; ANDERSON; WALLINGTON, 2011; TIRADO *et al.*, 2010). Por outro lado, outros estudos concluíram não haver grandes correlações entre o aumento nos preços dos alimentos verificado em 2008 e a produção de biocombustíveis, relacionando-o a outros fatores, como o alto patamar de preço do petróleo, que tem grande impacto nos custos de setores agrícolas com alto nível de mecanização, o baixo nível dos estoques e questões de natureza especulativa (AJANOVIC, 2011; HOCHMAN *et al.*, 2014).

⁴ Vegetações nativas, em geral, podem ser encaradas como um estoque natural de carbono na forma sólida, de maneira que, dependendo da quantidade de biomassa originalmente presente, sua remoção para atribuir outros usos àquela área pode causar a emissão de grandes quantidades de carbono para a atmosfera, contribuindo para o aquecimento global (MYHRE *et al.*, 2013). Mudanças diretas no uso do solo causadas pelo cultivo de determinado produto ocorrem quando a zona produtiva substitui o espaço anteriormente preenchido pela vegetação nativa. Já as mudanças indiretas são um efeito de natureza secundária, ocorrendo quando a cultura em questão passa a ocupar uma área outrora preenchida por outro cultivo e este, por conseguinte, passa a ser produzido com o desmatamento de florestas nativas em outras localidades, eventualmente em outras regiões ou mesmo países. As emissões por mudanças indiretas no uso do solo são mais difíceis de serem calculadas e previstas em modelos em comparação às mudanças diretas (GERASIMCHUK; YAM KOH, 2013).

Ademais, após o ano de 2008 os preços das *commodities* agrícolas tornaram a cair sem que houvesse qualquer redução na produção de biocombustíveis (SIMS *et al.*, 2010).

Apesar do dissenso com respeito aos efeitos de culturas energéticas dedicadas na produção de alimentos, há uma certa convergência entre os autores no que diz respeito ao aproveitamento energético de biomassas alternativas como uma forma sustentável de produção de energia sem impactar o setor alimentício (AJANOVIC, 2011; SIMS *et al.*, 2010; TIRADO *et al.*, 2010). Tais biomassas alternativas compreendem espécies vegetais não alimentícias, como gramíneas, resíduos florestais, resíduos sólidos urbanos orgânicos e resíduos agrícolas e agroindustriais⁵, que podem ser cultivadas em concomitância com os alimentos ou em terras marginais, inviáveis para a produção alimentícia (SIMS *et al.*, 2010).

Mesmo com toda controvérsia que cerceia a bioenergia, há grandes expectativas quanto ao crescimento do setor para o futuro. Projeta-se uma oferta mundial de 97 e 147 EJ/ano de energia primária advinda da biomassa para 2030 para os cenários de baixa e alta penetração, respectivamente (IRENA, 2014). Desta oferta, 38 e 45% do montante nos respectivos cenários provem de biomassa residual (IRENA, 2014). Pelo lado da demanda, o mesmo relatório da IRENA (2014) projeta, em seu caso referência, uma procura global de bioenergia (final) de 70 EJ em 2030, o que corresponderia a um consumo de 108 EJ/ano de biomassa em termos de energia primária, dos quais EUA, China, Índia, Brasil e Indonésia responderiam por 56% desse montante. Ademais, do total, aproximadamente 50% corresponde a usos modernos do recurso para geração elétrica, aquecimento e cocção (IRENA, 2014).

O Brasil já possui tradição na produção e uso da bioenergia, sobretudo em razão da produção em larga escala do etanol a partir da cana-de-açúcar desde a década de 70⁶. (GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008). O desenvolvimento da indústria

⁵ Resíduos agrícolas e agroindustriais são coprodutos gerados ao longo da cadeia produtiva da agricultura. Resíduos agrícolas são concebidos ainda no campo, sendo exemplos as hastes, caules e folhas. Já os resíduos agroindustriais surgem no beneficiamento da *commodity* agrícola, tendo como exemplos a casca do arroz e o bagaço da cana-de-açúcar (DIAS *et al.*, 2012; OLIVEIRA, 2011; PORTUGAL-PEREIRA *et al.*, 2015).

⁶ Em razão dos altos preços da gasolina resultantes primeiro choque do petróleo em 1973, o governo brasileiro lançou em 1975 um programa estratégico visando substituir uma parcela da gasolina automotiva por etanol, chamado programa PROÁLCOOL.

do etanol viabilizou também o aproveitamento do bagaço da cana-de-açúcar, gerado como um coproduto do processo. Segundo o Balanço Energético Nacional do ano de 2016 (EPE, 2016b), tendo como base o ano de 2015, 17,6% da produção de energia primária originou-se dos produtos da cana-de-açúcar, como aponta a Figura 2.1. No setor elétrico, a biomassa consta atualmente como a segunda fonte mais importante em termos de potência outorgada, contando com uma parcela de 9,52% do total no ano de 2014, da qual o bagaço representou quase 80% (UNICA, 2016b). Não obstante, o país apresentou na convenção mundial do clima em Paris, no final de 2015, sua *intended Nationally Determined Contribution* (iNDC) propondo-se a elevar a participação da bioenergia em sua matriz energética a 18% até o ano de 2030 (REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 2015).

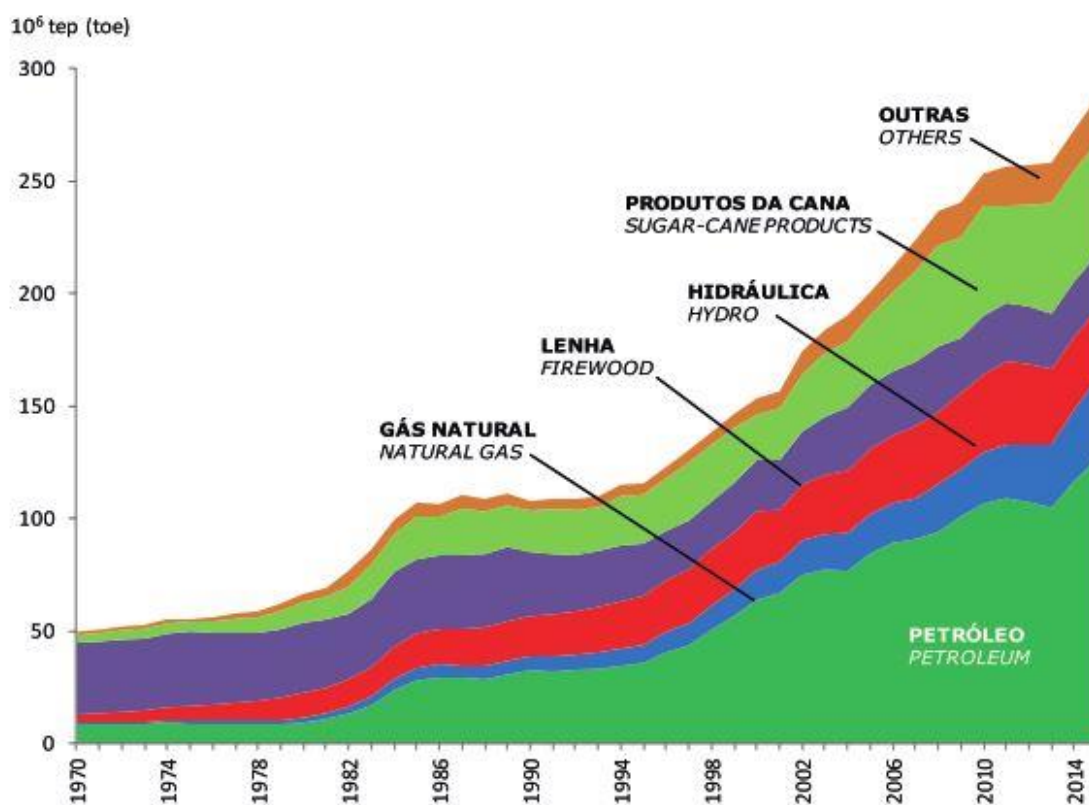


Figura 2.1: Produção de energia primária no Brasil em 2015

Fonte: EPE (2016b)

Além de ser o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e segundo maior produtor de soja (USDA, 2016), o Brasil também figura como grande produtor de outras commodities agrícolas. Assim sendo, é natural que haja uma grande formação de resíduos na colheita e processamento desses produtos sem competição para uso. PORTUGAL-PEREIRA *et al.* (2015) calcularam para o Brasil um potencial de aproveitamento

sustentável de resíduos agrícolas e agroindustriais para geração elétrica, sob restrições técnicas, econômicas e ambientais, de 141 TWh por ano, correspondendo a 27% do montante da eletricidade gerada no país em 2010.

2.2 Composição química, estrutura e classificação da biomassa

O conceito de biomassa abrange-se para materiais vastamente distintos em formas, tamanhos e aspecto. Tanto uma árvore conífera centenária quanto uma flor de girassol e um grão de soja podem ser chamados de biomassas, genericamente. Assim, há diversas classificações das biomassas que objetivam agrupá-las de acordo com características semelhantes.

Primeiramente, classifica-se a planta quanto a dois aspectos: o ciclo de vida e a rota fotossintética de fixação de carbono (DAVIS; HAY; PIERCE, 2014). O ciclo de vida da planta pode ser anual, bienal ou perene. As plantas de ciclo anual levam 12 meses para completar seu ciclo de semeadura e colheita, sendo necessário a cada ano refazer os processos de preparo do solo, fertilização e controle de pestes e ervas daninhas. Algumas plantas de ciclo anual podem possuir mais de uma safra em um único ano em condições climáticas favoráveis, como o caso do milho no Brasil (OLIVEIRA, 2011). Plantas bienais, mais raras, tem seu ciclo de vida completo em 24 meses, havendo o desenvolvimento de suas folhas, caules e raízes no primeiro ano. Após, as plantas passam por um período de hibernação durante o inverno e tornam a crescer rapidamente na primavera e no verão, florescendo e dando as sementes antes de finalizar seu ciclo. As espécies perenes, por sua vez, vivem por uma quantidade de tempo superior às demais, que varia com a espécie. Podem chegar a séculos ou até mesmo milênios (DAVIS; HAY; PIERCE, 2014).

A rota fotossintética da planta consiste no seu metabolismo utilizado para a fixação de carbono, que determina a resposta do organismo às condições climáticas (DAVIS; HAY; PIERCE, 2014). Há três diferentes tipos de rotas fotossintéticas: C_3 , C_4 e MAC. A rota C_3 é a mais comum entre os organismos vegetais. Chama-se C_3 em razão da primeira molécula formada após a captura do CO_2 , que possui três átomos de carbono. Durante períodos de iluminação, a planta absorve o CO_2 diretamente por estômatos (poros nas folhas) abertos, o que permite perda de água pela planta. Assim, plantas de mecanismo C_3 possuem menor eficiência no uso de água em relação a plantas com outras rotas fotossintéticas. As plantas C_4 tem um mecanismo de fixação mais eficiente em relação às C_3 , pois são capazes de concentrar o CO_2 internamente, utilizando energia para tal, seguindo posteriormente um mecanismo semelhante às plantas C_3 . Seus rendimentos fotossintéticos são superiores, tal como o consumo de água é menor no processo. A outra rota fotossintética é o metabolismo ácido crassuláceo (MAC), que ocorre em plantas

propensas a ambientes áridos. O mecanismo apresenta etapas enzimáticas semelhantes ao C₄, entretanto os estômatos são mantidos fechados durante o calor do dia, para evitar a perda de água. São abertos à noite, permitindo a difusão do CO₂ para as folhas para ser convertido a um ácido com quatro átomos de carbono. Ao longo do dia, com os poros fechados, o ácido é quebrado em CO₂, que é utilizado na síntese de produtos de interesse com a disponibilidade de energia luminosa (DAVIS; HAY; PIERCE, 2014).

Além das plantas como um todo, diferentes partes das plantas também apresentam composições distintas, que lhes proporcionam a produção de substâncias específicas. Assim, há quatro tipos básicos de produtos que podem ser extraídos da biomassa: amido, óleo, carboidratos solúveis e polímeros estruturais (DAVIS; HAY; PIERCE, 2014).

O amido é proveniente de tubérculos e das partes amiláceas dos cereais. É um polímero composto por cadeias de alfa-D-glicose, que podem ser lineares (amilose) ou ramificadas (amilopectina) (BERTOLINI, 2016). Seu principal mecanismo de aproveitamento energético é realizado por meio da sua fermentação a etanol, que necessita anteriormente de uma etapa de hidrólise para quebra das cadeias poliméricas em açúcares fermentáveis (SHIE *et al.*, 2011).

O óleo é uma substância líquida viscosa formada por triglicerídeos, obtido pelo esmagamento de sementes oleaginosas. Seu aproveitamento energético ocorre principalmente pelo processo de transesterificação, no qual o óleo é convertido a biodiesel (SWANSON *et al.*, 2010).

Carboidratos solúveis são açúcares simples, como frutose, glicose e sacarose, assimiláveis diretamente por micro-organismos. Assim como o amido, seu uso energético baseia-se na fermentação a etanol, conquanto não precise de etapa hidrolítica anterior (GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008; SIMS *et al.*, 2010).

Os polímeros estruturais da biomassa são responsáveis por conferir estabilidade à matéria. São formados por três compostos principais: a celulose, a lignina e a hemicelulose (HARMSSEN *et al.*, 2010). A proporção dos polímeros na composição da parede celular da biomassa determina a sua característica estrutural. Biomassas lenhosas apresentam maior teor de lignina, enquanto que biomassas herbáceas contêm maior proporção de celulose (DAVIS; HAY; PIERCE, 2014).

A celulose é um polímero formado essencialmente por glicose, sendo sua fórmula estrutural $(C_6H_{10}O_5)_n$. Sua cadeia estrutural encontra-se representada na Figura 2.2. A diferença da celulose para o amido está na forma como os monômeros de glicose se ligam no polímero. Devido a sua estrutura cristalina e a sua associação à hemicelulose e à lignina, a decomposição da celulose em seus monômeros constituintes é mais complicada do que para o amido, demandando tratamentos químicos mais severos ou rotas enzimáticas. A celulose não funde com a elevação da temperatura, porém sua degradação térmica se inicia em 180 °C (DAVIS; HAY; PIERCE, 2014; HARMSSEN *et al.*, 2010).

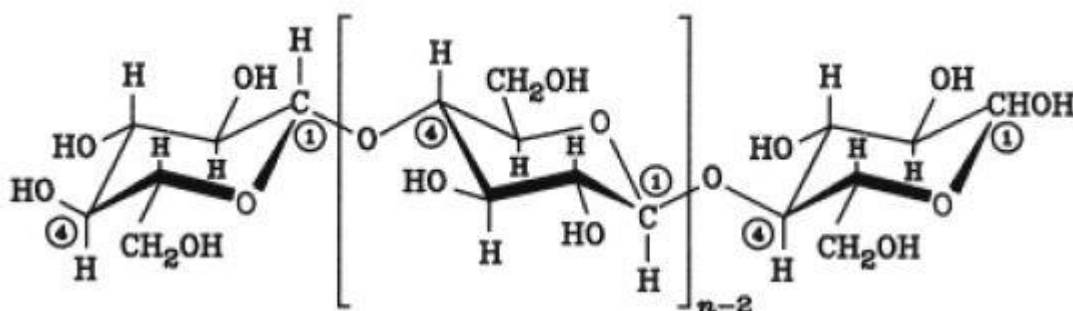


Figura 2.2: Estrutura química do polímero celulose

Fonte: HARMSSEN *et al.* (2010)

A hemicelulose, ao contrário da celulose, consiste em uma família de polímeros mistos de polissacarídeos, apresentando diferentes composições e estruturas a depender de sua origem e do método de extração empregado. O polímero mais comum no conjunto dos polissacarídeos que pertencem à família da hemicelulose é a xilose, um açúcar com cinco átomos de carbono. Porém, a hemicelulose também pode apresentar em sua estrutura açúcares com seis átomos de carbono. Desta forma, quando degradada a seus constituintes, a hemicelulose gera uma mistura com diferentes tipos de açúcar, dificultando o processo fermentativo. A Figura 2.3 traz um exemplo de estrutura química a hemicelulose, na qual são destacadas as heterogeneidades na composição do polímero (DAVIS; HAY; PIERCE, 2014; HARMSSEN *et al.*, 2010).

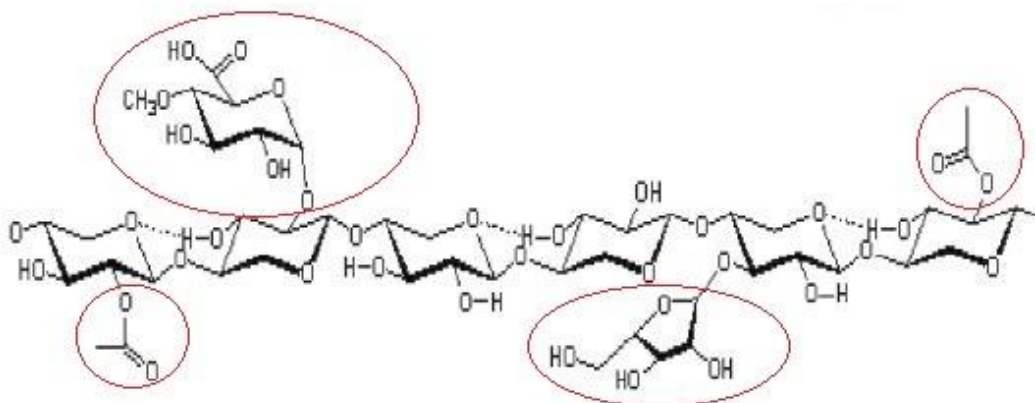


Figura 2.3: Exemplo de estrutura química do polímero hemicelulose

Fonte: Adaptado de HARMSSEN *et al.* (2010)

A lignina, por sua vez, consiste em um polímero amorfo e tridimensional, com estrutura complexa. Tem o fenilpropano como principal bloco constituinte de sua estrutura. Suas principais funções são de conferir à planta robustez, resistência à água e resistência à ruptura, além de defesa a ataques fúngicos e microbiológicos. Promove também auxílio na ligação entre as fibras das moléculas de celulose.

A Tabela 2.2 sumariza as principais classificações da biomassa, conforme apresentado ao longo desta seção. Vale ressaltar que outras formas de classificar a biomassa são possíveis, como proposto em VASSILEV *et al.* (2010), haja vista a diversidade de substâncias denominadas biomassa.

Tabela 2.2: Classificações da biomassa

Classificações da Planta			
Ciclo de Vida			
Anual	Bienal	Perene	
Mecanismo Fotossintético			
C ₃	C ₄	MAC	
Classificações dos Produtos da Biomassa			
Amiláceos	Açúcares	Oleaginosos	Lignocelulósicos
Classificações das Biomassas Lignocelulósicas			
Lenhosas		Herbáceas	

Fonte: Elaboração própria com base em DAVIS, HAY e PIERCE (2014) e HARMSSEN *et al.* (2010)

2.3 Sistemas de produção dos resíduos

2.3.1 Logística

A logística, de forma básica, pode ser definida em três operações: transporte, manuseio e armazenamento. Cada uma dessas operações existe em função de uma necessidade específica da cadeia de suprimentos. A demanda pelo transporte vem da divergência entre os locais de geração de valor na cadeia, como, por exemplo, entre os locais de produção e consumo. O manuseio está relacionado a uma dispersão do material entre as diferentes localidades, por exemplo, no estoque e no veículo de transporte. Já o armazenamento ocorre devido às divergências temporais entre a produção e o consumo (ROTTER; ROHRHOFER, 2014).

Os fatores que afetam o custo do transporte são a capacidade do transporte, a densidade da biomassa, a operação, o período da safra e a distância. Os custos de armazenamento são influenciados pelo tipo de armazenamento, o tempo de armazenamento, a finalidade e o local. Já os custos de manuseio são função da propriedade das máquinas e da operação (OLIVEIRA, 2011).

A questão logística é um dos principais aspectos a serem considerados em um sistema bioenergético pautado em resíduos agrícolas (OLIVEIRA, 2011). A dispersão espacial, a baixa densidade e o elevado teor de umidade são fatores que interferem negativamente nas operações das cadeias de suprimentos do aproveitamento desses recursos (USLU; FAALJ; BERGMAN, 2008).

Nesse sentido, não apenas a existência do pré-tratamento é importante na cadeia de suprimentos bioenergética, mas também o seu posicionamento relativo às demais operações. Uma vez que o pré-tratamento pode trazer benefícios às demais etapas da cadeia, sobretudo no que se refere à logística, e os resíduos agrícolas encontram-se dispersos espacialmente, uma boa estratégia para aproveitar ao máximo esses benefícios pode ser a de realizar o pré-tratamento de maneira descentralizada, levando a biomassa pré-tratada em seguida ao ponto final de uso, que pode ser uma estação centralizada de conversão em energia final (CHAI *et al.*, 2016; ROTTER; ROHRHOFER, 2014).

2.3.2 Coleta dos resíduos agrícolas

Esta etapa é o que basicamente diferencia as cadeias de aproveitamento dos resíduos agrícolas para os agroindustriais. Enquanto que, por serem gerados no campo,

os resíduos agrícolas demandam uma etapa específica de recolhimento, os agroindustriais são levados do campo juntamente com a respectiva *commodity*, sendo separado somente na indústria durante o beneficiamento (DIAS *et al.*, 2012). Isso confere grandes vantagens em termos de custo de oportunidade do uso para os resíduos agroindustriais, que em parte explicam o alto grau de aproveitamento do bagaço da cana-de-açúcar e da casca de arroz na própria indústria de beneficiamento para suprimento de suas demandas energéticas (EPE, 2016c).

Há diversas formas de coleta dos resíduos agrícolas do campo, sendo a mais comum o enfardamento (OLIVEIRA, 2011). Neste modelo, após a colheita da *commodity*, as palhas são deixadas no campo até que atinjam o teor de umidade ideal. Então, com a ajuda de um ancinho enleirador, as palhas são organizadas para a passagem da enfardadora, que produz os fardos. Os fardos são, em seguida, colocados nos caminhões de transporte com o auxílio de uma carregadora (BZUNECK *et al.*, 2013; CARDOSO, 2014; OLIVEIRA, 2011).

2.3.3 Resíduos agrícolas considerados no estudo

Optou-se por considerar os resíduos agrícolas (palhas) das cinco culturas brasileiras que apresentaram maior potencial energético em PORTUGAL-PEREIRA *et al.* (2015), sendo elas a cana-de-açúcar, a soja, o milho, o arroz e o trigo.

2.3.3.1 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma espécie de planta gramínea perene, com um eficiente mecanismo fotossintético do tipo C₄ que a proporciona uma elevada concentração de sacarose em seus colmos (DAVIS; HAY; PIERCE, 2014). A planta produz os principais insumos da bioenergia no Brasil, o etanol, por meio da fermentação dos açúcares, e a bioeletricidade, gerada com a queima do bagaço para cogeração (UNICA, 2016a). O Brasil figura como o principal produtor mundial de cana-de-açúcar (USDA, 2016).

O modelo de colheita da cana-de-açúcar por muito tempo foi predominantemente baseado em queimadas, inviabilizando o aproveitamento dos resíduos agrícolas. Nos últimos tempos, no entanto, medidas restritivas ao modelo de queimada vem sendo adotadas pelos governos federal e dos estados de São Paulo e Minas Gerais, objetivando introduzir a mecanização na colheita dos canaviais (CARDOSO, 2014). Isso abre uma importante janela de oportunidade para o aproveitamento da palha da cana-de-açúcar.

2.3.3.2 Soja

A soja consiste de uma leguminosa anual com mecanismo fotossintético C₃. Apesar de seu reduzido rendimento mássico por hectare, os grãos da soja apresentam uma considerável quantidade de proteína e de óleo, tornando-a uma boa matéria-prima para alimentação animal e produção de biodiesel (DAVIS; HAY; PIERCE, 2014). O Brasil é atualmente o segundo maior produtor mundial da *commodity* (USDA, 2016).

A expansão do cultivo de soja no Brasil foi bastante expressiva, sobretudo, para a região Centro-Oeste, principalmente no Mato Grosso, cuja produção se elevou em seis vezes nos últimos vinte anos. Isso foi possibilitado pelo desenvolvimento de sementes transgênicas, propensas ao clima do cerrado, e da atuação de grandes grupos agroindustriais na região, que implementaram organização e mecanização à cultura (OLIVEIRA, 2011).

2.3.3.3 Milho

O milho é uma gramínea anual com mecanismo fotossintético C₄, que lhe proporciona um crescimento acelerado (DAVIS; HAY; PIERCE, 2014). Seus resíduos agrícolas são os caules e folhas, aqui denominados palha (DIAS *et al.*, 2012).

Juntamente com a soja e cana-de-açúcar, foram as culturas que mais aumentaram suas produções no Brasil ao longo dos últimos vinte anos, principalmente na região Centro-Oeste (OLIVEIRA, 2011).

2.3.3.4 Arroz

O arroz é uma gramínea anual com mecanismo fotossintético C₃ (DAVIS; HAY; PIERCE, 2014). Seus resíduos agrícolas são as hastes e as folhas, que constituem a sua palha (DIAS *et al.*, 2012). Seu contexto geográfico no Brasil é de grande concentração na região Sul, sobretudo no estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2016).

2.3.3.5 Trigo

O trigo é uma gramínea anual com mecanismo fotossintético C₃ (DAVIS; HAY; PIERCE, 2014). Seu resíduo agrícola é a palhada gerada na colheita dos grãos (DIAS *et al.*, 2012). No Brasil, a produção é pequena e concentrada nos estados da região Sul (IBGE, 2016). No contexto mundial, trata-se do cereal com maior produção (USDA, 2016).

3. Caracterização das rotas tecnológicas empregadas

3.1 Processos de pré-tratamento

O pré-tratamento da biomassa, ou beneficiamento, tem o objetivo de convertê-la em um vetor energético mais adequado às operações a jusante na cadeia produtiva. Os pré-tratamentos podem ser de natureza biológica, física ou química (HARMSEN *et al.*, 2010).

Dentre os tipos de biomassa apresentados na seção 2.2, o que demanda maiores esforços de pré-tratamento para que possam ser aproveitados energeticamente é o lignocelulósico. A celulose e a hemicelulose são polímeros de açúcares, que uma vez reduzidos a seus respectivos monômeros, podem ser fermentados⁷. A lignina, por seu turno, pode ser levada a processos térmicos de produção de calor, eletricidade, combustíveis líquidos ou mesmo produtos químicos (HARMSEN *et al.*, 2010).

Para além dos benefícios à conversão da biomassa em energia final, uma das principais questões motrizes do pré-tratamento de material lignocelulósico é a logística, sobretudo com relação a biomassas residuais. Características como baixa densidade mássica e energética, irregularidade de formas e tamanhos, alto teor de umidade, caráter higroscópico e susceptibilidade à degradação biológica são maléficos às operações logísticas de armazenamento, transporte e manuseio (BATIDZIRAI *et al.*, 2013; ROTTER; ROHRHOFER, 2014). Assim, etapas de pré-tratamento que proporcionem melhorias nessas características da biomassa podem representar grandes benefícios à logística da cadeia de suprimentos bioenergética (USLU; FAAIJ; BERGMAN, 2008).

As modalidades de pré-tratamento consideradas neste trabalho foram a torrefação e a peletização, detalhadas nas seções subsequentes. A opção por apenas estas modalidades de pré-tratamento no escopo do trabalho deu-se por serem processos

⁷ A fermentação das hexoses, açúcares com cadeias de 6 átomos de carbono, é um processo que utiliza a levedura *Saccharomyces Cerevisiae* como micro-organismo fermentativo, dominado há séculos pelo para a produção de etanol, sobretudo para a fabricação de bebidas alcoólicas. A levedura, no entanto, não metaboliza outros açúcares presentes na estrutura polimérica da biomassa, como pentoses (e.x.: xiloses), o que leva a uma maior complexidade em sua fermentação, como a necessidade de utilização de micro-organismos geneticamente modificados (SEABRA, 2008).

específicos para o melhoramento da conversão termoquímica de biomassas lignocelulósicas e que produzem um material intermediário de fácil estocagem, transporte e manuseio, possibilitando ganhos na logística das cadeias de suprimentos bioenergéticas a serem analisadas.

3.1.1 Peletização

A peletização é um processo de pré-tratamento mecânico de densificação da biomassa. O produto do processo são os pellets, que consistem em sólidos homogêneos de formato cilíndrico, com diâmetro variando de 6 a 16 mm e altura entre 25 e 30 mm. Essas dimensões, contudo, podem variar de acordo com as especificações do país e com as demandas dos clientes (DIAS *et al.*, 2012; GARCÍA-MARAVÉ; POPOV; ZAMORANO, 2011).

O processo de peletização consiste nas operações sequenciais de secagem, moagem, pré-aquecimento, prensagem e extrusão e resfriamento do produto (KALLIO, 2011). A Figura 3.1 exibe um fluxograma simplificado do processo.

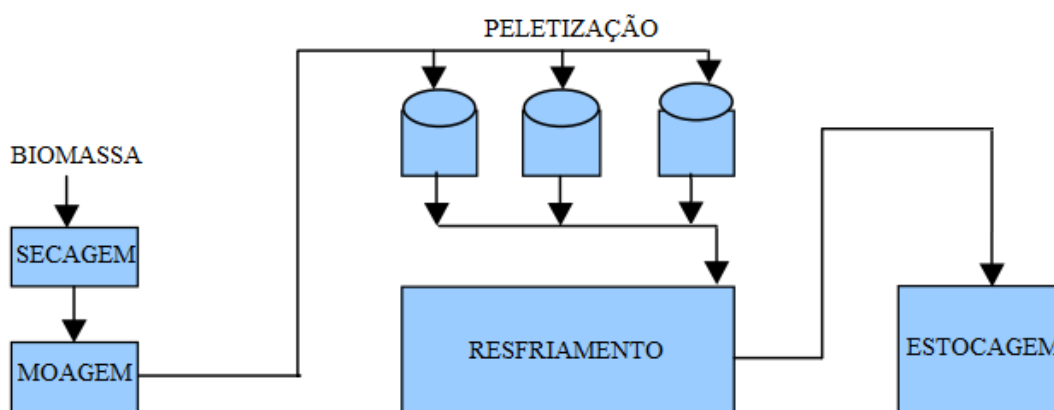


Figura 3.1. Fluxograma do processo de peletização.

Fonte: Adaptado de USLU, FAALJ e BERGMAN (2008)

Em geral, as unidades de peletização de palhas recebem fardos pesando cerca de 500 kg, o que demanda um bom planejamento da operação de alimentação do processo. Primeiramente, os fardos devem ser desfeitos e cortados, até que os caules possuam comprimentos médios de 25 a 75 mm. Ademais, como os estoques de palhas costumam conter teores elevados de toxinas e bactérias, é importante que os trabalhadores do local se protejam com máscaras. Em seguida, os contaminantes, como pedras e metais devem ser separados para evitar danos aos equipamentos a jusante (KALLIO, 2011).

Após o desfardamento e a eliminação dos contaminantes, procede-se à trituração do material, que pode ser realizada em moinhos de martelo ou de rolo. Essa operação demanda uma grande quantidade de energia mecânica, podendo variar de 10 a 100 kWh por tonelada de produto, a depender do tamanho de partícula desejado ao fim da operação⁸ (MANI; TABIL; SOKHANSANJ, 2006). O resultado dessa etapa é a biomassa reduzida a pequenas partículas, de consistência próxima ao pó ou em pequenos pedaços. Cabe ao operador avaliar a necessidade de uma etapa de moagem posterior, de acordo com o tamanho de partícula obtido (DIAS *et al.*, 2012).

Em seguida, procede-se à secagem do material. O teor de umidade é uma variável importante, uma vez que a água auxilia a peletização na gelatinização do amido, solubilização das fibras e fragmentação das proteínas. Porém, em excesso a umidade pode contribuir para o entupimento na alimentação do maquinário. O teor de umidade ideal para a peletização encontra-se entre 15 e 20 % em base mássica (DIAS *et al.*, 2012). Em geral, as palhas apresentam menor teor de umidade em relação a biomassas lenhosas, o que faz com que a demanda por secagem na peletização de palhas seja pequena ou até inexistente (BATIDZIRAI *et al.*, 2013; KALLIO, 2011).

Previamente à peletização propriamente dita, pode haver ainda etapas de condicionamento e aditivação. O condicionamento consiste na adição de água ou vapor à biomassa para amolecimento de suas fibras antes da peletização, o que confere melhores qualidades aos pellets e reduz o teor de partículas finas perdidas após a moagem. Também há no condicionamento o amolecimento da lignina e da hemicelulose, tornando-as compostos mais apropriados para a síntese de pellets com alta resistência. Há um considerável gasto energético nesta etapa, de cerca de 23 kWh/t. O condicionamento de palhas requer um tempo superior de contato com a água em comparação a biomassas lenhosas, devido a uma camada de cera presente nas palhas que a protege da ação da chuva e de ataques de insetos. A aditivação consiste na aplicação de substâncias na matéria-prima que auxiliam na lubricidade, na formação de liga ou nas características de combustão dos pellets (KALLIO, 2011).

A etapa de moagem determinará o tamanho de partícula a ser introduzido na prensa peletizadora, que é um parâmetro fundamental na determinação da qualidade do

⁸ Quanto menor o tamanho de partícula obtido ao fim da moagem, maior o consumo energético da operação (MANI; TABIL; SOKHANSANJ, 2006).

produto. Tamanhos de partícula muito pequenos levam à formação de pellets com poros de menor dimensão, o que os leva a ter maior densidade. Porém, tamanho de poros muito reduzidos dificultam a difusão do ar no interior dos pellets durante a combustão, prejudicando o processo (DIAS *et al.*, 2012). Conforme mencionado, dependendo do tamanho de partícula obtido na trituração pode-se desprezar a moagem.

A prensagem e a extrusão ocorrem na prensa de peletização, que consiste de um equipamento que pressiona a biomassa contra uma matriz dotada de diversos orifícios com diâmetro igual ao desejado para o produto. O tipo mais usual é a prensa de rolo e matriz anelar cilíndrica, na qual a biomassa é inserida entre o rolo e a matriz, ocorrendo a sua extrusão nos orifícios da matriz, onde é posicionada uma faca que corta os pellets de acordo com o tamanho desejado (KALLIO, 2011). Um esquema da prensa peletizadora pode ser visto na Figura 3.2. Os principais fatores que afetam o processo de peletização são a temperatura e pressão de operação, o teor de umidade da matéria-prima, a dimensão das partículas e o uso de aditivos (DIAS *et al.*, 2012; KALLIO, 2011).

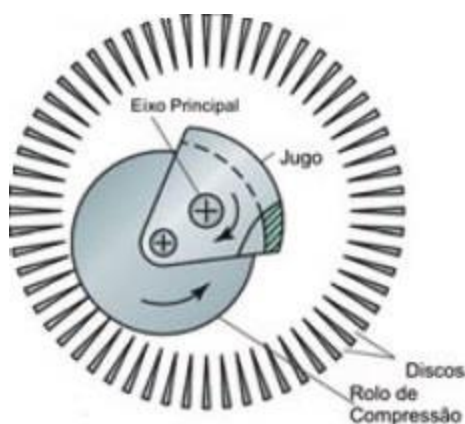


Figura 3.2: Esquematização de uma prensa peletizadora de matriz anelar

Fonte: DIAS *et al.* (2012)

Ao sair da prensa de peletização, os pellets encontram-se a altas temperaturas, superiores a 100 °C, podendo chegar a mais de 200 °C na sua superfície, devido ao aquecimento antes da peletização e ao cisalhamento durante a extrusão. Faz-se necessário, portanto, o resfriamento do produto, que pode ser realizado com resfriadores em contracorrente ou, no caso de pequenas produções, expondo-os por um curto período à temperatura ambiente. Após o resfriamento, o produto é enviado ao armazenamento (DIAS *et al.*, 2012). A forma final do produto pode ser vista na Figura 3.3.



Figura 3.3: Forma final dos pellets

Fonte: KALLIO (2011)

Em se tratando de densificação de biomassa, além da peletização também há o processo de briquetização. A diferença entre ambos está fundamentalmente nas dimensões do produto obtido. Enquanto que os pellets possuem diâmetros tipicamente variando entre 6 e 16 mm e comprimento entre 25 e 30 mm, os briquetes – produto da briquetização – apresentam dimensões maiores, com diâmetros entre 50 e 100 mm e comprimentos de 250 a 400 mm. As formas dos briquetes também variam, podendo estes ser prismáticos, ovóides, cilíndricos ou tetraédricos, entre outras formas geométricas (DIAS *et al.*, 2012). A opção por utilizar apenas o processo de peletização na análise deu-se por os pellets apresentarem densidades a granel superiores aos briquetes, por terem menores dimensões, deixando menos espaços vazios quando juntos em grandes quantidades. Isso traz benefícios às etapas logísticas na cadeia do aproveitamento energético.

A produção mundial de pellets vem consistentemente aumentando no mundo, indo de 2 Mt no ano 2000 para 28 Mt em 2015, conforme pode-se observar na Figura 3.4. Cerca de 77% da demanda concentra-se nos países da União Europeia, sobretudo no Reino Unido, Itália, Alemanha, Suécia, Dinamarca, França e Bélgica. A demanda mundial por pellets em 2015 foi de 15 Mt para aquecimento e 13 Mt para o setor industrial, que contempla a geração de energia (MATTHEWS, 2015).

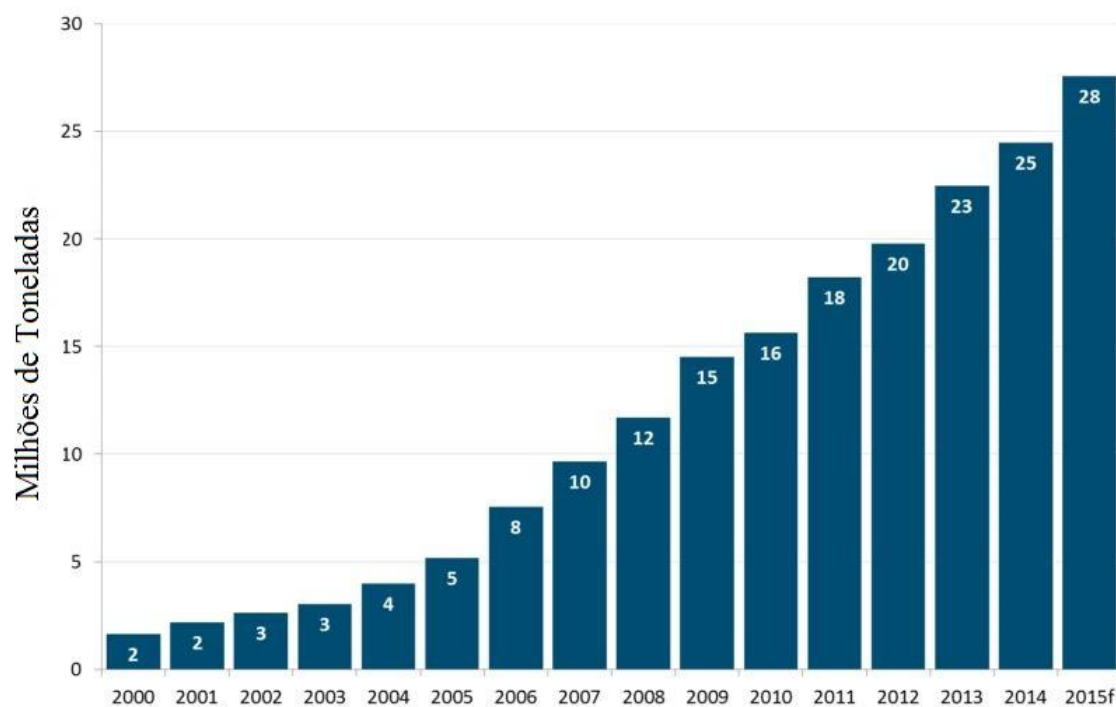


Figura 3.4: Evolução da produção mundial de pellets

Fonte: MATTHEWS (2015)

No Brasil, o mercado de pellets ainda é bastante reduzido, voltado somente para usos em aquecimento de pequena escala, no setor comercial. Em 2013 a capacidade instalada total de produção de pellets no país era de 425.750 t/ano, sendo a produção naquele ano de 61.500 t, o que equivale a 14,4% da capacidade produtiva. A Figura 3.5 ilustra esses dados.

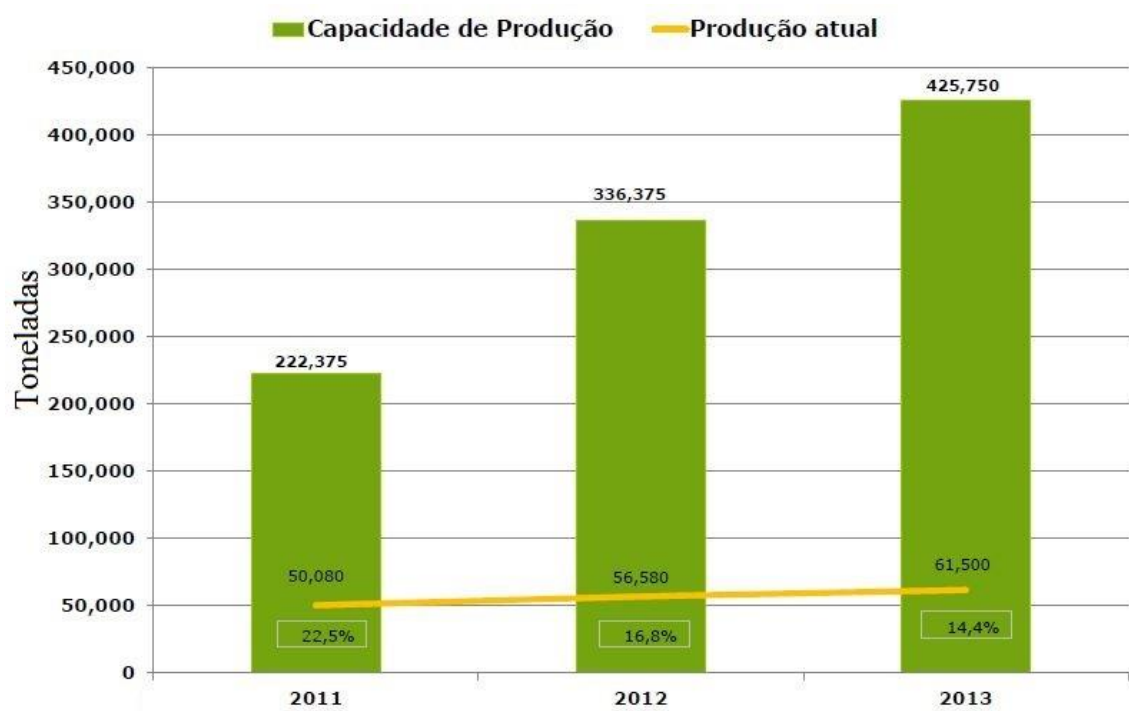


Figura 3.5: Produção de pellets no Brasil

Fonte: Adaptado de GARCIA (2014)

3.1.2 Torrefação

A torrefação – também chamada de “*pirólise branda*” – consiste de um processo termoquímico conduzido à pressão atmosférica no qual a biomassa é submetida a temperaturas na faixa de 200-300 °C sob uma atmosfera não oxidante (USLU; FAAIJ; BERGMAN, 2008). Semelhantemente ao tratamento dado ao café para fins alimentícios, ao ser torrefeita a biomassa adquire coloração escura, sendo a sua tonalidade final função de duas variáveis de processo: a temperatura de reação e o tempo de residência (DEUTMEYER et al., 2012; JOSHI et al., 2015). Uma cor mais escura indica um maior teor de carbono fixo na matéria. A Figura 3.6 apresenta imagens da casca de arroz torrefeita a diferentes temperaturas.



Figura 3.6: Casca de arroz torrefeita a diferentes temperaturas

Fonte: CHEN et al. (2014)

Pela ótica da química, durante a torrefação há uma degradação térmica moderada dos polímeros que compõem a biomassa, sobretudo da hemicelulose, que por possuir estrutura heterogênea e monossacarídea, a despeito da celulose e da lignina, apresenta o pico de sua atenuação em temperaturas inferiores aos demais polímeros (CHEN, W.; PENG; BI, 2015). Ademais, há liberação dos grupamentos hidroxila presentes na estrutura original da biomassa, reduzindo assim as interações intermoleculares (ligações de hidrogênio) do produto com as moléculas de água, além de uma condensação do alcatrão formado durante as reações químicas no interior dos poros da biomassa torrefeita, obstruindo a passagem de ar úmido por estes e prevenindo que água se condense acolá. O caráter apolar do alcatrão também causa interação repulsiva com a água. CHEN *et al.* (2015) consideram que esses fatores tornam a biomassa torrefeita hidrofóbica e BERGMAN (2005) menciona que esses motivos podem explicar a inertização da biomassa perante ataques biológicos. Sob a ótica físico-química, as temperaturas empregadas no processo auxiliam na eliminação da umidade e do conteúdo orgânico volátil presente na matéria original (BERGMAN, P., 2005).

A conjugação dos processos de torrefação e peletização possui importantes co-benefícios. Primeiramente, como a torrefação reduz o teor umidade da biomassa e torna-a hidrofóbica, elimina-se a etapa de secagem específica para o processo de densificação. Ademais, a torrefação torna a matéria frágil, tornando mais simples a moagem a montante da peletização, o que pode reduzir a demanda energética de 70% a 90% nessa etapa (USLU; FAAL; BERGMAN, 2008). Contudo, a degradação das ligações de hidrogênio ocorridas na torrefação diminui o caráter plástico da biomassa, sendo assim a etapa de compressão da biomassa torrefeita energeticamente mais custosa em comparação à biomassa crua (CAO *et al.*, 2015). O uso de óleos vegetais como aditivos pode auxiliar na compressão da biomassa, agindo como lubrificante. CAO *et al.* (2015) utilizaram óleo de mamona como aditivo na fabricação de pellets torrefeitos, obtendo como resultado uma redução da energia necessária para compactação da biomassa, além de pellets com maior resistência mecânica.

Pelo lado da torrefação, seu produto é um sólido pulverizado, que além de baixa densidade possui alta propensão à formação de poeira. Esta poeira representa um perigo elevado à operação, pois é nociva aos operadores e ainda pode causar incêndios. Ao densificar a biomassa torrefeita, há uma redução na formação dessa poeira. Assim, a peletização auxilia a torrefação a gerar um produto mais denso e a reduzir riscos

operacionais (KOPPEJAN et al., 2012). BERGMAN (2005) denominou o processo de torrefação e peletização conjugado de “processo TOP”.

Dessa forma, o produto do processo TOP é um sólido com características semelhantes ao carvão mineral, como alto teor de carbono fixo, alta densidade energética, baixo teor de umidade, caráter hidrofóbico, frágil (moagem facilitada), baixa razão O/C (oxigênio-carbono) e de fácil ignição, além de possuir uma forma bem definida em razão da peletização (BATIDZIRAI *et al.*, 2013). Com isso, alguns autores denominam a biomassa torrefeita como “bio-carvão” (FAGERNÄS; KUOPPALA; ARPIAINEN, 2015; KALIYAN *et al.*, 2014; STARFELT *et al.*, 2015).

Ainda sobre o bio-carvão, STELTE *et al.* (2011) destacam que estes possuem maior fragilidade em relação a pellets manufaturados com biomassa crua. Por um lado, um produto mais frágil possui uma moagem facilitada, fato desejado pelo usuário final que pretende usá-lo em caldeiras e gasificadores. Entretanto, a fragilidade do bio-carvão pode ser um fator negativo sob o aspecto logístico, pois torna o produto quebradiço e assim dificulta o seu manuseio.

A Figura 3.7 ilustra um esquema de torrefação de biomassa em que há uma integração energética, por meio da combustão dos gases da exaustão do reator de torrefação, ricos em material orgânico volátil. Com esse reciclo, é possível reduzir ou mesmo eliminar a necessidade de consumo de combustíveis, já que a demanda térmica do reator de torrefação e da secagem passa a ser suprida pelo próprio processo (BERGMAN, P., 2005; ERLACH, 2014; JOSHI *et al.*, 2015; USLU; FAAL; BERGMAN, 2008).

concluindo que esta modalidade de pré-tratamento é favorável tanto do ponto de vista competitivo quanto da complementariedade junto a outras, como a peletização simples e pirólise *flash*. Projeta-se que dentro de dez anos da realização do trabalho a tecnologia tornar-se-á comercial.

Atualmente, a tecnologia de torrefação não ocorre em escalas comerciais. Em 2015 a estimativa do total de capacidade instalada de plantas de torrefação de biomassa no mundo era superior a 200 kt/ano e a produção total acumulada de bio-carvão até a data era entre 70 e 120 kt (CREMERS *et al.*, 2015).

Tabela 3.1. Tecnologias existentes de torrefação de biomassa

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Tambor rotativo	<ul style="list-style-type: none"> • Pode usar aquecimento direto ou indireto • Transferência de calor uniforme • Ampla gama de tamanhos de biomassa e tipos de resíduo • Tecnologia consolidada de secagem industrial de biomassa 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa transferência de calor • Controle de temperatura precário • Alta formação de poeira pelo atrito entre a biomassa e as paredes do tambor • Aumento de escala limitado a 10-12 t/h de biomassa • Grande área de planta
Esteira e grade vibratória	<ul style="list-style-type: none"> • Ampla gama de tamanhos de biomassa • Relativo baixo custo de investimento • Fácil controle do tempo de residência • Tecnologia consolidada de secagem industrial de biomassa 	<ul style="list-style-type: none"> • Produto heterogêneo • Economias de escala são inviáveis • Controle de temperatura limitado • Alto custo de manutenção
Transportador helicoidal	<ul style="list-style-type: none"> • Custo relativamente baixo • Bom fluxo de biomassa • Ampla gama de tamanhos de biomassa • Tecnologia consolidada 	<ul style="list-style-type: none"> • Produto pouco homogêneo • Transferência de calor precária • Ganhos de escala limitados
Forno de múltiplas soleiras	<ul style="list-style-type: none"> • Boa transferência de calor • Bom controle térmico • Ampla gama de tamanhos de biomassa • Passível de aumento de escala 	<ul style="list-style-type: none"> • Grande área da planta • Demanda gás natural
Leito fluidizado (bolhas)	<ul style="list-style-type: none"> • Boa transferência de calor • Passível de aumento de escala 	<ul style="list-style-type: none"> • Tamanho de partícula seletivo • Alto tempo de resposta da temperatura • Alto atrito da biomassa e perda de finos
Leito fluidizado (toróide)	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo tempo de residência (< 100s) • Alto fluxo intermediário • Passível de aumento de escala • Baixa manutenção • Controle preciso do produto 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade volumétrica do reator limitada • Risco de formação de alcatrão pela relativa maior perda de voláteis
Leito fixo	<ul style="list-style-type: none"> • Relativamente simples e baixo custo • Alta transferência de calor • Alto fluxo intermediário • Baixa manutenção • Processa biomassas de baixa densidade sem grandes problemas 	<ul style="list-style-type: none"> • Presença de partículas pulverizadas podem causar 'shut down' do reator • Tamanho limitado de biomassa e tipo • Distribuição térmica pouco uniforme • Possibilidade de formação de caminhos preferenciais • Dificil controle térmico • Potencial de aumento de escala não comprovado
Micro-ondas	<ul style="list-style-type: none"> • Transferência de calor por radiação • Alta taxa de transferência e torrefação rápida • Capacidade de uso de biomassas grandes • Bom controle térmico • Tecnologia modular 	<ul style="list-style-type: none"> • Efeitos do rápido aquecimento da biomassa são desconhecidos • Demanda eletricidade • Aquecimento do interior da biomassa não uniforme • Requer acoplamento com aquecedores tradicionais para alcançar uniformidade

Fonte: KOPPEJAN *et al.* (2012); CREMERS *et al.* (2015)

3.2 Conversão da biomassa em energia final

Tal como a biomassa é diversa em sua origem, são diversas as rotas para conversão do recurso em energia final. A princípio, trabalha-se com três grandes grupos de conversão bioenergética: as rotas químicas, as rotas termoquímicas e as rotas bioquímicas⁹ (DAVIS; HAY; PIERCE, 2014; NAIK et al., 2010; SIMS et al., 2010). A Figura 3.8 apresenta um diagrama resumido dos tipos de biomassas, processos e produtos constituem as cadeias de suprimentos bioenergéticas.

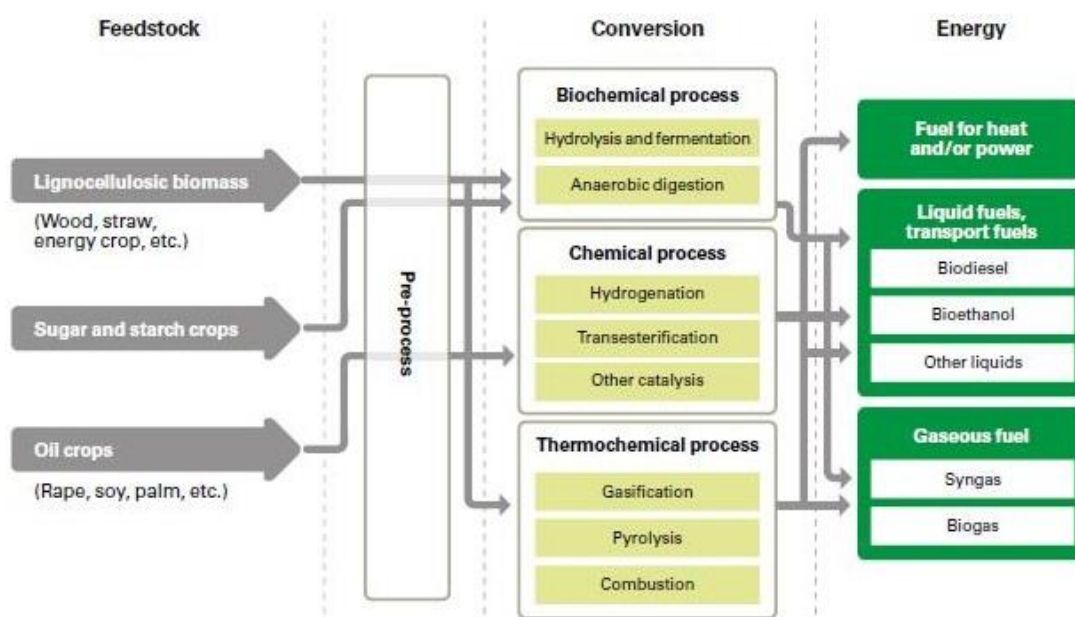


Figura 3.8: Biomassas, processos e produtos nas cadeias bioenergéticas

Fonte: DAVIS, HAY & PIERCE (2014)

Esta figura mostra a flexibilidade da biomassa na obtenção de produtos energéticos. No entanto, vale a ressalva de que algumas dessas rotas, apesar de possíveis do ponto de vista técnico, não são economicamente viáveis ou mesmo ambientalmente sustentáveis.

⁹ Tais denominações tem finalidade meramente didática, uma vez que dentro de uma rota com determinada classificação pode haver processos de diferentes naturezas, ou mesmo o consorciamento de rotas, sobretudo no que se refere à conversão principal. À guisa de exemplo, pode-se citar rotas bioquímicas em que se faz presente o processo de explosão a vapor, cujo caráter é tipicamente termoquímico, ou o consorciamento dos processos de pirólise rápida (termoquímico) com o posterior hidrotratamento do bio-óleo produzido (químico).

Biomassas lignocelulósicas, fundamentalmente, podem ser convertidas pelas rotas fermentativas e termoquímicas. A fermentação, que consiste no metabolismo de micro-organismos, demanda um pré-tratamento que exponha os açúcares presentes em na estrutura da biomassa na forma dos polímeros celulose e hemicelulose (HARMSEN *et al.*, 2010). O produto da fermentação de material lignocelulósico é denominado “combustível de segunda geração” (NAIK *et al.*, 2010; SIMS *et al.*, 2010). Contudo, o pré-tratamento de torrefação da biomassa causa a decomposição dos polímeros da biomassa não a seus monômeros de açúcar, mas basicamente a carbono fixo (BERGMAN, P. C. A *et al.*, 2005), o que faz com que o bio-carvão não seja adequado para processos fermentativos. Logo, o pré-tratamento da biomassa via torrefação torna-a elegível somente para as modalidades de conversão termoquímicas.

O aproveitamento energético da biomassa torrefeita em plantas existentes, projetadas para operar com carvão, é facilitado em relação ao uso da biomassa crua, uma vez que aquela possui características semelhantes ao carvão, como alta densidade energética, baixo teor de umidade e alta friabilidade¹⁰ (BATIDZIRAI *et al.*, 2013). STARFELT *et al.* (2015) estudaram o caso da instalação de uma planta de torrefação integrada a uma planta de cogeração a carvão, com vistas a substituição parcial e total do combustível fóssil por biomassa torrefeita. Obtiveram como resultado que o sistema é tecnicamente possível mesmo para a substituição integral do carvão por biomassa torrefeita e que sua viabilidade pode ser alcançada se houver uma taxa de emissão equivalente a € 37 por tonelada de CO₂ emitida.

A gasificação é um processo conduzido em temperaturas superiores a 700°C, em que há a oxidação parcial de combustíveis sólidos por oxigênio, vapor, CO₂ ou uma mistura desses gases, produzindo um gás capaz de ser usado como fonte de energia ou na síntese de combustíveis líquidos, produtos químicos ou outros combustíveis gasosos (COLLOT, 2006). Esse gás é conhecido como gás de síntese, sendo formado basicamente por uma mistura de H₂, CH₄, CO, CO₂ e H₂O, com ênfase, no entanto, nos gases CO e

¹⁰ Friabilidade é a propriedade de sólidos produzirem finos (pó) quando submetidos a queda ou abrasão (RODRIGUES, 2009).

H₂. Uma gasificação que leva a um gás de síntese com alta concentração de CO e H₂ apresenta uma baixa *cold gas efficiency*¹¹ (HOFFMANN, 2010).

Há uma vasta gama de reatores de gasificação, cada qual com um mecanismo específico de funcionamento, porém existe uma classificação geral dos gasificadores quanto a forma de escoamento do combustível: leito de arraste, leito fluidizado e leito fixo.

Nos gasificadores de leito fixo, o combustível é alimentado em grãos grossos e o meio oxidante flui com baixa velocidade, em geral em contracorrente com a alimentação. A produção de gás de síntese se dá com alta eficiência, porém o gás de síntese gerado apresenta elevada quantidade de contaminantes (alcatrão, fenóis e vapor). Sua principal exigência é a boa permeabilidade do leito, para que se evite a formação de caminhos preferenciais na reação. Materiais com alto teor de partículas finas não podem ser utilizados, para evitar entupimento do leito. Apresenta alto tempo de residência, variando de 15 a 60 minutos, em gasificadores de alta pressão operando com oxigênio ou vapor, ou a várias horas, para gasificadores à pressão atmosférica. Ganhos de escala são limitados nesse modelo de reator (HOFFMANN, 2010).

No leito fluidizado, o combustível é alimentado ao reator na forma particulada (6-10 mm) e misturado às partículas de fluidização do leito, sendo este suspenso com o fluxo do meio oxidante. A tecnologia de leito fluidizado permite a gasificação de uma carga maior em comparação ao leito fixo. Também se permite uma faixa de tamanhos de partícula nos reatores de leito fluidizado, o que é importante para as biomassas, que são heterogêneas em formas e tamanhos por natureza. Contudo, partículas muito grandes podem prejudicar a fluidização. Os reatores trabalham a níveis de temperatura relativamente baixos, geralmente abaixo do ponto de fusão das cinzas (800-1100°C). Essa baixa temperatura de operação desfavorece o craqueamento térmico de voláteis e alcatrão, gerando um gás de síntese com maior nível de impurezas (HOFFMANN, 2010).

No leito de arraste, o combustível é injetado na forma pulverizada (<100 µm), sendo levado pelo oxidante, que vem em fluxo paralelo a altas velocidades. O curto tempo

¹¹ A *cold gas efficiency* é a razão entre as energias químicas do gás de síntese e do combustível, sendo um dos parâmetros mais importantes de serem observados na gasificação. O nome “*cold gas*” vem de não ser levada em consideração a energia térmica do gás de síntese na saída do reator (HOFFMANN, 2010).

de retenção possibilita uma capacidade de carga bastante elevada em relação às demais tecnologias e, por conseguinte, grandes economias de escala. Por outro lado, o baixo tempo de residência do combustível demanda um maior controle dos parâmetros de processo, sobretudo da razão combustível/oxidante. É também o processo mais exigente quanto à homogeneidade da matéria-prima. Porém, é a tecnologia capaz de converter a mais ampla faixa de combustíveis em um gás de síntese de alta qualidade, devido às altas temperaturas (1200-1600°C) e pressões (2-8 MPa) (HOFFMANN, 2010).

Assim, os maiores entraves ao uso da biomassa para a gasificação em leito de arraste são a sua baixa friabilidade e o comportamento agressivo de suas cinzas (VASSILEV *et al.*, 2013b). A torrefação da biomassa auxilia em sua conversão a um material mais frágil, entretanto não há nada provado quanto à alteração do caráter de suas cinzas, apesar de estudos indicarem que a torrefação pode ocasionar uma redução na concentração de cloro das cinzas, o que mitigaria riscos de corrosão (CREMERS *et al.*, 2015).

4. Mapeamento de resíduos agrícolas no território brasileiro

4.1 Metodologia

O escopo de análise adotado para este trabalho foi os resíduos agrícolas das cinco culturas identificadas por PORTUGAL-PEREIRA *et al.* (2015) como tendo maior potencial energético no Brasil. Essas culturas são a cana-de-açúcar, a soja, o milho, o arroz e o trigo. Como resíduos agrícolas dessas culturas, considerou-se a palha produzida.

Primeiramente, foi feito um levantamento do potencial energético dos resíduos agrícolas no território brasileiro. Para tal, seguiu-se a metodologia proposta por PORTUGAL-PEREIRA *et al.* (2015), na qual a determinação potencial energético da biomassa residual deriva da produção agrícola da *commodity* que lhe dá origem.

A quantidade de resíduos disponível em cada município, em base mássica, foi obtida a partir das respectivas produções agrícolas no ano de 2014. Este dado foi retirado da Produção Agrícola Municipal, pesquisa realizada pelo IBGE que contabiliza com periodicidade anual a quantidade produzida, a área plantada e colhida, o rendimento médio e o valor da produção agrícola de todos os municípios brasileiros, separando-os pelas culturas de maior relevância no país (IBGE, 2016).

Assim, tendo a produção agrícola de cada cultura dentro do escopo da análise em cada município brasileiro, foram aplicados fatores multiplicativos fixos para cada produto agrícola para determinar a quantidade de massa de resíduo gerada. O primeiro desses fatores é a Razão Resíduo-Produto (RRP). Esse é um parâmetro que estima a quantidade do resíduo de interesse produzida para cada unidade do produto originário. Outro fator aplicado é o fator de disponibilidade do resíduo (FDR), um parâmetro restritivo que denota a fração percentual da palha produzida que pode ser direcionada para o aproveitamento energético. Para o caso dos resíduos agrícolas, o FDR é relevante apenas para a cana-de-açúcar, cuja colheita segue diferentes modelos produtivos, dentre os quais há as “queimadas”. Nesta, há a combustão da palha, de modo a impossibilitar seu aproveitamento posterior. Assim, o FDR da palha de cana-de-açúcar leva em consideração a parcela da produção inviabilizada pelas queimadas. Outro parâmetro de caráter restritivo é a taxa de remoção sustentável (TRS). Esta taxa exprime a parcela da palha que pode ser retirada sem prejuízo ao solo, que se beneficia da cobertura após a colheita em diversos aspectos, como a reciclagem de nutrientes por decomposição

microbiológica da palha (PORTUGAL-PEREIRA *et al.*, 2015). Por último, exclusivamente para cálculo do potencial de energia primária do município, utilizou-se o poder calorífico inferior do resíduo (PCI). A Equação 4.1 e a Equação 4.2 calculam, respectivamente, o potencial em massa e em energia de cada resíduo por município. A Tabela 4.1 exhibe os valores desses parâmetros para cada resíduo.

$$M_{i,j} = P_{i,j} * RRP_j * FDR_j * TRS_j \quad \text{Equação 4.1}$$

$$E_{i,j} = M_{i,j} * PCI_j \quad \text{Equação 4.2}$$

Onde: $M_{i,j}$ = Potencial em massa do resíduo j no município i [kt/ano]

$E_{i,j}$ = Potencial em energia primária do resíduo j no município i [TJ/ano]

$P_{i,j}$ = Produção agrícola do produto originário do resíduo j no município i [kt/ano]

RRP_j = Razão Resíduo-Produto para o resíduo j [%]

FDR_j = Fator de disponibilidade do resíduo j [%]

TRS_j = Taxa de remoção sustentável do resíduo j [%]

PCI_j = Poder Calorífico Inferior do resíduo j [MJ/kg] ¹²

Tabela 4.1: Parâmetros para cálculo dos potenciais em massa e energia dos resíduos

Resíduo	RRP	FDR	TRS	PCI [MJ/kg] ¹	Teor de umidade
Palha de Cana-de-açúcar	0,22	65%	34%	18,62	6%
Palha de Soja	2,01	100%	30%	20,09	14%
Palha de Milho	1,53	100%	25%	18,67	6%
Palha de Arroz	1,54	100%	50%	17,22	9%
Palha de Trigo	1,55	100%	15%	19,54	11%

1: Poder calorífico inferior em base seca.

Fonte: Adaptado de PORTUGAL-PEREIRA *et al.* (2015)

Com os potenciais de produção dos resíduos, em base mássica e energética, pode-se gerar mapas temáticos com a indicação em um código de cores dos municípios com maior concentração de cada resíduo e maior potencial de energia primária global. Entretanto, para definição de localidades ótimas para implantação de estações de conversão bioenergética, considerou-se que estes dados por si só eram insuficientes, pois

¹² Unidade equivalente a TJ/kt.

apesar de indicarem claramente os municípios nos quais a produção de resíduos é maior, desconsideram os municípios vizinhos da análise.

A fim de dispor os resíduos de biomassa relevantes ao presente trabalho sob um contexto georreferenciado, foi utilizado o software QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2016), que permite organizar informações quantitativas em diferentes camadas de dados. A sobreposição dessas camadas produz um mapa temático, com a configuração e nível de detalhamento desejado pelo analista.

O sistema de referência de coordenadas (SRC) adotado para o projeto foi o mesmo adotado pelo IBGE, o SIRGAS 2000¹³, que é o sistema de referência geocêntrico para as américas. As camadas vetoriais de base, com os contornos poligonais dos municípios, estados e do país foram retiradas da base de dados do IBGE (IBGE, 2015). A divisão territorial dos municípios adotada é a relativa ao ano de 2010, dado mais recente encontrado na referida base de dados.

Assim, alocaram-se os potenciais de produção dos resíduos, em termos de massa e energia, a seus respectivos municípios de origem, possibilitando a visualização dos locais com maior concentração de energia primária advinda das palhas.

Não obstante, tal visualização permitiu a verificação do potencial dos municípios somente de maneira individual. Como a produção de municípios vizinhos arranjados na forma de um *cluster* produtivo de um determinado resíduo pode significar um maior potencial do que um único grande produtor, ou não, optou-se por utilizar a ferramenta “Mapa de calor” do QGIS para a determinação dos locais ótimos para implantação de unidades conversoras dos resíduos em bioenergia. Tal ferramenta baseia-se no Estimador de Densidade de Kernel, que, em linhas gerais, calcula a dispersão superficial de um determinado parâmetro em uma região, permitindo a verificação de locais onde os valores se concentram. Assim, faz-se possível a identificação de locais de alta concentração de produção de um mesmo produto, doravante denominados *clusters*, na região de análise (COSTA, 2014).

¹³ Para a construção dos mapas de densidade de Kernel, faz-se necessário o uso de um sistema de coordenadas planas. Assim, para esses mapas foi adotado como sistema de referência a zona UTM-22S, sob a qual o território brasileiro encontra-se majoritariamente localizado.

Para formular os mapas de densidade faz-se necessário atribuir os valores de potencial energético a pontos específicos no mapa. Tais pontos, de maneira precisa, deveriam ser todos os locais nos quais a biomassa residual colhida nas propriedades agrícolas é depositada para ser enviada ao transporte. Porém, como se trabalhou com dados agregados em nível de produção agrícola municipal, foi considerado que toda a biomassa estaria disponibilizada no centroide do polígono que contorna o respectivo município. Outros dados que a formulação dos mapas de Densidade de Kernel demanda são o raio de influência dos pontos e o formato da função de estimação, que dita as propriedades de suavização do fenômeno (FREIRE, 2016). Para o raio de influência, considerou-se que cada ponto impacta células a no máximo 50 km de distância, seguindo o comportamento conservador adotado por PORTUGAL-PEREIRA *et al.* (2015). Para a curva de decaimento, optou-se pelo formato quártico, que é o tipo padrão utilizado pelo programa.

Com os mapas de calor, foi possível identificar os *clusters* de produção de cada resíduo agrícola considerado no escopo da análise. Cada *cluster* foi considerado como um local de instalação do sistema bioenergético, sendo desenvolvido um *buffer* circular de raio 50 km a partir de sua localização pontual. Os municípios compreendidos no interior dessa zona foram incluídos no escopo da análise como fornecedores de matéria-prima ao sistema bioenergético. No caso de *clusters* localizados em municípios de grandes áreas, nos quais o raio de 50 km não cobre a totalidade de seu perímetro, também foram incluídos os municípios que fazem limite com o município do *cluster*.

4.2 Premissas da modelagem

Para auxiliar o processo de modelagem e mapeamento dos resíduos, foram assumidas algumas premissas simplificadoras. A Tabela 4.2 inclui a lista das principais premissas para o levantamento e mapeamento do potencial energético dos resíduos, assim como as limitações.

Tabela 4.2: Premissas do cálculo de potencial bioenergético municipal dos resíduos agrícolas

Premissa	Limitação/Simplificação
Homogeneidade das propriedades físicas das palhas	Biomassas de diferentes localidades ou safras podem apresentar propriedades físicas distintas, mesmo sendo da mesma espécie
Produção de resíduos constante com a produção da <i>commodity</i>	A razão resíduo-produto pode variar com a localidade da produção ou com a espécie da planta
Possibilidade de aproveitamento dos resíduos em todos os municípios	Condições logísticas, ambientais, legais e de disponibilidade de mão-de-obra variam com as regiões do país
Centroide do município localizado na zona rural	Locais considerados para a conversão da biomassa podem coincidir com a zona urbana em alguns municípios

Fonte: Elaboração própria

4.3 Resultados

A aplicação da metodologia deste capítulo permitiu o levantamento do potencial energético dos resíduos agrícolas e sua organização em um contexto geográfico no território brasileiro. Ademais, a abordagem de georreferenciamento deste capítulo gerou os dados que subsidiaram a análise da cadeia de suprimentos bioenergética, relatada no capítulo 5.

A avaliação do potencial de energia primária advinda dos resíduos agrícolas no território brasileiro classificada de acordo com a natureza da palha encontra-se representada na Figura 4.1. A Tabela 4.3 e a Figura 4.2, por sua vez, abordam a distribuição do potencial energético por região do Brasil.

Tabela 4.3: Potencial de energia primária nas regiões do Brasil por resíduo agrícola

Região	Potencial de bioenergia primária (TJ/ano)					Total
	Palha de cana-de-açúcar	Palha de arroz	Palha de Soja	Palha de milho	Palha de trigo	
Sul	45.584	252.250	358.538	173.394	26.102	855.869
Sudeste	442.714	2.731	61.180	78.433	1.981	587.038
Norte	4.195	24.810	42.623	12.272	-	83.901
Nordeste	63.722	22.540	79.534	47.643	-	213.438
Centro-Oeste	121.874	21.330	508.217	256.769	347	908.537
Total	678.089	323.661	1.050.091	568.511	28.430	2.648.782

Fonte: Elaboração própria

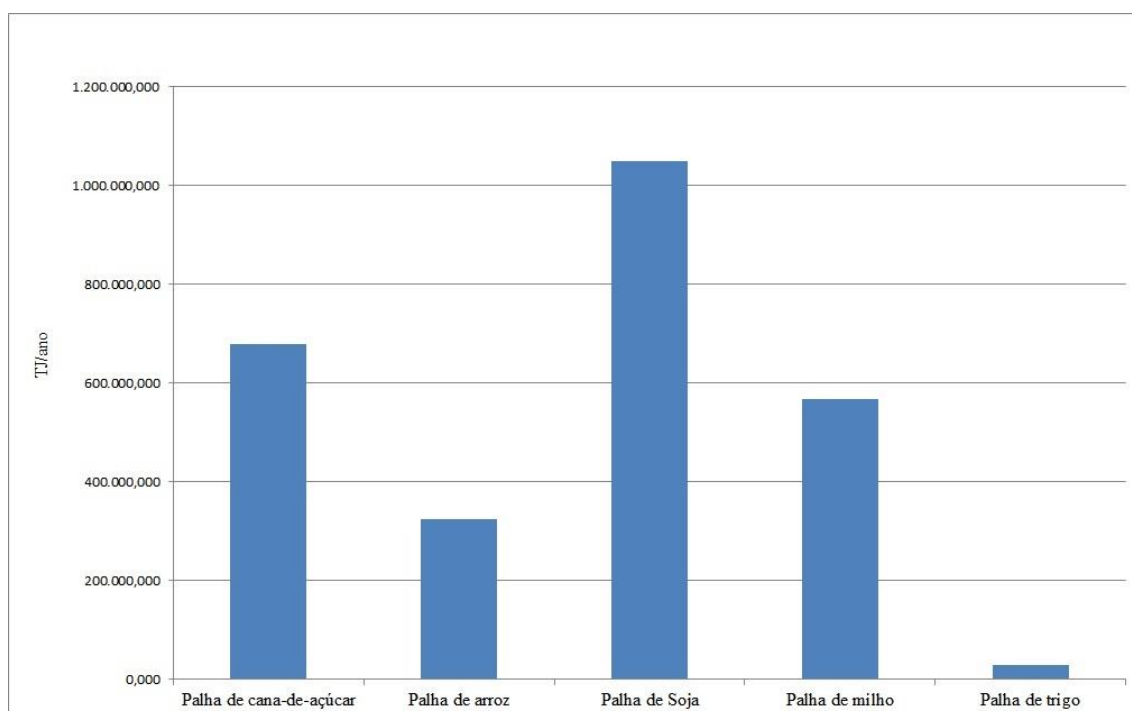


Figura 4.1: Distribuição do potencial energético no Brasil por resíduo agrícola

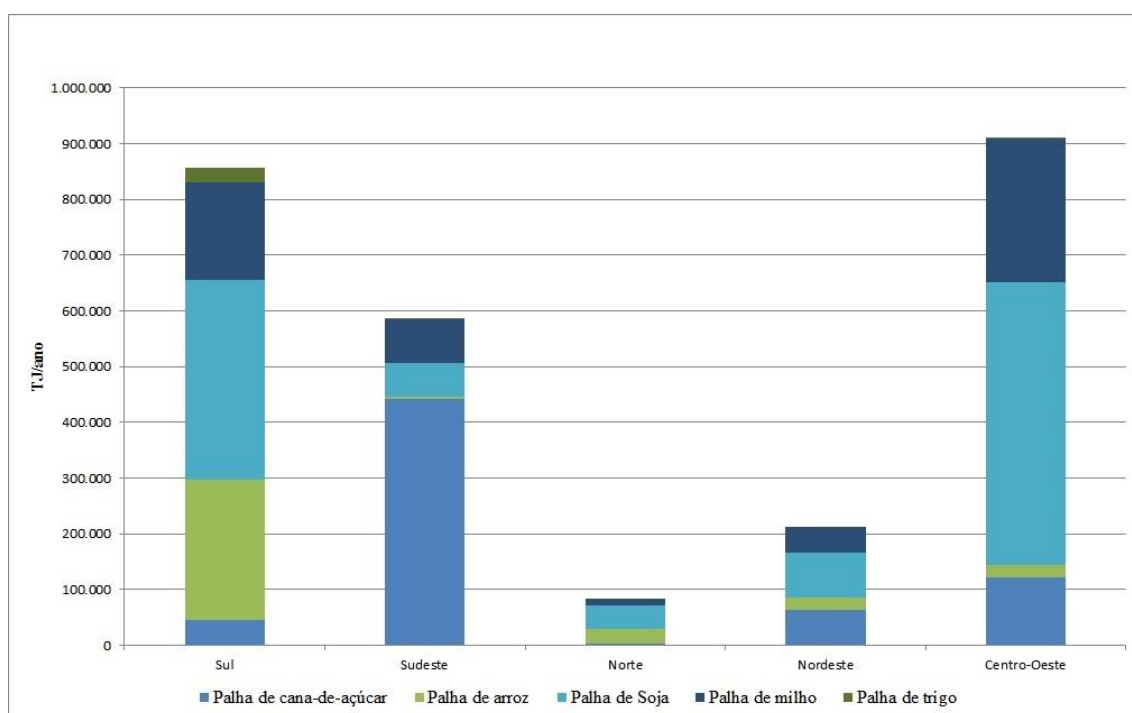


Figura 4.2: Distribuição do potencial energético por região do Brasil

O mapeamento dos resíduos no território brasileiro foi feito a partir da alocação dos potenciais verificados a seus respectivos municípios, por meio da união da camada

de dados numéricos, contendo as informações dos potenciais energéticos, com a camada vetorial contendo os polígonos de contorno das municipalidades do Brasil. O resultado obtido nesta etapa foram mapas temáticos para cada resíduo, com a distribuição da energia primária sobre a extensão territorial do país. As Figuras 4.3 a 4.7 apresentam os mapas de potencial energético das palhas de cana-de-açúcar, soja, milho, arroz e trigo, respectivamente. A Figura 4.8, por sua vez, apresenta um mapa com a distribuição do somatório dos potenciais energéticos ao longo de todo o território do Brasil, destacando a participação de cada resíduo no potencial total da região.

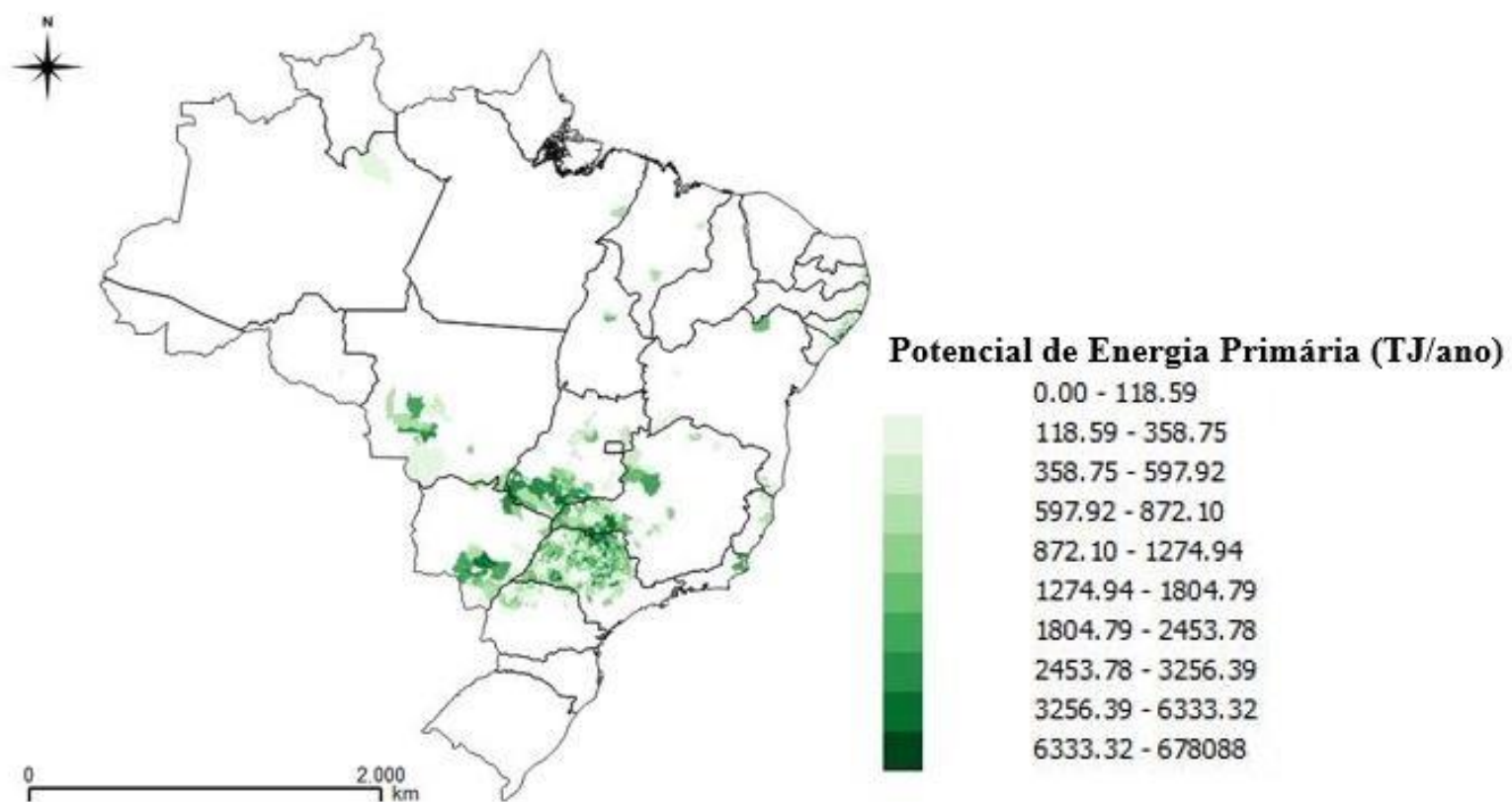


Figura 4.3: Mapa de distribuição do potencial de energia primária da palha de cana-de-açúcar no território brasileiro

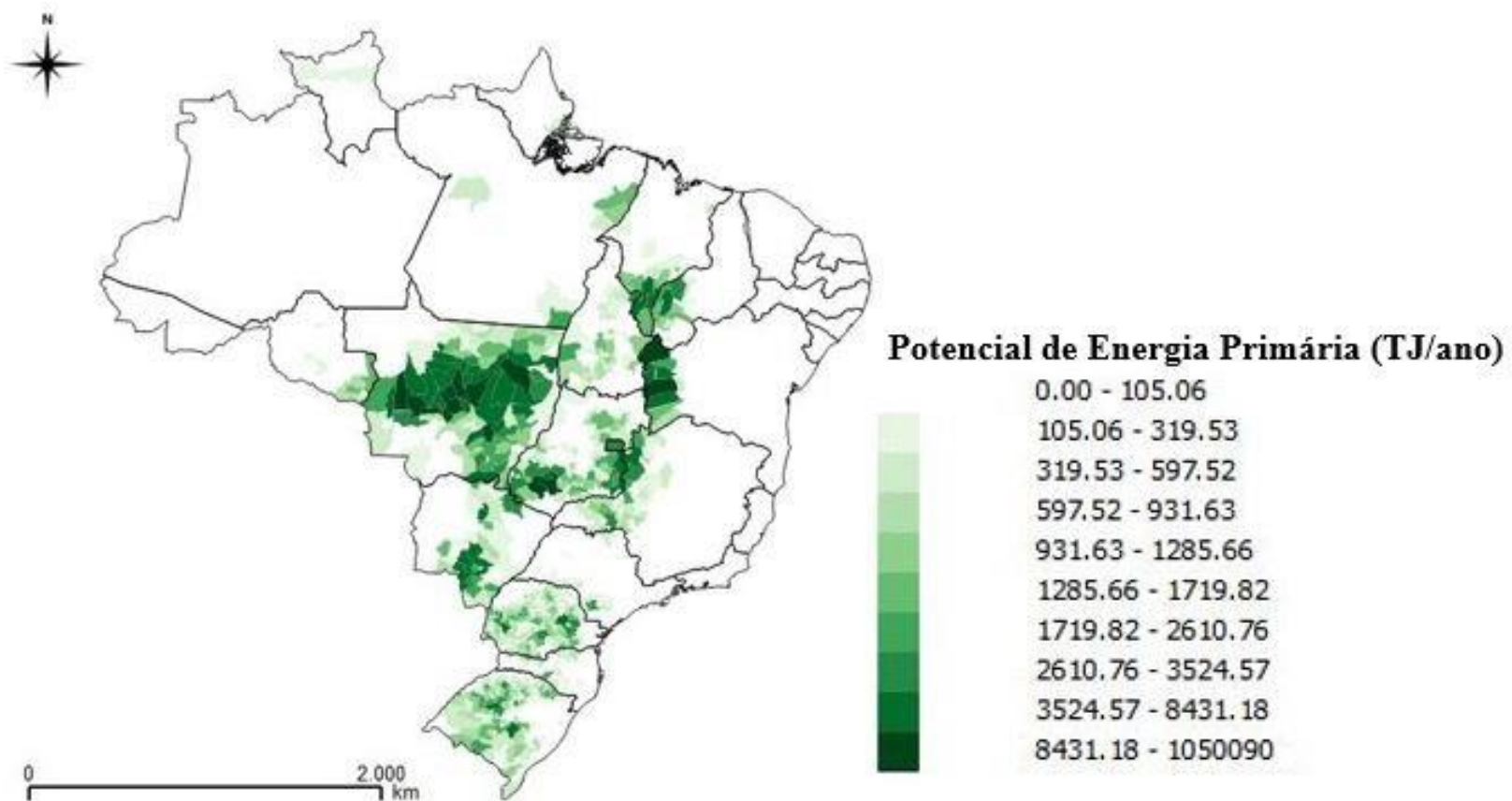


Figura 4.4: Mapa de distribuição do potencial de energia primária da palha de soja no território brasileiro

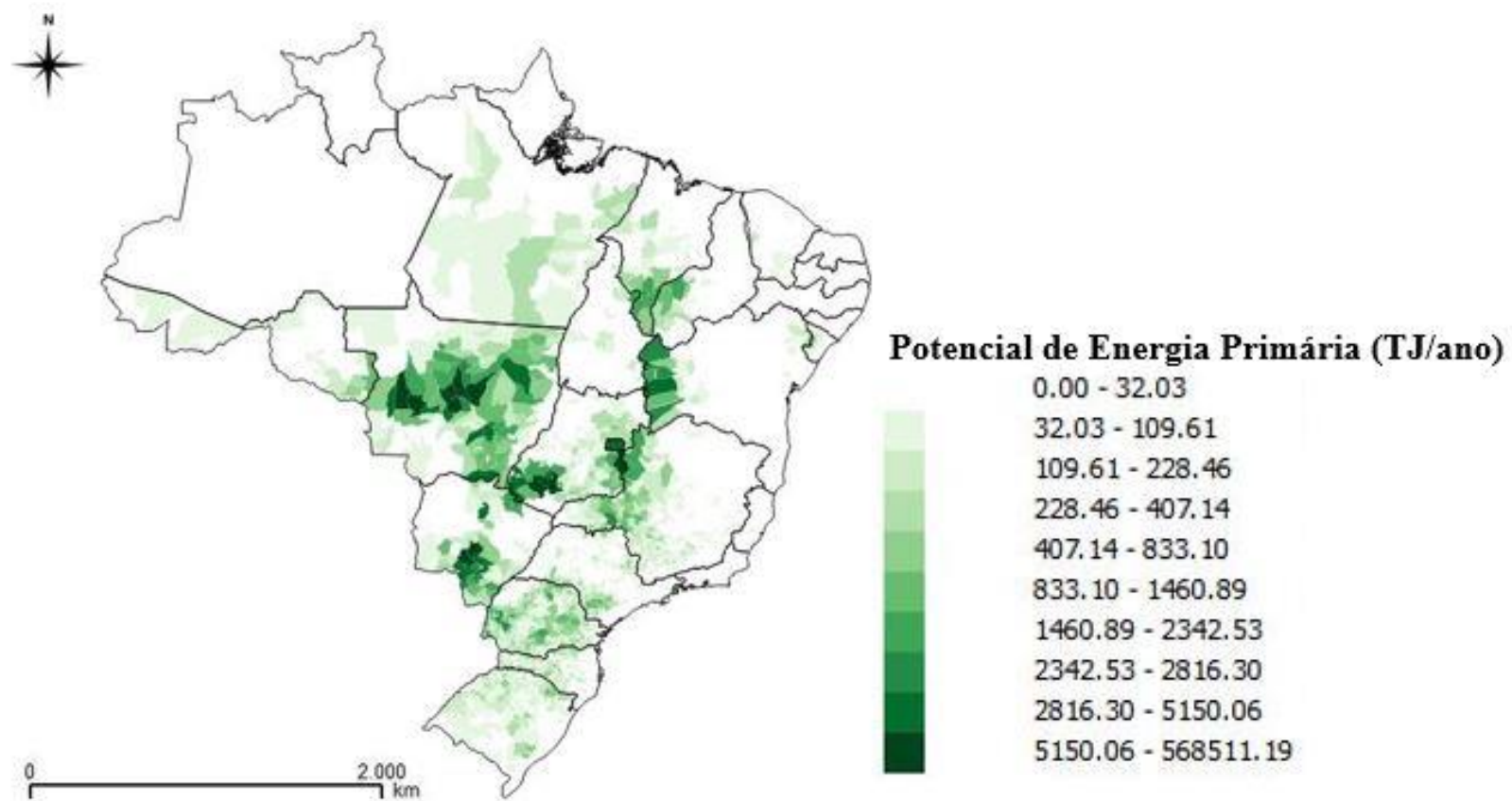


Figura 4.5: Mapa de distribuição do potencial de energia primária da palha de milho no território brasileiro

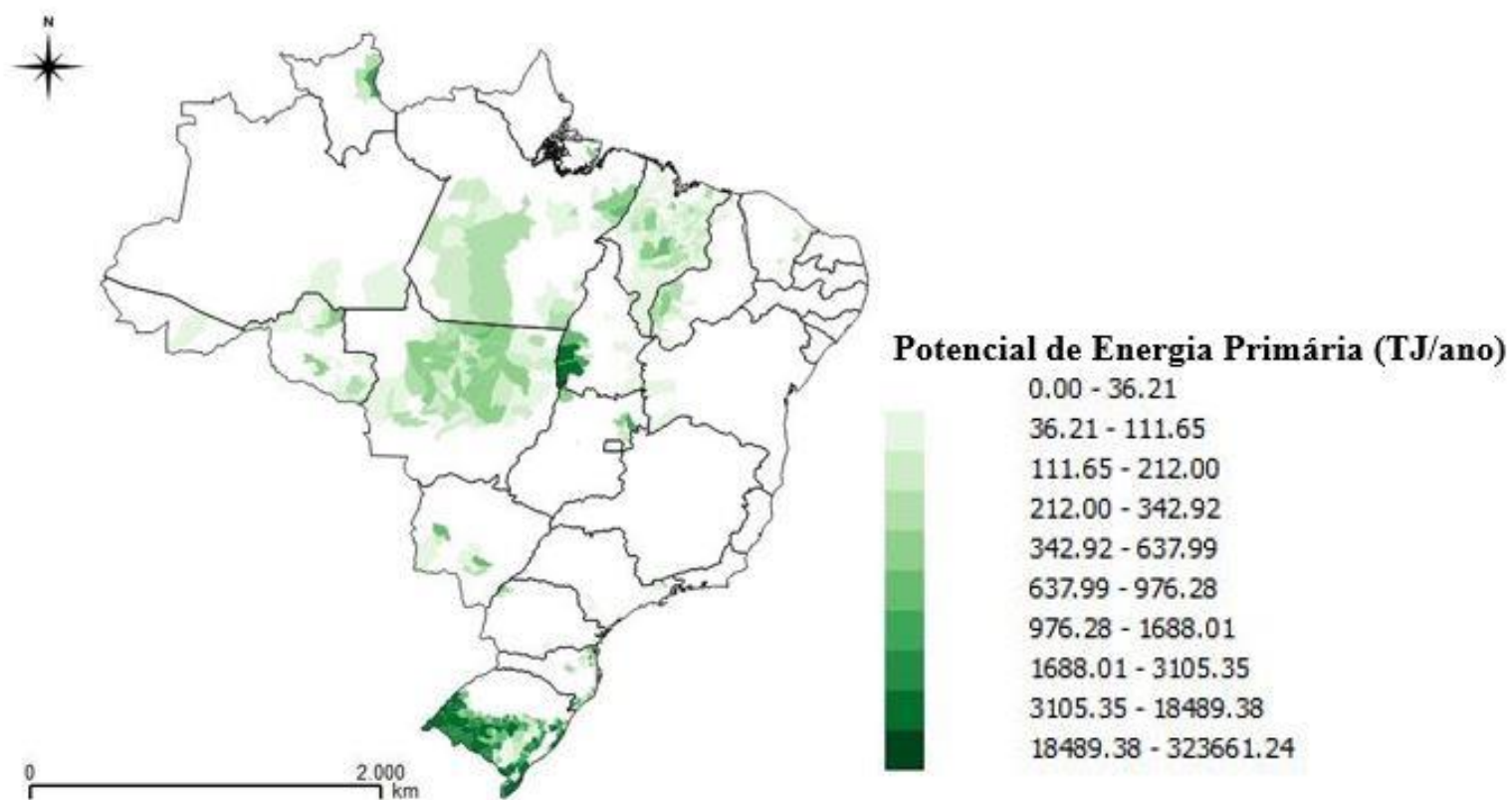


Figura 4.6: Mapa de distribuição do potencial de energia primária da palha de arroz no território brasileiro

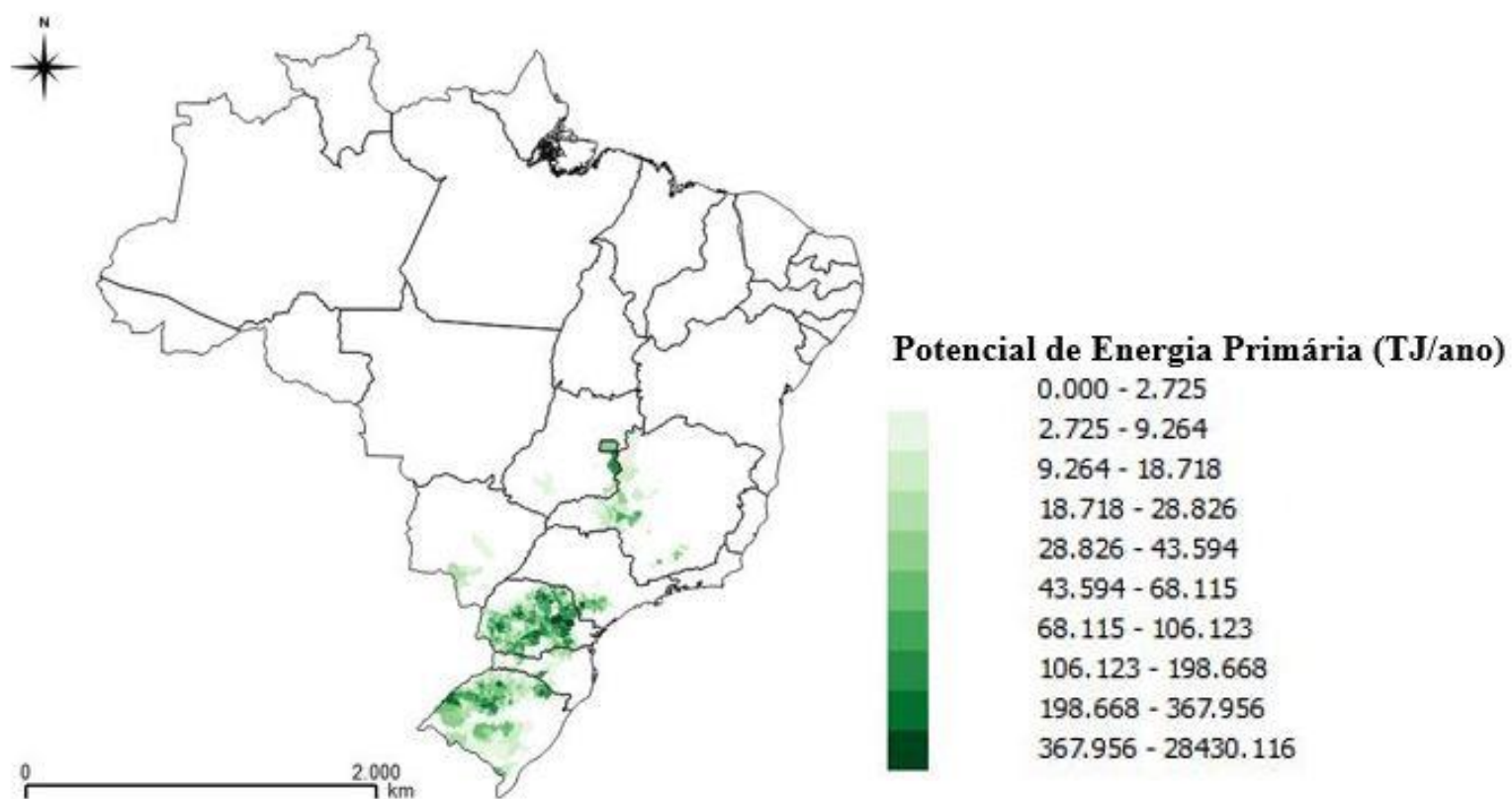


Figura 4.7: Mapa de distribuição do potencial de energia primária da palha de trigo no território brasileiro

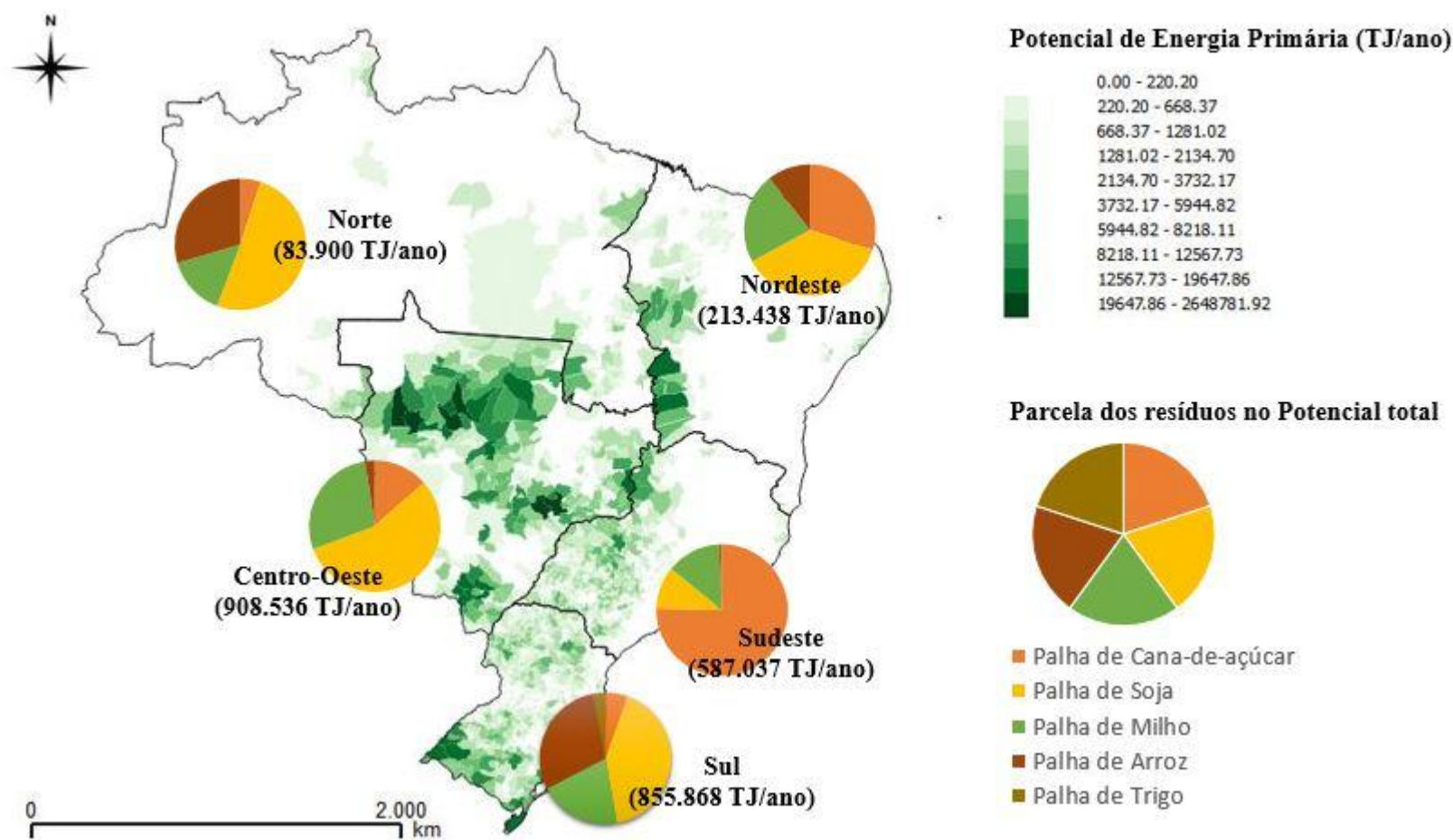


Figura 4.8: Mapa de distribuição do somatório do potencial de energia primária de todos os resíduos em cada município

Procedendo à confecção dos mapas de calor, que visou a identificação de *clusters*, foi gerado um mapa diferente para cada resíduo. Os *clusters* de cada biomassa foram considerados os locais onde há a conversão centralizada da biomassa, detalhada no capítulo 4. Ademais, a partir da localização pontual do *cluster* foi gerado o *buffer* que definiu os municípios congregados no escopo da análise como fornecedores de biomassa na cadeia de suprimentos bioenergética.

A Figura 4.9 exhibe o posicionamento de cada *cluster* sobre um mapa de calor para o somatório do potencial energético de todos os resíduos em cada município do território brasileiro. Vale ressaltar que o posicionamento dos *clusters* de soja e milho coincidiu no mesmo município (Sorriso/MT). As Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 apresentam uma ampliação dos *clusters* das palhas de cana-de-açúcar, soja (e milho), arroz e trigo, respectivamente. A Tabela 4.4 apresenta os municípios incluídos em cada *cluster* como fornecedores de biomassa, segundo o critério de *buffer* adotado, e a Tabela 4.5 exhibe o somatório dos potenciais, em massa e energia, de cada resíduo considerando apenas os municípios contemplados como fornecedores de biomassa. A Tabela 4.6 mostra as participações do potencial agregado de cada *cluster* no potencial total de sua biomassa e no somatório dos potenciais de todos os *clusters*.

No Anexo I são apresentados em detalhes os municípios fornecedores com seus respectivos potenciais em massa e energia, suas distâncias rodoviárias ao *cluster*, sua área e seu raio teórico, parâmetro importante para o cálculo dos custos de colheita, no capítulo 5. As distâncias rodoviárias dos municípios fornecedores de biomassa a seus respectivos *clusters* foram calculadas pelo *software* QGIS, com o auxílio do mapa das rodovias brasileiras retirado da base de dados de mapas do IBGE (IBGE, 2015). Para os municípios aos quais os *clusters* pertencem, arbitrou-se uma distância rodoviária de 25 km ao *cluster* (CARDOSO, 2014).

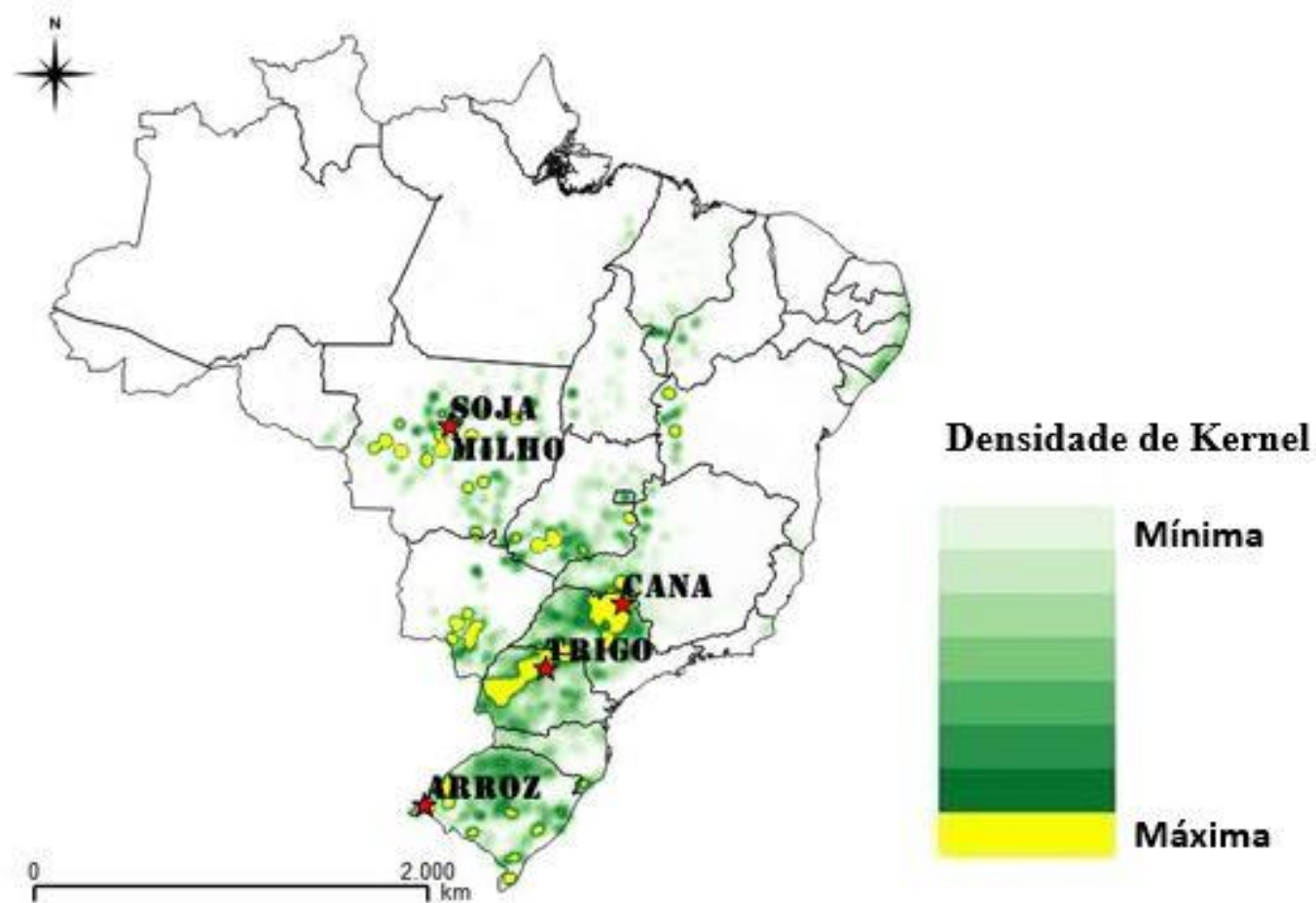


Figura 4.9: Mapa de calor com o somatório de todos os resíduos e o posicionamento de cada *cluster* no território do Brasil

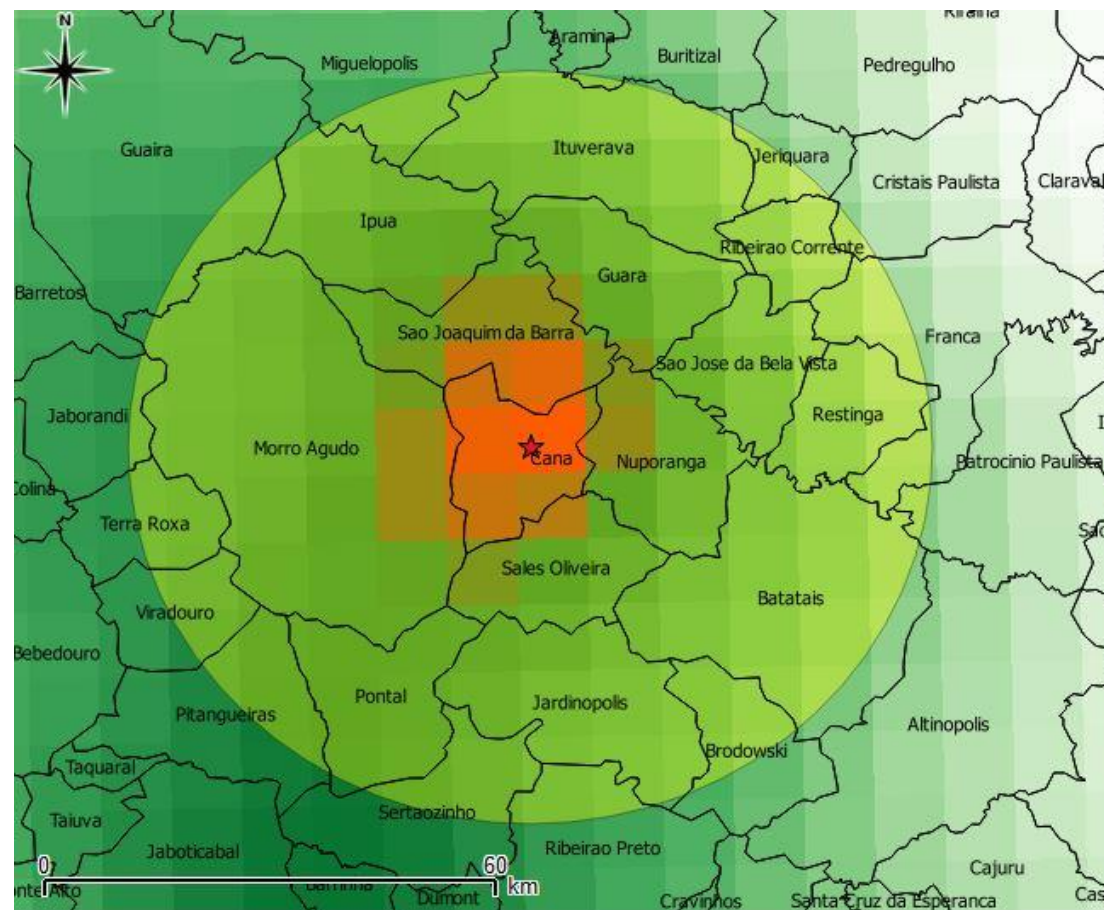


Figura 4.10: Ampliação do *cluster* de palha de cana-de-açúcar

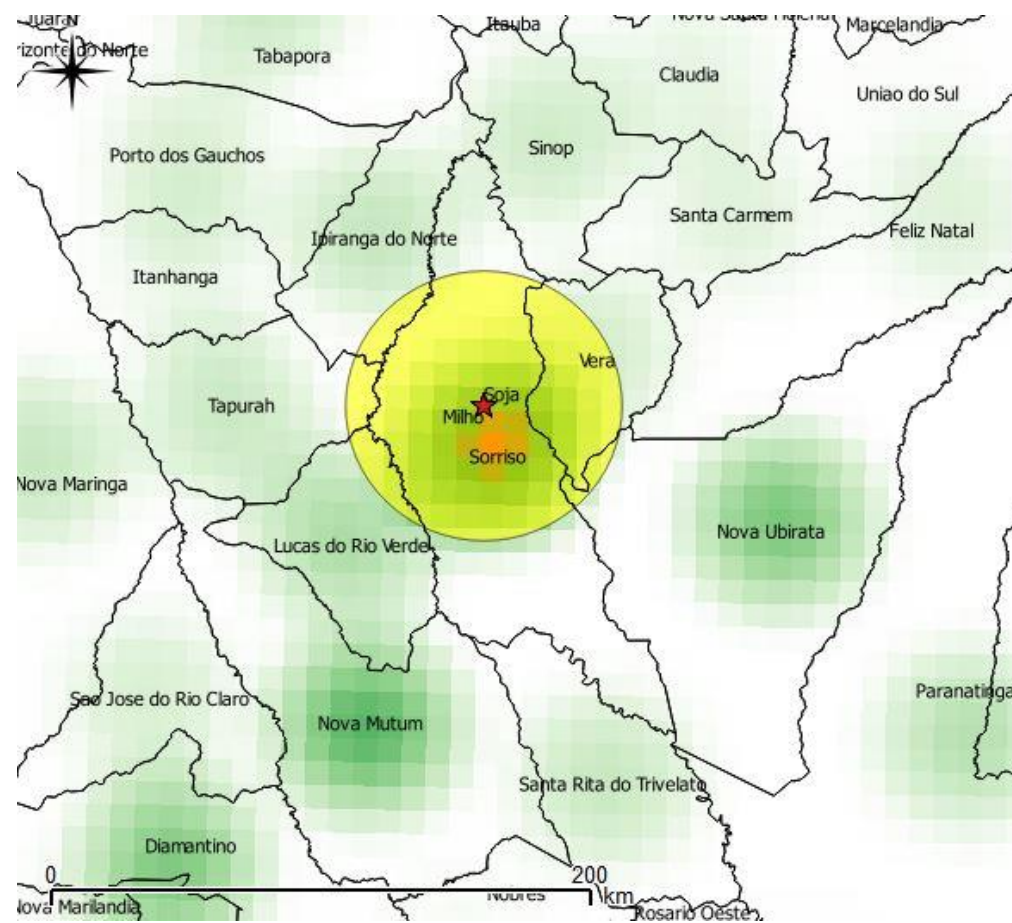


Figura 4.11: Ampliação do *cluster* de palha de soja e milho

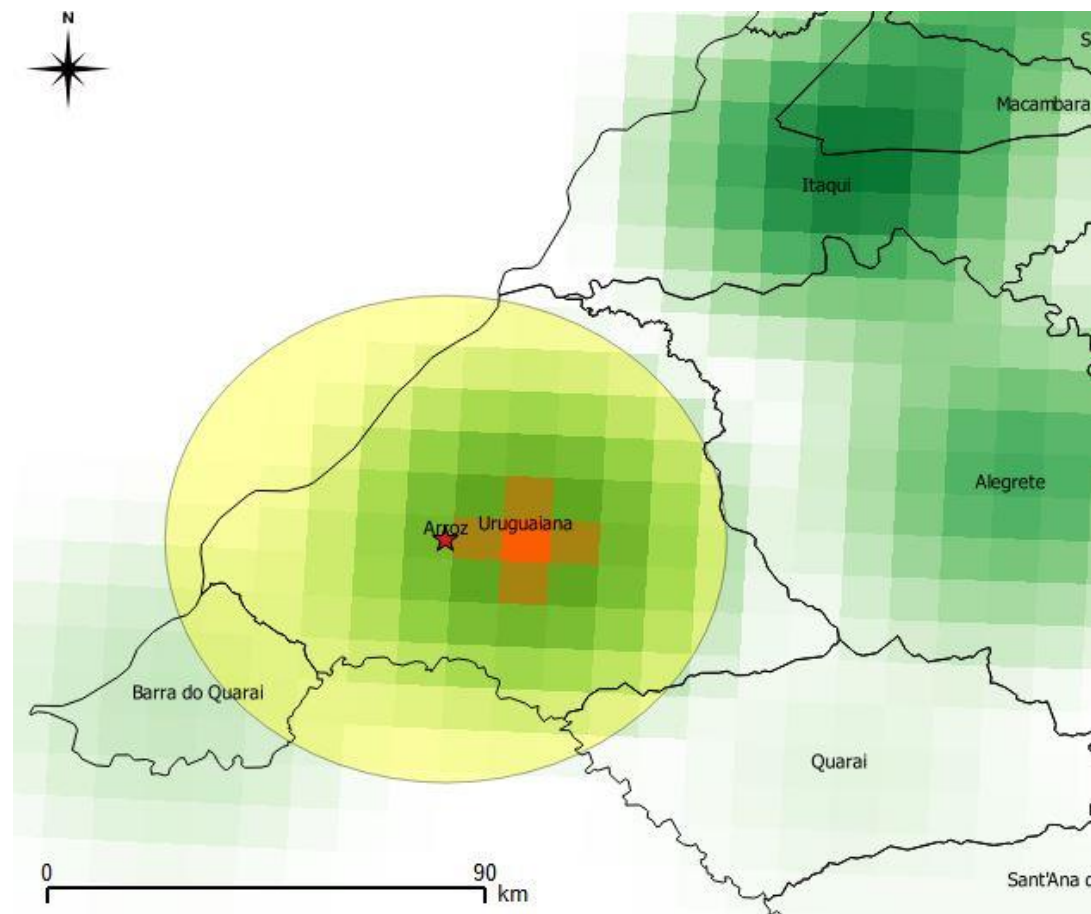


Figura 4.12: Ampliação do *cluster* de palha de arroz

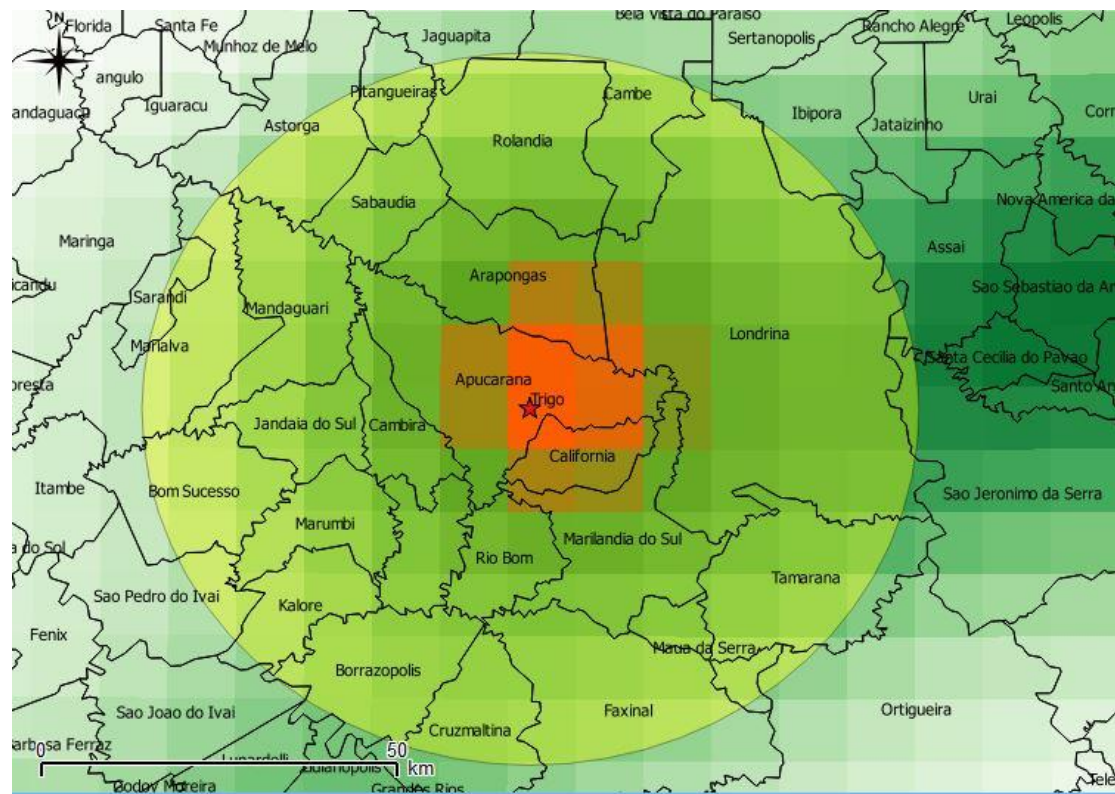


Figura 4.13: Ampliação do *cluster* de palha de trigo

Tabela 4.4: Municípios fornecedores de biomassa para cada *cluster*

Palha de cana-de-açúcar		Palha de soja e milho	Palha de arroz	Palha de trigo	
Orlândia*	Viradouro	Sorriso*	Uruguaiana*	Apucarana*	Tamarana
Sales Oliveira	Ribeirão Preto	Vera	Barra do Quaraí	Califórnia	Faxinal
Nuporanga	Pitangueiras	Lucas do Rio Verde	Itaqui	Arapongas	Cambé
São Joaquim da Barra	Franca	Sinop	Quaraí	Cambira	Sarandi
Morro Agudo	Jaborandi	Nova Ubiratã	Alegrete	Marilândia do Sul	Kaloré
Guará	Terra Roxa	Ipiranga do Norte		Londrina	Astorga
Jardinópolis	Restinga	Nova Mutum		Rio Bom	São Pedro do Ivaí
Batatais	Buritizal	Tapurah		Jandaia do Sul	Ibiporã
Pontal	Miguelópolis	Santa Rita do Trivelato		Novo Itacolomi	Borrazópolis
São José da Bela Vista	Jeriquara			Mandaguari	Cruzmaltina
Ituverava	Guaíra			Mauá da Serra	São João do Ivaí
Ipuã	Patrocínio Paulista			Sabáudia	Ortigueira
Brodowski	Cristais Paulista			Rolândia	Assaí
Sertãozinho				Marumbi	São Jerônimo da Serra
				Marialva	
* Município ao qual o <i>cluster</i> pertence					

Fonte: Elaboração própria

Tabela 4.5: Potencial em massa e energia para os municípios fornecedores de biomassa

Biomassa	Potencial de produção (kt/ano)	Potencial de energia primária (TJ/ano)
Palha de cana-de-açúcar	2.659,60	49.514,78
Palha de soja	4.407,43	88.553,29
Palha de milho	2.463,36	45.986,67
Palha de arroz	1.570,62	27.042,51
Palha de trigo	141,14	2.758,33
Total	11.242,14	213.855,57

Fonte: Elaboração própria

Tabela 4.6: Percentuais de participação do potencial dos *clusters*

Biomassa	Participação do potencial de energia primária do <i>cluster</i> no total para a biomassa	Participação do potencial de energia primária do <i>cluster</i> no total para os municípios fornecedores
Palha de cana-de-açúcar	7%	23%
Palha de soja	8%	41%
Palha de milho	8%	22%
Palha de arroz	8%	13%
Palha de trigo	10%	1%
Total	8%	100%

Fonte: Elaboração própria

4.4 Discussões

A análise das tabelas e figuras com os potenciais de energia primária de cada resíduo deixa claro o protagonismo da palha de soja, cana-de-açúcar e milho, respectivamente, sendo o potencial da palha de arroz consideravelmente inferior. O potencial advindo da palha de trigo é irrisório em comparação aos demais, podendo o aproveitamento energético desse resíduo somente possuir relevância em algum contexto local, sobretudo por ser um cultivo concentrado nos estados da região Sul. Entretanto, dificilmente representa de fato um recurso com potencial estratégico para o Brasil.

Também concentrado nos estados do sul do país, o resíduo do arroz, apesar de pouco significativo no montante do potencial de todas as regiões, apresenta grande participação no potencial energético da região Sul, que possui o segundo maior potencial energético de todos os resíduos combinados dentre as cinco regiões do Brasil. Assim, a palha de arroz pode ser um recurso energético relevante para a região Sul. Haja visto que os estados do sul do Brasil também concentram os recursos de carvão do país (EPE, 2016c), os resíduos da produção de arroz podem ser importantes fontes de biomassa no Brasil para o aproveitamento energético em conjunto com o carvão, seja via co-queima ou co-gasificação.

Ainda mais relevante do que a palha de arroz para a região Sul é a palha de cana-de-açúcar para a região Sudeste. O cultivo de cana-de-açúcar é concentrado na região, sobretudo no estado de São Paulo (UNICA, 2014). Ademais, o bagaço da cana-de-açúcar, outrora também visto como um resíduo, atualmente é a terceira fonte de geração mais importante da matriz elétrica brasileira, detendo 7,5% da potência outorgada, representado quase 80% da geração elétrica a biomassa no Brasil (UNICA, 2016a). Nesse sentido, a palha da cana-de-açúcar apresenta a grande vantagem, em relação às demais, de estar associada ao produto mais importante da bioenergia do Brasil.

As palhas de soja e milho aparecem com grande participação em ambas as regiões com maiores potenciais de energia primária, no Centro-Oeste e no Sul, sendo o resíduo da soja o mais relevante em termos de potencial. Isso está relacionado ao fato de o Brasil ser o segundo maior produto de soja no mundo (USDA, 2016). Nos mapas de potenciais, representados pela Figura 4.4 e pela Figura 4.5, verifica-se a existência de uma correlação das regiões que concentram alto potencial energético das duas culturas, sobretudo no estado do Mato Grosso, parte do Mato Grosso do Sul e no Oeste Baiano, na região do

Vale do São Francisco, zonas que integram o bioma do Cerrado. É possível que essa correlação entre a disponibilidade de ambos os resíduos esteja relacionada aos benefícios do sistema de rotação de culturas à produção de soja¹⁴, no qual o milho aparece como principal cultura de rotação (EMBRAPA, 2003). A observação de correlações dessa natureza apresenta relevância sob o ponto de vista do planejamento energético dos sistemas, pois a geração de dois ou mais resíduos em um mesmo local de produção por existência de um sistema rotacional de uso do solo pode representar não apenas um aumento da disponibilidade energética do sítio, mas também uma complementariedade sazonal na produção de resíduos ao longo do ano, garantindo assim um suprimento com maior regularidade à planta bioenergética.

As Figuras 4.3 a 4.7, que mostram mapas com a dispersão do potencial energético das biomassas no território brasileiro, exibem uma tendência de concentração dos principais resíduos agrícolas no eixo Centro-Sul do Brasil, conforme pressuposto na Tabela 4.3. Porém, cabe a ressalva na análise de tais mapas de que apesar do uso da mesma tonalidade de cor para representação do potencial, em cada mapa os tons de verde representam valores próprios, conforme a legenda indicada a sua direita, sendo impossível estabelecer comparações entre as figuras simplesmente pela observação da coloração.

O mapa com a densidade de Kernel para o somatório de todos os resíduos, apresentado na Figura 4.9, mostra em tonalidade amarela uma diversidade de pontos com concentração energética das palhas, na forma de uma miscelânea. Os pontos em formato de estrela representam os *clusters* de cada fonte, identificada pelo nome próximo ao ponto. Apesar da existência de diversos possíveis *clusters* de potencial energético para múltiplas biomassas, optou-se por trabalhar com as fontes individualmente, considerando que a operacionalidade das plantas industriais é beneficiada pela homogeneidade do suprimento, sob um viés conservador, ainda que a literatura não aponte restrições na alimentação dos equipamentos da torrefação pela mistura de diferentes biomassas, principalmente sendo todas palhas.

¹⁴ Tais benefícios incluem melhorias nas características físicas, químicas e biológicas do solo, auxílio no controle de pragas, doenças e daninhas, reposição de matéria orgânica, proteção do solo a agentes climáticos e facilita o Sistema de Plantio Direto, além da possibilidade de produção diversificada de *commodities* (EMBRAPA, 2003).

Da Figura 4.10 à Figura 4.13 há ampliações das regiões onde cada *cluster* se encontra, com os municípios vizinhos nomeados. Nota-se que os *clusters* das palhas de cana-de-açúcar e trigo localizam-se em regiões com municípios com pequena extensão territorial, sendo o potencial energético dividido em diversas localidades. Por outro lado, os *clusters* de palha de soja, milho e arroz estão em municípios maiores. Assim, o potencial energético é dividido em um menor número de municipalidades. Como o valor total do potencial energético de cada resíduo foi atribuído a um único ponto (centroide do polígono que compõe o município), para zonas com municípios de maior extensão territorial o resultado da análise de densidade de Kernel é menos precisa, já que há uma menor precisão dos pontos reais onde a se biomassa localiza. Idealmente, seriam levantados nos *clusters* dados do posicionamento preciso de cada propriedade rural e da respectiva produção agrícola, para então efetuar a análise por densidade de Kernel. Porém, a obtenção de dados com este nível de refinamento foge ao escopo da presente dissertação.

O potencial energético obtido para o país, considerando todos os resíduos em todos os municípios, foi da ordem de 2,6 EJ/ano de energia primária. Isso corresponde a cerca de 22% da produção total de energia primária do Brasil no ano de 2015, que foi de 12,0 EJ, e 84% da produção de energia primária a partir de biomassa no mesmo ano, que somou 3,1 EJ (EPE, 2016b). Analisando apenas os municípios fornecedores de biomassa de cada *cluster*, o somatório da energia primária dos resíduos agrícolas chega a 214 PJ/ano. Considerando uma conversão termoelétrica com eficiência de 20%, equivalente ao valor atribuído por TOLMASQUIM (2004) à tecnologia de turbina com ciclo de extração e condensação para biomassa, esse potencial energético é capaz de gerar 11.881 GWh de energia elétrica por ano, o que corresponde a 53% do montante da geração elétrica a biomassa e 3% do consumo total de eletricidade do Brasil em 2015 (UNICA, 2016a). Desta feita, há um grande potencial energético no Brasil associado ao aproveitamento sustentável dos resíduos agrícolas das principais culturas no Brasil.

No mais, o arranjo dos resíduos em *clusters* mostrou-se como uma boa ferramenta para identificação de localidades com elevada concentração de recursos agroenergéticos dispersos no território do país. Cada *cluster* concentrou de 7% a 10% de todo o potencial energético disperso no país e o somatório do potencial energético nos *clusters* foi equivalente a 8% do território do país, sendo que a área combinada de todos os municípios que integram os *clusters* corresponde a 1% da área total do Brasil. Ademais, a divisão do

potencial energético entre os *clusters* guardou coerência com as participações das biomassas no montante de energia primária do país, possuindo o *cluster* da palha de soja o maior percentual, seguido da palha da cana-de-açúcar, do milho e do arroz. O *cluster* de palha de trigo, conforme a participação do recurso no potencial total para o Brasil apresentou uma contribuição pequena ao potencial energético frente aos demais, de apenas 1% como pode ser verificado na Tabela 4.6.

5. Modelagem da cadeia de suprimentos da bioenergia

5.1 Metodologia

A partir dos resultados de potenciais de energia primária advindos dos resíduos agrícolas e dos mapas com os *clusters* para cada palha no território brasileiro, procedeu-se a modelagem técnico-econômica de cadeias de suprimentos para o aproveitamento energético de cada resíduo. Os municípios incluídos no escopo dessa análise como fornecedores de biomassa seguem o procedimento metodológico apresentado no capítulo 4, estando listados na Tabela 4.4.

Em linhas gerais, a configuração das cadeias de suprimentos dá-se da seguinte forma. Toda a biomassa de cada município é recolhida do campo e transportada a seu respectivo centroide, onde ocorre a primeira conversão da matéria, podendo ser esta uma das modalidades de pré-tratamento ou a conversão ao vetor energético final diretamente, nos casos onde a geração de energia é feita de maneira descentralizada. Para os casos de geração centralizada, após o pré-tratamento o montante de biomassa de todos os municípios fornecedores é reunido no ponto que corresponde ao seu respectivo *cluster*, onde ocorre a conversão.

O modelo desenvolvido para a cadeia de suprimentos da bioenergia apresentou como pontos de operação a colheita dos resíduos no campo, as fases industriais (pré-tratamento e conversão energética) e as etapas logísticas (transporte, manuseio e armazenamento). A fase de colheita da biomassa considerou a retirada da biomassa do campo e seu transporte até a primeira estação industrial da cadeia de suprimentos.

Como pré-tratamento, consideraram-se as modalidades de torrefação e peletização combinadas, de somente peletização e de utilização da biomassa no estado natural, ou seja, sem pré-tratamento. Para conversão energética, considerou-se o vetor tecnológico de gasificação da biomassa, sendo os resultados obtidos em termos de energia térmica do gás de síntese, em unidades apropriadas. As combinações das modalidades de pré-tratamento com a conversão final geraram os casos a serem analisados.

No que concerne à logística da cadeia, as operações foram incluídas de acordo com as demandas ao longo da cadeia de suprimentos. Como manuseio entendem-se as etapas de carga e descarga e toda a movimentação da matéria no interior das instalações

industriais. Assim, foi considerada uma etapa genérica de manuseio, em termos de custo e perdas técnicas, a cada transferência do material entre pontos de operação da cadeia. O transporte abrangeu a movimentação de matéria nas regiões externas às plantas industriais, ressaltando que o transporte da biomassa crua desde o campo ao centroide foi incluído no escopo da fase de colheita. Assim, no caso em que não foi considerada nenhuma etapa de pré-tratamento não houve etapa de transporte no escopo da logística, apenas na colheita. Na etapa de armazenamento do material, para os casos com pré-tratamento, foram consideradas duas possibilidades: o armazenamento da totalidade da biomassa crua, a montante do processo de pré-tratamento, e o armazenamento de toda a biomassa pré-tratada, a jusante do pré-tratamento. Essa avaliação do posicionamento do armazenamento na cadeia deu-se para avaliar o compromisso entre uma estocagem mais cara (biomassa crua) e um pré-tratamento mais custoso (superdimensionado), que é discutido amiúde na subseção da metodologia sobre armazenamento.

A Figura 5.1 e a Figura 5.2 apresentam fluxogramas com as etapas da cadeia de suprimentos bioenergéticas com armazenamento de biomassa a montante e a jusante do pré-tratamento, respectivamente, e a Tabela 5.1 exibe os casos da análise com uma breve descrição de suas estruturas.

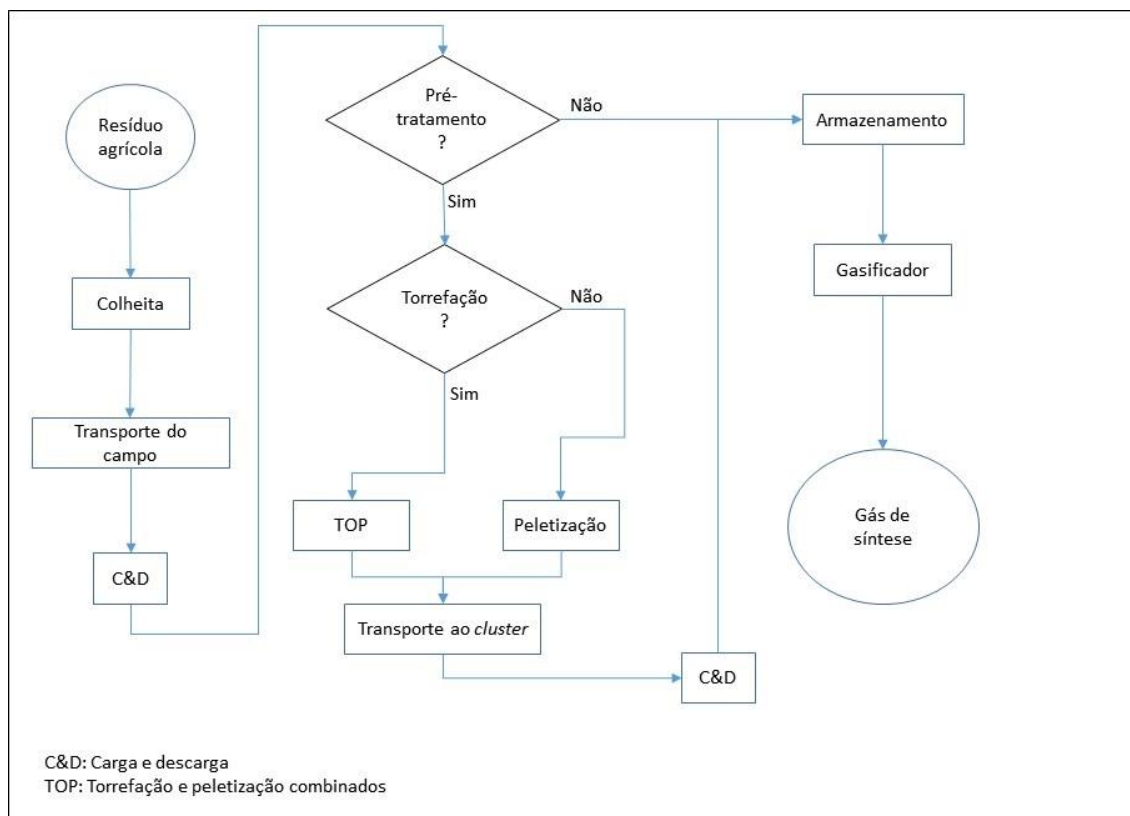


Figura 5.1: Fluxograma das cadeias de suprimentos bioenergéticas com armazenamento a jusante do pré-tratamento (Casos “A”)

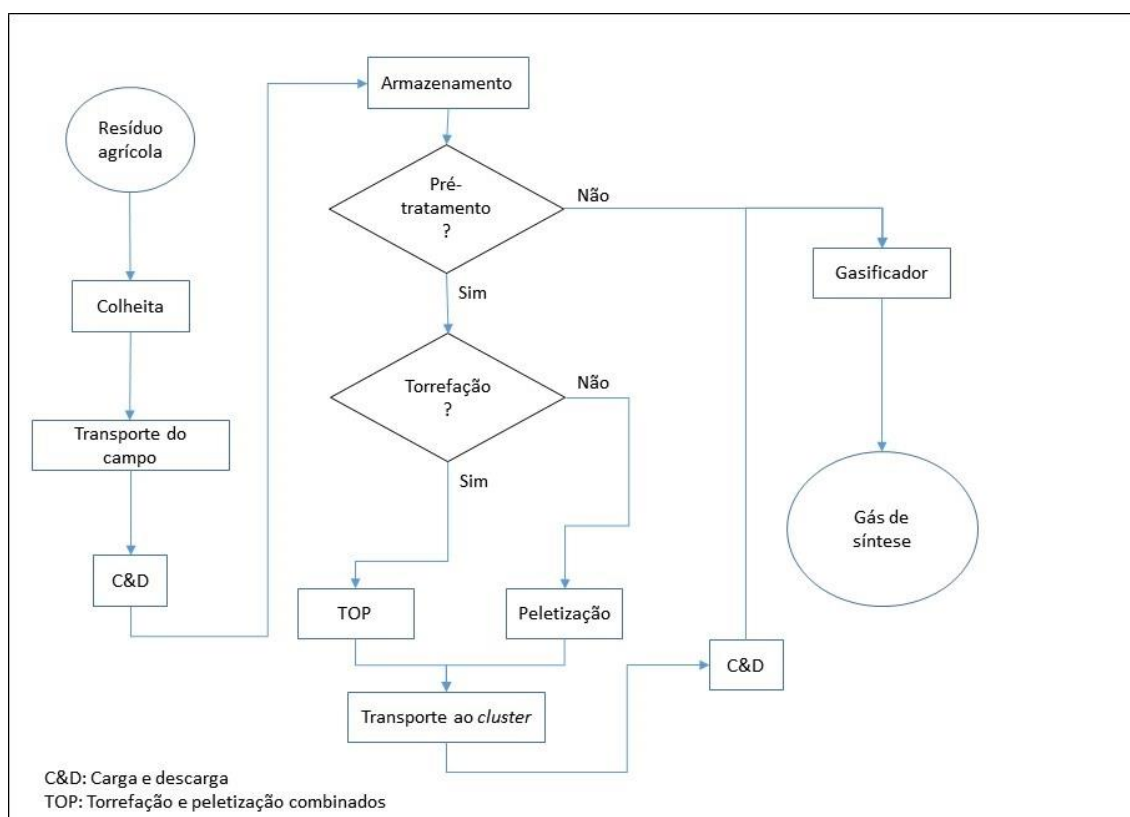


Figura 5.2: Fluxograma das cadeias de suprimentos bioenergéticas com armazenamento a montante do pré-tratamento (Casos “B”)

Em cada caso foram efetuadas as simulações para todas as palhas individualmente. Também foi efetuada uma simulação para a combinação da palha de soja com a palha de milho, devido à coincidência dos *clusters* de ambos os resíduos no mesmo município. Os dados de PCI e teor de umidade de cada palha são os mesmos utilizados nos cálculos do capítulo anterior, estando disponíveis na Tabela 4.1. Para a simulação da combinação das palhas de soja e milho foram utilizados os valores mais conservadores dos dois parâmetros, ou seja, o menor valor de PCI e o maior teor de umidade.

Tabela 5.1: Descrição dos estudos de caso

Caso	Descrição
G1	Gasificação descentralizada de biomassa crua
G2A	Gasificação de bio-carvão com armazenamento a jusante
G2B	Gasificação de bio-carvão com armazenamento a montante
G3A	Gasificação de pellets com armazenamento a jusante
G3B	Gasificação de pellets com armazenamento a montante

Fonte: Elaboração própria

Para os cálculos financeiros, foi usada uma taxa de desconto constante no valor de 10% ao ano, conforme utilizado em KHATIWADA *et al.* (2016). Os valores foram atualizados pelo índice resumido anual CEPCI para o ano de 2015 (CHEMICAL ENGINEERING, 2016), com auxílio da Equação 5.1. O Fator de Escala (FE) escolhido para utilização, sempre que aplicável, foi o geométrico, igual a dois terços.¹⁵ As taxas de câmbio de dólar e euro para real foram retiradas da página eletrônica do Banco Central do Brasil como a média do segundo semestre do ano de 2015, sendo os valores de 3,81 R\$/USD e 4,19 R\$/EUR, respectivamente (BB, 2015). O preço considerado para a energia elétrica foi de R\$ 200/MWh, valor arredondado do preço médio definido no leilão de energia nova A-5 da EPE realizado no ano de 2016 (EPE, 2016a). O preço atribuído ao óleo diesel foi de R\$ 3,14/L, preço médio dado pela ANP para o diesel S-10 no Brasil no intervalo de outubro a dezembro de 2016 (ANP, 2016). Para o gás natural, arbitrou-se um valor de R\$ 2,00/m³, uma vez que a tarifa varia de acordo com a companhia de

¹⁵ Trata-se da razão entre o expoente de cálculo da área pelo do volume, representando desta forma que o custo de um ativo varia em termos da área construída enquanto que a capacidade do equipamento se altera com o volume.

distribuição do estado no qual o empreendimento é realizado e com a faixa de consumo da indústria. O valor estimado encontra-se dentro da faixa de preços cobrados para consumidores industriais pela companhia de distribuição de gás natural que atende o estado do Rio Grande do Sul, a SULGÁS (SULGÁS, 2016). A Tabela 5.2 apresenta os parâmetros de auxílio aplicados na modelagem.

Tabela 5.2: Parâmetros auxiliares à modelagem

Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
Câmbio Real-Dólar	3,81	BRL/USD	BB (2015)
Câmbio Real-Euro	4,19	BRL/EUR	BB (2015)
Preço da Eletricidade	200,00	R\$/MWh	EPE (2016)
Preço do Gás Natural	2,00	R\$/m ³	ANP (2016)
Preço do Óleo Diesel	3,14	R\$/L	SULGÁS (2016)
Taxa de desconto	10	% a.a.	KHATIWADA <i>et al.</i> (2016)

Fonte: Elaboração própria

$$Valor_{2015} = Valor_x * CEPCI_{2015} / CEPCI_x \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde: Valor₂₀₁₅: Valor do parâmetro atualizado para o ano de 2015 [US\$]

Valor_x: Valor do parâmetro no ano da referência original [US\$]

CEPCI₂₀₁₅: Valor do índice para 2015 [-]

CEPCI_x: Valor do índice para o ano da referência original [-]

Na análise financeira, após a determinação dos custos em cada etapa, foi efetuado o cálculo do custo nivelado, computado pela Equação 5.2.

$$LC = \frac{(CI * FRC + CF + CV)}{X} \quad \text{Equação 5.2}$$

Onde: LC: Custo nivelado

CI: Custo de Investimento

FRC: Fator de Recuperação do Capital¹⁶

CF: Custo Fixo

CV: Custo Variável

X: Variável de nivelamento (produção mássica ou energética)

5.1.1 Cálculo de Sazonalidade

Dado que a produção das *commodities* agrícolas consideradas e, consequentemente, de seus respectivos resíduos ocorre de forma sazonal, foi efetuada uma análise da forma como a produção é fracionada ao longo do ano. É importante considerar a sazonalidade na modelagem, sobretudo para o dimensionamento da operação logística de armazenamento. Ademais, nos casos em que não há armazenamento anterior ao pré-tratamento, os equipamentos desta etapa devem ser dimensionados de maneira a poder processar a matéria-prima no momento em que há o pico da produção, já que o trabalho visa o levantamento do potencial de aproveitamento de toda a energia dos resíduos. Assim, nos casos G2A e G3A há um superdimensionamento das estruturas de pré-tratamento.

A Tabela 5.3 exibe a distribuição em nível mensal da produção dos resíduos ao longo do ano, baseado em dados obtidos para os produtos originários. A sazonalidade da cana-de-açúcar foi calculada com base no histórico da moagem na região Centro-Sul da safra 2015-2016 (UNICA, 2016b). A sazonalidade dos cultivos de soja, milho e arroz foram obtidas de OLIVEIRA (2011). Para o trigo não foram encontrados valores numéricos que representassem explicitamente a distribuição anual da produção. Assim, foi feita uma estimativa com base no calendário agrícola da CONAB (CONAB, 2016). Para o caso do aproveitamento conjunto das palhas de soja e milho, somaram-se as produções de cada cultura em cada mês, obtendo-se ao final a distribuição mensal do potencial energético agregado. Marcou-se em vermelho e negrito na tabela as participações mensais máximas para cada cultura, sendo os respectivos valores denominados como Fator de Sazonalidade (FS). Nos casos em que se faz necessário o

¹⁶ O FRC objetiva anualizar o investimento inicial com base na taxa de desconto definida e no tempo de duração do projeto. É calculado pela seguinte Equação: $FRC = \frac{r \cdot (1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$, onde r é a taxa de desconto anual e n é a duração do projeto em anos.

superdimensionamento dos sistemas de pré-tratamento, estes devem ser feitos com base nesse fator.

Tabela 5.3: Sazonalidade das culturas selecionadas

Cultura	Mês do ano											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cana-de-açúcar	2%	1%	1%	4%	9%	13%	12%	16%	12%	13%	10%	7%
Soja	20%	30%	30%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Milho	0%	1%	1%	1%	18%	31%	20%	18%	9%	0%	0%	0%
Arroz	17%	17%	29%	29%	9%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Trigo	30%	20%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	15%	20%
Soja+Milho	13%	20%	20%	13%	7%	11%	7%	6%	3%	0%	0%	0%

Fonte: Elaboração própria com base em CONAB (2016); OLIVEIRA (2011) UNICA (2016b)

O cálculo da sazonalidade para auxílio no dimensionamento da operação de armazenamento foi efetuado tendo em vista a menor quantidade mensal acumulada de massa possível. Para tal, considerando uma retirada equânime em todos os meses do ano (equivalente a um $1/12$, ou 8,33%, ao mês), o estoque deve ser zerado no último mês em que a produção é deficitária, ou seja, inferior ao valor retirado do armazém. As Equações 5.3 e 5.4 apresentam o roteiro do cálculo. Os valores do acúmulo mensal de biomassa para cada cultura encontram-se na Tabela 5.4.

$$ETQ_{i,j,0} = 0 \quad \text{Equação 5.3}$$

$$ETQ_{i,j,m+1} = ETQ_{i,j,m} + PP_{i,j,m+1} - 1/12 \quad \text{Equação 5.4}$$

Onde: $ETQ_{i,j,0}$: Estoque no município i do resíduo j no último mês deficitário [%]

$ETQ_{i,j,m}$: Estoque no município i do resíduo j no mês m [%]

$PP_{i,j,m}$: Parcela da produção no município i do resíduo j no mês m [%]

Tabela 5.4: Acúmulo mensal da biomassa ao longo do ano

Produto Agrícola	Mês do Ano																							
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cana-de-açúcar	X	X	X	0%	0%	5%	9%	17%	20%	25%	27%	25%	19%	12%	4%	0%	0%	5%	9%	17%	20%	25%	27%	25%
Soja	12%	33%	55%	67%	58%	50%	42%	33%	25%	17%	8%	0%	12%	33%	55%	67%	58%	50%	42%	33%	25%	17%	8%	0%
Milho	X	X	X	0%	10%	33%	44%	54%	55%	46%	38%	30%	21%	14%	7%	0%	10%	33%	44%	54%	55%	46%	38%	30%
Arroz	9%	18%	38%	58%	58%	50%	42%	33%	25%	17%	8%	0%	9%	18%	38%	58%	58%	50%	42%	33%	25%	17%	8%	0%
Trigo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0%	7%	18%	40%	52%	58%	50%	42%	33%	25%	17%	8%	0%	7%	18%
Soja e Milho	4%	16%	27%	32%	30%	33%	32%	30%	25%	17%	8%	0%	4%	16%	27%	32%	30%	33%	32%	30%	25%	17%	8%	0%

Fonte: Elaboração própria.

5.1.2 Colheita

A etapa de colheita compreende a retirada da palha do campo e transporte desde a unidade produtora até o primeiro ponto de conversão da cadeia de suprimentos, localizado no centroide do município de origem do recurso.

Na retirada das palhas do campo, optou-se por fazê-la via enleiramento e enfardamento. Para fins de simplificação do modelo, considerou-se que todas as palhas apresentam propriedades idênticas, no que se refere a esta operação. Tais propriedades encontram-se na Tabela 5.5. Para o transporte dos fardos ao centroide do município, dado que foram utilizados dados agregados por município para o cálculo do potencial mássico de produção das palhas, não se sabe ao certo a distância a ser percorrida pelos veículos de carga nesse transporte. Porém, espera-se um trajeto maior dos resíduos em municípios de grandes dimensões em relação aos municípios menores. Assim, para inserir a questão da dimensão dos municípios no cálculo do custo de transporte, dadas as áreas dos municípios (IBGE, 2015) foi calculado um raio teórico para cada município, supondo geometria circular. Esse raio foi considerado como a distância média de transporte das palhas desde a unidade produtora ao centroide do município. Seu cálculo seguiu a Equação 5.5.

Tabela 5.5: Parâmetros-base para a operação de colheita

Parâmetro	Valor	Unidade
Densidade dos Fardos	180	kg/m ³
Dimensões dos Fardos	0.9x1.2x2.3	m
Distribuição da palha recolhida	3,2	t/ha
Massa anual de palha	280	kt

Fonte: Adaptado de CARDOSO (2014)

$$RT_i = \sqrt{A_i/\pi}$$

Equação 5.5

Onde: RT_i : Raio teórico de transporte do município i [km]

A_i : Área do município i [km²]

No que tange os custos de retirada e transporte, também foi considerado que estes são iguais para as diferentes palhas. Vale ressaltar neste ponto que os custos de investimento e os operacionais para o recolhimento da palha são de natureza marginal, pois já há uma base de ativos, infraestrutura e mão-de-obra preparada para a colheita do produto principal, dos quais boa parte pode ser aproveitada também para a retirada do resíduo. Assim, os custos de colheita e transporte das palhas foram calculados com base em CARDOSO (2014), através da diferença entre as configurações com e sem os equipamentos de colheita da palha. Os valores dos custos encontram-se destacados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Custos do Sistema-Base de colheita e transporte das palhas

Parâmetro	Valor	Unidade
Escala-base de colheita anual de palha	280	kt _{palha} /ano
Investimento na colheita	3,0	MUS\$
Operação e Manutenção na colheita	1,1	MUS\$/ano
Diesel com enleirador e enfardador	3,2	L/t
Diesel com transporte	163	L/(kt.km)

Fonte: Adaptado de CARDOSO (2014)

O cálculo dos custos de investimento (CI) e de manutenção e operação fixos (CF) para o mecanismo de recolhimento de palha levou em conta economias de escala em relação ao sistema base, dado por CARDOSO (2014). Já para os custos variáveis (CV), neste caso expressos exclusivamente pelo gasto com óleo diesel no maquinário, não foram consideradas economias de escala. Na operação de transporte, foi considerado que os próprios caminhões responsáveis pelo transporte da *commodity* fazem o carregamento das palhas. Logo, investimentos e custos de manutenção e operação incrementais para o transporte foram desconsiderados, sendo apenas as despesas com óleo diesel consideradas no modelo. Haja visto que a diferença na produtividade para cada palha influencia a distância percorrida pelos equipamentos de colheita e, por conseguinte, o consumo de combustível, o custo com óleo diesel para cada sistema foi ponderado pela produtividade da respectiva biomassa. Os dados de produção de cada palha por unidade de área estão dispostos na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Produtividade das biomassas

Resíduo	Produtividade da <i>commodity</i> (t/ha) ¹	Produtividade da palha (t/ha) ²
Palha de Cana-de-açúcar	75,0	3,7
Palha de Soja	3,1	1,9
Palha de Milho	5,4	2,1
Palha de Arroz	8,4	6,5
Palha de Trigo	2,9	0,7

1: Valor da produtividade agrícola média para o ano de 2014 nos municípios onde localizam-se os respectivos *clusters*

2: Produto do valor de produtividade das *commodities* pelos parâmetros da Tabela 4.1 (RRP, FDR e TDS)

Fonte: Adaptado de IBGE (2016)

Os valores de CI, CF e CV para as etapas de colheita e transporte foram calculados pelas Equações 5.6 a 5.9.

$$CI_{C,ij} = CI_{C,base} * (M_{ij}/M_{base})^{FE} \quad \text{Equação 5.6}$$

$$CF_{C,ij} = CF_{C,base} * (M_{ij}/M_{base})^{FE} \quad \text{Equação 5.7}$$

$$CV_{C,ij} = M_{ij} * C_{C,Diesel} * P_{Diesel} * PP_{base}/PP_j \quad \text{Equação 5.8}$$

$$CV_{TP,ij} = M_{ij} * C_{TP,Diesel} * P_{Diesel} * RT_i \quad \text{Equação 5.9}$$

Onde: $CI_{C,ij}$: Custo de Investimento em colheita no município i do resíduo j [US\$]

$CI_{C,base}$: Custo de Investimento base em colheita [US\$]

M_{ij} : Produção no município i do resíduo j [kt/ano]

M_{base} : Escala-base de produção de palha [kt/ano]

FE: Fator de escala [-]

$CF_{C,ij}$: Custo Fixo de O&M em colheita no município i [US\$/ano]

$CF_{C,base}$: Custo Fixo base de O&M em colheita [US\$/ano]

$CV_{C,ij}$: Custo Variável em colheita no município i [US\$/ano]

$C_{C,Diesel}$: Consumo de diesel na colheita [l/kt]

P_{Diesel} : Preço do litro de diesel [US\$/l]

PP_{base} : Produtividade das palhas do sistema base (t/ha)

PP_j : Produtividade do resíduo j (t/ha)

$CV_{TP,ij}$: Custo variável em transporte primário no município i do resíduo j [US\$/ano]

$C_{TP,Diesel}$: Consumo de diesel no transporte primário [l/kt.km]

RT_i : Raio teórico de transporte primário do município i [km]

Ademais, foi atribuído à etapa de transporte primário da biomassa um índice de perda técnica de 2% da biomassa original na disponibilidade para o próximo estágio da cadeia de suprimentos (SVANBERG *et al.*, 2013).

5.1.3 Armazenamento

Conforme mencionado na descrição dos estudos de caso, duas modalidades de armazenamento na cadeia logística foram abordadas: a montante ou a jusante dos processos de pré-tratamento. Naturalmente, para os casos sem pré-tratamento excluem-se essas opções. Nos casos que adotam a modalidade “a jusante”, foi incluído no nome o índice “A”, e nos casos “a montante”, inclui-se o índice “B”.

Essa opção por duas abordagens dá-se com vistas a avaliar o armazenamento da biomassa na forma crua e na forma pré-tratada, cada qual apresentando uma diferente função. Para os casos “B”, o armazenamento da biomassa dá-se no estado cru, o que representa altos custos, devido à baixa densidade, difícil manuseio e alta susceptibilidade à degradação biológica (BATIDZIRAI *et al.*, 2013). Por outro lado, um armazenamento a montante do pré-tratamento tem papel regulatório quanto à questão sazonal, permitindo uma alimentação regular do posterior processo de pré-tratamento. Consequentemente, perde-se a necessidade de superdimensionamento deste, o que, em tese, reduz custos. Já nos casos “A”, faz-se presente o superdimensionamento do pré-tratamento, visto que este deve ser projetado para acompanhar a sazonalidade do suprimento de biomassa ao longo do ano, sendo capaz de processar a carga no mês em que a produção atinge seu pico. Assim, em meses fora do pico de suprimento, a planta operará com capacidade ociosa ou

até mesmo ficará inativa. Porém, o armazenamento de pellets e bio-carvão é menos custoso em relação à biomassa crua, pois são materiais mais densos, com forma bem definida – que facilita o manuseio – e apresentam menor susceptibilidade ou mesmo caráter inerte à degradação biológica (BATIDZIRAI *et al.*, 2013; CHAI; SAFFRON, 2016; USLU; FAAIJ; BERGMAN, 2008).

Os custos unitários de armazenamento da biomassa crua, do bio-carvão e dos pellets basearam-se na tabela de preços de armazenamento de commodities agrícolas da CONAB (CONAB, 2014). Para as palhas isentas de pré-tratamento, armazenadas na forma de fardos, considerou-se a modalidade de precificação de “produtos diversos”, calculada em termos da área ocupada pela base do produto. Com as dimensões típicas dos fardos e sua densidade, presentes na Tabela 5.5, esse valor foi convertido para a base mássica. Já para os produtos pré-tratados, o armazenamento dos pellets foi considerado como efetuado na forma ensacada e o do bio-carvão feita a granel, pois como este apresenta características superiores para armazenagem em relação àquele, sua modalidade de estoque pode ser mais simples (WEATHERSTONE *et al.*, 2015). A Tabela 5.8 exibe os custos unitários de estocagem aplicados a cada tipo de produto.

Tabela 5.8: Custos unitários de armazenamento

Produto	Custo de estocagem (US\$/t)
Palha em fardos	17,14
Pellets	1,22
Bio-carvão	0,98

Fonte: Elaboração própria com base em CONAB (2014)

Para o cálculo do custo total de armazenamento, foi considerado o acúmulo mensal dos produtos ao longo do ano, dado pelo produto de sua massa produzida no ano pelo fator de acúmulo mensal (FAM) de sua fonte original, presente na Tabela 5.4. As Equações 5.10 e 5.11 apresentam o roteiro do cálculo.

$$ETQ_{k,m} = P_k * FAM_{k,m} \quad \text{Equação 5.10}$$

$$CARM_k = \sum_{m=1}^{12} ETQ_{k,m} * CETQ_k \quad \text{Equação 5.11}$$

Onde: $ETQ_{k,m}$: Estoque do produto k no mês m [t/ano]

P_k : Produção anual do produto m [t/ano]

FAM_m: Fator de acúmulo mensal da matéria-prima originária do produto k [%]

CARM_k: Custo anual de armazenamento do produto k [US\$/ano]

CETQ_k: Custo unitário de estocagem do produto k [US\$/t]

A fim de representar a degradação biológica a que a biomassa na forma crua está sujeita ao longo do armazenamento, nos casos em que há armazenamento de biomassa crua foi considerada uma perda de 15% em massa do potencial total durante esta etapa (SVANBERG *et al.*, 2013). Para os casos nos quais a biomassa é armazenada após ser pré-tratada, considerou-se que não há perdas de massa no armazenamento.

5.1.4 Carga e Descarga

A operação de carga e descarga foi considerada após cada etapa de transferência de biomassa entre instalações industriais da planta. Os custos da operação basearam-se na massa envolvida e na natureza do produto com o qual se lida. Utilizou-se a faixa de valores proposta por OLIVEIRA (2011), atualizando-os ao ano base pela Equação 5.1.

O valor mais alto dos custos de carga e descarga foi atribuído à biomassa no estado cru, devido à sua heterogeneidade de forma e baixa densidade, que acabam por demandar ativos específicos e com maiores dimensões, elevando os custos (STELTE *et al.*, 2011). Para o bio-carvão, considerou-se o custo intermediário da faixa de carga e descarga, pois em comparação aos pellets de biomassa não torrefeitos o bio-carvão apresenta maior fragilidade, demandando maiores cuidados em seu manuseio e, conseqüentemente, tornando a operação mais custosa (WEATHERSTONE *et al.*, 2015). Posta a razão anterior, aos pellets de palha foi atribuído o menor valor da faixa. A Tabela 5.9 enumera os custos de carga e descarga para cada natureza de biomassa.

Tabela 5.9: Custos de carga e descarga por natureza de biomassa

Produto	Bio-carvão	Pellets	Biomassa Crua
Custo de Carga e Descarga (US\$/t)	2,08	0,98	3,68

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2011)

O cálculo dos custos de carga e descarga em cada operação foi calculado com o auxílio da Equação 5.12. Após a realização de cada etapa de carga e descarga na cadeia

de suprimentos, foi aplicado um índice de perdas técnicas de 2% da massa original (SVANBERG *et al.*, 2013).

$$CCD_{i,m} = P_{i,m} * CCDU_m \quad \text{Equação 5.12}$$

Onde: $CCD_{i,m}$: Custo de carga e descarga no município i do produto m [US\$/ano]

$P_{i,m}$: Produção anual no município i do produto m [t/ano]

$CCDU_m$: Custo unitário de carga e descarga para o produto m [US\$/t]

5.1.5 Pré-tratamento

Os processos de pré-tratamento abordados, torrefação e densificação, foram simulados técnico-economicamente segundo um esquema metodológico do tipo “*black box*”, ou seja, a partir de parâmetros de processo disponíveis literatura, como eficiências, rendimentos, índices de perdas técnicas e consumo energético das unidades industriais. As configurações das plantas e os ativos demandados para cada processo foram listados e seus respectivos custos elencados. A demanda por mão-de-obra também foi detalhada para cada tipo de pré-tratamento, com os respectivos custos do trabalho.

Esta seção da metodologia será, doravante, dividida em duas subseções. A primeira versará exclusivamente das operações pertinentes ao processo de produção de bio-carvão, enquanto que a segunda tratará da manufatura dos pellets.

5.1.5.1 Processo de torrefação e peletização combinadas (TOP)

Este processo objetiva a produção de bio-carvão a partir das palhas, sendo o bio-carvão a biomassa torrefeita e densificada na forma de pellets. A Tabela 5.10 apresenta os principais parâmetros técnicos utilizados na modelagem do processo.

Tabela 5.10: Parâmetros técnicos do processo TOP

Coeficiente	Valor	Fonte
Escala máxima de trem	100 kt/ano	PIRRAGLIA <i>et al.</i> (2013)
Rendimento mássico total do processo	65%	BATIDZIRAI <i>et al.</i> (2013)
Rendimento energético total do processo	96%	BATIDZIRAI <i>et al.</i> (2013)
Densidade do produto	650 kg/m ³	DEUTMEYER <i>et al.</i> (2012)
Vida útil da planta	15 anos	KOPPEJAN <i>et al.</i> (2012)
Fator de capacidade de projeto	80%	PIRRAGLIA <i>et al.</i> (2013)

Fonte: Adaptado de diversas fontes.

A escala máxima definida para um único trem de torrefação foi de 100 kt/ano de bio-carvão, que corresponde a uma produção média de 12,5 toneladas por hora em uma planta com janela operacional de 8.000 horas ao ano. Apesar de alguns trabalhos que abordam a temática da torrefação de biomassa considerarem a possibilidade de escalas superiores a esse valor (BATIDZIRAI *et al.*, 2013; USLU; FAAIJ; BERGMAN, 2008), muitos autores utilizam essa capacidade como escala base (ERLACH, 2014; PIRRAGLIA *et al.*, 2013; SVANBERG *et al.*, 2013), e há uma grande incerteza quanto ao aumento da escala na tecnologia de torrefação. Ademais, segundo CREMERS *et al.* (2015), a maior planta de torrefação de biomassa que atualmente se tem notícia no mundo possui uma capacidade de produção de 80 kt/ano. Quanto aos rendimentos mássicos e energéticos do processo, estes representam a razão entre a quantidade absoluta de massa e energia, respectivamente, na saída e na entrada do processo. Tipicamente, para plantas de torrefação de biomassa que operam com material lenhoso os respectivos valores são de 70% e 90% (BERGMAN, P. *et al.*, 2005). Porém, BATIDZIRAI *et al.* (2013) apresentam valores específicos para a produção de bio-carvão advindo de palhas, presentes na Tabela 5.10, como resultado de sua modelagem do processo para otimização do poder calorífico do produto.

Na Tabela 5.11 encontram-se os ativos demandados pelo processo TOP, com os respectivos custos relativos a uma escala de produção de 100 kt/ano. Na mesma tabela também estão representados os custos indiretos e o capital de contingência considerados para o cálculo do investimento total na planta TOP. Os valores foram atualizados para o ano de 2015 pela Equação 5.1. A Tabela 5.12 apresenta a demanda de mão-de-obra para a planta TOP, além de demais parâmetros para o cálculo dos custos fixos e a Tabela 5.13 sintetiza o consumo energético nas operações, que compõe o custo variável. Considerou-se apenas o consumo de energia elétrica no processo, uma vez que a demanda térmica da torrefação é suprida pela combustão dos voláteis liberados no próprio processo (BERGMAN, P., 2005; ERLACH, 2014).

Tabela 5.11: Componentes do custo de investimento na planta TOP

Ativos da planta		
Equipamento	Custo	Fonte
Esteira de transporte	US\$ 182.262,00	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Carregadeira frontal	US\$ 45.565,00	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Funil de alimentação	US\$ 243.016,00	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Transportador helicoidal	US\$ 668.293,00	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Separador de sólidos	US\$ 218.714,00	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Triturador de sólidos	US\$ 1.221.780,00	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Empilhadeira	US\$ 45.565,00	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Unidade de torrefação	€ 2.086.666,67	ERLACH, (2013)
Caldeira de queima de voláteis	€ 509.166,67	ERLACH, (2013)
Trocador de calor	€ 306.956,52	ERLACH, (2013)
Resfriador de produto	€ 112.173,91	ERLACH, (2013)
Compressores	€ 510.000,00	ERLACH, (2013)
Unidade de Peletização	€ 1.047.500,00	ERLACH, (2013)
Armazenamento e manejo de pellets	€ 499.166,67	ERLACH, (2013)
Infraestrutura e edificações	US\$ 1.200.000,00	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Custos diretos	US\$ 9.403.988,48	
Custos indiretos	24%	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Contingência	10%	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Investimento total	US\$ 12.601.344,56	
Investimento total (valores 2015)	US\$ 12.368.109,73	

Fonte: Adaptado de diversas fontes.

Tabela 5.12: Componentes do custo anual de O&M fixo da planta TOP

Mão-de-obra				
Cargo ¹	Número	Turnos	Salário anual (US\$) ²	Custo anual (US\$) ³
Supervisor de turno	1	3	27.296,59	122.834,65
Técnico de Manutenção	1	3	15.354,33	69.094,49
Operador de planta (turno)	4	3	8.871,39	159.685,04
Operador de empilhadeira	2	3	5.459,32	49.133,86
Auxiliar de campo	1	3	5.118,11	23.031,50
Vendedor/Marketing	2	1	13.648,29	40.944,88
Contador	2	1	10.236,22	30.708,66
Secretário executivo	1	1	13.307,09	19.960,63
Gerente Financeiro	1	1	51.181,10	76.771,65
Gerente de Planta	1	1	51.181,10	76.771,65
Total			668.937,01	
Outros custos de O&M fixos				
Classe			Valor ⁴	
Manutenção e Reparos			2% do CI	
Reinvestimentos			1% do CI	
Seguro			1% do CI	
Total (US\$/ano)			494.724,39	
O&M fixo (US\$/ano)			1.163.661,40	

1: Adaptado de PIRRAGLIA *et al.* (2013)

2: Adaptado de EXAME (2016)

3: Ao custo anual dos salários foi aplicada uma quantia extra de 50% como simplificação dos custos extras relacionados aos tributos sobre o trabalho.

4: SVANBERG *et al.* (2013)

Tabela 5.13: Componentes do custo variável da planta TOP

Energia Elétrica	
Etapa	Consumo
Moagem	25 kWh/t bio-carvão
Peletização	22 kWh/t bio-carvão
Equipamentos de manuseio e transporte	124 kWh/t bio-carvão
Total	171 kWh/t bio-carvão
Custo Variável (US\$/t bio-carvão)	8,98

Fonte: Adaptado de BATIDIZIRAI *et al.* (2013)

Com as restrições e os custos do sistema-base, procedeu-se o cálculo dos custos de torrefação para o potencial energético de cada município para cada matéria-prima, dado pelas Equações 5.13 a 5.18.

$$NTtop_{i,j} = INT \left(\frac{P_{i,j} * RMtop}{EMtop * FCtop} \right) + 1 \quad \text{Equação 5.13}$$

$$Pbc_{i,j} = P_{i,j} * RMtop \quad \text{Equação 5.14}$$

$$ETbc_{i,j} = Pbc_{i,j} / (NTtop_{i,j} * FCtop) \quad \text{Equação 5.15}$$

$$CItop_{i,j} = (NTtop_{i,j})^{FT} * CItop_{base} * (ETbc_{i,j} / EMtop)^{FE} \quad \text{Equação 5.16}$$

$$CFtop_{i,j} = (NTtop_{i,j})^{FT} * CFtop_{base} * (ETbc_{i,j} / EMtop)^{FE} \quad \text{Equação 5.17}$$

$$CVtop_{i,j} = CVUtop * Pbc_{i,j} * 1000 \quad \text{Equação 5.18}$$

Onde: $NTtop_{i,j}$: Número de trens de TOP para o resíduo j do município i [-]

$RMtop$: Rendimento mássico do processo TOP [%]

$EMtop$: Escala máxima de trem do processo TOP [kt/ano]

$FCtop$: Fator de capacidade da planta TOP [%]

$Pbc_{i,j}$: Produção de bio-carvão a partir do resíduo j no município i [kt/ano]

$ETbc_{i,j}$: Escala de produção de bio-carvão por trem no município i [kt/ano]

$CItop_{i,i}$: Custo de investimento em TOP para o resíduo i no município j [US\$]

FT : Fator de trem¹⁷

$CItop_{base}$: Custo de investimento em TOP para a planta na escala base [US\$]

FE : Fator de escala

¹⁷ O fator de trem denota a economia de recursos proveniente da instalação de mais de um trem de produção em um mesmo sítio, devido à possibilidade de compartilhamento de infraestrutura, utilidades de processo, unidades administrativas, etc. O valor assumido para o fator de trem neste trabalho foi de 0,9 (SWANSON *et al.*, 2010).

$CF_{top_{i,j}}$: Custo fixo de O&M da planta TOP para o resíduo i no município j [US\$/ano]

$CF_{top_{base}}$: Custo fixo de O&M da planta TOP para a escala base [US\$/ano]

$CV_{top_{i,j}}$: Custo variável da planta TOP para o resíduo i no município j [US\$/ano]

CVU_{top} : Custo variável unitário da planta TOP [US\$/t]

O poder calorífico inferior (PCI) do produto final foi calculado com base no PCI da matéria-prima do bio-carvão e nos rendimentos mássicos e energéticos do processo, segundo a Equação 5.19. Os resultados encontram-se disponíveis na Tabela 5.14.

$$PCI_{bc_j} = PCI_j * RE_{top} / RM_{top} \quad \text{Equação 5.19}$$

Onde: PCI_{bc_j} : Poder calorífico inferior do bio-carvão advindo do resíduo j [MJ/kg]

PCI_j : Poder calorífico inferior do resíduo j no estado cru [MJ/kg]

RE_{top} : Rendimento energético do processo TOP [%]

Tabela 5.14: Poder calorífico inferior do bio-carvão

Resíduo originário	PCI_{bc} (MJ/kg) ¹
Palha de Cana-de-açúcar	23,94
Palha de Soja	25,83
Palha de Milho	24,00
Palha de Arroz	22,14
Palha de Trigo	25,12
1: Poder calorífico inferior em base seca	

Fonte: Elaboração própria

5.1.5.2 Processo de Peletização

A peletização da biomassa, assim como o processo TOP, objetiva densificar a biomassa, dando-lhe forma regular. Sem embargo, diferentemente do TOP, na peletização não há alterações termoquímicas significantes na matéria, tratando-se, portanto, de um pré-tratamento de natureza física. Os parâmetros técnicos utilizados na modelagem do processo de peletização encontram-se na Tabela 5.15.

Tabela 5.15: Parâmetros técnicos do processo de peletização

Coeficiente	Valor	Fonte
Escala máxima de trem	390 kt/ano	PIRRAGLIA <i>et al.</i> (2013)
Densidade do produto	600 kg/m ³	DEUTMEYER <i>et al.</i> (2012)
Perda mássica na moagem da biomassa	10%	SVANBERG <i>et al.</i> (2013)
Vida útil da Planta	15 anos	KOPPEJAN <i>et al.</i> (2012)
Fator de capacidade de projeto	80%	PIRRAGLIA <i>et al.</i> (2013)

Fonte: Adaptado de diversas fontes

A peletização de biomassa para fins de aproveitamento energético, ao contrário da torrefação, é um processo consolidado e com um grande número de plantas industriais em escala comercial operando no mundo. O mercado de pellets também apresenta um maior grau de maturidade, sobretudo na Europa Ocidental (MATTHEWS, 2015). Desta forma, o *know-how* tecnológico para esta tecnologia é maior, o que reduz incertezas na operação industrial e no projeto da instalação industrial. Assim, considerou-se para o processo de peletização uma escala máxima de produção de 390 kt/ano, conforme utilizado por ERLACH (2014) em seu cenário linha de base.

A Tabela 5.16 apresenta a lista dos equipamentos que compõem a planta de peletização e seus respectivos custos, além dos custos indiretos e do capital de contingência. A Tabela 5.17 exhibe os componentes do custo fixo anual da planta e a Tabela 5.18 os do custo variável, que assim como para o processo TOP foram considerados como somente os gastos da planta com energia.

Tabela 5.16: Componentes do custo de investimento na planta de peletização

Ativos da planta		
Equipamento	Custo	Fonte
Esteira de transporte	US\$ 451.584,68	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Carregadeira frontal	US\$ 112.894,93	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Funil de alimentação	US\$ 602.112,91	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Transportador helicoidal	US\$ 1.655.808,03	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Separador de sólidos	US\$ 541.900,63	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Triturador de sólidos	US\$ 3.027.164,93	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Empilhadeira	US\$ 112.894,93	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Resfriador de produto	€ 277.929,69	ERLACH, (2013)
Unidade de Peletização	€ 2.595.356,99	ERLACH, (2013)
Armazenamento e manejo de pellets	€ 1.236.769,16	ERLACH, (2013)
Infraestrutura e edificações	US\$ 2.973.201,32	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Custos diretos	US\$ 13.998.623,79	
Custos indiretos	24%	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Contingência	10%	PIRRAGLIA <i>et al.</i> , (2013)
Investimento total	US\$ 18.758.155,87	
Investimento total (valores 2015)	US\$ 18.410.966,31	

Fonte: Adaptado de diversas fontes

Tabela 5.17: Componentes do custo anual de O&M fixo da planta de peletização

Mão-de-obra				
Cargo ¹	Número	Turnos	Salário anual (US\$) ²	Custo anual (US\$) ³
Supervisor de turno	1	3	27.296,59	122.834,65
Técnico de Manutenção	1	3	15.354,33	69.094,49
Operador de planta (turno)	3	3	8.871,39	159.685,04
Operador de empilhadeira	2	3	5.459,32	49.133,86
Auxiliar de campo	1	3	5.118,11	23.031,50
Vendedor/Marketing	2	1	13.648,29	40.944,88
Contador	2	1	10.236,22	30.708,66
Secretário executivo	1	1	13.307,09	19.960,63
Gerente Financeiro	1	1	51.181,10	76.771,65
Gerente de Planta	1	1	51.181,10	76.771,65
Total (planta 100 kt/ano)			US\$ 736.438,65	
Total (planta 390 kt/ano)			US\$ 1.558.492,05	
Outros custos de O&M fixos				
Classe	Valor ⁴			
Manutenção e Reparos	2% do CI			
Reinvestimentos	1% do CI			
Seguro	1% do CI			
Total (US\$/ano)			494.724,39	
O&M fixo (US\$/ano)			1.163.661,40	

1: Adaptado de PIRRAGLIA *et al.* (2013)

2: Adaptado de EXAME (2016)

3: Ao custo anual dos salários foi aplicada uma quantia extra de 50% como simplificação dos custos extras relacionados aos tributos sobre o trabalho.

4: SVANBERG *et al.* (2013)

Fonte: Adaptado de diversas fontes

Com a configuração do sistema base, foi feito o cálculo dos custos de peletização para o potencial energético de cada município, para cada matéria-prima. O cálculo seguiu o roteiro dado pelas Equações 5.20 a 5.25.

Tabela 5.18: Componentes do custo variável da planta de peletização

Energia Elétrica	
Etapa	Consumo
Moagem	83 kWh/t bio-carvão
Peletização	44 kWh/t bio-carvão
Equipamentos de manuseio e transporte	124 kWh/t bio-carvão
Total	251 kWh/t bio-carvão
Custo Variável (US\$/t bio-carvão)	13,19

Fonte: Adaptado de BATIDIZIRAI *et al.* (2013)

$$NTpel_{i,j} = INT((P_{i,j} * (1 - FPM)) / (EMtop * FCtop)) + 1 \quad \text{Equação 5.20}$$

$$Ppe_{i,j} = P_{i,j} * (1 - FPM) \quad \text{Equação 5.21}$$

$$ETpe_{i,j} = Ppe_{i,j} / (NTpel_{i,j} * FCpel) \quad \text{Equação 5.22}$$

$$CIpel_{i,j} = (NTpel_{i,j})^{FT} * CIpel_{base} * (ETpe_{i,j} / EMPel)^{FE} \quad \text{Equação 5.23}$$

$$CFpel_{i,j} = (NTpel_{i,j})^{FT} * CFpel_{base} * (ETpe_{i,j} / EMPel)^{FE} \quad \text{Equação 5.24}$$

$$CVpel_{i,j} = CVUpel * Ppe_{i,j} * 1000 \quad \text{Equação 5.25}$$

Onde: $NTpel_{i,j}$: Número de trens de peletização para o resíduo j do município i [-]

FPM: Fator de perda de massa na moagem [%]

EMPel: Escala máxima de trem do processo de peletização [kt/ano]

FCpel: Fator de capacidade da planta de peletização [%]

Ppe_{i,j}: Produção de pellets do resíduo j no município i [kt/ano]

ETpe_{i,j}: Escala de produção de pellets por trem no município i [kt/ano]

CIpel_{i,i}: Custo de investimento na planta de peletização para o resíduo i no município j [US\$]

CIpel_{base}: Custo de investimento na planta de peletização para a escala base [US\$]

CFpel_{i,j}: Custo fixo de O&M da planta de peletização do resíduo i no município j [US\$/ano]

CFpel_{base}: Custo fixo de O&M da planta de peletização para a escala base [US\$/ano]

CVpel_{i,j}: Custo variável da planta de peletização do resíduo *i* no município *j* [US\$/ano]

CVUpel: Custo variável unitário da planta de peletização [US\$/t]

O PCI dos pellets foi considerado como o mesmo de sua respectiva matéria-prima, visto que o processo é basicamente físico.

Tanto para o processo TOP quanto para a peletização, nos casos em que o armazenamento é feito a jusante do processo de pré-tratamento, o cálculo dos custos utilizou-se das mesmas equações apresentadas acima. Porém, para considerar a necessidade de superdimensionamento das instalações com vistas à questão da sazonalidade, na verificação do número de trens e da escala dos mesmos, o parâmetro de escala máxima de trem foi convertido para base mensal, e a disponibilidade anual de resíduos foi multiplicada pelo fator de sazonalidade da respectiva cultura de origem, que representa a parcela de sua produção anual que é produzida no mês de pico, conforme detalhado na seção 5.1.1. Assim, nos casos “A” os equipamentos de pré-tratamento são dimensionados com capacidade suficiente para receber a biomassa nos meses de maior produção, operando abaixo da capacidade nominal nos demais períodos do ano.

5.1.6 Transporte da biomassa

Conforme é possível notar nos fluxogramas das cadeias de suprimentos, trazidos pela Figura 5.1 e pela Figura 5.2, a etapa de transporte da biomassa só se verifica nos casos em que há o pré-tratamento da biomassa, ou seja, quando a conversão final da biomassa é efetuada de forma centralizada. Esta etapa, como mencionado na parte introdutória da seção de metodologia, compreende o carregamento da biomassa pré-tratada desde o local do pré-tratamento até o ponto onde ocorre a sua conversão final. Optou-se pelo modal rodoviário para fazer este traslado, devido à inexistência de infraestrutura nos locais de estudo que permitam a opção por outro modal de maneira viável.

A partir do mapeamento dos recursos e da camada vetorial do IBGE contendo o mapa das rodovias brasileiras (IBGE, 2015), foi possível obter as respectivas distâncias entre cada estação de pré-tratamento e o ponto de conversão final centralizada. Porém, a distância é apenas um dos parâmetros que compõem os custos de transporte, que ainda

incluem a densidade do produto, o tipo de veículo, a topografia e a margem do transportador, dentre outros. Assim, para melhor representar os custos reais da etapa de transporte, foram utilizados os dados de custos de frete para as *commodities* agrícolas originárias dos produtos, disponibilizados pelo grupo ESALQ-LOG no Sistema de Informações de Fretes – SIFRECA (ESALQ-LOG, 2016).

O SIFRECA apresenta os custos de transporte em unidades de R\$/t e R\$/t.km. Assim, extraíram-se dados mais recentes dos custos de frete de cada *commodity* para diversas localidades e foram feitas regressões lineares, a fim de determinar a influência do fator distância no custo de frete para cada produto. Como não havia dados para o arroz, considerou-se como os mesmos para o trigo, já que dentre as culturas analisadas esta é a que mais se assemelha àquela, porquanto ambas são produções concentradas nos estados do sul do Brasil e possuem as menores escalas de produção. A Tabela 5.19 mostra os resultados das regressões lineares.

Tabela 5.19: Resultado das regressões lineares com os custos de frete

Matéria-prima	Regressão linear ¹	Densidade do produto agrícola (kg/m³) ²
Cana-de-açúcar	$y = 0,1904x + 15,601$	350
Farelo de Soja	$y = 0,1148x + 16,702$	630
Milho	$y = 0,0621x + 30,638$	780
Arroz	$y = 0,0876x + 12,903$	560
Trigo	$y = 0,0876x + 12,903$	620
1: y = [R\$/t]; x = [km] 2: BUSA (2016)		

Fonte: Adaptado de ESALQ-LOG (2016)

Com o resultado das regressões lineares, procedeu-se o cálculo do custo de frete dos produtos para cada município, substituindo o valor de x nas respectivas equações pela distância ao centro de conversão. Ademais, dado que produtos de maior densidade possuem custo de transporte menores, foi feita ainda uma ponderação dos custos da regressão linear com as densidades, dividindo-se o custo obtido pela densidade da biomassa pré-tratada e multiplicando-o pela densidade da *commodity* agrícola original.

Foi considerado um fator de perda técnica de 2% da massa do produto transportado nessa operação da cadeia logística (SVANBERG *et al.*, 2013).

5.1.7 Conversão Final

Para a conversão da biomassa em um vetor energético no final da cadeia, considerou-se o processo de gasificação do material lignocelulósico. A escolha pela

gasificação como processo de conversão final deu-se pela versatilidade do seu produto, o gás de síntese. Este pode ser utilizado para produção de combustíveis líquidos, pela reação de Fischer-Tropsch; hidrogênio, através do processo de *Water-Gas shift*; metanol sintético ou mesmo produzir eletricidade com alta eficiência em ciclos termodinâmicos combinados.

O objetivo da análise da conversão final é, primordialmente, o de avaliar possíveis economias de escala obtidas com a conversão da biomassa em uma planta centralizada em relação à sua conversão na forma difusa. Assim, não serão aprofundadas nessa análise questões de cunho tecnológico pertinentes ao produto da gasificação, ou seja, a qualidade do gás de síntese produzido. A avaliação feita restringiu-se à eficiência de conversão do conteúdo energético da matéria-prima em gás de síntese, expressa pela *Cold Gas Efficiency*, indicador que por si só não traduz toda a complexidade química das características do produto para a avaliação de seu uso posterior, seja este em quaisquer das possibilidades anteriormente citadas.

A metodologia de simulação técnico-econômica do processo de gasificação, tal como para o TOP e a peletização, foi efetuada no formato “*black box*”. Para os casos onde houve pré-tratamento da biomassa, a conversão procedeu-se de forma centralizada, no *cluster* de produção do recurso energético. No caso em que a biomassa no estado cru é gasificada, considerou-se uma unidade industrial de conversão a cada município fornecedor do recurso.

Para o processo de gasificação, considerou-se como linha de base um gasificador de leito fluidizado borbulhante, com escala máxima de 2.000 t/dia de entrada de biomassa. Os parâmetros técnicos aplicados na simulação encontram-se na Tabela 5.20. Para a simulação econômica da planta, considerou-se o arranjo proposto em DUTTA e PHILLIPS (2009), apenas das áreas industriais relativas ao manuseio da carga e alimentação, gasificação e reforma do alcatrão e limpeza do gás de síntese. As demais áreas presentes no trabalho, destinadas à conversão do gás de síntese a metanol, foram desconsideradas, pois sua finalidade está fora do escopo da presente análise.

Tabela 5.20: Parâmetros técnicos do processo de gasificação

Parâmetro	Valor	Fonte
Escala base (máxima por trem)	2000 t/dia	DUTTA e PHILLIPS (2009)
<i>Cold gas efficiency</i> para biomassa crua	58%	SARKAR <i>et al.</i> (2014)
<i>Cold gas efficiency</i> para pellets	64%	SARKAR <i>et al.</i> (2014)
<i>Cold gas efficiency</i> para biocarvão	65%	SARKAR <i>et al.</i> (2014)
Operação anual	7446 h/ano	DUTTA e PHILLIPS (2009)
Vida útil	30 anos	DUTTA e PHILLIPS (2009)
Fator de capacidade	85%	DUTTA e PHILLIPS (2009)

Fonte: Adaptado de diversas fontes.

A Tabela 5.21 apresenta os parâmetros que constituem o Custo de Investimento, a Tabela 5.22 os que compõem o Custo Fixo anual e a Tabela 5.23 exhibe o Custo Variável da planta base de gasificação de biomassa.

Tabela 5.21: Componentes do custo de investimento da planta de gasificação.

Ativos	
Equipamento	Custo atualizado (US\$)
Equipamentos de manuseio da carga	5.367.749
Sistema de gasificação e reforma de alcatrão	11.926.332
Sistema de limpeza do gás de síntese	28.969.852
Custo Total dos Equipamentos (CTE)	46.263.935
Custo de Instalação	39% do CTE
Instrumentação e controle	26% do CTE
Tubulações	31% do CTE
Sistemas Elétricos	10% do CTE
Edificações	29% do CTE
Melhorias no terreno	12% do CTE
Custo Total Instalado (CTI)	114.271.918
Custos indiretos	36% do CTI
Contingência	3% do CTI
Investimento total (CI)	158.837.967,30

Fonte: Adaptado de DUTTA e PHILLIPS (2009)

Tabela 5.22: Componentes do custo de fixo anual da planta de gasificação.

Mão-de-Obra			
Função	Número	Salário anual ¹ (R\$)	Custo anual do trabalho (US\$)
Gerente de Planta	1	195.000,00	51.181
Engenheiro de Planta	1	110.500,00	29.002
Supervisor de Manutenção	1	117.000,00	30.708
Gerente de Laboratório	1	195.000,00	51.181
Supervisor de turno	5	104.000,00	136.482
Técnico de Laboratório	2	84.500,00	44.356
Técnico de Manutenção	8	58.500,00	122.834
Operadores de planta	20	33.800,00	177.427
Auxiliares de campo	12	19.500,00	61.417
Secretários	3	50.700,00	39.921
Custo do trabalho (US\$/ano)		744.514	
Outros custos			
Classe	Valor		
<i>Overhead</i>	95% do custo de trabalho		
Manutenção	2% de CI		
Seguro/taxas	2% de CI		
Custo Fixo (US\$/ano)		7.805.321	

1: Adaptado de EXAME (2016)**Fonte: Adaptado de Dutta & Phillips (2009)****Tabela 5.23: Componentes do custo variável da planta de gasificação.**

Insumos	
Eletricidade	15 kWh/t biomassa
Gás natural	0,5 m ³ /t biomassa
Catalisadores e demais insumos	1,65 US\$/t biomassa
Custo Variável (US\$/t)	5,64

Fonte: Adaptado de DUTTA e PHILLIPS (2009)

Os custos de gasificação da biomassa para cada planta foram calculados de forma semelhante aos processos TOP e de peletização. A partir da escala máxima permitida foram calculados o número de trens nas plantas industriais pertinentes a cada um dos casos. Com o número de trens e suas respectivas escalas, foram calculados os custos de investimento e fixo anual, tomando como base a planta de escala máxima e levando em consideração as economias de escala e de trem. O conjunto das Equações 5.26 a 5.31 apresenta o roteiro para o cálculo dos custos do sistema de gasificação.

$$NTgsf_{b,p} = INT \left(\frac{D_{b,p}}{EMgsf * FCgsf} \right) + 1 \quad \text{Equação 5.26}$$

$$ETgsf_{b,p} = D_{b,p} / (NTgsf_{b,p} * FCgsf) \quad \text{Equação 5.27}$$

$$CIgsf_{b,p} = (NTgsf_{b,p})^{FT} * CIgsf_{base} * (ETgsf_{b,p} / EMgsf)^{FE} \quad \text{Equação 5.28}$$

$$CFgsf_{b,p} = (NTgsf_{b,p})^{FT} * CFgsf_{base} * (ETgsf_{b,p} / EMgsf)^{FE} \quad \text{Equação 5.29}$$

$$CVgsf_{b,p} = CVUgsf * D_{b,p} * 1000 \quad \text{Equação 5.30}$$

$$Esg_{b,p} = E_{b,p} * CGE_b \quad \text{Equação 5.31}$$

Onde: $NTgsf_{b,p}$: Número de trens de gasificação da biomassa b na planta p [-]

$D_{b,p}$: Disponibilidade da biomassa b na planta p [kt/ano]

$EMgsf$: Escala máxima de trem do processo de gasificação [kt/ano]

$FCgsf$: Fator de capacidade da planta de gasificação [%]

$ETgsf_{b,p}$: Escala de produção por trem de gasificação da biomassa b na planta p [kt/ano]

$CIgsf_b$: Custo de investimento em gasificação da biomassa b na planta p [US\$]

$CIgsf_{base}$: Custo de investimento na planta de gasificação para a escala base [US\$]

$CFgsf_{b,p}$: Custo fixo de O&M da gasificação da biomassa b na planta p [US\$/ano]

$CFgsf_{base}$: Custo fixo de O&M da planta de gasificação para a escala base [US\$/ano]

$CV_{gsf_{b,p}}$: Custo variável da gasificação da biomassa b na planta p [US\$/ano]

CVU_{gsf} : Custo variável unitário da planta de gasificação [US\$/t]

$E_{sb,p}$: Conteúdo energético do gás de síntese produzido pela biomassa b na planta p [MWh_t/ano]

$E_{b,p}$: Potencial energético total da biomassa b disponível na planta p [MWh/ano]

CGE: *Cold gas efficiency* da gasificação da biomassa b [%]

5.2 Premissas da modelagem

Na modelagem da cadeia de suprimentos, assim como no mapeamento dos resíduos, foram assumidas algumas premissas de forma a simplificar e viabilizar a construção do modelo. Tais premissas encontram-se listadas abaixo, na Tabela 5.24.

Tabela 5.24: Premissas da simulação técnico-econômica das cadeias de suprimentos bioenergéticas

Premissa	Limitação/Simplificação
Produção agrícola constante ao longo da duração do projeto	Incerteza na variação da produção agrícola ao longo do tempo em razão de fatores climáticos e mudanças de produtividade e uso do solo
Produção agrícola equanimemente distribuída no mês	A produção agrícola pode variar ao longo do mês
Sistemas de colheita semelhantes para todas as palhas	O modelo de produção da <i>commodity</i> define os ativos empregados na colheita das palhas, logo os custos podem variar de acordo com a biomassa colhida
Não necessidade de adição de fertilizantes pela retirada da palha	A retirada da palha, ainda que não seja integral, pode levar à necessidade de reposição de alguns nutrientes de forma artificial
Resíduos agrícolas sem competição para uso e sem pagamento de prêmio ao agricultor (cadeia de produção verticalizada)	Usos alternativos da palha, como alimentação animal, podem conferir-lhe valor de mercado, tal como o prêmio pago ao produtor não necessariamente está relacionado à existência de valor de mercado das palhas, mas pode estar atrelado a uma compensação de eventuais danos à propriedade causados pela colheita das palhas, como compactação do solo, por exemplo
Capacidade de armazenamento municipal suficiente para suprir as demandas	Desconsideradas possíveis limitações de disponibilidade de espaço para armazenamento
Armazéns de biomassa anexos às instalações industriais a jusante	O distanciamento entre o ponto de armazenagem e o de conversão a jusante leva à necessidade de novas etapas logísticas
Preço de frete dos produtos constante ao longo do ano	O valor do frete varia ao longo do ano de acordo com a demanda

Tabela 5.24: Premissas da simulação técnico-econômica das cadeias de suprimentos bioenergéticas (continuação)

Premissa	Limitação/Simplificação
Área disponível para instalação de todas as plantas industriais	Desconsideradas possíveis restrições de espaço disponível para implantação das unidades industriais
Custos e produção <i>overnight</i>	Desconsiderou-se o tempo entre o projeto e o início da operação das plantas
Disponibilidade de tecnologia, equipamentos e serviços de engenharia	O estudo aborda tecnologias modernas, como a torrefação e a gasificação da biomassa, sem precedentes no Brasil
Produtividade do trabalho no Brasil semelhante ao restante do mundo	O número de trabalhadores nas plantas industriais baseia-se em estudos que consideram condições de outros países
Todas as biomassas são adequadas aos processos de pré-tratamento e conversão	Desconsideradas possíveis restrições técnicas para utilização das palhas nos processos industriais abordados
Taxa de desconto constante	Desconsideradas possíveis variações no custo de oportunidade do capital ao longo do tempo do projeto
Inexistência de custos de transação entre as operações da cadeia de suprimentos	As negociações entre agentes envolvidos nas diferentes etapas da cadeia levam à formação de custos de transacionais
Fonte: Elaboração própria	

5.3 Resultados

Esta seção do capítulo 5 apresenta os resultados obtidos da modelagem das cadeias de suprimentos desenvolvidas para cada tipo de biomassa, para todos os cinco casos abordados no estudo. Os resultados serão divididos por casos, sendo primeiramente exibidos por operação da cadeia, seguindo a ordem lógica que permeia o desenvolvimento do caso, e ao fim mostrados de forma consolidada para a respectiva configuração da cadeia de suprimentos. Por último, são mostrados os resultados de todos os casos juntamente, permitindo estabelecer uma comparação entre eles. Os resultados completos e detalhados de todas as simulações encontram-se no Anexo II.

Como a etapa de colheita e transporte das palhas do campo, conforme se nota nos fluxogramas da Figura 5.1 e da Figura 5.2, é idêntica para todos os casos, os resultados dessas operações são mostrados anteriormente à separação das diferentes configurações de cadeia, sendo aplicados a todos os casos. A Tabela 5.25 apresenta os somatórios das massas colhidas nos municípios, dos investimentos, dos custos fixos anuais e dos custos com diesel. Também exibe o custo nivelado médio para a colheita e o transporte primário de cada palha. Semelhantemente, a primeira operação de carga e descarga é comum a todos os casos, na qual a biomassa crua transportada do campo deve ser descarregada na primeira (ou única) planta industrial da cadeia de suprimentos. A Tabela 5.26 exibe os custos de carga e descarga da biomassa crua separadamente por tipo de biomassa.

Tabela 5.25: Custos da etapa de colheita da biomassa

Resíduo	Massa colhida (kt/ano)	CI total (US\$)	CF total (US\$/ano)	Diesel colheita (US\$/ano)	Diesel transporte (US\$/ano)	LC médio (US\$/t)
Palha de cana-de-açúcar	2.660	38.330.108,35	13.283.365,13	6.057.445,99	4.972.455,83	11,04
Palha de soja	4.407	38.457.904,26	13.327.653,03	19.628.380,06	28.215.982,84	15,03
Palha de milho	2.463	25.656.207,53	8.891.202,95	10.098.758,46	15.980.575,17	15,57
Palha de arroz	1.571	15.699.337,11	5.918.526,52	2.042.821,83	8.167.080,02	11,58
Palha de trigo	141	1.534.666,09	531.841,18	1.767.833,76	254.077,08	19,52
Palha de soja e milho	6.871	64.114.111,79	22.218.855,98	29.727.138,52	44.196.558,01	15,22

Fonte: Elaboração própria**Tabela 5.26: Custos da etapa de carga e descarga da biomassa crua**

Resíduo	Biomassa Crua (US\$/ano)
Palha de cana-de-açúcar	8.158.888,40
Palha de soja	13.520.717,65
Palha de milho	7.556.891,75
Palha de arroz	4.818.205,72
Palha de trigo	432.965,91
Palha de soja e milho	21.077.609,39

Fonte: Elaboração própria

5.3.1 Caso G1

O caso G1 caracteriza-se pelo não uso do pré-tratamento dos resíduos e pela gasificação da biomassa realizada nos municípios de origem do recurso. De todos os casos este é o único em que a gasificação se dá de maneira descentralizada. A Figura 5.3 ilustra sequencialmente as operações da cadeia de suprimentos bioenergética configurada pelo caso G1.

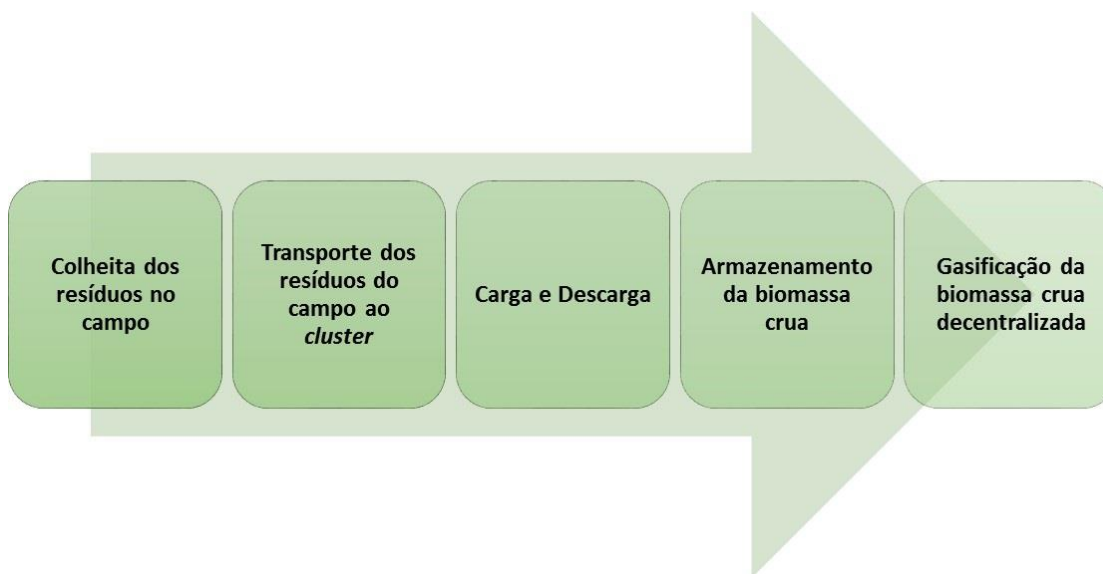


Figura 5.3. Sequência de operações para o Caso G1

Os custos da etapa de armazenamento da biomassa para o Caso G1 encontram-se na Tabela 5.27. Vale ressaltar que os mesmos valores para esta operação também se aplicam aos casos G2B e G3B, cujas cadeias de suprimentos possuem o armazenamento dos resíduos no mesmo ponto em que no Caso G1, configurando assim custos idênticos.

Como a gasificação dos resíduos neste caso ocorre no próprio município de origem do resíduo, foram simulados os custos de investimento, de operação e manutenção fixos e os variáveis individualmente para cada município, sendo os resultados completos exibidos no Anexo II. A Tabela 5.28 mostra os resultados, segregados por biomassa, do somatório do investimento, O&M fixo e dos custos variáveis nos municípios, além do custo nivelado da gasificação como uma média ponderada pela produção de gás de síntese em cada planta.

A Tabela 5.29 apresenta o custo total da cadeia de suprimentos nivelado pela produção final de gás de síntese, por biomassa, para o Caso G1. A Figura 5.4 mostra a

divisão do custo nivelado final pelas etapas em valores absolutos e a Figura 5.5 faz a mesma divisão, porém apresentando os valores em termos relativos.

Tabela 5.27: Custos da etapa de armazenamento da biomassa crua

Resíduo	Biomassa Crua (US\$/ano)
Palha de cana-de-açúcar	74.096.479
Palha de soja	302.197.332
Palha de milho	148.198.411
Palha de arroz	94.489.964
Palha de trigo	8.490.906
Palha de soja e milho	300.399.299

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5.28: Custos da etapa de gasificação da biomassa para o Caso G1

Resíduo	Produção de gás de síntese (MWh/ano)	CI total (US\$)	CF total (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC médio (US\$/MWh)
Palha de cana-de-açúcar	6.646.092	896.809.165,38	44.069.338,62	5,64	22,71
Palha de soja	11.883.254	878.981.787,81	43.193.298,58	5,64	13,21
Palha de milho	6.172.246	601.767.162,19	29.570.929,76	5,64	16,90
Palha de arroz	9.801.975	360.433.503,96	17.711.757,14	5,64	17,27
Palha de trigo	370.113	123.033.407,93	6.045.880,36	5,64	53,19
Palha de soja e milho	18.524.948	1.207.012.746,78	59.312.789,73	5,64	11,90

Fonte: Elaboração própria**Tabela 5.29: Custo nivelado da cadeia de suprimentos da bioenergia para o Caso G1**

Resíduo	LC G1 (US\$/MWh)
Palha de cana-de-açúcar	39,50
Palha de soja	45,12
Palha de milho	48,35
Palha de arroz	49,64
Palha de trigo	84,74
Palha de soja e milho	34,61

Fonte: Elaboração própria

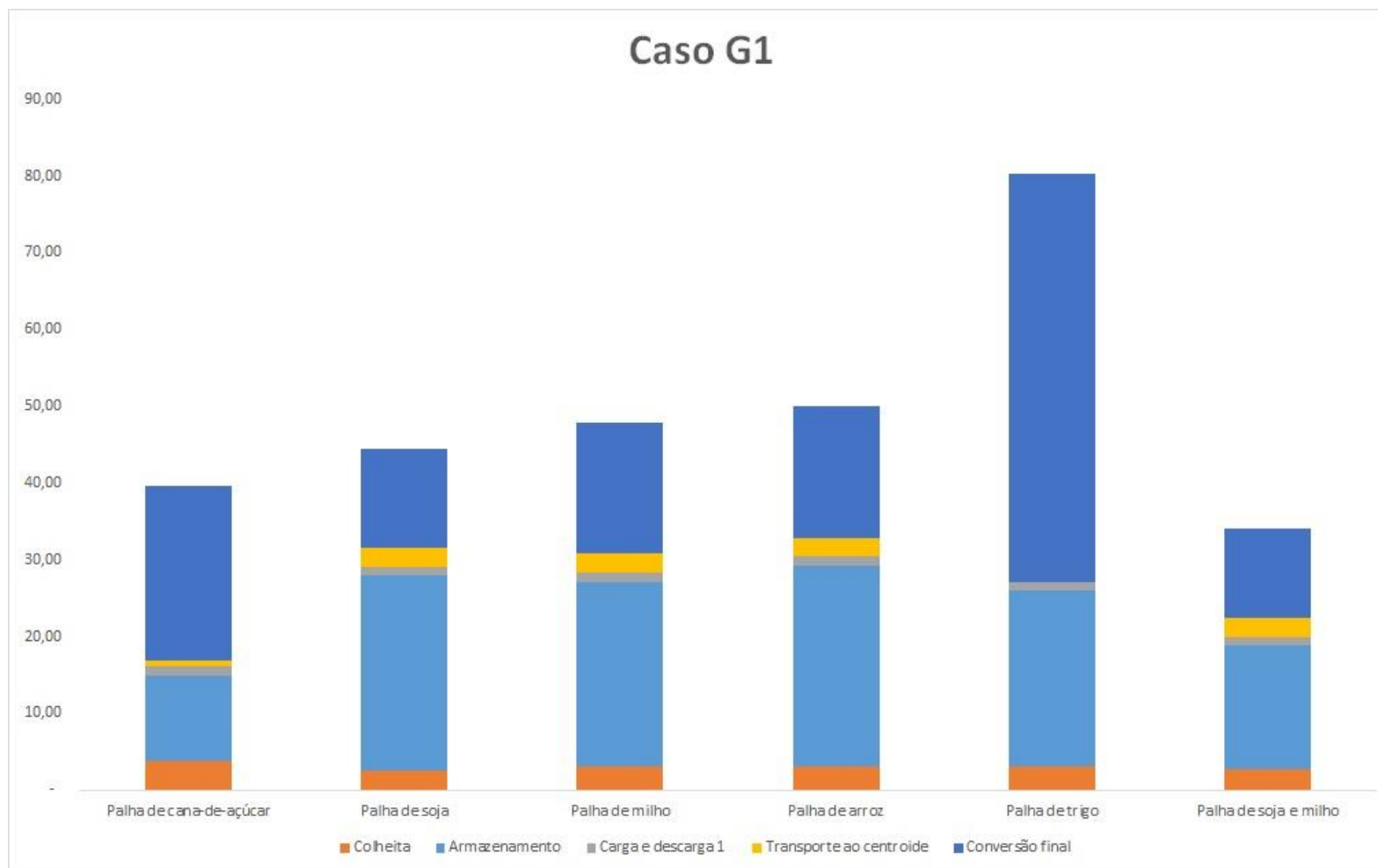


Figura 5.4: Divisão absoluta do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G1

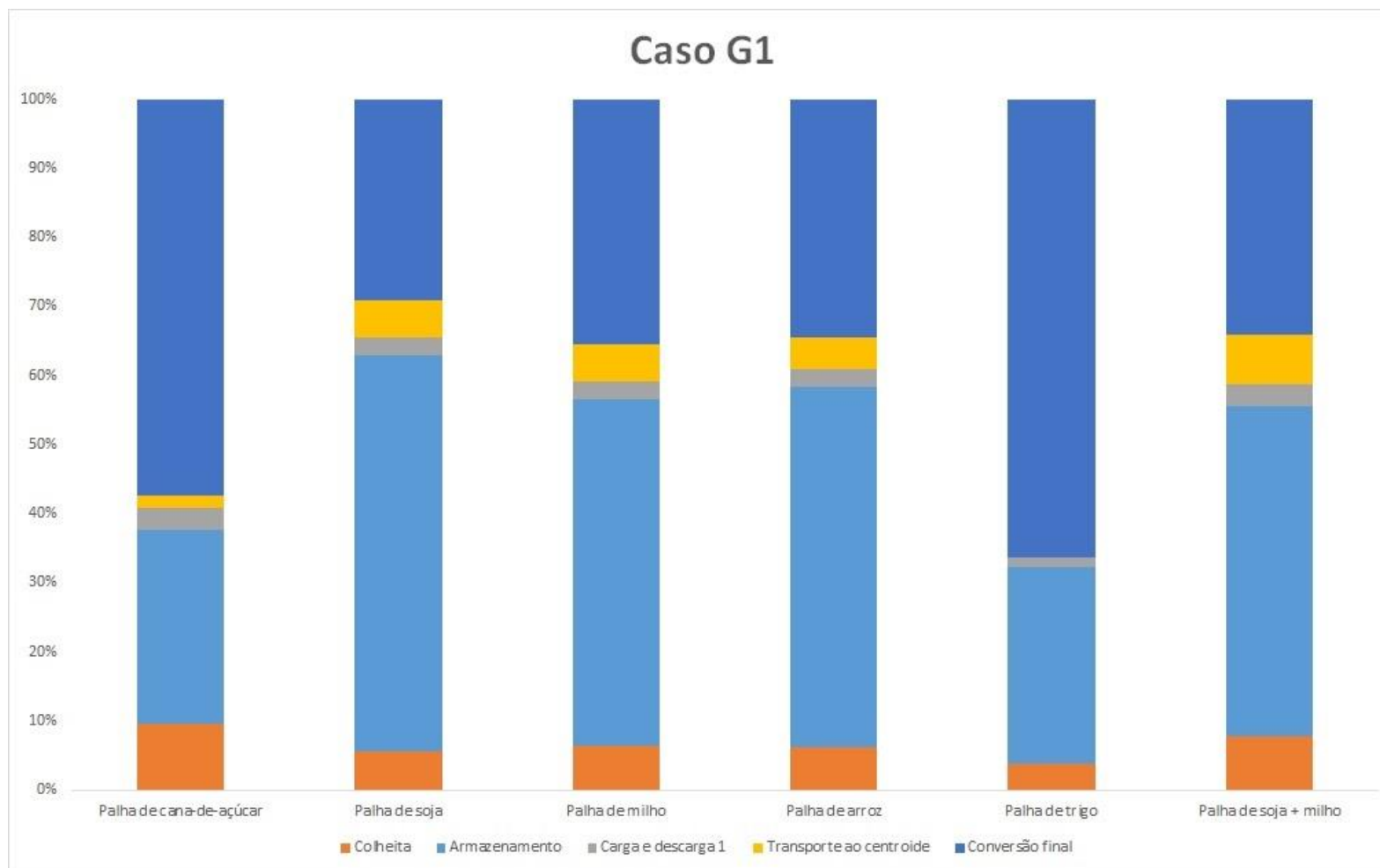


Figura 5.5: Divisão relativa do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G1

5.3.2 Caso G2A

A cadeia de suprimentos configurada no caso G2A caracteriza-se por pré-tratamento dos resíduos via processo TOP e armazenamento da biomassa após o pré-tratamento. A Figura 5.6 exibe a sequência das operações que configuram a cadeia de suprimentos bioenergética do caso.

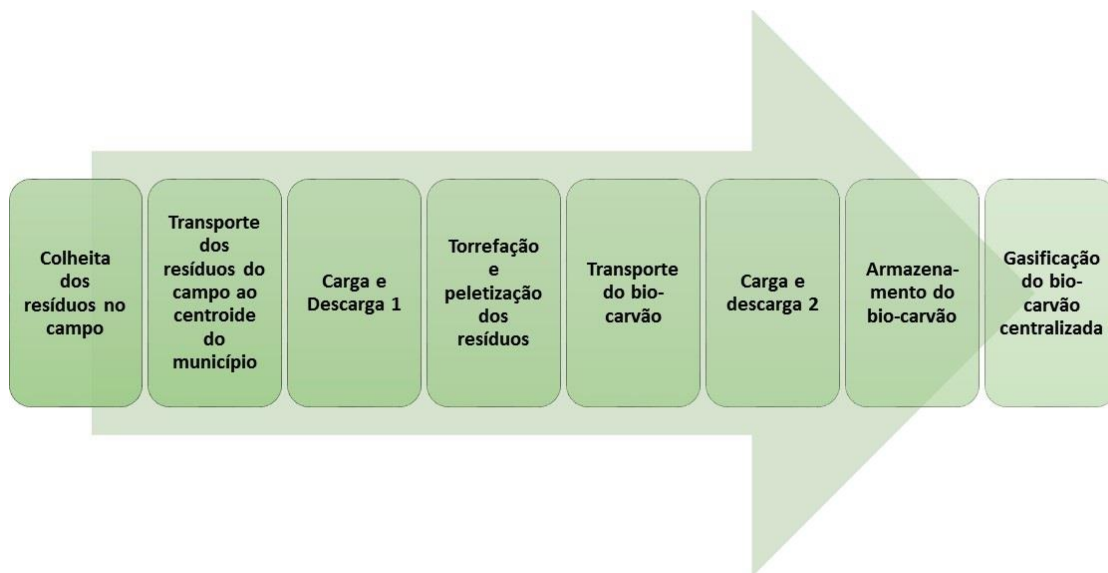


Figura 5.6. Sequência de operações para o Caso G2A

Os custos de investimento, O&M fixos totais e os custos variáveis do pré-tratamento encontram-se na Tabela 5.30, discriminados por biomassa, assim como o custo nivelado médio da operação, descrito em termos de US\$ por tonelada produzida de bio-carvão. Os custos da etapa de armazenamento, carga e descarga e transporte do bio-carvão encontram-se na Tabela 5.31, na Tabela 5.32 e na Tabela 5.33, respectivamente. A Tabela 5.34 mostra os resultados do investimento, O&M fixo e dos custos variáveis da planta centralizada da gasificação, além do seu custo nivelado.

A Tabela 5.35 apresenta o custo total da cadeia de suprimentos nivelado pela produção final de gás de síntese, por biomassa, para o Caso G2A. A Figura 5.7 mostra a divisão do custo nivelado final pelas etapas em valores absolutos e a Figura 5.8 faz a mesma divisão, porém apresentando os valores em termos relativos.

Tabela 5.30: Custos do processo TOP para o Caso G2A

Resíduo	Produção (kt/ano)	CI total (US\$)	CF total (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC médio (US\$/t)
Palha de cana-de-açúcar	1.694	321.550.618,54	30.253.292,55	8,98	51,79
Palha de soja	2.808	508.148.339,52	47.809.456,70	8,98	49,80
Palha de milho	1.569	303.561.237,08	28.560.750,26	8,98	52,61
Palha de arroz	1.000	186.013.146,11	17.501.164,06	8,98	50,91
Palha de trigo	90	37.877.275,83	3.563.707,36	8,98	104,01
Palha de soja e milho	4.377	685.371.924,71	64.483.649,38	8,98	44,30

Fonte: Elaboração própria**Tabela 5.31: Custos da etapa de armazenamento da bio-carvão para o Caso G2A**

Resíduo	Custo (US\$/ano)
Palha de cana-de-açúcar	2.702.949,64
Palha de soja	22.047.583,83
Palha de milho	5.406.098,18
Palha de arroz	5.484.208,41
Palha de trigo	308.882,30
Palha de soja e milho	10.958.201,87

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5.32: Custos da etapa de carga e descarga do bio-carvão para o Caso G2A

Resíduo	Custo (US\$/ano)
Palha de cana-de-açúcar	3.453.648,19
Palha de soja	5.723.304,42
Palha de milho	3.198.823,69
Palha de arroz	2.039.541,01
Palha de trigo	183.273,98
Palha de soja e milho	8.922.128,12

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5.33: Custos da etapa de transporte do bio-carvão para o Caso G2A

Resíduo	Custo (US\$/ano)
Palha de cana-de-açúcar	5.968.690,39
Palha de soja	18.947.722,92
Palha de milho	17.520.318,57
Palha de arroz	4.413.203,33
Palha de trigo	395.782,60
Palha de soja e milho	36.468.041,48

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5.34: Custos da etapa de gasificação da biomassa para o Caso G2A

Resíduo	Produção de gás de síntese (MWh/ano)	CI total (US\$)	CF total (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC médio (US\$/MWh)
Palha de cana-de-açúcar	8.243.851	343.034.330,75	16.856.759,12	5,64	7,54
Palha de soja	14.740.056	513.731.022,19	25.244.820,47	5,64	5,41
Palha de milho	7.656.089	325.946.051,84	16.017.038,50	5,64	6,61
Palha de arroz	4.502.336	219.660.780,82	10.794.164,14	5,64	7,57
Palha de trigo	459.090	37.487.898,79	1.842.161,04	5,64	12,68
Palha de soja e milho	22.978.451	759.226.732,45	37.308.516,96	5,64	5,13

Fonte: Elaboração própria**Tabela 5.35: Custo nivelado da cadeia de suprimentos bioenergética para o Caso G2A**

Resíduo	LC G2A (US\$/MWh)
Palha de cana-de-açúcar	24,20
Palha de soja	24,48
Palha de milho	27,87
Palha de arroz	27,82
Palha de trigo	42,95
Palha de soja e milho	22,49

Fonte: Elaboração própria

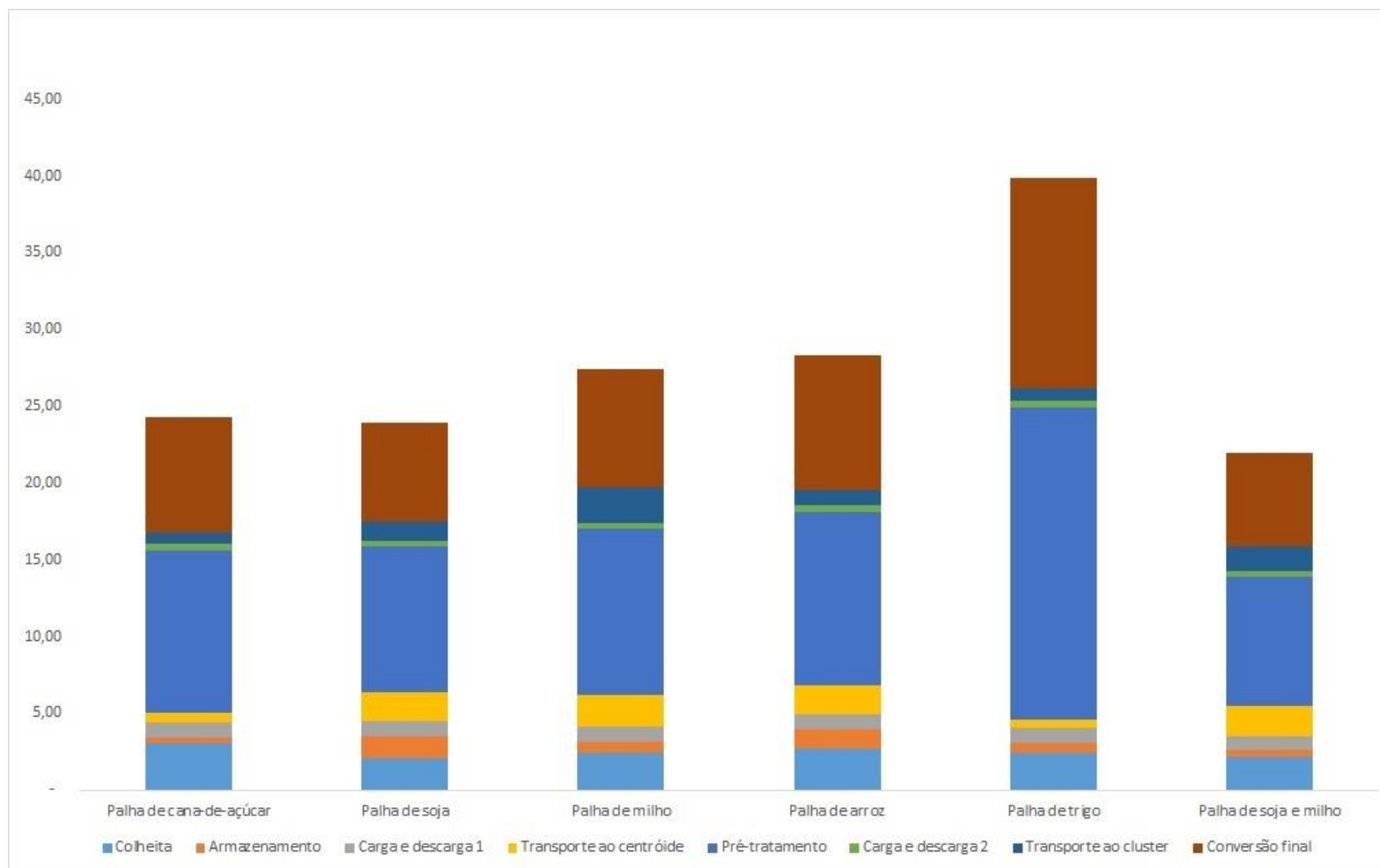


Figura 5.7: Divisão absoluta do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G2A

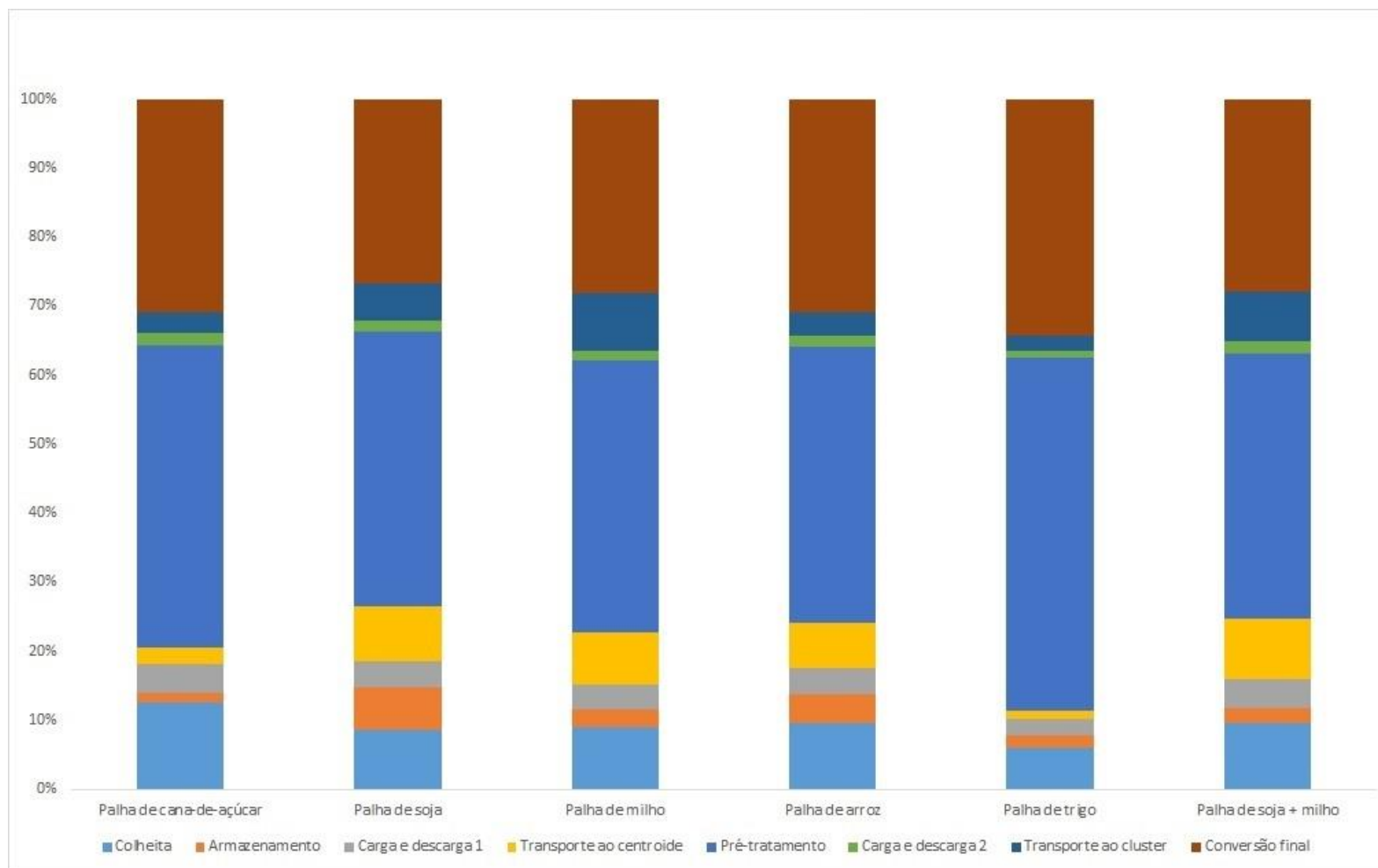


Figura 5.8: Divisão relativa do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G2A

5.3.3 Caso G2B

A cadeia de suprimentos configurada no caso G2B caracteriza-se pelo pré-tratamento dos resíduos via processo TOP e armazenamento da biomassa anterior ao pré-tratamento, ainda na forma crua. A Figura 5.15 exibe a sequência das operações que configuram a cadeia de suprimentos bioenergética do caso.

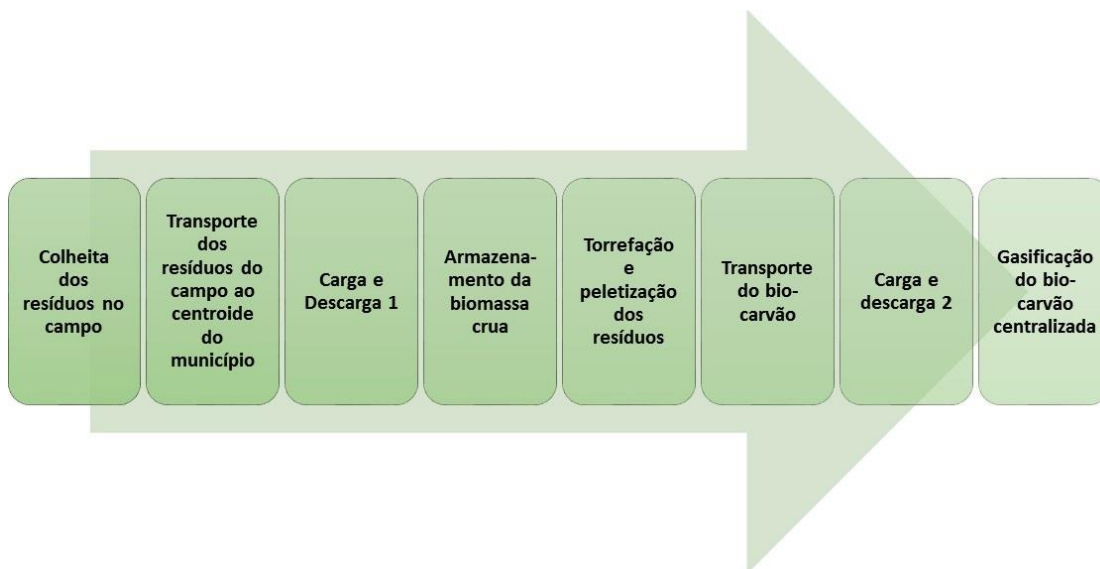


Figura 5.9. Sequência de operações para o Caso G2B

Os custos de investimento, O&M fixos totais e os custos variáveis do pré-tratamento encontram-se na Tabela 5.36, discriminados por biomassa, assim como o custo nivelado médio da operação, descrito em termos de US\$ por tonelada produzida de bio-carvão. Os custos da etapa de armazenamento são idênticos aos encontrados no Caso G1, disponíveis na Tabela 5.27. Os custos de carga e descarga e de transporte do bio-carvão encontram-se na Tabela 5.37 e na Tabela 5.38, respectivamente. A Tabela 5.39 mostra os resultados do investimento, O&M fixo e dos custos variáveis da planta centralizada da gasificação, além do seu custo nivelado.

A Tabela 5.40 apresenta o custo total da cadeia de suprimentos nivelado pela produção final de gás de síntese, por biomassa, para o Caso G2B. A Figura 5.10 mostra a divisão do custo nivelado final pelas etapas em valores absolutos e a Figura 5.11 faz a mesma divisão, porém apresentando os valores em termos relativos.

Tabela 5.36: Custos do processo TOP para o Caso G2B

Resíduo	Produção (kt/ano)	CI total (US\$)	CF total (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC médio (US\$/t)
Palha de cana-de-açúcar	1.440	255.174.538,79	24.008.257,26	8,98	48,95
Palha de soja	2.386	334.869.483,74	31.506.406,37	8,98	40,63
Palha de milho	1.334	199.922.892,58	18.809.871,32	8,98	42,79
Palha de arroz	850	108.102.022,17	10.170.846,87	8,98	37,65
Palha de trigo	76	33.987.927,80	3.197.775,60	8,98	109,30
Palha de soja e milho	3.720	490.901.567,07	46.186.783,25	8,98	38,74

Fonte: Elaboração própria**Tabela 5.37: Custos da etapa de carga e descarga do bio-carvão para o Caso G2B**

Resíduo	Custo (US\$/ano)
Palha de cana-de-açúcar	2.935.600,97
Palha de soja	4.864.808,76
Palha de milho	2.719.000,14
Palha de arroz	1.733.609,86
Palha de trigo	155.782,88
Palha de soja e milho	7.583.808,90

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5.38: Custos da etapa de transporte do bio-carvão para o Caso G2B

Resíduo	Custo (US\$/ano)
Palha de cana-de-açúcar	5.073.386,83
Palha de soja	16.105.564,48
Palha de milho	14.892.270,78
Palha de arroz	3.751.222,83
Palha de trigo	336.415,21
Palha de soja e milho	30.997.835,26

Fonte: Elaboração própria**Tabela 5.39: Custos da etapa de gasificação da biomassa para o Caso G2B**

Resíduo	Produção de gás de síntese (MWh/ano)	CI total (US\$)	CF total (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC médio (US\$/MWh)
Palha de cana-de-açúcar	7.007.273	280.024.207,16	13.760.432,08	5,64	7,28
Palha de soja	12.529.048	460.979.637,78	22.652.609,43	5,64	5,71
Palha de milho	6.507.676	266.074.781,92	13.074.955,20	5,64	6,35
Palha de arroz	3.826.986	197.105.377,72	9.685.788,20	5,64	8,00
Palha de trigo	390.226	33.638.533,12	1.653.002,63	5,64	13,38
Palha de soja e milho	19.531.683	652.892.707,30	32.083.246,82	5,64	5,19

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5.40: Custo nivelado da cadeia de suprimentos bioenergética para o Caso G2B

Resíduo	LC G2B (US\$/MWh)
Palha de cana-de-açúcar	34,41
Palha de soja	46,61
Palha de milho	48,72
Palha de arroz	49,66
Palha de trigo	67,00
Palha de soja e milho	37,36

Fonte: Elaboração própria

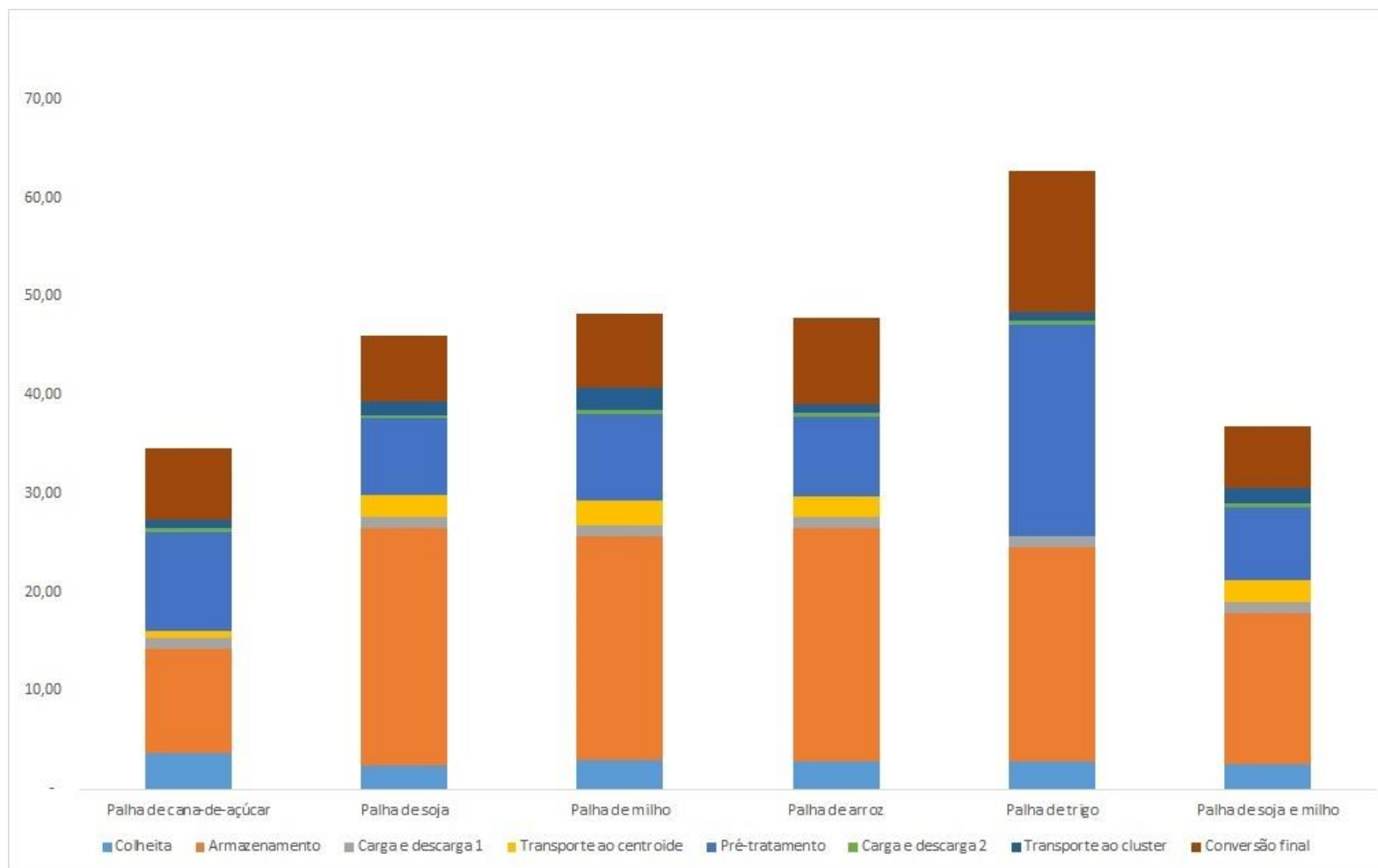


Figura 5.10: Divisão absoluta do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G2B

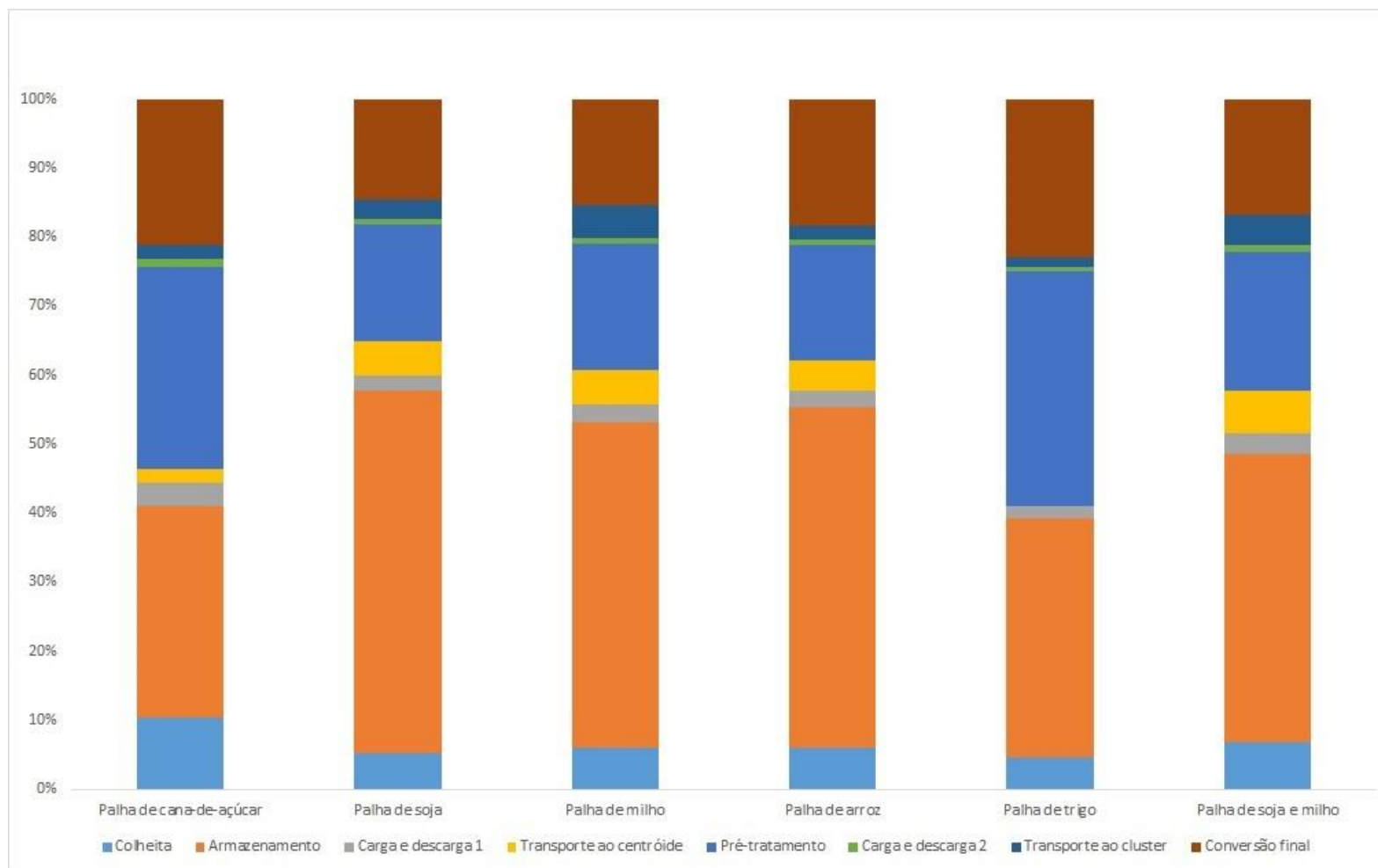


Figura 5.11: Divisão relativa do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G2B

5.3.4 Caso G3A

A cadeia de suprimentos configurada no caso G3A caracteriza-se pelo pré-tratamento dos resíduos via peletização e armazenamento da biomassa já pré-tratada. A Figura 5.12 exhibe a sequência das operações que configuram a cadeia de suprimentos bioenergética proposta pelo caso.

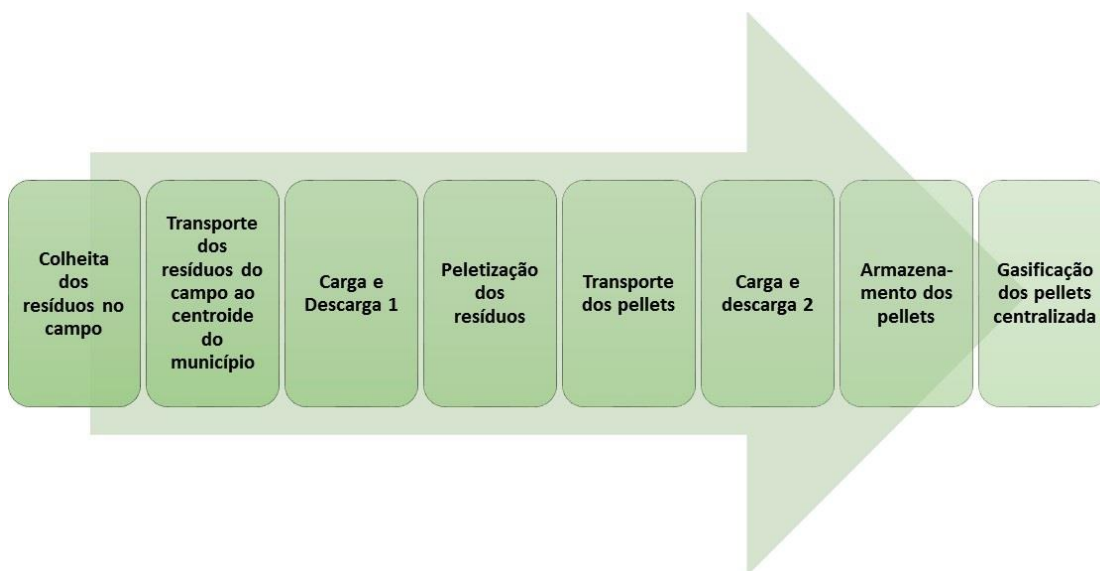


Figura 5.12. Sequência de operações para o Caso G3A

Os custos de investimento, O&M fixos totais e os custos variáveis do pré-tratamento encontram-se na Tabela 5.41, discriminados por biomassa, assim como o custo nivelado médio da operação, descrito em termos de US\$ por tonelada produzida de pellets. Os custos da etapa de armazenamento, carga e descarga e transporte dos pellets encontram-se na Tabela 5.42, na Tabela 5.43 e na Tabela 5.44, respectivamente. A Tabela 5.45 mostra os resultados do investimento, O&M fixo e dos custos variáveis da planta centralizada da gasificação, além do seu custo nivelado.

A Tabela 5.46 apresenta o custo total da cadeia de suprimentos nivelado pela produção final de gás de síntese, por biomassa, para o Caso G1. A Figura 5.13 mostra a divisão do custo nivelado final pelas etapas em valores absolutos e a Figura 5.14 faz a mesma divisão, porém apresentando os valores em termos relativos.

Tabela 5.41: Custos do processo de peletização para o Caso G3A

Resíduo	Produção (kt/ano)	CI total (US\$)	CF total (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC médio (US\$/t)
Palha de cana-de-açúcar	2.346	206.190.283,39	25.701.660,79	13,19	35,71
Palha de soja	3.887	304.356.470,53	37.938.095,99	13,19	33,25
Palha de milho	2.173	181.178.909,06	22.583.987,89	13,19	34,55
Palha de arroz	1.385	112.736.050,84	14.052.571,68	13,19	34,04
Palha de trigo	124	28.270.165,70	3.523.881,91	13,19	71,36
Palha de soja e milho	6.060	408.317.586,30	50.896.870,23	13,19	30,45

Fonte: Elaboração própria**Tabela 5.42: Custos da etapa de armazenamento dos pellets para o Caso G3A**

Resíduo	Custo (US\$/ano)
Palha de cana-de-açúcar	4.663.171,86
Palha de soja	19.018.421,76
Palha de milho	9.326.686,87
Palha de arroz	5.946.611,06
Palha de trigo	1.527.821,74
Palha de soja e milho	18.905.264,76

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5.43: Custos da etapa de carga e descarga dos pellets para o Caso G3A

Resíduo	Custo (US\$/ano)
Palha de cana-de-açúcar	2.250.699,70
Palha de soja	3.729.806,51
Palha de milho	2.084.633,73
Palha de arroz	1.329.143,58
Palha de trigo	119.437,38
Palha de soja e milho	5.814.440,24

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5.44: Custos da etapa de transporte do bio-carvão para o Caso G3A

Resíduo	Custo (US\$/ano)
Palha de cana-de-açúcar	8.953.035,58
Palha de soja	28.421.584,38
Palha de milho	26.280.477,85
Palha de arroz	6.619.805,00
Palha de trigo	593.673,90
Palha de soja e milho	54.702.062,22

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5.45: Custos da etapa de gasificação da biomassa para o Caso G3A

Resíduo	Produção de gás de síntese (MWh/ano)	CI total (US\$)	CF total (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC médio (US\$/MWh)
Palha de cana-de-açúcar	7.609.708	423.148.871,50	20.793.599,82	5,64	8,63
Palha de soja	13.606.206	629.145.064,56	30.916.284,04	5,64	7,18
Palha de milho	7.067.159	403.067.108,18	19.806.778,92	5,64	8,85
Palha de arroz	4.156.003	265.883.857,70	13.065.573,16	5,64	9,93
Palha de trigo	423.775	43.580.656,14	2.141.560,06	5,64	15,96
Palha de soja e milho	19.711.652	1.004.050.363,68	49.339.187,39	5,64	7,91

Fonte: Elaboração própria**Tabela 5.46: Custo nivelado da cadeia de suprimentos bioenergética para o Caso G3A**

Resíduo	LC G3A (US\$/MWh)
Palha de cana-de-açúcar	28,00
Palha de soja	27,88
Palha de milho	32,35
Palha de arroz	31,73
Palha de trigo	48,26
Palha de soja e milho	28,87

Fonte: Elaboração própria

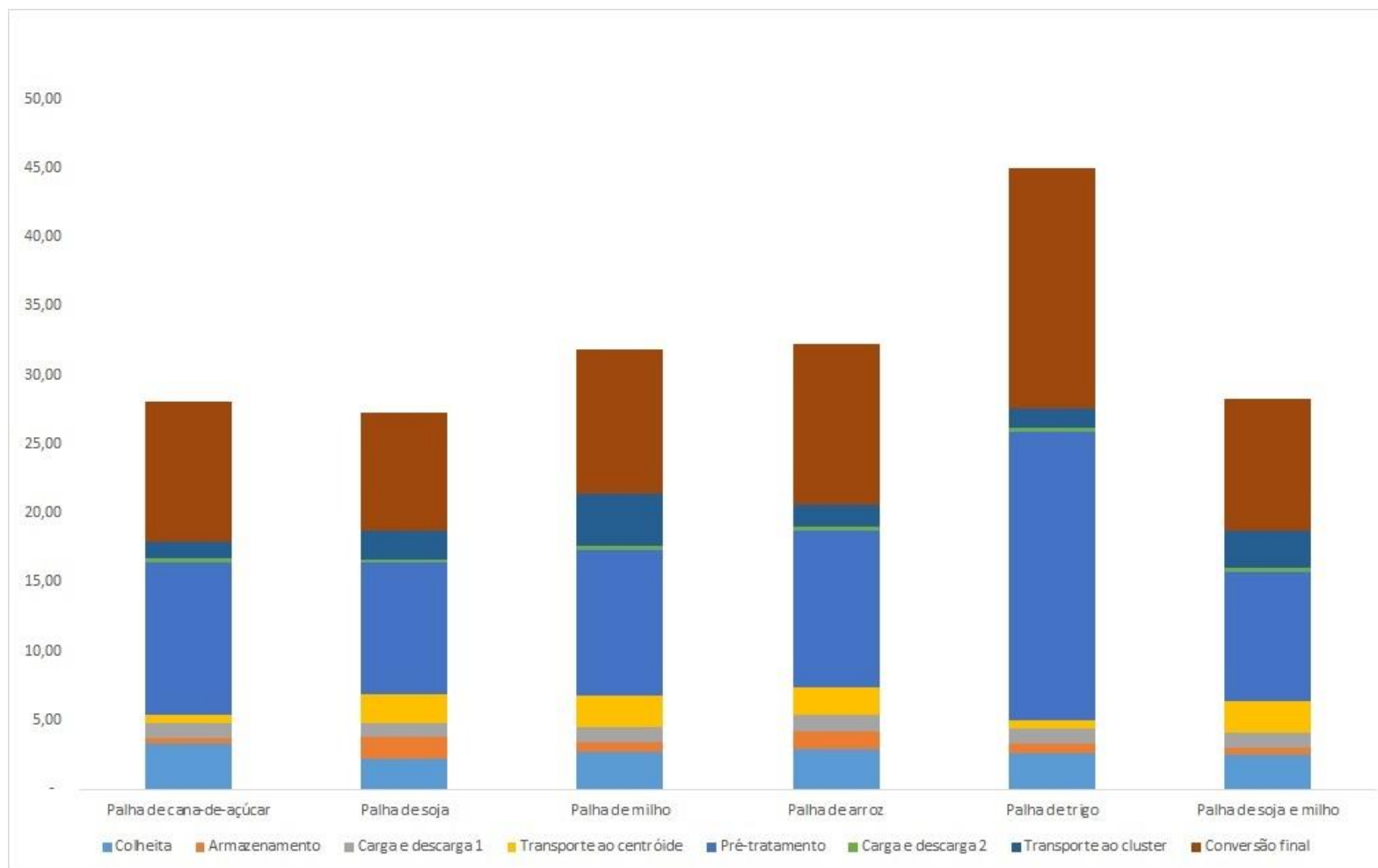


Figura 5.13: Divisão absoluta do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G3A

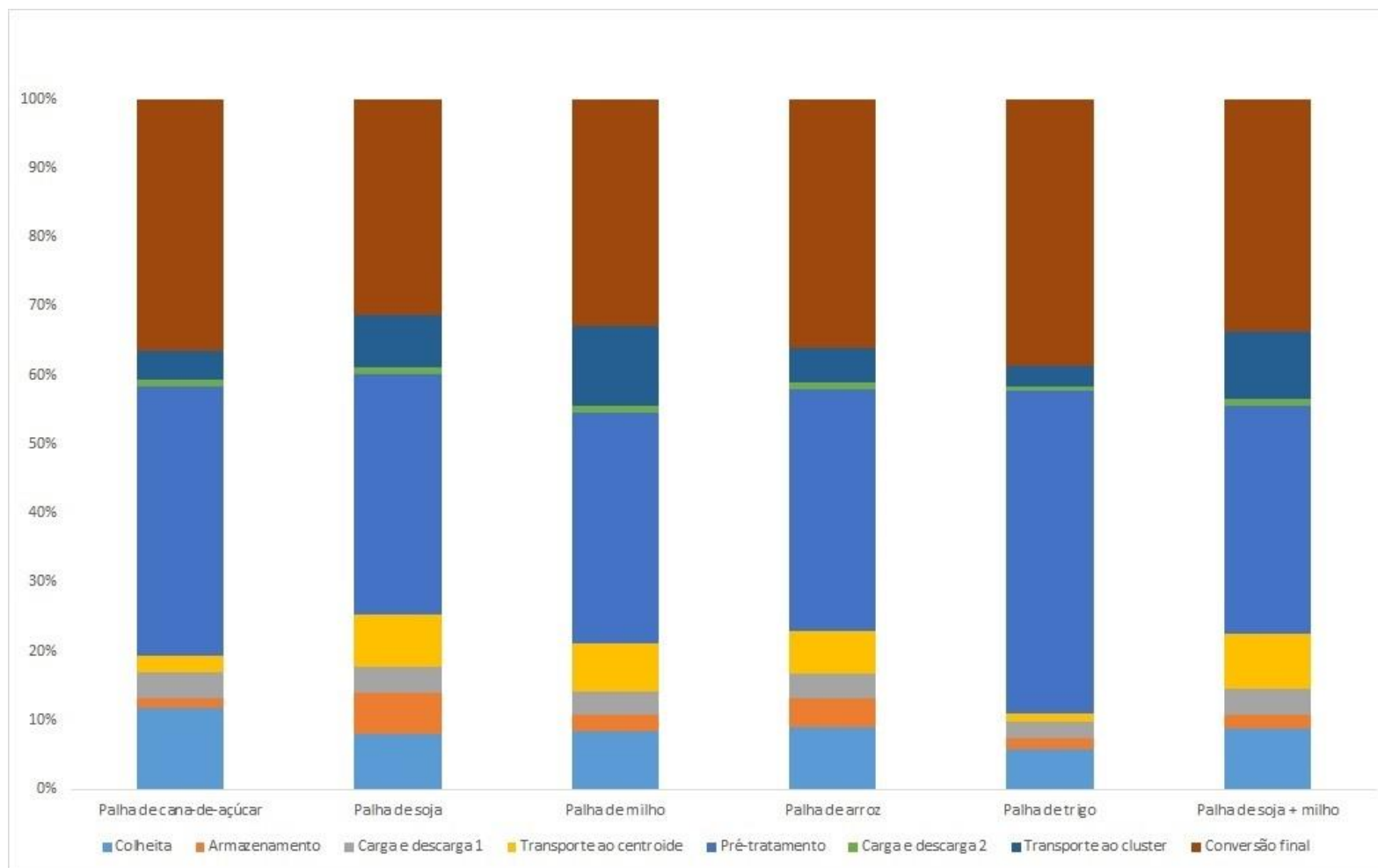


Figura 5.14: Divisão relativa do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G3A

5.3.5 Caso G3B

A cadeia de suprimentos configurada no caso G3B caracteriza-se pelo pré-tratamento dos resíduos via processo de peletização e armazenamento da biomassa a montante do pré-tratamento. A Figura 5.15 exibe a sequência das operações que configuram a cadeia de suprimentos bioenergética do caso.

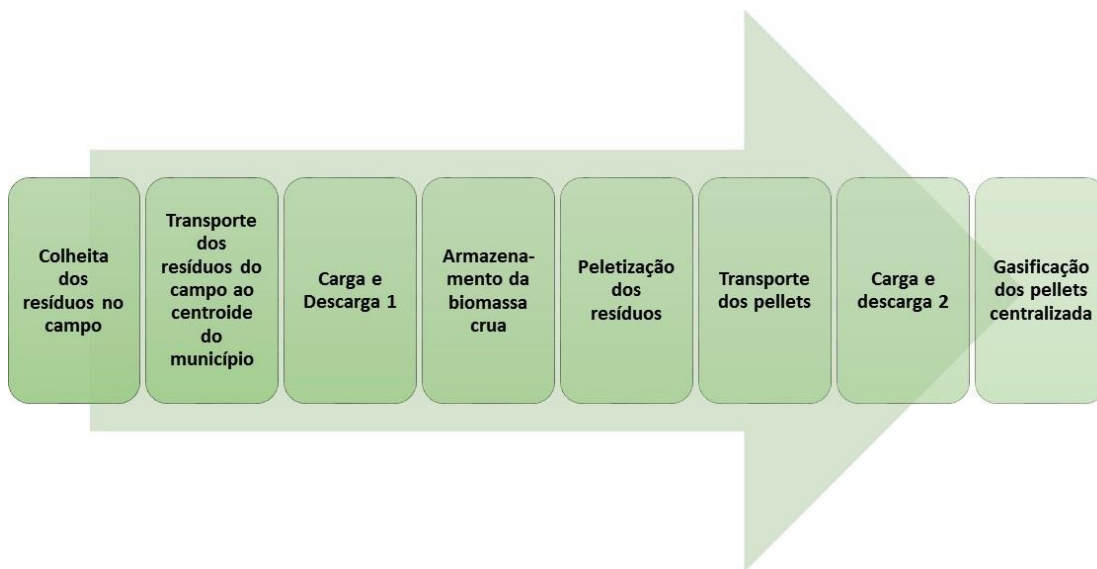


Figura 5.15. Sequência de operações para o Caso G3B

Os custos de investimento, O&M fixos totais e os custos variáveis do pré-tratamento encontram-se na Tabela 5.47, discriminados por biomassa, assim como o custo nivelado médio da operação, descrito em termos de US\$ por tonelada produzida de pellets. Os custos da etapa de armazenamento são idênticos aos encontrados no Caso G1, disponíveis na Tabela 5.27. Os custos de carga e descarga e de transporte dos pellets encontram-se na Tabela 5.48 e na Tabela 5.49, respectivamente. A Tabela 5.50 mostra os resultados do investimento, O&M fixo e dos custos variáveis da planta centralizada da gasificação, além do seu custo nivelado.

A Tabela 5.51 apresenta o custo total da cadeia de suprimentos nivelado pela produção final de gás de síntese, por biomassa, para o Caso G3B. A Figura 5.16 mostra a divisão do custo nivelado final pelas etapas em valores absolutos e a Figura 5.17 faz a mesma divisão, porém apresentando os valores em termos relativos.

Tabela 5.47: Custos do processo de peletização para o Caso G3B

Resíduo	Produção (kt/ano)	CI total (US\$)	CF total (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC médio (US\$/t)
Palha de cana-de-açúcar	1.994	177.968.954,37	22.183.866,38	13,19	36,05
Palha de soja	3.304	201.624.265,47	25.132.505,72	13,19	28,82
Palha de milho	1.847	123.975.084,69	15.453.519,54	13,19	30,39
Palha de arroz	1.177	80.192.074,59	9.995.958,42	13,19	30,64
Palha de trigo	106	25.367.303,48	3.162.039,54	13,19	74,60
Palha de soja e milho	5.151	293.857.407,99	36.629.385,71	13,19	27,80

Fonte: Elaboração própria**Tabela 5.48: Custos da etapa de carga e descarga dos pellets para o Caso G3B**

Resíduo	Custo (US\$/ano)
Palha de cana-de-açúcar	1.913.094,74
Palha de soja	3.170.335,54
Palha de milho	1.771.938,67
Palha de arroz	1.129.772,04
Palha de trigo	101.521,77
Palha de soja e milho	4.942.274,21

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5.49: Custos da etapa de transporte dos pellets para o Caso G3B

Resíduo	Custo (US\$/ano)
Palha de cana-de-açúcar	7.610.080,24
Palha de soja	24.158.346,72
Palha de milho	22.338.406,17
Palha de arroz	5.626.834,25
Palha de trigo	504.622,81
Palha de soja e milho	46.496.752,89

Fonte: Elaboração própria**Tabela 5.50: Custos da etapa de gasificação da biomassa para o Caso G3B**

Resíduo	Produção de gás de síntese (MWh/ano)	CI total (US\$)	CF total (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC médio (US\$/MWh)
Palha de cana-de-açúcar	6.468.252	379.698.723,82	18.658.452,97	5,64	9,11
Palha de soja	11.565.275	535.900.803,45	26.334.246,89	5,64	7,19
Palha de milho	6.007.085	361.679.013,93	17.772.961,69	5,64	9,35
Palha de arroz	3.532.602	238.582.135,64	11.723.962,39	5,64	10,48
Palha de trigo	436.530	39.105.668,56	1.921.658,49	5,64	13,91
Palha de soja e milho	16.754.904	873.313.138,60	42.914.740,29	5,64	8,09

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5.51: Custo nivelado da cadeia de suprimentos bioenergética para o Caso G3B

Resíduo	LC G3B (US\$/MWh)
Palha de cana-de-açúcar	40,55
Palha de soja	52,17
Palha de milho	56,62
Palha de arroz	57,55
Palha de trigo	61,28
Palha de soja e milho	46,74

Fonte: Elaboração própria

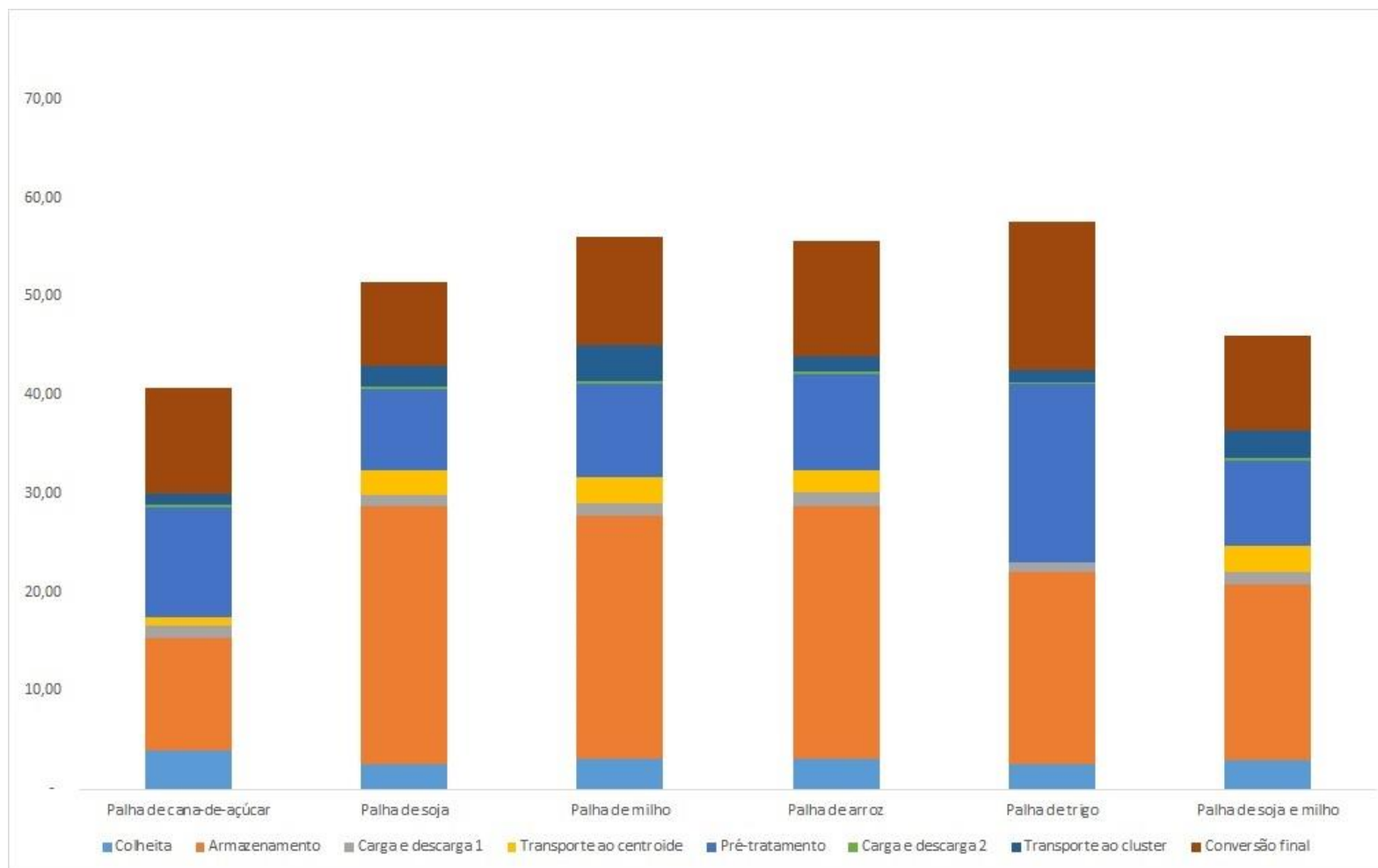


Figura 5.16: Divisão absoluta do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G3B

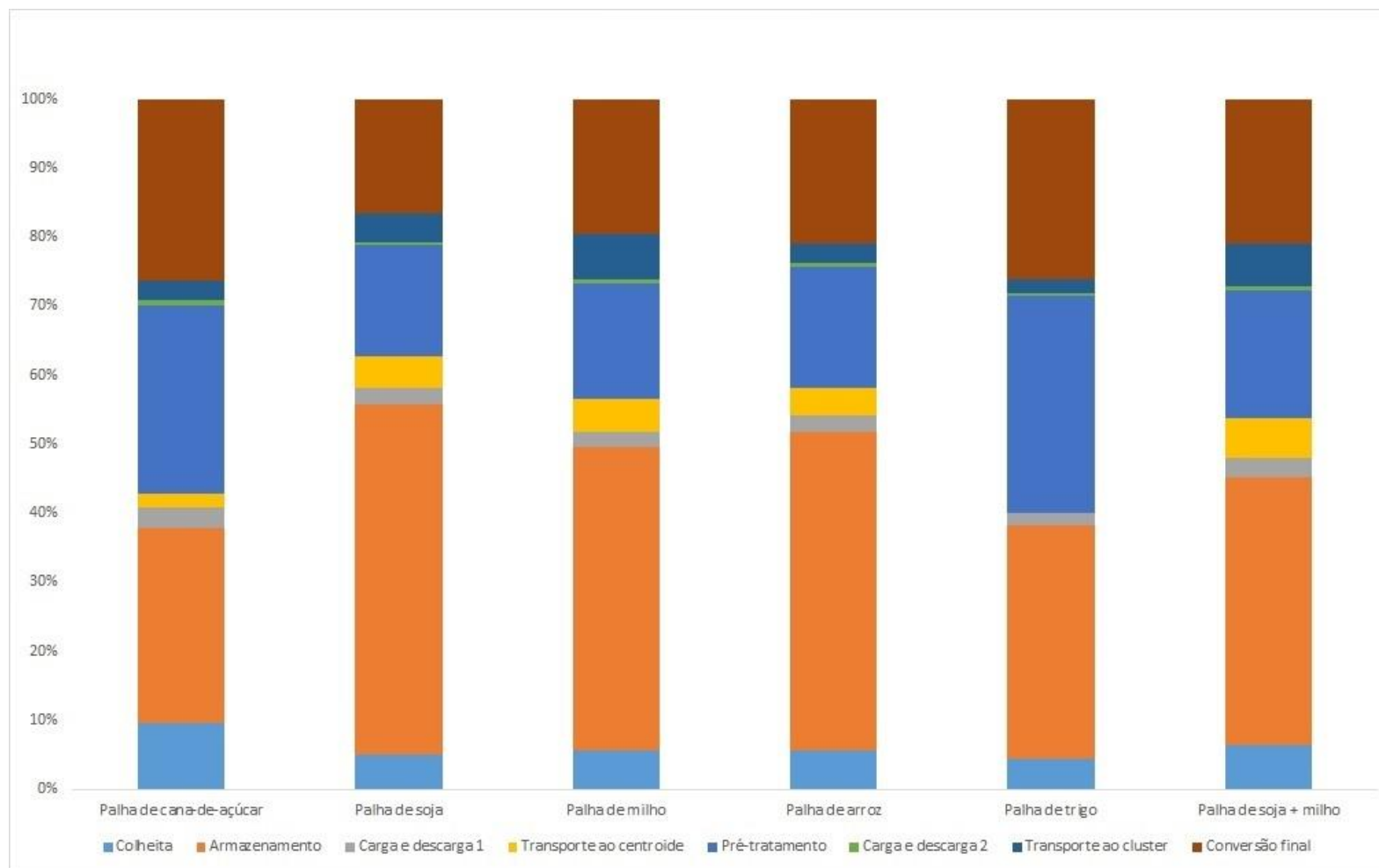


Figura 5.17: Divisão relativa do custo nivelado do produto por operação da cadeia de suprimentos para o Caso G3B

5.3.6 Comparação entre os casos

A Figura 5.18 junta os resultados de custo nivelado por biomassa obtidos para todos os casos, permitindo uma comparação gráfica entre eles. Observa-se que há um padrão na relação entre os custos dos cenários para todas as biomassas, no qual os casos que preveem armazenamento da palha na forma crua (G1, G2B e G3B) possuem custos superiores àqueles em que a biomassa é armazenada após o pré-tratamento (G2A e G3A). Também se verifica que para todas as biomassas o caso G2A (torrefação e peletização com armazenamento a jusante) possui os menores custos da cadeia.

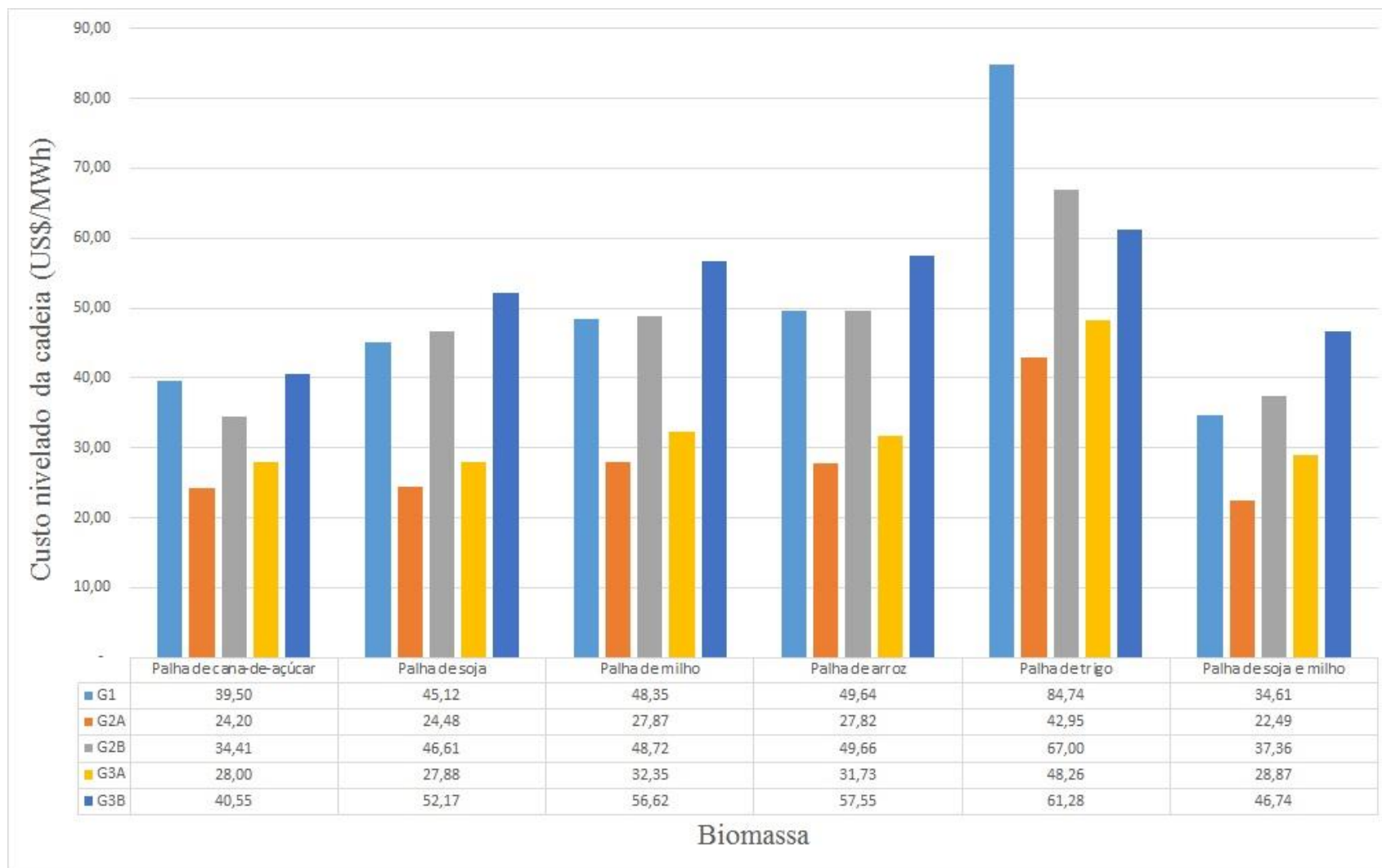


Figura 5.18: Comparação entre os custos nivelados totais das cadeias dos cinco casos

5.4 Discussões

Esta seção discute os resultados obtidos neste capítulo de forma qualitativa e quantitativa, comparando-os entre si e situando-os no contexto que envolve a temática abordada dentro do ambiente científico.

Primeiramente, para fins de interpretação é interessante estabelecer uma discussão qualitativa da forma como a produção agrícola se organiza em cada *cluster* de biomassa no escopo do trabalho. Isso é importante, sobretudo, para a verificação da influência dos arranjos produtivos nos resultados das simulações em cada caso. Na Figura 5.19 são listadas características dos sistemas produtivos de cada *cluster* que possuem potencialidade de exercer influência nos resultados dos custos nas etapas da cadeia de produção.



Figura 5.19: Discussão qualitativa dos sistemas de produção das biomassas

O Caso G1 (“biomassa crua”) traz consigo a diferenciação em relação aos outros da conversão descentralizada, o que acaba por reduzir o número de operações ao longo da cadeia, em detrimento de um custo unitário maior de gasificação. Essa redução na quantidade de operações ressalta os dois grandes custos da cadeia: o armazenamento e a conversão final.

A etapa de armazenamento representa uma parcela que varia de 28% a 57% dos custos totais da cadeia. Para as palhas de cana-de-açúcar e trigo, as participações desta etapa são as mais baixas (28% e 29%, respectivamente), enquanto que para as demais o

armazenamento representa uma parcela próxima de 50% dos custos. Entretanto, observando a fatia do armazenamento em valores absolutos, é possível notar que para as palhas de cana-de-açúcar e de soja e milho combinadas essa etapa possui os menores valores no custo nivelado final. Isso leva à conclusão, como esperado, que a significância do custo do armazenamento na cadeia de suprimentos aumenta o quanto maior for o grau de sazonalidade da produção de biomassa. Assim, para o caso de sistemas que preveem o armazenamento de biomassa no estado cru, que demanda altos custos, o fator de sazonalidade é uma variável imprescindível na análise para a tomada de decisões. Ademais, para além da questão dos custos o armazenamento, a degradação biológica não somente causa perda de matéria seca como também compromete a qualidade da biomassa para o seu aproveitamento futuro. Um caso que exemplifica esta assertiva foi o relatado em BZUNECK *et al.* (2013), no qual um atraso para testes de co-queima da palha de arroz com carvão resultou na perda de grande parte dos fardos armazenados não só pela redução da massa seca, mas também pelo estágio de decomposição que o material adquiriu.

O fato que explica a baixa participação relativa da parcela referente ao armazenamento na cadeia da palha de trigo e a alta participação na cadeia da palha de soja e trigo combinadas não é o fator de sazonalidade, que indicaria exatamente o oposto, em uma análise isolada. Verifica-se que o alto custo da gasificação para a palha de trigo dilui a parcela do armazenamento, enquanto que o baixo custo para a gasificação da palha de soja e milho acaba por aumentar a representatividade das demais. E o principal parâmetro que rege a importância do custo de gasificação nas cadeias bioenergéticas é a escala de produção, o que pode ser concluído pela comparação dos custos das cadeias da soja, do milho e do arroz, que possuem escalas produtivas decrescentes, na ordem escrita, e demais características semelhantes. Os custos de gasificação desses três resíduos seguem a ordem inversa da escala, como pode ser visto na Figura 5.4.

Comparando os custos da cadeia da palha da soja com a da palha da cana-de-açúcar é possível verificar que, ao final, ambos possuem valores próximos. Porém, suas composições de custos são diametralmente opostas no que diz respeito à participação das duas principais etapas que os compõem. A palha da cana-de-açúcar possui menores custos de armazenamento, porém maiores custos de gasificação, devido a seu potencial ser fragmentado em diversos municípios e, conseqüentemente, ser dividido em um maior número de plantas industriais em decorrência do procedimento metodológico adotado. Enquanto isso, a palha da soja tem os elevados custos de armazenamento compensados

nos ganhos de escala obtidos na gasificação, sendo seu alto potencial dividido em um número reduzido de plantas industriais.

Os casos mais emblemáticos dentro do estudo de caso G1 são a palha de trigo e a palha de soja com milho, que trazem perspectivas antagônicas no que diz respeito a escala de produção e sazonalidade, refletindo, assim, nos custos finais de cada sistema, sendo o primeiro o maior de todos e o segundo o menor da série que compõe o caso.

O estudo de caso G2A (“TOP com armazenamento a jusante”), assim como os subsequentes, introduz não só a etapa de pré-tratamento na cadeia produtiva, mas outras operações logísticas adicionais que visam entregar o produto à central de gasificação. Este caso apresentou os menores custos da cadeia produtiva dentre as alternativas comparadas, para todas as biomassas.

Com relação aos custos com armazenamento, neste caso eles representam uma parcela muito baixa nos custos totais da cadeia produtiva. As demais operações logísticas também possuem pouca representatividade no custo final, sendo as maiores parcelas referentes às etapas industriais do processo, ou seja, o pré-tratamento e a gasificação. Destas, o pré-tratamento possui a maior parcela na composição dos custos.

A modalidade adotada de pré-tratamento neste caso foi o processo de torrefação e peletização combinadas, que objetivam a conversão da biomassa a um produto mais denso em massa e energia, com baixo teor de umidade e caráter inerte à degradação biológica, sendo todas essas características favoráveis ao processo logístico. Assim, conforme esperado, esta modalidade de pré-tratamento possibilitou uma sensível redução nos custos logísticos ao longo da cadeia de suprimentos da bioenergia. Contudo, a própria operação de pré-tratamento apresentou um custo relativo elevado na cadeia, evidenciando a presença de um *trade-off* entre o investimento no aumento da qualidade da biomassa e os custos logísticos da cadeia.

Observando isoladamente os custos do processo TOP no caso G2A, todas as biomassas situaram-se na faixa de 50 dólares por tonelada de bio-carvão produzida, com exceção da palha de trigo, cujo custo simulado da tonelada chegou a US\$ 104,01. Dessa forma, indica-se uma considerável influência da escala de produção nos custos do referido pré-tratamento, não obstante ter sido utilizado um valor para escala máxima conservador, de apenas 100 kt/ano. É importante notar que os custos nivelados do processo TOP para as palhas de cana-de-açúcar, soja, milho e arroz foram bem semelhantes, com uma

variação máxima entre si de apenas 5%. Assim, não foi possível verificar correlações diretas do quesito sazonalidade com o custo do produto.

A gasificação do bio-carvão, tanto no Caso G2A quanto no Caso G2B, apresentou os menores custos dentre as opções de matéria-prima consideradas. Atribui-se isso à maior eficiência de conversão lograda pelo uso da biomassa torrefeita no processo e à maior densidade energética adquirida pela biomassa por meio da torrefação, que permite uma alimentação de maior conteúdo energético ao gasificador por unidade de massa. Comparando as biomassas entre si apenas para o caso G2A, fica evidenciado que o efeito dominante dos custos da gasificação é a escala de produção.

No Caso G2B testou-se a combinação do pré-tratamento TOP com uma etapa de armazenamento a montante, visando a quebra do efeito de sazonalidade no dimensionamento das plantas de torrefação e peletização da biomassa e, potencialmente, reduzindo seus custos.

Comparando este caso ao G2A, nota-se de fato uma redução no custo nivelado do pré-tratamento para as biomassas, com exceção da palha de trigo, que apresentou uma elevação no custo nivelado. Este comportamento anômalo da palha de trigo pode ser atribuído a um efeito negativo na escala das plantas TOP, em razão da perda de matéria-prima no armazenamento. E o maior problema da cadeia sugerida foi justamente a etapa do armazenamento da biomassa crua, que, em razão de seu alto custo, acabou por representar, para todas as biomassas, a maior fatia do custo nivelado do produto final. Assim, os resíduos com maiores fatores de sazonalidades, que em tese deveriam ser os maiores beneficiários da regulação do suprimento à planta de pré-tratamento, acabaram sendo os mais prejudicados em termos de custos.

Não obstante os resultados com elevado custo final, o Caso G2B é relevante para a análise do efeito de escala na planta de pré-tratamento sem a influência do fator de sazonalidade. As simulações apontam que baixas escalas, como o sistema de aproveitamento da palha de trigo, apresentam custos bastante elevados. Semelhantemente, o sistema de uso da palha de cana-de-açúcar também apresentou custos ligeiramente mais altos que os demais, o que pode ser atribuído ao grande número de municípios no arranjo produtivo desse resíduo. Para os demais sistemas, contudo, não se verificaram muitas divergências, mesmo tendo os resíduos uma considerável diferença de produção anual, o que supostamente impactaria a escala. Para ilustrar esse fato, o resíduo

que apresentou os menores custos foi a palha de arroz, que, dos quatro, possui a menor escala, seguido da palha de soja com milho, que tem a maior produção anual. Dessa forma, é possível concluir que em razão da baixa escala máxima adotada para o processo TOP, as plantas industriais apresentam caráter modular quando sujeitas a produções de alta escala, sendo nesta situação os benefícios do aumento da produção regidos pelas economias de trem, que são menos representativas que as economias de escala. Logo, o desenvolvimento da tecnologia TOP que permita plantas com maiores escalas pode ter um impacto significativo na viabilização da tecnologia e também no aproveitamento energético de recursos alternativos de biomassa, sobretudo os que enfrentam dificuldades no campo logístico.

O Caso G3A introduz o pré-tratamento de peletização da biomassa, mantendo a mesma configuração da cadeia de suprimentos do Caso G2A. As maiores parcelas de custos foram encontradas para as etapas de pré-tratamento e gasificação. Os custos totais das cadeias para todas as biomassas foram inferiores a todos os casos, exceto ao Caso G2A.

A peletização representou uma fatia dos custos finais variando entre 33% e 47%. Comparando ao Caso G2A, os custos nivelados médios foram inferiores, devido a menores custos de investimento e de O&M. Contudo, vale ressaltar que ambos os custos nivelados de pré-tratamento foram relatados em base mássica e, dadas as diferenças de poder calorífico entre os pellets e o bio-carvão, não necessariamente o mesmo se dá em termos de energia.

O processo de gasificação dos pellets, tanto no Caso G3A quanto no G3B, apresentou maiores custos nivelados do que o mesmo processo consumindo bio-carvão. Entretanto, ainda foram inferiores aos custos da gasificação descentralizada.

A análise do Caso G3B, que considerou o armazenamento regulatório anteriormente à peletização, assim como o Caso G2B, enfrentou problemas relacionados aos elevados custos do armazenamento da biomassa crua e à perda de parte da matéria-prima, penalizando principalmente os resíduos com maiores fatores de sazonalidade.

Estabelecendo uma comparação dos casos G1, G2B e G3B, em que há o armazenamento da biomassa crua, é possível constatar que o pré-tratamento reduz o custo da gasificação para todas as biomassas, dado que essa ocorre de forma centralizada, beneficiando-se significativamente da escala. Entretanto, para algumas biomassas essa

redução no custo da conversão final não compensa a adição de novas operações na cadeia de suprimentos, fazendo com que o custo nivelado do sistema centralizado seja superior ao custo nivelado médio do sistema distribuído.

Por outro lado, comparando o sistema descentralizado (Caso G1) com os sistemas com armazenamento da biomassa após o pré-tratamento, estes apresentam custos consideravelmente inferiores, chegando a menos da metade para algumas biomassas. Isso pode ser explicado pela grande redução dos gastos e da perda de matéria-prima com armazenamento, auferida com o pré-tratamento, combinada com a redução dos custos da conversão final por meio do aumento da escala. Constata-se, assim, que a realização do pré-tratamento o quanto antes na cadeia de suprimentos pode representar uma maior propagação de seus benefícios ao longo das operações a jusante.

Com respeito ao peso da etapa de colheita dos resíduos no campo no custo final do produto, observa-se que esta possui uma parcela relativamente baixa nos custos totais do sistema, variando de 4% a 13%. Como o valor desta etapa independe do restante da configuração da cadeia, para uma mesma biomassa quanto maior for o custo total do caso, menor é a parcela relativa da colheita. O mesmo aplica-se ao transporte primário dos resíduos desde o campo ao centroide do município. Somados os custos dessas duas etapas, chegam a ter uma representatividade de 18%, no Caso G2A, para o aproveitamento conjunto das palhas de soja e de milho. Como os investimentos nestas operações são relativamente baixos, devido à possibilidade de aproveitamento de parte dos ativos de colheita e transporte para o produto originário do resíduo, assim como os custos de operação e manutenção fixos, que de forma semelhante ao investimento são cobertos parcialmente pela atividade fim da produção agrícola, os maiores custos da colheita e transporte dos resíduos estão relacionados ao consumo de combustível. Assim, o que mais pode ter efeito positivo na queda dos custos destas etapas são medidas que visem o aumento de sua eficiência energética, como investimento em equipamentos com menor consumo de combustível, adoção de práticas eficientes por partes dos operadores das máquinas e planejamento operacional.

Ainda sobre os custos na fase agrícola, as simulações não consideraram prêmios pagos ao agricultor pela biomassa. Essa premissa partiu da ideia de não competitividade para usos alternativos dos recursos, o que lhes conferiria valor de mercado, e de que a retirada da biomassa do solo é feita de forma sustentável, sem levar a demandas adicionais de fertilizantes e, conseqüentemente, isentando o agricultor de quaisquer prejuízos.

Naturalmente que, em um caso real, o agricultor cobraria pela palha os custos de colheita somados a uma margem de lucro pelo serviço. Ainda que a operação fosse feita de forma terceirizada, o dono dos direitos de propriedade da terra deveria cobrar um valor que lhe fosse atrativo para permitir a atividade sob seus domínios, salvo casos em que deixar os resíduos no solo represente algum tipo de prejuízo ao produtor. Porém, a desconsideração do pagamento de prêmio ao produtor da biomassa está em concordância com o restante da modelagem, que optou por não incorporar custos de transação e margens de lucro intermediárias ao longo da cadeia.

As operações de carga e descarga apresentaram baixa participação no custo total da cadeia, variando de 2% a 9%, com moda em 5%, para todas as biomassas em todos os casos. Logo, nesta etapa há pouco espaço para uma redução significativa nos custos da cadeia.

A operação de transporte da biomassa pré-tratada do município de origem ao *cluster*, tal como a etapa de carga e descarga, apresentou reduzida influência no custo final do produto. Como adotou-se o modelo de fretamento para realização deste transporte, os custos seguem a lógica do mercado, restando ao tomador de decisões apenas a alternativa de analisar a aquisição de uma frota própria para realizar esta movimentação. Contudo, isto dificilmente refletiria significativamente no custo do produto, dada a baixa margem desta para melhoria etapa na cadeia.

Um ponto de importante análise nos sistemas bioenergéticos considerados é que em três dos cinco estudos de caso, os menores custos totais da cadeia entre as biomassas selecionadas foram verificados para o aproveitamento combinado das palhas de soja e milho. Isto pode ser explicado tanto pela questão da amenização de sazonalidade da produção dos resíduos quanto pelos ganhos de escala possibilitados com o aumento da oferta de matéria-prima. Logo, esta ponderação mostra que o uso diversificado de fontes de biomassa em uma mesma instalação industrial pode ser vantajoso do ponto de vista do planejamento estratégico do sistema, desde que seja tecnicamente e operacionalmente viável.

O detalhamento tecnológico do processo de gasificação foge ao escopo do trabalho, uma vez que a implantação da gasificação na ponta final da cadeia foi meramente um mecanismo para verificação de ganhos de escala nas plantas centralizadas e descentralizadas. Entretanto, como foram utilizados índices técnicos para a modelagem

da gasificação, vale ressaltar que a opção para o uso da tecnologia de gasificação em leito fluidizado para todos os estados da biomassa assumiu caráter conservador quanto às possibilidades de aproveitamento do bio-carvão. Segundo HOFFMANN (2010), um dos maiores entraves à gasificação em leito de arraste da biomassa – que permite escalas de produção muito superiores à gasificação em leito fluidizado e a produção de um gás de síntese de qualidade superior – está associado a seu caráter fibroso e tenaz, que impede uma moagem que a deixe com tamanho de partícula suficientemente pequeno para o uso nessa tecnologia de gasificação. Não obstante, a torrefação da biomassa a torna um material frágil, de fácil moagem, superando este entrave a essa modalidade de gasificação. Há inclusive estudos na literatura que avaliam o potencial de uso de biomassa torrefeita em gasificadores de leito de arraste (BERGMAN, P. *et al.*, 2005; CARBO *et al.*, 2012). Contudo, o caráter agressivo das cinzas das palhas, devido à maior presença de enxofre e cloro comparadas às cinzas de biomassas lenhosas (BATIDZIRAI *et al.*, 2013; VASSILEV *et al.*, 2013a), pode representar um entrave ao uso do leito de arraste para bio-carvão advindo de resíduos agrícolas.

Apesar da versatilidade do gás de síntese quanto à sua conversão em energia final, fato que justificou sua escolha como vetor energético de conversão na ponta final das cadeias de suprimentos bioenergéticas modeladas, trata-se de uma forma de energia secundária, que para aproveitamento antrópico necessita ainda de uma etapa posterior. Nesse sentido, a unidade obtida ao final da análise é de difícil comparação, pois não se verificaram na literatura trabalhos que representassem a cadeia de suprimentos da bioenergia parando na produção do gás de síntese. Assim, para fins de estabelecer uma comparação a grosso modo, supondo uma eficiência de conversão elétrica de 38% em uma planta de gasificação integrada com ciclo combinado (HOFFMANN, 2010) e utilizando o melhor resultado em termos de custo da cadeia (US\$ 22,49/MWh, para a palha de soja com milho no caso G2A), apenas a parcela do gás de síntese incrementaria ao custo de geração elétrica um valor de US\$ 59,18 por MWh elétrico produzido. Dada a taxa de câmbio adotada no trabalho de R\$ 3,81/US\$, esse valor representaria um custo de R\$ 225,49 por MWh elétrico produzido, que por sua vez deveria ser ainda somado ao custo do bloco de geração elétrica. Esse valor, por si só, é superior ao custo da eletricidade adotado no trabalho, de R\$ 200 por MWh, o que mostra a dificuldade do aproveitamento energético dos resíduos agrícolas pelo caminho proposto.

Contudo, as cadeias bioenergéticas são baseadas no uso de um recurso renovável. Logo, em um futuro restritivo em relação a emissões de gases de efeito estufa, que venha a adotar medidas limitantes ao uso combustíveis fósseis e mecanismos de taxaço de emissões de CO₂, tecnologias e cadeias produtivas como esta podem tornar-se viáveis do ponto de vista econômico. Ademais, o bio-carvão é um recurso energético passível de estocagem, característica importante principalmente para sistemas elétricos que, como o sistema hidrotérmico brasileiro, depende da entrada de usinas térmicas nos momentos de escassez de recursos hídricos. Além disso, a crescente participação de fontes intermitentes no mix elétrico brasileiro, nomeadamente solar e eólica, demanda a conjugação com usinas térmicas de entrada rápida, principalmente com a tecnologia de turbina a gás. Esta pode ser abastecida por gases derivados da biomassa, seja o biogás, obtido por sua biodigestão, ou mesmo o gás de síntese. Dessa forma, um recurso renovável que possa regular a oscilação da oferta de eletricidade de um sistema integralmente baseado em fontes renováveis, papel que atualmente cabe a fontes fósseis como carvão e gás natural, pode significar aos resíduos de biomassa um papel estratégico na segurança energética do país. Para o Brasil, tal característica pode ser particularmente interessante na região do vale do rio São Francisco, no Oeste baiano, local onde BURGI (2013) identificou grande potencial heliotérmico, sobretudo para utilização da tecnologia CSP (*Concentrated Solar Power*). Além da energia solar, DUTRA (2007) também encontrou grande potencial de energia eólica na região. Como também foi identificado nessa dissertação um potencial significativo de energia primária advindo das palhas de soja e milho naquela localidade, trata-se de um interessante estudo de caso a análise de um sistema híbrido de energia renovável intermitente (eólica ou solar) e térmica (biomassa), considerando a introdução do vetor tecnológico de torrefação em conjunto com tecnologias de produção de gases combustíveis de biomassa.

6. Considerações finais e recomendações para trabalhos futuros

6.1 Conclusão

No tocante aos objetivos, a dissertação foi bem-sucedida ao desenvolver uma metodologia que permitiu comparar custos de cadeias de suprimento bioenergéticas com e sem pré-tratamento da biomassa, baseadas no aproveitamento de resíduos agrícolas.

Foi possível levantar os potenciais de energia primária advindos dos resíduos agrícolas do cultivo de cana-de-açúcar, soja, milho, arroz e trigo, mapeando-os no território brasileiro. A palha da soja apresentou o maior valor de potencial, localizado principalmente nos estados do Sul e do Centro-Oeste. As palhas de cana-de-açúcar e de arroz apontaram grande concentração de seus potenciais nas regiões Sudeste e Sul, respectivamente.

A ferramenta de desenvolvimento de mapas de calor no QGIS, baseada no Estimador de Densidade de Kernel, possibilitou a localização de *clusters* de produção para cada resíduo agrícola. Os *clusters* das palhas de soja e milho coincidiram na mesma localização, criando assim um novo vetor de análise para a cadeia de suprimentos, considerando o aproveitamento conjunto das duas palhas. A partir da identificação dos *clusters*, foi possível localizar uma quantidade correspondente a 8% do total de potencial agroenergético levantado em uma área combinada de municípios equivalente a cerca de 1% do território nacional.

As cadeias bioenergéticas partindo dos resíduos agrícolas foram desenvolvidas e caracterizadas técnico e economicamente. Foram incluídas a etapa de colheita dos resíduos no campo, as fases industriais de pré-tratamento e gasificação da biomassa e as operações logísticas de armazenamento, manuseio e transporte. Combinaram-se diferentes arranjos da cadeia de suprimentos, sendo obtidos um total de cinco estudos de caso.

Os custos de investimento e de O&M na colheita e transporte primário dos resíduos no campo são relativamente baixos, pois uma parcela dos ativos empregados para o processo produtivo da *commodity* de origem pode ser aproveitada para coletar os resíduos, assim como mão-de-obra e serviços administrativos. Assim, a maior parte dos custos desta etapa reside no consumo de combustível das máquinas, sendo este o ponto

onde se encontra a margem para a melhoria do processo. Logo, medidas que venham a elevar a eficiência desta operação – como investimentos em maquinário eficiente, treinamento dos operadores e programas de gestão das operações – são identificadas como potenciais mecanismos de auxílio na redução dos custos desta etapa na cadeia.

Dentre as etapas logísticas, as cadeias que consideraram o armazenamento da biomassa crua obtiveram uma elevada participação desta operação nos seus custos totais. Este efeito foi mais acentuado para os resíduos com alto fator de sazonalidade. Já as cadeias que consideraram o armazenamento da biomassa após o pré-tratamento apresentaram uma considerável redução na participação relativa dessa etapa nos seus custos. As demais etapas logísticas representaram pequenas partes dos custos totais das cadeias.

Comparando o Caso G1, cuja gasificação da biomassa é feita descentralizada, com os casos G2B e G3B, que preveem pré-tratamento via TOP e peletização, respectivamente, e gasificação centralizada, sendo que em todos o armazenamento da biomassa é feito no estado cru, os ganhos de escala com a gasificação centralizada compensaram o investimento em pré-tratamento para algumas biomassas, resultando em custos finais das cadeias relativamente próximos. Ao comparar o Caso G1 (“sem pré-tratamento”) com os casos G2A e G3A, nos quais o armazenamento da biomassa realiza-se após o pré-tratamento, a queda nos custos dessa etapa resultou em uma redução significativa do custo final da cadeia de suprimentos. Assim, os resultados indicam que a adoção do pré-tratamento o quanto antes na cadeia de suprimentos terá um maior potencial de impacto na redução dos custos ao longo das operações a jusante.

Estabelecendo uma comparação entre o pré-tratamento TOP e a peletização simples, esta apresenta custos de investimentos inferiores, gerando um produto com menor custo nivelado por unidade de massa. Entretanto, os custos totais das cadeias energéticas que adotaram o processo TOP como pré-tratamento são inferiores aos custos das cadeias de peletização, o que pode ser atribuído à maior propagação dos benefícios do TOP nas operações a jusante em relação à peletização, que incluem menor custo de armazenamento e transporte e maior eficiência de gasificação, mesmo sendo o custo de manuseio dos pellets ser inferior ao do bio-carvão.

A baixa escala máxima de planta escolhida para as plantas do processo TOP limitou o seu potencial de redução de custos para as localidades com alta oferta de

resíduos. Nesse sentido, avanços tecnológicos e de mercado que permitam uma elevação da escala de produção das plantas de TOP podem significar uma redução nos custos para este pré-tratamento, que representou parcelas expressivas nas cadeias bioenergéticas que o adotaram.

No que tange as biomassas analisadas, os arranjos de seus sistemas de produção afetam as operações da cadeia de forma diversa. Os principais atributos dos sistemas produtivos que interferem nas etapas das cadeias bioenergéticas são a produção anual, sua concentração e a sazonalidade. Nesta perspectiva, a utilização conjunta de diferentes resíduos em uma mesma unidade industrial pode representar ganhos na escala e suavizações na sazonalidade da oferta. Os bons resultados do aproveitamento conjunto das palhas de soja e milho corroboram com essa tese. Porém, há de se ressaltar que tal aproveitamento conjunto deve ser provado como viável tecnicamente.

A gasificação da biomassa em reatores de leito de arraste, que permite maiores escalas de produção em relação aos de leito fluidizado, produzindo um gás de síntese com menos contaminantes, é uma vertente tecnológica que pode ser viabilizada por meio da torrefação. Este processo de pré-tratamento torna a biomassa frágil e com alta densidade energética, que são características favoráveis ao processo de gasificação em leito de arraste. Entretanto, o comportamento das cinzas dos resíduos agrícolas pode ser um entrave ao processo, requerendo-se assim estudos mais aprofundados para confirmação dessa hipótese.

Mesmo o melhor resultado obtido, dentre os estudos de caso e as biomassas, apresentou um custo elevado de produção do gás de síntese ao considerar a cadeia bioenergética como um todo. Assim, o aproveitamento energético dos resíduos agrícolas por meio das cadeias de suprimentos propostas apresenta-se como uma alternativa ainda pouco atrativa economicamente de produção de energia. O aumento da competitividade do uso dos resíduos agrícolas frente a outras fontes, sobretudo a recursos fósseis de baixo custo, depende da identificação de ponto para melhorias ao longo da cadeia. Ademais, em um panorama futuro restritivo em termos de emissões de gases de efeito estufa, as cadeias bioenergéticas desenvolvidas neste estudo podem assumir relevância na oferta de energia ao Brasil, sendo os processos de pré-tratamento via torrefação e peletização fundamentais nesse sentido.

6.2 Limitações dos resultados e recomendações para trabalhos futuros

Apesar de todo o rigor adotado no trabalho, o uso de dados agregados e premissas de simplificação trazem limitações aos resultados obtidos. Assim, abaixo encontram-se listados os principais pontos de limitação dos resultados juntamente com o que pode ser feito para aprimorá-los. Também estão listadas sugestões para trabalhos futuros na temática abordada, com vistas a galgar avanços na pesquisa científica.

- O levantamento do potencial energético dos resíduos agrícolas baseou-se na utilização de um valor de produção agrícola anual, em nível municipal de agregação. Isso impediu um arranjo preciso da biomassa no território e, por conseguinte, prejudicou a localização dos *clusters*. Assim, recomenda-se o aprofundamento do modelo de georreferenciamento a partir da utilização de mapas de uso do solo, partindo das regiões em que se identificou elevado potencial energético;
- A metodologia limitou-se ao levantamento do potencial energético advindo de resíduos agrícolas, o que exclui parte substancial do potencial bioenergético brasileiro. Nesse prisma, sugere-se a aplicação da metodologia a outras biomassas residuais, como resíduos agroindustriais, florestais e sólidos urbanos;
- O aproveitamento energético de biomassas residuais apresenta como uma de suas vantagens a não indução de alterações na dinâmica do uso do solo. Contudo, visto que o território brasileiro possui dimensões continentais e condições edafoclimáticas favoráveis para o cultivo de diversas espécies, a competição pelo uso da terra no Brasil não é uma questão tão urgente como na Europa ocidental, por exemplo. Nessa conjuntura, sistemas de cultivos energéticos dedicados no Brasil são um ponto interessante de análise sob o ponto de vista da oferta interna de bioenergia. Portanto, é recomendado um estudo que avalie cadeias de suprimentos bioenergéticas provenientes de biomassas dedicadas com a inserção dos vetores de pré-tratamento de torrefação e densificação no Brasil;
- A identificação dos locais de conversão energética da biomassa foi determinada a partir dos pontos de concentração de potencial energético (*clusters*), ou seja, seguiu uma lógica da oferta do recurso. Recomenda-se refazer a análise sob a ótica da demanda por biomassa, identificando locais que poderiam aproveitar-se do recurso – como plantas termelétricas a carvão existentes – e levantando o potencial bioenergético em seu entorno.

- Uma das principais vantagens que um sistema bioenergético pode possuir em relação a um sistema baseado em fontes fósseis é a redução nas emissões de gases de efeito estufa em sua cadeia de produção. Para testar tal hipótese para as cadeias bioenergéticas de gasificação de resíduos agrícolas com pré-tratamento via torrefação, sugere-se a realização de análise de ciclo de vida;
- Muitas das operações que englobam a cadeia de suprimentos abordada na análise são intensivas em trabalho, como a etapa agrícola e o transporte. Dessa forma, a adoção do sistema bioenergético pode apresentar co-benefícios socioeconômicos locais. Assim, recomenda-se a realização de análise com Matriz Insumo-Produto para aferição dos impactos socioeconômicos provenientes da adoção do sistema bioenergético;
- Nas cadeias de suprimentos, considerou-se apenas a opção de gasificação como conversão final da biomassa, limitando a fronteira final da análise a um produto energético intermediário. Dessa forma, foi possível somente a analisar a cadeia sob o ponto de vista de custos. Logo, recomenda-se analisar a cadeia com um indicador que inclua, para além de seus custos, o preço de revenda do produto, como o Valor Presente Líquido (VPL). Para isso, deve-se considerar a adição de tecnologias de conversão do gás de síntese em produtos com valor de mercado estabelecido, como unidades de Fischer-Tropsch e turbinas de combustão, ou mesmo outras tecnologias de conversão final da biomassa diferentes da gasificação, como caldeiras;
- Os processos industriais foram modelados no estilo “*black box*”, partindo de parâmetros obtidos em outros trabalhos científicos. Para que se obtenham parâmetros mais precisos para a problemática abordada, pode-se realizar uma modelagem de otimização dos processos de torrefação, peletização e gasificação para cada biomassa;
- Uma das principais vantagens de torrefazer a biomassa para fins de gasificação está em possibilitar o seu uso em gasificadores de leito de arraste, tecnologia que permite maiores escalas e um gás de síntese de qualidade superior em comparação às demais. Com isso, sugere-se a inclusão da possibilidade de uso de gasificadores de leito de arraste na análise das cadeias bioenergéticas que preveem a torrefação como pré-tratamento;
- Recomenda-se estudar as questões institucionais e mercadológicas na cadeia bioenergética, identificando potenciais agentes de interesse em cada, demandas de autorizações dos órgãos competentes e custos com tributos pertinentes a cada etapa;

- A partir do mapeamento do potencial energético no território brasileiro, sugerem-se estudos de potenciais para integração de biomassa com outros recursos renováveis intermitentes, considerando seu pré-tratamento via torrefação e peletização. A região do vale do rio São Francisco mostrou-se interessante para tal avaliação.

Referências Bibliográficas

AJANOVIC, A. “Biofuels versus food production: Does biofuels production increase food prices?”, **Energy**, v. 36, n. 4, pp. 2070–2076, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.019>>.

ANGELIS-DIMAKIS, A.; BIBERACHER, M.; DOMINGUEZ, J.; FIORESE, G.; GADOCHA, S.; GNANSOUNOU, E.; GUARISO, G.; KARTALIDIS, A.; PANICHELLI, L.; PINEDO, I.; ROBBA, M. “Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 2, pp. 1182–1200, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.049>>.

ANP. **Síntese dos preços praticados**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/preco/prc/>>. Acesso em: 10 dez. 2016.

BATIDZIRAI, B.; MIGNOT, A. P. R.; SCHAKEL, W. B.; JUNGINGER, H. M.; FAAIJ, A. P. C. “Biomass torrefaction technology: Techno-economic status and future prospects”, **Energy**, v. 62, pp. 196–214, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.035>>.

BB. **Taxas de Câmbio**. Disponível em: <<http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpesq.asp?id=txcotacao>>. Acesso em: 5 dez. 2016.

BERGMAN, P. **Combined torrefaction and pelletisation**, ECN - Energy Centre of the Netherlands, Petten, 2005. Disponível em: <<http://www.ecn.nl/publications>>.

BERGMAN, P.; BOERSMA, A.; KIEL, J.; PRINS, M. J.; PTASINSKI, K.; JANSSEN, F. J. “Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass”. In: **2nd World conference and technology exhibition on Biomass for Energy**, Industry and Climate Protection, v. a, p. 78–82, 2005. Disponível em: <<http://www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-RX--04-029#page=78>>.

BERGMAN, P. C. A; BOERSMA, A R.; ZWART, R. W. R.; KIEL, J. H. A. **Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations**. In: Report ECNC05013, Energy research Centre of the Netherlands ECN, n. July, p. 71, 2005. Disponível em: <<http://www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-C--05-013>>.

BERTOLINI, A. C. **Amiláceos**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/tecnologia_de_alimentos/arvore/CONT000fid57plx02wyiv80z4s4737lcrsun.html#>. Acesso em: 15 dez. 2016.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; MURAMOTO, M. C.; COUTO, H. T. Z. DO. “Estimativa da densidade o granel do carvão vegetal a partir de sua densidade aparente”, **Circular técnica**, IPEF, Piracicaba, v. d, p. 6, 1982.

BRUNDTLAND, G. H. **Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development**. 1987, [S.l: s.n.], 1987. pp. 300.

BURGI, A. S. **Avaliação do Potencial Técnico de Geração Elétrica Termossolar no Brasil a partir de Modelagem em SIG e Simulação de Plantas Virtuais**. Dissertação de M.Sc., PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/salvi.pdf>>.

BUSA. **Tabela de pesos específicos - Produtos agropecuários**. Disponível em: <<http://www.busa.com.br/Transporte-Rodoviario-Produto/Container/5>>. Acesso em: 14 dez. 2016.

BZUNECK, M.; BAZZO, E.; CANESCHI, M. D.; FELIPPE, L.; GOMES, E. R.; DALSASSO, C. H.; MIYAKE, R. G.; RESTREPO, A. H.; REINALDO, E. B.; PEREIRA, F.; BURIN, E. K.; KLEVESTON, F.; DEO, V. A.; HESS, R. A.; FONTOURA, D. F.; ROSA, O.; FERREIRA, A. S.; SANTOS, C. S. DOS; PAGANELLI, P. **Utilização da Palha de Arroz em Processo de Co-Firing com Carvão Pulverizado**. In: Projeto P&D ANEEL 0403-005/2008, Tractebel Energia e UFSC, Capivari de Baixo, 2013.

CAO, L.; YUAN, X.; LI, H.; LI, C.; XIAO, Z.; JIANG, L.; HUANG, B.; XIAO, Z.; CHEN, X.; WANG, H.; ZENG, G. “Complementary effects of torrefaction and co-pelletization: Energy consumption and characteristics of pellets”, **Bioresource Technology**, v. 185, pp. 254–262, 2015. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84924680659&partnerID=tZOtx3y1>>.

CARBO, M.; KALIVODOVA, J.; CIEPLIK, M.; DRIFT, B. VAN DER; ZWART, R.; KIEL, J. **Entrained Flow gasification of coal / torrefied woody biomass blends**, ECN’ s Bio Energy Group, Leipzig, 2012.

CARDOSO, T. DE F. **Avaliação socioeconômica e ambiental de sistemas de recolhimento e uso da palha de cana-de-açúcar**. Tese de D.Sc, Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP, Campinas, 2014. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000936323>>.

CHAI, L.; SAFFRON, C. M. “Comparing pelletization and torrefaction depots: Optimization of depot capacity and biomass moisture to determine the minimum production cost”, **Applied Energy**, v. 163, pp. 387–395, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.018>>.

CHAI, L.; SAFFRON, C. M.; YANG, Y.; ZHANG, Z.; MUNRO, R. W.; KRIEGEL, R. M. “Integration of decentralized torrefaction with centralized catalytic pyrolysis to produce green aromatics from coffee grounds”, **Bioresource Technology**, v. 201, pp. 287–292, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852415015989>>.

CHEMICAL ENGINEERING. *Chemical Engineering Plant Cost Index*. Disponível em: <<http://www.chemengonline.com/pci-home>>. Acesso em: 10 dez. 2016.

CHEN, D.; ZHOU, J.; ZHANG, Q.; ZHU, X.; LU, Q. “Upgrading of Rice Husk by Torrefaction and its Influence on the Fuel Properties”, **Bioresources**, v. 9, n. 4, pp. 5893–5905, 2014.

CHEN, W.; PENG, J.; BI, X. T. “A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, pp. 847–866, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114010910>>.

CHUM, H.; FAAL, A.; MOREIRA, J.; BERND, G.; DHAMIJA, P.; DONG, H.; GABRIELLE, B.; ENG, A. G.; CERUTTI, O. M.; MCINTYRE, T.; MINOWA, T.; PINGOUD, K.; SEYBOTH, K.; MATSCHOSS, P.; KADNER, S.; ZWICKEL, T.; EICKEMEIER, P.; HANSEN, G.; KINGDOM, U. **2011: Bioenergy**. In: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Cambridge University Press, Cambridge (UK) e Nova York, 2012.

COLLOT, A. G. “Matching gasification technologies to coal properties”, **International Journal of Coal Geology**, v. 65, n. 3–4, pp. 191–212, 2006.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos. Monitoramento**

agrícola- Safra 2015/2016, v. 3, n. 9, pp. 1–174, 2016. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>.

CONAB. **Tabela de Tarifas para Unidades Armazenadoras de Ambiente Natural da CONAB**. Brasília. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1207&t=2>>. 2014

COSTA, I. L. V. DA. **Proposta de estrutura regulatória para sequestro geológico de CO₂ no Brasil e uma aplicação para o estado do Rio de Janeiro**. Tese de D.Sc., PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/isabella.pdf>>.

CREMERS, M.; KOPPEJAN, J.; MIDDELKAMP, J.; WITKAMP, J.; SOKHANSANJ, S.; MELIN, S.; MADRALI, S. **Status overview of torrefaction technologies**. IEA Bioenergy Task 32, Enschede, 2015.

DAVIS, S. C.; HAY, W.; PIERCE, J. **Biomass in the energy industry: an introduction**. Energy Biosciences Institute, Londres, 2014. Disponível em: <http://www.ener-supply.eu/downloads/ENER_handbook_en.pdf>5Cnwww.bp.com/energysustainabilitychallenge%5Cnhttp://cigr.org/documents/CIGRHandbookVol5.pdf>.

DE MEYER, A.; CATTRYSSSE, D.; RASINMÄKI, J.; VAN ORSHOVEN, J. “Methods to optimise the design and management of biomass-for-bioenergy supply chains: A review”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, pp. 657–670, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.036>>.

DEUTMEYER, M.; BRADLEY, D.; HEKTOR, B.; HESS, R.; NIKOLAISEN, L.; TUMULURU, J.; WILD, M. **Possible effect of torrefaction on biomass trade**. IEA bioenergy task 40, 2012.

DIAS, J. M. C. D. S.; SOUZA, D. T. DE; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Embrapa Agroenergia, pp. 132, Brasília, 2012. Disponível em: <www.cnpae.embrapa.br>.

DUTRA, R. M. **Propostas de Políticas Específicas para Energia Eólica no Brasil após a Primeira Fase do PROINFA**. Tese de D.Sc., PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/ddutrarm.pdf>>.

DUTTA, A.; PHILLIPS, D. **Thermochemical Ethanol via Direct Gasification and Mixed Alcohol Synthesis of Lignocellulosic Biomass**. National Renewable Energy Laboratory, pp. 144, Golden (Colorado), 2009. Disponível em: <http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?query_id=3&page=0&osti_id=962020>.

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja Região Central do Brasil**, 2003. Disponível em: <<https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/>>. Acesso em: 29 dez. 2016.

EPE. **23º Leilão de Energia Nova A-5**. Rio de Janeiro, 2016a. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leilão de Energia A-5 2016/Resultado_completo_site_23_len.pdf](http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leilão_de_Energia_A-5_2016/Resultado_completo_site_23_len.pdf)>.

EPE. **Brazilian Energy Balance 2016**. Rio de Janeiro, 2016b. Disponível em: <www.epe.gov.br>.

EPE. **Energia Termelétrica: Gás natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. Rio de Janeiro, 2016c. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/Documents/Energia Termelétrica - Online 13maio2016.pdf](http://www.epe.gov.br/Documents/Energia_Termelétrica_-_Online_13maio2016.pdf)>.

ERLACH, B. **Biomass upgrading technologies for carbon-neutral and carbon-negative electricity generation**. Dissertação de M.Sc., Institute for Energy Engineering, Technische Universität Berlin, pp. 1–381, Berlin, 2014.

ESALQ-LOG. **Indicadores de Fretes Rodoviários**. Disponível em: <<http://esalqlog.esalq.usp.br/sifreca/mercado-de-fretes/outros-produtos/>>. Acesso em: 15 dez. 2016.

EXAME. **Tabela de salários de profissionais**. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/ferramentas/tabela-de-salarios/>>. Acesso em: 1 dez. 2016.

FAGERNÄS, L.; KUOPPALA, E.; ARPIAINEN, V. “Composition, utilization and economic assessment of torrefaction condensates”, **Energy and Fuels**, v. 29, n. 5, pp. 3134–3142, 2015.

FARGIONE, J.; HILL, J.; TILMAN, D.; POLASKY, S.; HAWTHORNE, P. “Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt”, **Science**, v. 319, n. 5867, pp. 1235–1238, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1152747>>.

FREIRE, F. H. M. DE A. **Introdução à Estatística Espacial**. Disponível em: <<http://www.observatoriodasmetropoles.ufrj.br/download/aulasanalise-espacial.pdf>>.

Acesso em: 5 maio 2016.

FROMBO, F.; MINCIARDI, R.; ROBBA, M.; SACILE, R. “A decision support system for planning biomass-based energy production”, **Energy**, v. 34, n. 3, pp. 362–369, 2009.

GARCÍA-MARAVÉ, A.; POPOV, V.; ZAMORANO, M. “A review of European standards for pellet quality”, **Renewable Energy**, v. 36, n. 12, pp. 3537–3540, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.013>>.

GARCIA, D. P. **O mercado e as indústrias de pellets no Brasil**. In: 3rd Annual World Biomass Power Markets Brasil, São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://biomassaworld.com.br/wp-content/uploads/2016/04/o-mercado-e-as-indstrias-de-pellets-no-brasil.pdf>>.

GERASIMCHUK, I.; YAM KOH, P. **Cutting subsidies or cutting rainforest?**, International Institute for Sustainable Development, pp. 20, 2013.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T. “Renewable energy - Traditional biomass vs. modern biomass”, **Energy Policy**, v. 32, n. 6, pp. 711–714, 2004.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. “The sustainability of ethanol production from sugarcane”, **Energy Policy**, v. 36, n. 6, pp. 2086–2097, 2008.

HARMSSEN, P.; HUIJGEN, W.; LÓPEZ, L.; BAKKER, R. **Literature Review of Physical and Chemical Pretreatment Processes for Lignocellulosic Biomass**. In: Report ECN-E--10-013. Wageningen University & Research centre - Food & Biobased Research, Energy Research Centre of the Netherlands e Abengoa Bioenergía Nuevas Tecnologías, pp. 1–49, 2010. Disponível em: <<http://www.ecn.nl/docs/library/report/2010/e10013.pdf>>.

HOCHMAN, G.; RAJAGOPAL, D.; TIMILSINA, G.; ZILBERMAN, D. “Quantifying the causes of the global food commodity price crisis”, **Biomass and Bioenergy**, v. 68, pp. 106–114, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.06.012>>.

HOFFMANN, B. S. **O ciclo combinado com gaseificação integrada e a captura de CO₂: Uma solução para mitigar as emissões de CO₂ em termelétricas a carvão em larga escala no curto prazo?**. Dissertação de M.Sc., PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.

IBGE. **Índice de cartas e mapas**. 2015. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/>. Acesso em: 4 abr. 2016.

IBGE. **Produção Agrícola Municipal**. 2016. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 4 abr. 2016.

IEA. **Key World Energy Statistics 2015**. Statistics. Paris, 2015. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld_Statistics_2015.pdf>.

IRENA. **Global Bioenergy Supply and Demand Projections for the Year 2030**. Bonn, Germany: [s.n.], 2014. Disponível em: <http://www.irena.org/REMAP/IRENA_REmap_2030_Biomass_paper_2014.pdf>.

JOSHI, Y.; DE VRIES, H.; WOULDSTRA, T.; DE JONG, W. “Torrefaction: Unit operation modelling and process simulation”, **Applied Thermal Engineering**, v. 74, pp. 83–88, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.12.059>>.

KALIYAN, N.; MOREY, R. V.; TIFFANY, D. G.; LEE, W. F. “Life cycle assessment of a corn stover torrefaction plant integrated with a corn ethanol plant and a coal fired power plant”, **Biomass and Bioenergy**, v. 63, pp. 92–100, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.02.008>>.

KALLIO, M. **Critical review on the pelletizing technology**. In: Report IEE/09/758/SI2.558286. MixBioPells, pp. 1–54, 2011.

KHATIWADA, D.; LEDUC, S.; SILVEIRA, S.; MCCALLUM, I. “Optimizing ethanol and bioelectricity production in sugarcane biorefineries in Brazil”, **Renewable Energy**, v. 85, pp. 371–386, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.009>>.

KIM, K. H.; JAHAN, S. A.; KABIR, E. “A review of diseases associated with household air pollution due to the use of biomass fuels”, **Journal of Hazardous Materials**, v. 192, n. 2, pp. 425–431, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.05.087>>.

KOPPEJAN, J.; SOKHANSANJ, S.; MELIN, S.; MADRALI, S. **Status overview of torrefaction technologies**. IEA Bioenergy Task 32, Enschede, 2012.

MANI, S.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ, S. “Specific energy requirement for compacting corn stover”, **Bioresource Technology**, v. 97, n. 12, pp. 1420–1426, 2006.

MATTHEWS, F. **Global Wood Pellet Market Outlook**. In: WPAC Annual Conference, Halifax, 2015. Disponível em: <<http://www.pellet.org/images/2015/FionaMcDermottHawkinsWright.pdf>>.

MUELLER, S. A.; ANDERSON, J. E.; WALLINGTON, T. J. “Impact of biofuel production and other supply and demand factors on food price increases in 2008”, **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 5, pp. 1623–1632, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.030>>.

MYHRE, G.; SHINDELL, D.; BRÉON, F.-M.; COLLINS, W.; FUGLESTVEDT, J.; HUANG, J.; KOCH, D.; LAMARQUE, J.-F.; LEE, D.; MENDOZA, B.; NAKAJIMA, T.; ROBOCK, A.; STEPHENS, G.; TAKEMURA, T.; ZHAN, H. **2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing**. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 659–740, Cambridge University Press, Cambridge (UK) e Nova York, 2013.

NAIK, S. N.; GOUD, V. V.; ROUT, P. K.; DALAI, A. K. “Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 2, pp. 578–597, 2010.

OLIVEIRA, L. G. S. DE. **Aproveitamento Energético De Resíduos Agrícolas – O Caso Da Agroeletricidade Distribuída**. Dissertação de M.Sc., PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/luiz_oliveira.pdf>.

PANICHELLI, L.; GNANSOUNOU, E. “GIS-based approach for defining bioenergy facilities location: A case study in Northern Spain based on marginal delivery costs and resources competition between facilities”, **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 4, pp. 289–300, 2008.

PIRRAGLIA, A.; GONZALEZ, R.; SALONI, D.; DENIG, J. “Technical and economic assessment for the production of torrefied ligno-cellulosic biomass pellets in the US”, **Energy Conversion and Management**, v. 66, pp. 153–164, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2012.09.024>>.

PORTUGAL-PEREIRA, J.; SORIA, R.; RATHMANN, R.; RSCHAEFFER; ASZKLO. “Agricultural and agro-industrial residues- to-energy in Brazil: Techno-economic and environmental assessment”, **Biomass and Bioenergy**, v. 81, pp. 521-533,

2015.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project, Versão 2.8.7 (Wien). Disponível em: <<http://www.qgis.org/>>. 2016

RATHMANN, R.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. “Land use competition for production of food and liquid biofuels: An analysis of the arguments in the current debate”, **Renewable Energy**, v. 35, n. 1, pp. 14–22, 2010.

RATHMANN, R.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. “Targets and results of the Brazilian Biodiesel Incentive Program - Has it reached the Promised Land?”, **Applied Energy**, v. 97, pp. 91–100, 2012.

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. **Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada**. UNFCCC, v. 9, 2015.

RODRIGUES, T. O. **Efeitos da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos**. Dissertação de M.Sc., Departamento de Engenharia Florestal, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/4392/1/2009_ThiagoOliveiraRodrigues.pdf>.

ROTTER, S.; ROHRHOFER, C. Logistics Concept. In: Work Package WP 1 and WP4. BioBoost, 2014. Disponível em: <www.BioBoost.eu>.

SARKAR, M.; KUMAR, A.; TUMULURU, J. S.; PATIL, K. N.; BELLMER, D. D. “Gasification performance of switchgrass pretreated with torrefaction and densification”, **Applied Energy**, v. 127, pp. 194–201, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.027>>.

SEABRA, J. E. A. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil**. Tese de D.Sc., Faculdade de Engenharia Mecânica/UNICAMP, Campinas, 2008. Disponível em: <<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000446190>>.

SHIE, J. L.; CHANG, C. Y.; CHEN, C. S.; SHAW, D. G.; CHEN, Y. H.; KUAN, W. H.; MA, H. K. “Energy life cycle assessment of rice straw bio-energy derived from potential gasification technologies”, **Bioresource Technology**, v. 102, n. 12, pp. 6735–6741, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.116>>.

SIMS, R. E. H. “Bioenergy to mitigate for climate change and meet the needs of

society, the economy and the environment”, **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 8, n. 4, pp. 349–370, 2003.

SIMS, R. E. H.; MABEE, W.; SADDLER, J. N.; TAYLOR, M. “An overview of second generation biofuel technologies”, **Bioresource Technology**, v. 101, n. 6, pp. 1570–1580, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.046>>.

SMIL, V. **Energy Transitions: History, Requirements, Prospects**. 1 ed. Santa Barbara (California), Praeger, 2010.

SMITH, K. R.; MEHTA, S. “The burden of disease from indoor air pollution in developing countries: comparison of estimates”, **International journal of hygiene and environmental health**, v. 206, n. 4–5, pp. 279–289, 2003.

STARFELT, F.; TOMAS APARICIO, E.; LI, H.; DOTZAUER, E. “Integration of torrefaction in CHP plants - A case study”, **Energy Conversion and Management**, v. 90, pp. 427–435, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.019>>.

STELTE, W.; HOLM, J. K.; SANADI, A. R.; BARSBERG, S.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U. B. “A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources”, **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 2, pp. 910–918, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.003>>.

SULGÁS. **Simulador Industrial**. Disponível em: <<http://www.sulgas.rs.gov.br/sulgas/simulador-industrial#>>. Acesso em: 10 dez. 2016.

SVANBERG, M.; OLOFSSON, I.; FLODÉN, J.; NORDIN, A. “Analysing biomass torrefaction supply chain costs”, **Bioresource Technology**, v. 142, pp. 287–296, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.048>>.

SWANSON, R. M.; PLATON, A.; SATRIO, J. A.; BROWN, R. C. “Techno-economic analysis of biomass-to-liquids production based on gasification”, **Fuel**, v. 89, pp. S11–S19, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.027>>.

TIRADO, M. C.; COHEN, M. J.; ABERMAN, N.; MEERMAN, J.; THOMPSON, B. “Addressing the challenges of climate change and biofuel production for food and nutrition security”, **Food Research International**, v. 43, n. 7, pp. 1729–1744, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2010.03.010>>.

TOLMASQUIM, M. T. **Alternativas energéticas sustentáveis no Brasil**. 1. ed.

Rio de Janeiro, Relume Dumará: COPPE : CENERGIA, 2004.

TSALIDIS, G. A.; JOSHI, Y.; KOREVAAR, G.; DE JONG, W. “Life cycle assessment of direct co-firing of torrefied and/or pelletised woody biomass with coal in the Netherlands”, **Journal of Cleaner Production**, v. 81, pp. 168–177, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.049>>.

UNICA. **A bioeletricidade da cana em números - Março de 2016**. 2016a. Disponível em:< <http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=37058433>>

UNICA. **Acompanhamento quinzenal da safra na região Centro-Sul**. 2016b. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticia/274609939203259654>>.

UNICA. **Histórico de produção e moagem**. 2014. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=31&tipoHistorico=2>>. Acesso em: 01/12/2016.

USDA. **World Agricultural Supply and Demand Estimates**. Washington (D.C), 2016. Disponível em: <<http://usda.mannlib.cornell.edu/usda/current/wasde/wasde-10-12-2016.pdf>>.

USLU, A.; FAAIJ, A. P. C.; BERGMAN, P. C. A. “Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation”, **Energy**, v. 33, n. 8, pp. 1206–1223, 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544208000893>>.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. “An overview of the chemical composition of biomass”, **Fuel**, v. 89, n. 5, pp. 913–933, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>>.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. “An overview of the composition and application of biomass ash.: Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges”, **Fuel**, v. 105, pp. 19–39, 2013a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.001>>.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. “An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification”, **Fuel**, v. 105, pp. 40–76, 2013b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.041>>.

WEATHERSTONE, S.; SIMONSSON, N.; KARLSSON, G.; PADBAN, N.; ADELL, A.; ABELHA, P.; CARBO, M. **Final report on bulk tests in existing storage and handling facilities**. In: WP 6 Logistics, SECTOR, Taby, 2015. Disponível em: <https://sector-project.eu/fileadmin/downloads/deliverables/SECTOR_Deliverable_6.7_FINAL.pdf>.

WHO. **Indoor Air Quality Guidelines: Household Fuel Combustion**. World Health Organization, Genebra, 2014. Disponível em: <<http://www.who.int/iris/bitstream/10665/141496Summary> in 6 languages: http://apps.who.int/iris/handle/10665/144309/http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/141496/1/9789241548885_eng.pdf?ua=1>.

WICKE, B.; SIKKEMA, R.; DORNBURG, V.; FAAIJ, A. “Exploring land use changes and the role of palm oil production in Indonesia and Malaysia”, **Land Use Policy**, v. 28, n. 1, pp. 193–206, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2010.06.001>>.

Anexo I – Municípios Fornecedores de biomassa

Palha de Cana-de-açúcar					
Municípios	Distância base (km)	Potencial do recurso (TJ)	Massa do recurso (10 ³ t)	Área (km ²)	Raio Teórico (km)
Orlândia	15	1.241,83	67	291,77	10
Sales Oliveira	11	1.790,71	96	305,78	10
Nuporanga	18	1.907,59	102	348,27	11
São Joaquim da Barra	19	1.841,95	99	410,86	11
Morro Agudo	23	6.278,12	337	1.388,13	21
Guará	36	1.798,35	97	362,18	11
Jardinópolis	37	2.283,72	123	501,87	13
Batatais	39	3.256,39	175	849,53	16
Pontal	41	1.983,13	107	356,37	11
São José da Bela Vista	45	1.107,53	59	276,95	9
Ituverava	48	3.495,51	188	704,66	15
Ipuã	53	2.060,51	111	466,46	12
Brodowski	59	973,63	52	278,46	9
Sertãozinho	61	1.526,07	82	32,80	3
Viradouro	63	918,40	49	217,73	8
Ribeirão Preto	63	2.112,02	113	650,92	14
Pitangueiras	65	2.414,66	130	430,64	12
Franca	69	154,54	8	605,68	14
Jaborandi	69	19,32	1	9.994,48	56
Terra Roxa	70	938,27	50	221,54	8
Restinga	72	965,87	52	245,75	9
Buritizal	72	774,90	42	266,42	9
Miguelópolis	78	3.098,92	166	820,80	16
Jeriquara	79	262,16	14	141,97	7
Guaíra	82	4.769,53	256	1.258,47	20
Patrocínio Paulista	86	1.279,77	69	602,85	14
Cristais Paulista	87	261,38	14	385,23	11
Total		49.514,78	2.660		

Palha de Soja

Municípios	Distância base (km)	Potencial do recurso (TJ)	Massa (10³ t)	Área (km²)	Raio Teórico (km)
Sorriso	15	23.986,37	1.194	9.329,60	54
Vera	57	4.945,42	246	2.962,69	31
Lucas do Rio Verde	62	8.701,12	433	3.663,99	34
Sinop	85	5.382,59	268	3.942,23	35
Nova Ubiratã	87	12.331,96	614	12.706,74	64
Ipiranga do Norte	100	6.487,87	323	3.467,05	33
Nova Mutum	131	14.636,91	729	9.544,57	55
Tapurah	185	5.959,19	297	4.510,65	38
Santa Rita do Trivelato	197	6.121,86	305	4.733,92	39
Total		88.553,29	4.407		

Palha de Milho

23.986,37

Municípios	Distância base (km)	Potencial do recurso (TJ)	Massa (10³ t)	Área (km²)	Raio Teórico (km)
Sorriso	15	14.289,48	765	9.329,60	54
Vera	57	2.540,87	136	2.962,69	31
Lucas do Rio Verde	62	5.448,98	292	3.663,99	34
Sinop	85	2.766,34	148	3.942,23	35
Nova Ubiratã	87	6.713,01	360	12.706,74	64
Ipiranga do Norte	100	2.722,36	146	3.467,05	33
Nova Mutum	131	7.102,04	380	9.544,57	55
Tapurah	185	1.636,40	88	4.510,65	38
Santa Rita do Trivelato	197	2.767,19	148	4.733,92	39
Total		45.986,67	2.463		

Palha de Arroz

Municípios	Distância base (km)	Potencial do recurso (TJ)	Massa (10³ t)	Área (km²)	Raio Teórico (km)
Uruguaiana	15	9.244,69	537	5.703,59	43
Barra do Quaraí	72	2.482,17	144	1.054,45	18
Itaqui	104	7.967,10	463	3.406,61	33
Quaraí	115	1.210,79	70	3.147,63	32
Alegrete	123	6.137,76	356	7.803,95	50
Total		27.042,51	1.571		

Palha de Trigo

Municípios	Distância base (km)	Potencial do recurso (TJ)	Massa (10³ t)	Área (km²)	Raio Teórico (km)
Apucarana	15	243,62	12	558,39	13
Califórnia	10	70,88	4	141,82	7
Arapongas	23	204,34	10	382,22	11
Cambira	24	42,69	2	163,39	7
Marilândia do Sul	24	218,19	11	384,42	11
Londrina	34	341,66	17	1.652,57	23
Rio Bom	34	72,66	4	177,84	8
Jandaia do Sul	37	27,47	1	187,60	8
Novo Itacolomi	44	31,79	2	161,41	7
Mandaguari	45	23,30	1	335,81	10
Mauá da Serra	46	55,22	3	108,32	6
Sabáudia	50	34,87	2	190,33	8
Rolândia	52	212,27	11	459,02	12
Marumbi	53	26,52	1	208,47	8
Marialva	55	85,82	4	475,56	12
Tamarana	60	122,61	6	472,16	12
Faxinal	61	89,88	5	715,94	15
Cambé	61	73,56	4	495,38	13
Sarandi	61	24,52	1	103,46	6
Kaloré	66	59,06	3	193,30	8
Astorga	70	39,39	2	434,79	12
São Pedro do Ivaí	77	24,16	1	322,69	10
Ibiporã	79	42,23	2	297,74	10
Borrazópolis	80	79,47	4	334,38	10
Cruzmaltina	82	9,02	0	312,30	10
São João do Ivaí	89	19,07	1	353,33	11
Ortigueira	91	84,92	4	2.429,56	28
Assaí	94	161,86	8	440,35	12
São Jerônimo da Serra	129	237,25	12	823,77	16
Total		2.758,33	141		

Anexo II – Tabelas Completas das Simulações

Custos de colheita e transporte primário

Palha de Cana-de-açúcar							
Municípios	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	Diesel (colheita) (US\$/ano)	Diesel (transporte) (US\$/ano)	Custo nivelado colheita (US\$/t)	Custo nivelado transporte (US\$/t)	Custo nivelado total (US\$/t)
Orlândia	1.170.009,05	405.468,65	175.928,24	86.418,99	11,02	1,30	12,32
Sales Oliveira	1.493.365,32	517.528,33	253.688,52	127.573,23	10,06	1,33	11,39
Nuporanga	1.557.658,94	539.809,39	270.246,62	145.034,81	9,90	1,42	11,32
São Joaquim da Barra	1.521.717,15	527.353,70	260.947,19	152.110,15	9,99	1,54	11,53
Morro Agudo	3.446.422,21	1.194.363,56	889.414,97	952.963,12	7,52	2,83	10,35
Guará	1.497.607,08	518.998,32	254.770,15	139.434,30	10,05	1,44	11,49
Jardinópolis	1.756.210,52	608.617,78	323.531,51	208.434,33	9,48	1,70	11,18
Batatais	2.224.879,80	771.035,93	461.329,84	386.684,65	8,72	2,21	10,93
Pontal	1.598.511,48	553.966,91	280.947,62	152.522,39	9,81	1,43	11,24
São José da Bela Vista	1.084.054,29	375.680,88	156.901,92	75.090,95	11,35	1,26	12,61
Ituverava	2.332.504,23	808.333,36	495.205,41	378.034,93	8,58	2,01	10,59
Ipuã	1.639.829,60	568.285,78	291.910,56	181.306,98	9,72	1,64	11,36
Brodowski	994.821,81	344.757,22	137.933,47	66.192,16	11,73	1,27	13,00
Sertãozinho	1.342.345,47	465.192,14	216.196,25	35.606,47	10,47	0,43	10,90
Viradouro	956.833,62	331.592,34	130.108,70	55.210,10	11,91	1,12	13,03
Ribeirão Preto	1.667.042,14	577.716,33	299.206,89	219.528,60	9,66	1,94	11,60
Pitangueiras	1.822.718,42	631.666,21	342.082,68	204.147,62	9,36	1,57	10,93
Franca	291.634,95	101.066,59	21.893,29	15.494,92	19,43	1,87	21,30
Jaborandi	72.908,74	25.266,65	2.736,66	7.867,89	36,23	7,58	43,81
Terra Roxa	970.584,81	336.357,84	132.923,56	56.896,57	11,84	1,13	12,97
Restinga	989.523,80	342.921,18	136.833,07	61.686,68	11,76	1,19	12,94
Buritizal	854.369,26	296.083,14	109.779,22	51.530,06	12,45	1,24	13,69
Miguelópolis	2.152.560,43	745.973,53	439.020,44	361.710,19	8,82	2,17	10,99
Jeriquara	414.823,43	143.757,78	37.140,41	12.726,34	16,72	0,90	17,62
Guaiara	2.869.453,67	994.414,12	675.694,74	689.331,57	7,99	2,69	10,68
Patrocínio Paulista	1.193.722,82	413.686,70	181.303,82	128.017,08	10,94	1,86	12,80
Cristais Paulista	413.995,32	143.470,79	37.029,24	20.900,75	16,73	1,49	18,22
Total	38.330.108,35	13.283.365,13	7.014.704,99	4.972.455,83	9,53	1,87	11,40

Palha de Soja

Municípios	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	Diesel (colheita) (US\$/ano)	Diesel (transporte) (US\$/ano)	Custo nivelado colheita (US\$/t)	Custo nivelado transporte(US\$/t)	Custo nivelado total (US\$/t)
Sorriso	8.005.544,04	2.774.335,09	3.148.748,64	8.746.345,99	5,84	7,33	13,17
Vera	2.793.936,57	968.243,54	649.197,04	1.016.193,81	8,06	4,13	12,19
Lucas do Rio Verde	4.071.906,83	1.411.126,33	1.142.216,59	1.988.304,51	7,13	4,59	11,72
Sinop	2.956.256,24	1.024.495,70	706.585,68	1.275.830,00	7,91	4,76	12,67
Nova Ubiratã	5.137.705,05	1.780.480,54	1.618.845,74	5.247.828,66	6,64	8,55	15,19
Ipiranga do Norte	3.348.233,73	1.160.336,17	851.677,88	1.442.156,98	7,59	4,47	12,06
Nova Mutum	5.759.447,88	1.995.946,59	1.921.423,04	5.398.316,27	6,42	7,41	13,83
Tapurah	3.163.779,03	1.096.413,08	782.277,67	1.510.905,70	7,74	5,09	12,83
Santa Rita do Trivelato	3.221.094,88	1.116.275,99	803.631,58	1.590.100,92	7,69	5,22	12,91
Total	38.457.904,26	13.327.653,03	11.624.603,85	28.215.982,84	6,81	6,40	13,21

Palha de Milho

Municípios	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	Diesel (colheita) (US\$/ano)	Diesel (transporte) (US\$/ano)	Custo nivelado colheita (US\$/t)	Custo nivelado transporte(US\$/t)	Custo nivelado total (US\$/t)
Sorriso	5.952.549,16	2.062.866,18	2.018.860,00	5.607.830,31	6,35	7,33	13,68
Vera	1.882.260,40	652.300,59	358.980,84	561.915,86	9,25	4,13	13,38
Lucas do Rio Verde	3.130.176,63	1.084.768,11	769.847,99	1.340.106,81	7,76	4,59	12,36
Sinop	1.992.029,15	690.341,14	390.836,62	705.705,06	9,06	4,76	13,83
Nova Ubiratã	3.597.245,59	1.246.631,66	948.433,42	3.074.546,23	7,42	8,55	15,97
Ipiranga do Norte	1.970.857,33	683.004,01	384.622,33	651.285,89	9,10	4,47	13,56
Nova Mutum	3.734.914,26	1.294.340,98	1.003.396,71	2.819.083,90	7,33	7,41	14,74
Tapurah	1.403.735,86	486.467,08	231.195,73	446.535,75	10,29	5,09	15,39
Santa Rita do Trivelato	1.992.439,14	690.483,22	390.957,29	773.565,35	9,06	5,22	14,28
Total	25.656.207,53	8.891.202,95	6.497.130,93	15.980.575,17	7,62	6,49	14,10

Palha de Arroz

Municípios	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	Diesel (colheita) (US\$/ano)	Diesel (transporte) (US\$/ano)	Custo nivelado colheita (US\$/t)	Custo nivelado transporte(US\$/t)	Custo nivelado total (US\$/t)
Uruguaiana	4.699.355,57	2.023.294,11	1.416.149,74	3.075.673,49	7,56	5,73	13,28
Barra do Quaraí	1.955.827,91	543.247,22	380.231,13	355.072,73	8,19	2,46	10,65
Itaqui	4.255.756,32	1.743.679,60	1.220.441,16	2.048.494,75	7,61	4,43	12,04
Quaraí	1.211.964,14	264.994,11	185.475,42	299.250,81	8,67	4,26	12,93
Alegrete	3.576.433,17	1.343.311,48	940.214,37	2.388.588,26	7,72	6,70	14,43
Total	15.699.337,11	5.918.526,52	4.142.511,83	8.167.080,02	7,72	5,20	12,92

Palha de Trigo

Municípios	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	Diesel (colheita) (US\$/ano)	Diesel (transporte) (US\$/ano)	Custo nivelado colheita (US\$/t)	Custo nivelado transporte(US\$/t)	Custo nivelado total (US\$/t)
Apucarana	135.546,21	46.973,77	32.878,02	22.342,47	7,84	1,79	9,63
Califórnia	39.435,99	13.666,61	9.565,57	3.275,91	7,84	0,90	8,74
Arapongas	113.692,07	39.400,18	27.577,09	15.504,56	7,84	1,48	9,32
Cambira	23.754,06	8.232,01	5.761,77	2.117,99	7,84	0,97	8,80
Marilândia do Sul	121.397,87	42.070,64	29.446,20	16.603,19	7,84	1,49	9,32
Londrina	190.093,14	65.877,11	46.108,89	53.904,07	7,84	3,08	10,92
Rio Bom	40.423,85	14.008,95	9.805,19	3.760,30	7,84	1,01	8,85
Jandaia do Sul	15.285,27	5.297,14	3.707,59	1.460,38	7,84	1,04	8,87
Novo Itacolomi	17.685,43	6.128,92	4.289,77	1.567,32	7,84	0,96	8,80
Mandaguari	12.960,90	4.491,62	3.143,79	1.656,76	7,84	1,39	9,23
Mauá da Serra	30.722,12	10.646,80	7.451,94	2.230,43	7,84	0,79	8,62
Sabáudia	19.403,45	6.724,30	4.706,49	1.867,27	7,84	1,05	8,88
Rolândia	118.103,32	40.928,91	28.647,08	17.650,42	7,84	1,63	9,46
Marumbi	14.757,23	5.114,14	3.579,51	1.486,28	7,84	1,10	8,93
Marialva	47.750,67	16.548,08	11.582,38	7.263,72	7,84	1,65	9,49
Tamarana	68.215,24	23.640,11	16.546,25	10.339,49	7,84	1,65	9,48
Faxinal	50.006,83	17.329,95	12.129,63	9.333,48	7,84	2,03	9,86
Cambé	40.929,15	14.184,07	9.927,75	6.354,41	7,84	1,69	9,52
Sarandi	13.643,05	4.728,02	3.309,25	968,01	7,84	0,77	8,61
Kaloré	32.857,01	11.386,65	7.969,78	3.186,53	7,84	1,05	8,89
Astorga	21.917,30	7.595,48	5.316,25	3.187,89	7,84	1,58	9,42
São Pedro do Ivaí	13.440,93	4.657,98	3.260,22	1.684,22	7,84	1,36	9,20
Ibiporã	23.496,36	8.142,70	5.699,26	2.828,11	7,84	1,31	9,14

Borrazópolis	44.213,58	15.322,29	10.724,42	5.639,62	7,84	1,39	9,22
Cruzmaltina	5.020,14	1.739,74	1.217,68	618,84	7,84	1,34	9,18
São João do Ivaí	10.611,26	3.677,35	2.573,86	1.391,34	7,84	1,43	9,26
Ortigueira	47.245,37	16.372,96	11.459,81	16.244,21	7,84	3,74	11,57
Assaí	90.056,75	31.209,32	21.844,12	13.182,24	7,84	1,59	9,43
São Jerônimo da Serra	132.001,55	45.745,36	32.018,22	26.427,64	7,84	2,18	10,01
Total	1.534.666,09	531.841,18	372.247,78	254.077,08	7,84	1,80	9,64

Palha de Soja e Milho

Municípios	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	Diesel (colheita) (US\$/ano)	Diesel (transporte) (US\$/ano)	Custo nivelado colheita (US\$/t)	Custo nivelado transporte(US\$/t)	Custo nivelado total (US\$/t)
Sorriso	13.958.093,20	4.837.201,26	5.167.608,63	14.354.176,30	6,04	7,33	13,37
Vera	4.676.196,97	1.620.544,12	1.008.177,88	1.578.109,67	8,49	4,13	12,61
Lucas do Rio Verde	7.202.083,45	2.495.894,44	1.912.064,58	3.328.411,32	7,39	4,59	11,98
Sinop	4.948.285,40	1.714.836,84	1.097.422,30	1.981.535,06	8,32	4,76	13,08
Nova Ubiratã	8.734.950,64	3.027.112,20	2.567.279,17	8.322.374,89	6,93	8,55	15,48
Ipiranga do Norte	5.319.091,06	1.843.340,18	1.236.300,21	2.093.442,87	8,06	4,47	12,53
Nova Mutum	9.494.362,14	3.290.287,57	2.924.819,75	8.217.400,18	6,73	7,41	14,14
Tapurah	4.567.514,89	1.582.880,16	1.013.473,40	1.957.441,45	8,32	5,09	13,41
Santa Rita do Trivelato	5.213.534,03	1.806.759,21	1.194.588,87	2.363.666,28	8,14	5,22	13,36
Total	64.114.111,79	22.218.855,98	18.121.734,78	44.196.558,01	7,10	6,43	13,53

Custos de armazenamento

Palha de Cana-de-açúcar			
Municípios	Biomassa Crua (US\$/ano)	Bio-carvão (US\$/ano)	Pellets (US\$/ano)
Orlândia	1.858.333,74	67.789,76	116.951,97
Sales Oliveira	2.679.717,25	97.752,83	168.644,75
Nuporanga	2.854.620,87	104.133,10	179.652,09
São Joaquim da Barra	2.756.390,72	100.549,79	173.470,10
Morro Agudo	9.394.909,44	342.714,89	591.257,21
Guará	2.691.142,56	98.169,61	169.363,79
Jardinópolis	3.417.470,23	124.665,17	215.074,34
Batatais	4.873.036,98	177.762,47	306.678,66
Pontal	2.967.655,74	108.256,48	186.765,81
São José da Bela Vista	1.657.358,38	60.458,42	104.303,84
Ituverava	5.230.865,33	190.815,62	329.198,15
Ipuã	3.083.457,46	112.480,79	194.053,65
Brodowski	1.456.994,22	53.149,38	91.694,16
Sertãozinho	2.283.685,68	83.306,08	143.720,98
Viradouro	1.374.341,04	50.134,29	86.492,48
Ribeirão Preto	3.160.528,75	115.292,25	198.904,04
Pitangueiras	3.613.426,71	131.813,42	227.406,62
Franca	231.259,31	8.436,06	14.554,02
Jaborandi	28.907,41	1.054,51	1.819,25
Terra Roxa	1.404.074,38	51.218,93	88.363,71
Restinga	1.445.370,68	52.725,37	90.962,65
Buritizal	1.159.600,25	42.300,81	72.978,03
Miguelópolis	4.637.382,36	169.166,08	291.848,02
Jeriquara	392.314,90	14.311,17	24.689,86
Guaíra	7.137.378,09	260.362,89	449.182,21
Patrocínio Paulista	1.915.116,16	69.861,11	120.525,51
Cristais Paulista	391.140,71	14.268,34	24.615,97
Total	74.096.479,33	2.702.949,64	4.663.171,86

Palha de Soja

Municípios	Biomassa Crua (US\$/ano)	Bio-carvão (US\$/ano)	Pellets (US\$/ano)
Sorriso	81.855.988,24	2.986.007,11	5.151.507,12
Vera	16.876.756,89	615.643,61	1.062.118,18
Lucas do Rio Verde	29.693.468,32	1.083.181,69	1.868.722,34
Sinop	18.368.652,28	670.066,14	1.156.008,80
Nova Ubiratã	42.084.089,14	1.535.176,50	2.648.511,00
Ipiranga do Norte	22.140.520,71	807.659,33	1.393.386,76
Nova Mutum	49.949.996,09	1.822.115,24	3.143.542,29
Tapurah	20.336.368,14	741.846,03	1.279.844,61
Santa Rita do Trivelato	20.891.492,00	762.096,27	1.314.780,66
Total	302.197.331,81	22.047.583,83	19.018.421,76

Palha de Milho

Municípios	Biomassa Crua (US\$/ano)	Bio-carvão (US\$/ano)	Pellets (US\$/ano)
Sorriso	46.049.840,58	1.679.842,30	2.898.090,74
Vera	8.188.289,75	298.698,87	515.320,06
Lucas do Rio Verde	17.560.097,00	640.571,03	1.105.123,36
Sinop	8.914.914,45	325.205,26	561.049,30
Nova Ubiratã	21.633.599,13	789.167,44	1.361.484,27
Ipiranga do Norte	8.773.167,58	320.034,51	552.128,64
Nova Mutum	22.887.301,98	834.901,00	1.440.384,53
Tapurah	5.273.533,83	192.372,11	331.883,44
Santa Rita do Trivelato	8.917.666,82	325.305,66	561.222,52
Total	148.198.411,11	5.406.098,18	9.326.686,87

Palha de Arroz

Municípios	Biomassa Crua (US\$/ano)	Bio-carvão (US\$/ano)	Pellets (US\$/ano)
Uruguaiana	32.302.125,81	1.874.819,10	2.032.895,02
Barra do Quaraí	8.673.005,14	503.382,22	545.825,04
Itaqui	27.838.047,63	1.615.723,49	1.751.953,69
Quaraí	4.230.661,72	245.548,09	266.251,55
Alegrete	21.446.124,11	1.244.735,51	1.349.685,75
Total	94.489.964,41	5.484.208,41	5.946.611,06

Palha de Trigo

Municípios	Biomassa Crua (US\$/ano)	Bio-carvão (US\$/ano)	Pellets (US\$/ano)
Apucarana	749.941,76	27.281,39	47.196,67
Califórnia	218.189,02	7.937,28	13.731,46
Arapongas	629.028,50	22.882,81	39.587,14
Cambira	131.425,02	4.780,98	8.271,07
Marilândia do Sul	671.662,66	24.433,75	42.270,27
Londrina	1.051.735,65	38.260,05	66.189,71
Rio Bom	223.654,58	8.136,11	14.075,43
Jandaia do Sul	84.569,39	3.076,47	5.322,27
Novo Itacolomi	97.848,88	3.559,55	6.158,00
Mandaguari	71.709,25	2.608,64	4.512,93
Mauá da Serra	169.977,48	6.183,44	10.697,33
Sabáudia	107.354,20	3.905,33	6.756,21
Rolândia	653.434,81	23.770,66	41.123,13
Marumbi	81.647,90	2.970,19	5.138,41
Marialva	264.191,97	9.610,78	16.626,60
Tamarana	377.417,10	13.729,68	23.752,29
Faxinal	276.674,69	10.064,88	17.412,19
Cambé	226.450,26	8.237,81	14.251,37
Sarandi	75.483,42	2.745,94	4.750,46
Kaloré	181.789,24	6.613,13	11.440,68
Astorga	121.262,72	4.411,30	7.631,52
São Pedro do Ivaí	74.365,15	2.705,26	4.680,08
Ibiporã	129.999,22	4.729,11	8.181,34
Borrazópolis	244.622,20	8.898,87	15.395,00
Cruzmaltina	27.775,10	1.010,40	1.747,99
São João do Ivaí	58.709,33	2.135,73	3.694,80
Ortigueira	261.396,29	9.509,08	16.450,66
Assaí	498.260,47	18.125,73	31.357,42
São Jerônimo da Serra	730.330,05	26.567,96	45.962,43
Total	8.490.906,28	308.882,30	1.527.821,74

Palha de Soja e Milho

Municípios	Biomassa Crua (US\$/ano)	Bio-carvão (US\$/ano)	Pellets (US\$/ano)
Sorriso	85.662.108,50	3.124.849,76	5.391.040,68
Vera	16.712.303,37	609.644,54	1.051.768,50
Lucas do Rio Verde	31.695.798,88	1.156.224,28	1.994.736,58
Sinop	18.191.684,92	663.610,59	1.144.871,58
Nova Ubiratã	42.557.121,13	1.552.432,13	2.678.280,69
Ipiranga do Norte	20.493.828,05	747.589,98	1.289.754,16
Nova Mutum	48.483.978,69	1.768.636,70	3.051.280,27
Tapurah	16.800.085,72	612.846,74	1.057.292,97
Santa Rita do Trivelato	19.802.389,90	722.367,15	1.246.239,34
Total	300.399.299,15	10.958.201,87	18.905.264,76

Custos de carga e descarga

Palha de Cana-de-açúcar					
Municípios	Biomassa Crua (US\$/ano)	Bio-carvão G2A (US\$/ano)	Pellets G3A (US\$/ano)	Bio-carvão G2B (US\$/ano)	Pellets G3B (US\$/ano)
Orlândia	204.624,26	86.617,22	56.447,37	73.624,64	47.980,26
Sales Oliveira	295.068,19	124.902,03	81.397,10	106.166,72	69.187,54
Nuporanga	314.327,12	133.054,31	86.709,85	113.096,17	73.703,37
São Joaquim da Barra	303.510,83	128.475,79	83.726,08	109.204,42	71.167,17
Morro Agudo	1.034.489,34	437.898,16	285.372,80	372.213,44	242.566,88
Guará	296.326,25	125.434,56	81.744,15	106.619,38	69.482,53
Jardinópolis	376.303,42	159.288,81	103.806,54	135.395,49	88.235,56
Batatais	536.578,33	227.133,00	148.019,76	193.063,05	125.816,79
Pontal	326.773,58	138.322,89	90.143,31	117.574,45	76.621,81
São José da Bela Vista	182.494,53	77.249,73	50.342,69	65.662,27	42.791,29
Ituverava	575.979,41	243.811,43	158.888,89	207.239,72	135.055,55
Ipuã	339.524,71	143.720,42	93.660,82	122.162,36	79.611,69
Brodowski	160.432,09	67.910,72	44.256,58	57.724,11	37.618,09
Sertãozinho	251.460,48	106.442,94	69.367,54	90.476,50	58.962,41
Viradouro	151.331,01	64.058,25	41.745,96	54.449,51	35.484,07
Ribeirão Preto	348.011,16	147.312,73	96.001,88	125.215,82	81.601,60
Pitangueiras	397.880,51	168.422,37	109.758,77	143.159,01	93.294,95
Franca	25.464,35	10.779,03	7.024,56	9.162,18	5.970,88
Jaborandi	3.183,04	1.347,38	878,07	1.145,27	746,36
Terra Roxa	154.605,00	65.444,12	42.649,12	55.627,50	36.251,75
Restinga	159.152,21	67.368,95	43.903,51	57.263,61	37.317,98
Buritizal	127.685,54	54.049,14	35.223,16	45.941,77	29.939,68
Miguelópolis	510.630,00	216.149,10	140.861,69	183.726,73	119.732,43
Jeriquara	43.198,46	18.285,86	11.916,67	15.542,98	10.129,17
Guaíra	785.908,75	332.674,28	216.799,70	282.773,14	184.279,75
Patrocínio Paulista	210.876,67	89.263,86	58.172,15	75.874,28	49.446,33
Cristais Paulista	43.069,16	18.231,13	11.881,00	15.496,46	10.098,85
Total	8.158.888,40	3.453.648,19	2.250.699,70	2.935.600,97	1.913.094,74

Palha de Soja

Municípios	Biomassa Crua (US\$/ano)	Bio-carvão G2A (US\$/ano)	Pellets G3A (US\$/ano)	Bio-carvão G2B (US\$/ano)	Pellets G3B (US\$/ano)
Sorriso	3.662.347,71	1.550.267,62	1.010.290,18	1.317.727,48	858.746,66
Vera	755.088,95	319.628,29	208.297,79	271.684,05	177.053,13
Lucas do Rio Verde	1.328.525,96	562.363,53	366.485,34	478.009,00	311.512,54
Sinop	821.838,36	347.883,25	226.711,20	295.700,76	192.704,52
Nova Ubiratã	1.882.899,11	797.029,05	519.413,95	677.474,70	441.501,86
Ipiranga do Norte	990.596,86	419.318,53	273.264,68	356.420,75	232.274,98
Nova Mutum	2.234.830,43	946.001,18	616.497,24	804.101,01	524.022,65
Tapurah	909.876,64	385.149,75	250.997,31	327.377,28	213.347,72
Santa Rita do Trivelato	934.713,63	395.663,22	257.848,81	336.313,73	219.171,49
Total	13.520.717,65	5.723.304,42	3.729.806,51	4.864.808,76	3.170.335,54

Palha de Milho

Municípios	Biomassa Crua (US\$/ano)	Bio-carvão G2A (US\$/ano)	Pellets G3A (US\$/ano)	Bio-carvão G2B (US\$/ano)	Pellets G3B (US\$/ano)
Sorriso	2.348.160,53	993.973,69	647.760,32	844.877,63	550.596,28
Vera	417.534,97	176.742,08	115.180,62	150.230,77	97.903,53
Lucas do Rio Verde	895.419,53	379.030,07	247.009,20	322.175,56	209.957,82
Sinop	454.586,81	192.426,08	125.401,69	163.562,17	106.591,44
Nova Ubiratã	1.103.134,41	466.955,54	304.309,14	396.912,21	258.662,77
Ipiranga do Norte	447.358,90	189.366,51	123.407,81	160.961,54	104.896,64
Nova Mutum	1.167.062,87	494.016,39	321.944,35	419.913,93	273.652,70
Tapurah	268.906,56	113.827,84	74.180,19	96.753,66	63.053,16
Santa Rita do Trivelato	454.727,16	192.485,49	125.440,41	163.612,67	106.624,35
Total	7.556.891,75	3.198.823,69	2.084.633,73	2.719.000,14	1.771.938,67

Palha de Arroz

Municípios	Biomassa Crua (US\$/ano)	Bio-carvão G2A (US\$/ano)	Pellets G3A (US\$/ano)	Bio-carvão G2B (US\$/ano)	Pellets G3B (US\$/ano)
Uruguaiana	1.647.140,92	697.232,88	454.378,02	592.647,95	386.221,32
Barra do Quaraí	442.251,44	187.204,53	121.998,87	159.123,85	103.699,04
Itaqui	1.419.509,90	600.876,93	391.584,04	510.745,39	332.846,44
Quaraí	215.728,71	91.317,72	59.510,63	77.620,06	50.584,03
Alegrete	1.093.574,74	462.908,94	301.672,02	393.472,60	256.421,21
Total	4.818.205,72	2.039.541,01	1.329.143,58	1.733.609,86	1.129.772,04

Palha de Trigo

Municípios	Biomassa Crua (US\$/ano)	Bio-carvão G2A (US\$/ano)	Pellets G3A (US\$/ano)	Bio-carvão G2B (US\$/ano)	Pellets G3B (US\$/ano)
Apucarana	38.240,82	16.187,30	10.549,06	13.759,20	8.966,70
Califórnia	11.125,83	4.709,55	3.069,16	4.003,12	2.608,78
Arapongas	32.075,24	13.577,41	8.848,23	11.540,80	7.521,00
Cambira	6.701,59	2.836,77	1.848,69	2.411,26	1.571,39
Marilândia do Sul	34.249,23	14.497,66	9.447,95	12.323,01	8.030,75
Londrina	53.629,81	22.701,44	14.794,25	19.296,22	12.575,11
Rio Bom	11.404,53	4.827,53	3.146,04	4.103,40	2.674,13
Jandaia do Sul	4.312,34	1.825,41	1.189,60	1.551,60	1.011,16
Novo Itacolomi	4.989,48	2.112,04	1.376,39	1.795,24	1.169,93
Mandaguari	3.656,58	1.547,83	1.008,70	1.315,65	857,39
Mauá da Serra	8.667,44	3.668,92	2.390,99	3.118,58	2.032,34
Sabáudia	5.474,18	2.317,21	1.510,10	1.969,63	1.283,58
Rolândia	33.319,76	14.104,22	9.191,54	11.988,59	7.812,81
Marumbi	4.163,37	1.762,35	1.148,50	1.498,00	976,23
Marialva	13.471,60	5.702,51	3.716,26	4.847,14	3.158,82
Tamarana	19.245,15	8.146,45	5.308,94	6.924,48	4.512,60
Faxinal	14.108,12	5.971,95	3.891,85	5.076,16	3.308,07
Cambé	11.547,09	4.887,87	3.185,36	4.154,69	2.707,56
Sarandi	3.849,03	1.629,29	1.061,79	1.384,90	902,52
Kaloré	9.269,75	3.923,87	2.557,14	3.335,29	2.173,57
Astorga	6.183,39	2.617,42	1.705,74	2.224,81	1.449,88
São Pedro do Ivaí	3.792,01	1.605,15	1.046,06	1.364,38	889,15
Ibiporã	6.628,88	2.806,00	1.828,63	2.385,10	1.554,34
Borrazópolis	12.473,71	5.280,11	3.440,98	4.488,09	2.924,83
Cruzmaltina	1.416,30	599,52	390,70	509,59	332,09
São João do Ivaí	2.993,69	1.267,23	825,84	1.077,14	701,96
Ortigueira	13.329,05	5.642,17	3.676,93	4.795,84	3.125,39
Assaí	25.407,16	10.754,82	7.008,78	9.141,60	5.957,47
São Jerônimo da Serra	37.240,78	15.763,98	10.273,19	13.399,38	8.732,21
Total	432.965,91	183.273,98	119.437,38	155.782,88	101.521,77

Palha de Soja e Milho

Municípios	Biomassa Crua (US\$/ano)	Bio-carvão G2A (US\$/ano)	Pellets G3A (US\$/ano)	Bio-carvão G2B (US\$/ano)	Pellets G3B (US\$/ano)
Sorriso	6.010.508,24	2.544.241,31	1.658.050,51	2.162.605,11	1.409.342,93
Vera	1.172.623,92	496.370,37	323.478,42	421.914,82	274.956,65
Lucas do Rio Verde	2.223.945,50	941.393,60	613.494,54	800.184,56	521.470,36
Sinop	1.276.425,18	540.309,33	352.112,89	459.262,93	299.295,96
Nova Ubatã	2.986.033,52	1.263.984,60	823.723,09	1.074.386,91	700.164,62
Ipiranga do Norte	1.437.955,76	608.685,04	396.672,49	517.382,28	337.171,62
Nova Mutum	3.401.893,30	1.440.017,57	938.441,59	1.224.014,94	797.675,35
Tapurah	1.178.783,19	498.977,59	325.177,50	424.130,95	276.400,88
Santa Rita do Trivelato	1.389.440,79	588.148,71	383.289,22	499.926,40	325.795,84
Total	21.077.609,39	8.922.128,12	5.814.440,24	7.583.808,90	4.942.274,21

Custos de pré-tratamento

CASO G2A							
Palha de Cana-de-açúcar							
Municípios	Número de trens	Produção anual de bio-carvão (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/mês)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Orlândia	2	42,5	26,6	9.535.384,02	897.142,61	8,98	59,60
Sales Oliveira	2	61,3	38,3	12.170.685,18	1.145.086,58	8,98	53,78
Nuporanga	2	65,3	40,8	12.694.667,73	1.194.385,81	8,98	52,85
São Joaquim da Barra	2	63,0	39,4	12.401.747,94	1.166.826,27	8,98	53,36
Morro Agudo	6	214,8	44,8	36.294.911,29	3.414.829,60	8,98	47,09
Guará	2	61,5	38,5	12.205.254,81	1.148.339,09	8,98	53,72
Jardinópolis	2	78,1	48,8	14.312.830,93	1.346.631,72	8,98	50,29
Batatais	3	111,4	46,4	19.931.660,41	1.875.282,83	8,98	49,33
Pontal	2	67,9	42,4	13.027.609,34	1.225.710,83	8,98	52,28
São José da Bela Vista	1	37,9	47,4	7.515.530,96	707.103,47	8,98	53,71
Ituverava	3	119,6	49,8	20.895.817,55	1.965.996,16	8,98	48,38
Ipuã	2	70,5	44,1	13.364.345,30	1.257.392,85	8,98	51,73
Brodowski	1	33,3	41,6	6.896.900,08	648.899,19	8,98	55,67
Sertãozinho	2	52,2	32,6	10.939.897,85	1.029.287,18	8,98	56,23
Viradouro	1	31,4	39,3	6.633.535,51	624.120,37	8,98	56,59
Ribeirão Preto	2	72,3	45,2	13.586.123,08	1.278.258,95	8,98	51,38
Pitangueiras	2	82,6	51,6	14.854.859,48	1.397.628,81	8,98	49,53
Franca	1	5,3	6,6	2.021.846,58	190.226,71	8,98	95,22
Jaborandi	1	0,7	0,8	505.461,65	47.556,68	8,98	181,47
Terra Roxa	1	32,1	40,1	6.728.869,80	633.089,95	8,98	56,25
Restinga	1	33,0	41,3	6.860.169,98	645.443,41	8,98	55,80
Buritizal	1	26,5	33,1	5.923.170,71	557.285,25	8,98	59,37
Miguelópolis	3	106,0	44,2	19.283.784,91	1.814.327,05	8,98	50,00
Jeriquara	1	9,0	11,2	2.875.887,66	270.579,70	8,98	81,29
Guaíra	4	163,2	51,0	27.490.871,99	2.586.496,01	8,98	46,97
Patrocínio Paulista	2	43,8	27,4	9.728.647,35	915.325,92	8,98	59,09
Cristais Paulista	1	8,9	11,2	2.870.146,47	270.039,54	8,98	81,37
Total	53	1694,2		321.550.618,54	30.253.292,55	8,98	51,79

Palha de Soja

Municípios	Número de trens	Produção anual de bio-carvão (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/mês)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Sorriso	35	760,5	27,2	127.227.803,23	11.970.308,03	8,98	46,71
Vera	8	156,8	24,5	31.466.335,87	2.960.530,04	8,98	54,24
Lucas do Rio Verde	13	275,9	26,5	51.360.185,26	4.832.255,39	8,98	50,97
Sinop	8	170,7	26,7	33.294.439,37	3.132.528,31	8,98	52,98
Nova Ubiratã	18	391,0	27,2	69.915.701,56	6.578.062,83	8,98	49,31
Ipiranga do Norte	10	205,7	25,7	39.724.435,50	3.737.498,54	8,98	52,54
Nova Mutum	21	464,1	27,6	81.246.997,77	7.644.174,98	8,98	48,47
Tapurah	9	188,9	26,2	36.624.471,21	3.445.836,45	8,98	52,70
Santa Rita do Trivelato	9	194,1	27,0	37.287.969,75	3.508.262,13	8,98	52,31
Total	131	2807,5		508.148.339,53	47.809.456,70	8,98	49,80

Palha de Milho

Municípios	Número de trens	Produção anual de bio-carvão (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/mês)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Sorriso	23	487,6	26,5	85.772.510,18	8.069.960,66	8,98	48,66
Vera	5	86,7	21,7	18.996.838,91	1.787.329,56	8,98	58,40
Lucas do Rio Verde	9	185,9	25,8	36.235.483,75	3.409.238,32	8,98	52,93
Sinop	5	94,4	23,6	20.104.687,42	1.891.562,18	8,98	57,02
Nova Ubiratã	11	229,1	26,0	43.638.553,80	4.105.760,83	8,98	51,95
Ipiranga do Norte	5	92,9	23,2	19.891.009,38	1.871.458,15	8,98	57,28
Nova Mutum	12	242,3	25,2	46.237.913,51	4.350.323,23	8,98	52,01
Tapurah	3	55,8	23,3	12.575.414,87	1.183.165,83	8,98	59,78
Santa Rita do Trivelato	5	94,4	23,6	20.108.825,25	1.891.951,49	8,98	57,01
Total	78	1569,2		303.561.237,08	28.560.750,26	8,98	52,61

Palha de Arroz

Municípios	Número de trens	Produção anual de bio-carvão (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/mês)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Uruguaiana	15	342,0	28,5	61.286.981,82	5.766.224,30	8,98	49,39
Barra do Quaraí	4	91,8	28,7	18.737.857,77	1.762.963,15	8,98	55,00
Itaqui	13	294,8	28,3	53.679.134,18	5.050.435,16	8,98	50,05
Quaraí	2	44,8	28,0	9.877.311,20	929.313,05	8,98	58,71
Alegrete	10	227,1	28,4	42.431.861,13	3.992.228,39	8,98	51,12
Total	44	1000,5		186.013.146,11	17.501.164,06	8,98	50,91

Palha de Trigo

Municípios	Número de trens	Produção anual de bio-carvão (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/mês)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Apucarana	1	7,9	9,9	2.651.416,14	249.460,16	8,98	84,29
Califórnia	1	2,3	2,9	1.164.165,70	109.531,26	8,98	122,64
Arapongas	1	6,7	8,3	2.358.159,02	221.868,88	8,98	88,84
Cambira	1	1,4	1,7	830.318,87	78.121,07	8,98	143,56
Marilândia do Sul	1	7,1	8,9	2.463.544,09	231.784,10	8,98	87,11
Londrina	1	11,1	13,9	3.321.981,96	312.550,77	8,98	76,26
Rio Bom	1	2,4	3,0	1.183.526,72	111.352,86	8,98	121,71
Jandaia do Sul	1	0,9	1,1	618.873,18	58.227,07	8,98	164,87
Novo Itacolomi	1	1,0	1,3	682.071,82	64.173,16	8,98	157,47
Mandaguari	1	0,8	0,9	554.425,23	52.163,45	8,98	173,68
Mauá da Serra	1	1,8	2,2	985.644,86	92.735,02	8,98	132,50
Sabáudia	1	1,1	1,4	725.558,15	68.264,60	8,98	152,95
Rolândia	1	6,9	8,6	2.418.768,93	227.571,40	8,98	87,83
Marumbi	1	0,9	1,1	604.536,99	56.878,24	8,98	166,71
Marialva	1	2,8	3,5	1.322.531,26	124.431,19	8,98	115,62
Tamarana	1	4,0	5,0	1.677.544,00	157.832,78	8,98	103,66
Faxinal	1	2,9	3,7	1.363.868,49	128.320,43	8,98	113,99
Cambé	1	2,4	3,0	1.193.369,01	112.278,87	8,98	121,24
Sarandi	1	0,8	1,0	573.711,98	53.978,05	8,98	170,89
Kaloré	1	1,9	2,4	1.030.793,45	96.982,85	8,98	129,77
Astorga	1	1,3	1,6	786.945,04	74.040,22	8,98	147,22
São Pedro do Ivaí	1	0,8	1,0	568.031,60	53.443,61	8,98	171,70
Ibiporã	1	1,4	1,7	824.302,68	77.555,04	8,98	144,05

Borrazópolis	1	2,6	3,2	1.256.387,03	118.207,97	8,98	118,39
Cruzmaltina	1	0,3	0,4	294.598,13	27.717,45	8,98	234,93
São João do Ivaí	1	0,6	0,8	485.211,34	45.651,41	8,98	185,04
Ortigueira	1	2,8	3,5	1.313.184,70	123.551,81	8,98	116,00
Assaí	1	5,3	6,6	2.018.817,95	189.941,76	8,98	95,29
São Jerônimo da Serra	1	7,7	9,7	2.604.987,54	245.091,89	8,98	84,96
Total	29	89,9		37.877.275,83	3.563.707,36	8,98	104,01

Palha de Soja e Milho

Municípios	Número de trens	Produção anual de bio- carvão (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/mês)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Sorriso	38	1248,1	41,1	180.447.168,85	16.977.485,58	8,98	41,59
Vera	8	243,5	38,0	42.197.487,91	3.970.177,24	8,98	48,07
Lucas do Rio Verde	14	461,8	41,2	73.672.555,85	6.931.528,84	8,98	44,96
Sinop	8	265,0	41,4	44.652.352,09	4.201.144,68	8,98	46,98
Nova Ubiratã	19	620,0	40,8	96.286.498,68	9.059.175,90	8,98	44,00
Ipiranga do Norte	9	298,6	41,5	49.691.263,25	4.675.233,81	8,98	46,51
Nova Mutum	21	706,4	42,0	107.512.277,82	10.115.360,40	8,98	43,31
Tapurah	8	244,8	38,2	42.345.122,02	3.984.067,49	8,98	48,00
Santa Rita do Trivelato	9	288,5	40,1	48.567.198,24	4.569.475,45	8,98	46,95
Total	134	4376,7		685.371.924,71	64.483.649,38	8,98	44,30

CASO G2B

Palha de Cana-de-açúcar

Municípios	Número de trens	Produção anual de bio-carvão (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Orlândia	1	36,1	45,1	7.278.532,18	684.805,29	8,98	54,43
Sales Oliveira	1	52,1	65,1	9.290.105,52	874.065,43	8,98	49,21
Nuporanga	1	55,5	69,3	9.690.070,94	911.696,43	8,98	48,37
São Joaquim da Barra	1	53,6	67,0	9.466.479,93	890.659,73	8,98	48,84
Morro Agudo	3	182,6	76,1	27.704.566,40	2.606.601,59	8,98	43,20
Guará	1	52,3	65,4	9.316.493,14	876.548,13	8,98	49,16
Jardinópolis	1	66,4	83,0	10.925.244,36	1.027.908,50	8,98	46,08
Batatais	2	94,7	59,2	16.270.521,36	1.530.822,25	8,98	47,73
Pontal	1	57,7	72,1	9.944.211,33	935.607,39	8,98	47,87
São José da Bela Vista	1	32,2	40,3	6.743.814,55	634.496,04	8,98	56,20
Ituverava	2	101,7	63,5	17.057.577,67	1.604.872,94	8,98	46,82
Ipuã	1	59,9	74,9	10.201.248,02	959.790,85	8,98	47,37
Brodowski	1	28,3	35,4	6.188.706,47	582.268,35	8,98	58,27
Sertãozinho	1	44,4	55,5	8.350.623,14	785.673,64	8,98	51,42
Viradouro	1	26,7	33,4	5.952.384,94	560.033,89	8,98	59,24
Ribeirão Preto	1	61,4	76,8	10.370.535,03	975.718,32	8,98	47,06
Pitangueiras	1	70,2	87,8	11.338.984,61	1.066.835,51	8,98	45,40
Franca	1	4,5	5,6	1.814.237,54	170.693,68	8,98	100,03
Jaborandi	1	0,6	0,7	453.559,38	42.673,42	8,98	191,08
Terra Roxa	1	27,3	34,1	6.037.930,02	568.082,45	8,98	58,89
Restinga	1	28,1	35,1	6.155.747,92	579.167,42	8,98	58,41
Buritizal	1	22,5	28,2	5.314.962,44	500.061,59	8,98	62,17
Miguelópolis	2	90,1	56,3	15.741.650,60	1.481.063,12	8,98	48,37
Jeriquara	1	7,6	9,5	2.580.583,21	242.795,80	8,98	85,32
Guaíra	2	138,7	86,7	20.984.282,95	1.974.319,48	8,98	43,10
Patrocínio Paulista	1	37,2	46,5	7.426.053,59	698.684,93	8,98	53,98
Cristais Paulista	1	7,6	9,5	2.575.431,55	242.311,10	8,98	85,40
Total	19	1440,0		255.174.538,79	24.008.257,26	8,98	48,95

Palha de Soja

Municípios	Número de trens	Produção anual de bio-carvão (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Sorriso	9	646,4	89,8	83.157.614,19	7.823.936,53	8,98	37,99
Vera	2	133,3	83,3	20.432.027,28	1.922.360,16	8,98	43,56
Lucas do Rio Verde	3	234,5	97,7	32.732.615,52	3.079.668,76	8,98	40,46
Sinop	2	145,1	90,7	21.619.069,23	2.034.043,75	8,98	42,59
Nova Ubiratã	5	332,3	83,1	46.528.253,77	4.377.640,07	8,98	40,56
Ipiranga do Norte	3	174,8	72,8	26.915.264,02	2.532.339,57	8,98	43,70
Nova Mutum	5	394,4	98,6	52.158.901,71	4.907.403,13	8,98	38,80
Tapurah	3	160,6	66,9	25.432.498,10	2.392.832,61	8,98	44,70
Santa Rita do Trivelato	3	165,0	68,7	25.893.239,92	2.436.181,79	8,98	44,38
Total	30	2386,4		334.869.483,74	31.506.406,37	8,98	40,63

Palha de Milho

Municípios	Número de trens	Produção anual de bio-carvão (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Sorriso	6	414,4	86,3	56.250.475,84	5.292.361,46	8,98	39,59
Vera	1	73,7	92,1	11.709.390,49	1.101.685,38	8,98	44,82
Lucas do Rio Verde	2	158,0	98,8	22.890.947,05	2.153.709,18	8,98	41,65
Sinop	2	80,2	50,1	14.567.687,18	1.370.610,03	8,98	49,93
Nova Ubiratã	3	194,7	81,1	28.916.982,10	2.720.672,48	8,98	42,48
Ipiranga do Norte	1	79,0	98,7	12.260.544,89	1.153.541,09	8,98	44,00
Nova Mutum	3	206,0	85,8	30.023.651,76	2.824.794,19	8,98	41,85
Tapurah	1	47,5	59,3	8.732.527,85	821.605,38	8,98	50,48
Santa Rita do Trivelato	2	80,3	50,2	14.570.685,42	1.370.892,12	8,98	49,93
Total	17	1333,8		199.922.892,58	18.809.871,32	8,98	42,79

Palha de Arroz

Municípios	Número de trens	Produção anual de bio-carvão (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Uruguaiana	4	290,7	72,7	34.815.038,54	3.275.594,84	8,98	35,99
Barra do Quaraí	1	78,1	78,1	10.485.244,18	986.510,81	8,98	39,28
Itaqui	4	250,5	62,6	31.528.646,45	2.966.392,57	8,98	37,36
Quaraí	1	38,1	38,1	6.497.371,22	611.309,26	8,98	47,47
Alegrete	3	193,0	64,3	24.775.721,79	2.331.039,40	8,98	37,93
Total	11	850,4		108.102.022,17	10.170.846,87	8,98	37,65

Palha de Trigo

Municípios	Número de trens	Produção anual de bio-carvão (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Apucarana	1	6,7	8,4	2.379.161,08	223.844,87	8,98	88,48
Califórnia	1	2,0	2,5	1.044.625,80	98.284,28	8,98	128,97
Arapongas	1	5,7	7,1	2.116.016,44	199.086,74	8,98	93,28
Cambira	1	1,2	1,5	745.059,33	70.099,38	8,98	151,06
Marilândia do Sul	1	6,0	7,6	2.210.580,27	207.983,84	8,98	91,46
Londrina	1	9,5	11,8	2.980.871,26	280.457,15	8,98	80,01
Rio Bom	1	2,0	2,5	1.061.998,78	99.918,82	8,98	127,98
Jandaia do Sul	1	0,8	1,0	555.325,49	52.248,15	8,98	173,55
Novo Itacolomi	1	0,9	1,1	612.034,71	57.583,67	8,98	165,74
Mandaguari	1	0,6	0,8	497.495,25	46.807,15	8,98	182,85
Mauá da Serra	1	1,5	1,9	884.436,00	83.212,72	8,98	139,38
Sabáudia	1	1,0	1,2	651.055,74	61.254,99	8,98	160,97
Rolândia	1	5,9	7,4	2.170.402,75	204.203,71	8,98	92,22
Marumbi	1	0,7	0,9	542.461,39	51.037,82	8,98	175,49
Marialva	1	2,4	3,0	1.186.729,94	111.654,23	8,98	121,55
Tamarana	1	3,4	4,2	1.505.288,94	141.626,06	8,98	108,93
Faxinal	1	2,5	3,1	1.223.822,53	115.144,11	8,98	119,83
Cambé	1	2,0	2,5	1.070.830,43	100.749,76	8,98	127,49
Sarandi	1	0,7	0,8	514.801,58	48.435,43	8,98	179,90
Kaloré	1	1,6	2,0	924.948,60	87.024,37	8,98	136,49
Astorga	1	1,1	1,4	706.139,25	66.437,56	8,98	154,92
São Pedro do Ivaí	1	0,7	0,8	509.704,48	47.955,87	8,98	180,75
Ibiporã	1	1,2	1,5	739.660,90	69.591,46	8,98	151,57

Borrazópolis	1	2,2	2,8	1.127.377,58	106.070,03	8,98	124,48
Cruzmaltina	1	0,2	0,3	264.347,95	24.871,34	8,98	247,50
São João do Ivaí	1	0,5	0,7	435.388,43	40.963,80	8,98	194,84
Ortigueira	1	2,4	2,9	1.178.343,11	110.865,15	8,98	121,95
Assaí	1	4,5	5,6	1.811.519,89	170.437,99	8,98	100,09
São Jerônimo da Serra	1	6,6	8,2	2.337.499,90	219.925,15	8,98	89,19
Total	1	76,4		33.987.927,80	3.197.775,60	8,98	109,30

Palha de Soja e Milho

Municípios	Número de trens	Produção anual de bio- carvão (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Sorriso	14	1060,9	94,7	128.265.460,72	12.067.936,69	8,98	36,25
Vera	3	207,0	86,2	30.118.951,12	2.833.760,49	8,98	41,80
Lucas do Rio Verde	5	392,5	98,1	51.989.400,93	4.891.455,54	8,98	38,85
Sinop	3	225,3	93,9	31.871.139,18	2.998.616,21	8,98	40,89
Nova Ubiratã	7	527,0	94,1	68.442.371,21	6.439.443,62	8,98	38,27
Ipiranga do Norte	4	253,8	79,3	36.902.013,82	3.471.949,22	8,98	41,77
Nova Mutum	8	600,4	93,8	77.020.649,25	7.246.536,31	8,98	37,91
Tapurah	3	208,1	86,7	30.224.326,70	2.843.674,82	8,98	41,74
Santa Rita do Trivelato	4	245,2	76,6	36.067.254,14	3.393.410,33	8,98	42,15
Total	47	3720,2		490.901.567,07	46.186.783,25	8,98	38,74

CASO G3A

Palha de Cana-de-açúcar

Municípios	Número de trens	Produção anual de pellets (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Orlândia	1	58,8	73,5	6.054.070,49	754.641,12	13,19	39,55
Sales Oliveira	1	84,8	106,0	7.727.238,44	963.201,84	13,19	36,52
Nuporanga	1	90,4	113,0	8.059.918,00	1.004.670,42	13,19	36,04
São Joaquim da Barra	1	87,3	109,1	7.873.941,53	981.488,41	13,19	36,30
Morro Agudo	2	297,4	185,9	20.963.657,90	2.613.124,22	13,19	31,25
Guará	1	85,2	106,5	7.749.186,90	965.937,72	13,19	36,49
Jardinópolis	1	108,2	135,2	9.087.299,18	1.132.733,69	13,19	34,71
Batatais	1	154,3	192,8	11.512.371,72	1.435.019,48	13,19	32,31
Pontal	1	94,0	117,4	8.271.304,55	1.031.019,80	13,19	35,74
São José da Bela Vista	1	52,5	65,6	5.609.307,98	699.201,38	13,19	40,57
Ituverava	2	165,6	103,5	14.187.994,93	1.768.536,46	13,19	35,14
Ipuã	1	97,6	122,0	8.485.100,16	1.057.669,46	13,19	35,46
Brodowski	1	46,1	57,7	5.147.585,29	641.647,55	13,19	41,78
Sertãozinho	1	72,3	90,4	6.945.804,44	865.795,94	13,19	37,80
Viradouro	1	43,5	54,4	4.951.019,95	617.145,64	13,19	42,34
Ribeirão Preto	1	100,1	125,1	8.625.908,16	1.075.221,21	13,19	35,27
Pitangueiras	1	114,4	143,0	9.431.436,24	1.175.630,45	13,19	34,31
Franca	1	7,3	9,2	1.509.029,80	188.100,87	13,19	65,98
Jaborandi	1	0,9	1,1	377.257,45	47.025,22	13,19	118,78
Terra Roxa	1	44,5	55,6	5.022.173,85	626.014,99	13,19	42,13
Restinga	1	45,8	57,2	5.120.171,33	638.230,40	13,19	41,85
Buritizal	1	36,7	45,9	4.420.830,53	551.057,43	13,19	44,04
Miguelópolis	1	146,8	183,5	11.138.163,88	1.388.374,39	13,19	32,62
Jeriquara	1	12,4	15,5	2.146.453,75	267.555,90	13,19	57,46
Guará	2	226,0	141,2	17.454.113,70	2.175.658,82	13,19	32,98
Patrocínio Paulista	1	60,6	75,8	6.176.774,49	769.936,20	13,19	39,29
Cristais Paulista	1	12,4	15,5	2.142.168,74	267.021,77	13,19	57,50
Total	30	2345,8		206.190.283,39	25.701.660,79	13,19	35,71

Palha de Soja

Municípios	Número de trens	Produção anual de pellets (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Sorriso	13	1053,0	101,2	75.364.915,72	9.394.252,08	13,19	31,53
Vera	3	217,1	90,5	18.681.127,61	2.328.606,36	13,19	35,23
Lucas do Rio Verde	5	382,0	95,5	30.672.493,60	3.823.332,57	13,19	33,76
Sinop	3	236,3	98,5	19.766.447,34	2.463.891,68	13,19	34,62
Nova Ubiratã	7	541,4	96,7	41.861.709,75	5.218.070,64	13,19	33,00
Ipiranga do Norte	4	284,8	89,0	23.941.683,39	2.984.335,71	13,19	34,72
Nova Mutum	8	642,5	100,4	48.412.788,82	6.034.663,98	13,19	32,49
Tapurah	4	261,6	81,7	22.622.732,46	2.819.928,21	13,19	35,34
Santa Rita do Trivelato	4	268,7	84,0	23.032.571,83	2.871.014,77	13,19	35,14
Total	51	3887,3		304.356.470,53	37.938.095,99	13,19	33,25

Palha de Milho

Municípios	Número de trens	Produção anual de pellets (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Sorriso	9	675,1	93,8	51.430.154,39	6.410.779,21	13,19	32,70
Vera	2	120,0	75,0	11.449.282,96	1.427.155,45	13,19	37,62
Lucas do Rio Verde	4	257,4	80,5	22.382.457,07	2.789.977,83	13,19	35,46
Sinop	2	130,7	81,7	12.116.976,74	1.510.383,62	13,19	36,94
Nova Ubiratã	4	317,2	99,1	25.722.252,97	3.206.284,07	13,19	33,97
Ipiranga do Norte	2	128,6	80,4	11.988.194,24	1.494.330,85	13,19	37,07
Nova Mutum	4	335,5	104,9	26.706.658,49	3.328.990,42	13,19	33,58
Tapurah	1	77,3	96,6	7.263.461,62	905.391,97	13,19	37,26
Santa Rita do Trivelato	2	130,7	81,7	12.119.470,58	1.510.694,47	13,19	36,94
Total	30	2172,7		181.178.909,06	22.583.987,89	13,19	34,55

Palha de Arroz

Municípios	Número de trens	Produção anual de pellets (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Uruguaiana	6	473,6	98,7	36.937.303,09	4.604.242,35	13,19	33,17
Barra do Quaraí	2	127,2	79,5	11.896.774,32	1.482.935,34	13,19	37,16
Itaqui	5	408,1	102,0	32.057.378,52	3.995.958,76	13,19	33,31
Quaraí	1	62,0	77,5	6.271.162,04	781.701,62	13,19	39,09
Alegrete	4	314,4	98,3	25.573.432,87	3.187.733,61	13,19	34,03
Total	18	1385,3		112.736.050,84	14.052.571,68	13,19	34,04

Palha de Trigo

Municípios	Número de trens	Produção anual de pellets (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Apucarana	1	11,0	13,7	1.978.916,70	246.672,37	13,19	59,29
Califórnia	1	3,2	4,0	868.889,23	108.307,22	13,19	82,76
Arapongas	1	9,2	11,5	1.760.040,67	219.389,43	13,19	62,08
Cambira	1	1,9	2,4	619.718,59	77.248,05	13,19	95,57
Marilândia do Sul	1	9,8	12,3	1.838.696,11	229.193,84	13,19	61,02
Londrina	1	15,4	19,3	2.479.401,65	309.057,92	13,19	54,38
Rio Bom	1	3,3	4,1	883.339,57	110.108,46	13,19	82,19
Jandaia do Sul	1	1,2	1,5	461.903,53	57.576,37	13,19	108,61
Novo Itacolomi	1	1,4	1,8	509.072,60	63.456,00	13,19	104,08
Mandaguari	1	1,1	1,3	413.802,02	51.580,51	13,19	114,01
Mauá da Serra	1	2,5	3,1	735.648,03	91.698,68	13,19	88,80
Sabáudia	1	1,6	2,0	541.529,15	67.501,72	13,19	101,32
Rolândia	1	9,6	12,0	1.805.277,62	225.028,22	13,19	61,46
Marumbi	1	1,2	1,5	451.203,54	56.242,61	13,19	109,74
Marialva	1	3,9	4,8	987.087,30	123.040,63	13,19	78,47
Tamarana	1	5,5	6,9	1.252.055,38	156.068,96	13,19	71,15
Faxinal	1	4,1	5,1	1.017.939,84	126.886,41	13,19	77,47
Cambé	1	3,3	4,1	890.685,48	111.024,13	13,19	81,91
Sarandi	1	1,1	1,4	428.196,92	53.374,83	13,19	112,30
Kaloré	1	2,7	3,3	769.345,23	95.899,04	13,19	87,13
Astorga	1	1,8	2,2	587.346,00	73.212,80	13,19	97,81
São Pedro do Ivaí	1	1,1	1,4	423.957,30	52.846,36	13,19	112,79
Ibiporã	1	1,9	2,4	615.228,33	76.688,34	13,19	95,87

Borrazópolis	1	3,6	4,5	937.719,75	116.886,96	13,19	80,16
Cruzmaltina	1	0,4	0,5	219.876,90	27.407,70	13,19	151,49
São João do Ivaí	1	0,9	1,1	362.143,38	45.141,25	13,19	120,96
Ortigueira	1	3,8	4,8	980.111,38	122.171,08	13,19	78,70
Assaí	1	7,3	9,1	1.506.769,34	187.819,10	13,19	66,02
São Jerônimo da Serra	1	10,7	13,4	1.944.264,15	242.352,92	13,19	59,70
Total	29	124,5		28.270.165,70	3.523.881,91	13,19	71,36

Palha de Soja e Milho

Municípios	Número de trens	Produção anual de pellets (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Sorriso	14	1728,1	154,3	106.687.464,13	13.298.614,12	13,19	29,01
Vera	3	337,1	140,5	25.052.063,89	3.122.744,86	13,19	32,23
Lucas do Rio Verde	5	639,4	159,9	43.243.265,30	5.390.281,82	13,19	30,52
Sinop	3	367,0	152,9	26.509.482,74	3.304.412,42	13,19	31,69
Nova Ubiratã	7	858,5	153,3	56.928.365,46	7.096.132,34	13,19	30,18
Ipiranga do Norte	4	413,4	129,2	30.694.017,34	3.826.015,51	13,19	32,21
Nova Mutum	8	978,1	152,8	64.063.526,59	7.985.531,63	13,19	29,97
Tapurah	3	338,9	141,2	25.139.712,22	3.133.670,24	13,19	32,19
Santa Rita do Trivelato	4	399,5	124,8	29.999.688,62	3.739.467,29	13,19	32,43
Total	51	6060,0		408.317.586,30	50.896.870,23	13,19	30,45

CASO G3A

Palha de Cana-de-açúcar

Municípios	Número de trens	Produção anual de pellets (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Orlândia	1	50,0	62,5	5.432.421,06	677.152,39	13,19	41,02
Sales Oliveira	1	72,1	90,1	6.933.783,29	864.297,50	13,19	37,82
Nuporanga	1	76,8	96,0	7.232.302,35	901.507,96	13,19	37,31
São Joaquim da Barra	1	74,2	92,7	7.065.422,48	880.706,35	13,19	37,59
Morro Agudo	1	252,8	316,0	16.001.941,64	1.994.645,28	13,19	29,40
Guará	1	72,4	90,5	6.953.478,02	866.752,45	13,19	37,79
Jardinópolis	1	92,0	115,0	8.154.189,07	1.016.421,33	13,19	35,90
Batatais	1	131,1	163,9	10.330.248,16	1.287.667,53	13,19	33,37
Pontal	1	79,9	99,8	7.421.983,12	925.151,71	13,19	37,00
São José da Bela Vista	1	44,6	55,7	5.033.328,04	627.405,37	13,19	42,10
Ituverava	1	140,8	176,0	10.829.954,77	1.349.956,07	13,19	32,90
Ipuã	1	83,0	103,7	7.613.825,58	949.064,91	13,19	36,70
Brodowski	1	39,2	49,0	4.619.016,38	575.761,33	13,19	43,37
Sertãozinho	1	61,5	76,8	6.232.589,19	776.893,51	13,19	39,17
Viradouro	1	37,0	46,2	4.442.634,93	553.775,35	13,19	43,96
Ribeirão Preto	1	85,0	106,3	7.740.175,01	964.814,39	13,19	36,50
Pitangueiras	1	97,2	121,5	8.462.989,14	1.054.913,32	13,19	35,49
Franca	1	6,2	7,8	1.354.078,26	168.786,13	13,19	68,92
Jaborandi	1	0,8	1,0	338.519,57	42.196,53	13,19	124,65
Terra Roxa	1	37,8	47,2	4.506.482,54	561.733,97	13,19	43,74
Restinga	1	38,9	48,6	4.594.417,36	572.695,06	13,19	43,45
Buritizal	1	31,2	39,0	3.966.886,89	494.473,26	13,19	45,75
Miguelópolis	1	124,8	156,0	9.994.465,06	1.245.812,10	13,19	33,71
Jeriquara	1	10,6	13,2	1.926.049,68	240.082,48	13,19	59,92
Guaíra	1	192,1	240,1	13.323.042,67	1.660.719,98	13,19	30,96
Patrocínio Paulista	1	51,5	64,4	5.542.525,46	690.876,93	13,19	40,74
Cristais Paulista	1	10,5	13,2	1.922.204,67	239.603,20	13,19	59,97
Total	27	1993,9		177.968.954,37	22.183.866,38	13,19	36,05

Palha de Soja

Municípios	Número de trens	Produção anual de pellets (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Sorriso	3	895,0	372,9	48.031.189,88	5.987.097,59	13,19	26,94
Vera	1	184,5	230,7	12.972.412,35	1.617.013,84	13,19	31,20
Lucas do Rio Verde	2	324,7	202,9	22.225.030,54	2.770.354,58	13,19	30,73
Sinop	1	200,8	251,1	13.726.072,15	1.710.957,69	13,19	30,70
Nova Ubiratã	2	460,2	287,6	28.042.304,59	3.495.478,97	13,19	28,80
Ipiranga do Norte	1	242,1	302,6	15.546.046,74	1.937.817,89	13,19	29,64
Nova Mutum	2	546,2	341,3	31.435.862,95	3.918.486,71	13,19	27,94
Tapurah	1	222,4	277,9	14.689.612,70	1.831.063,21	13,19	30,11
Santa Rita do Trivelato	1	228,4	285,5	14.955.733,58	1.864.235,23	13,19	29,96
Total	14	3304,2		201.624.265,47	25.132.505,72	13,19	28,82

Palha de Milho

Municípios	Número de trens	Produção anual de pellets (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Sorriso	2	573,9	358,7	32.489.836,46	4.049.864,73	13,19	27,69
Vera	1	102,0	127,5	8.739.446,07	1.089.373,73	13,19	35,13
Lucas do Rio Verde	1	218,8	273,5	14.533.594,74	1.811.615,54	13,19	30,20
Sinop	1	111,1	138,9	9.249.108,89	1.152.903,30	13,19	34,52
Nova Ubiratã	1	269,6	337,0	16.702.223,50	2.081.935,56	13,19	29,06
Ipiranga do Norte	1	109,3	136,7	9.150.806,86	1.140.649,94	13,19	34,63
Nova Mutum	1	285,2	356,5	17.341.427,27	2.161.612,44	13,19	28,77
Tapurah	1	65,7	82,1	6.517.628,41	812.423,71	13,19	38,60
Santa Rita do Trivelato	1	111,1	138,9	9.251.012,48	1.153.140,59	13,19	34,51
Total	10	1846,8		123.975.084,69	15.453.519,54	13,19	30,39

Palha de Arroz

Municípios	Número de trens	Produção anual de pellets (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Uruguaiana	2	402,5	251,6	25.649.732,53	3.197.244,38	13,19	29,51
Barra do Quaraí	1	108,1	135,1	9.081.024,38	1.131.951,54	13,19	34,71
Itaqui	2	346,9	216,8	23.228.506,48	2.895.438,06	13,19	30,34
Quaraí	1	52,7	65,9	5.627.221,02	701.434,24	13,19	40,53
Alegrete	1	267,3	334,1	16.605.590,19	2.069.890,20	13,19	29,11
Total	7	1177,5		80.192.074,59	9.995.958,42	13,19	30,64

Palha de Trigo

Municípios	Número de trens	Produção anual de pellets (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Apucarana	1	9,3	11,7	1.775.715,82	221.343,34	13,19	61,86
Califórnia	1	2,7	3,4	779.669,18	97.185,92	13,19	86,64
Arapongas	1	7,8	9,8	1.579.314,62	196.861,89	13,19	64,80
Cambira	1	1,6	2,0	556.084,10	69.316,00	13,19	100,16
Marilândia do Sul	1	8,4	10,5	1.649.893,48	205.659,56	13,19	63,68
Londrina	1	13,1	16,4	2.224.809,53	277.322,96	13,19	56,67
Rio Bom	1	2,8	3,5	792.635,71	98.802,20	13,19	86,03
Jandaia do Sul	1	1,1	1,3	414.473,94	51.664,26	13,19	113,92
Novo Itacolomi	1	1,2	1,5	456.799,56	56.940,16	13,19	109,14
Mandaguari	1	0,9	1,1	371.311,63	46.284,07	13,19	119,62
Mauá da Serra	1	2,1	2,6	660.109,57	82.282,79	13,19	93,01
Sabáudia	1	1,3	1,7	485.923,38	60.570,45	13,19	106,22
Rolândia	1	8,1	10,2	1.619.906,50	201.921,68	13,19	64,15
Marumbi	1	1,0	1,3	404.872,66	50.467,46	13,19	115,11
Marialva	1	3,3	4,1	885.730,33	110.406,47	13,19	82,10
Tamarana	1	4,7	5,9	1.123.490,72	140.043,35	13,19	74,38
Faxinal	1	3,4	4,3	913.414,84	113.857,35	13,19	81,05
Cambé	1	2,8	3,5	799.227,32	99.623,85	13,19	85,73
Sarandi	1	0,9	1,2	384.228,42	47.894,15	13,19	117,81
Kaloré	1	2,3	2,8	690.346,64	86.051,85	13,19	91,24
Astorga	1	1,5	1,9	527.035,62	65.695,10	13,19	102,52
São Pedro do Ivaí	1	0,9	1,2	380.424,14	47.419,95	13,19	118,34
Ibiporã	1	1,6	2,0	552.054,91	68.813,76	13,19	100,47

Borrazópolis	1	3,0	3,8	841.431,98	104.884,67	13,19	83,89
Cruzmaltina	1	0,3	0,4	197.299,31	24.593,40	13,19	159,19
São João do Ivaí	1	0,7	0,9	324.957,46	40.506,01	13,19	126,96
Ortigueira	1	3,3	4,1	879.470,72	109.626,20	13,19	82,34
Assaí	1	6,2	7,8	1.352.049,91	168.533,30	13,19	68,97
São Jerônimo da Serra	1	9,1	11,4	1.744.621,49	217.467,42	13,19	62,29
Total	29	105,8		25.367.303,48	3.162.039,54	13,19	74,60

Palha de Soja e Milho

Municípios	Número de trens	Produção anual de pellets (kt/ano)	Escala de produção por trem (kt/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/t)
Sorriso	5	1468,9	367,2	75.287.429,40	9.384.593,40	13,19	26,32
Vera	1	286,6	358,2	17.396.471,44	2.168.473,70	13,19	28,74
Lucas do Rio Verde	2	543,5	339,7	31.333.705,84	3.905.752,81	13,19	27,96
Sinop	1	311,9	389,9	18.408.521,60	2.294.625,96	13,19	28,31
Nova Ubiratã	3	729,7	304,1	41.919.241,42	5.225.241,97	13,19	27,91
Ipiranga do Norte	2	351,4	219,6	23.429.302,10	2.920.467,27	13,19	30,27
Nova Mutum	3	831,4	346,4	45.726.092,28	5.699.766,71	13,19	27,28
Tapurah	1	288,1	360,1	17.457.335,55	2.176.060,43	13,19	28,71
Santa Rita do Trivelato	2	339,6	212,2	22.899.308,35	2.854.403,45	13,19	30,47
Total	20	5151,0		293.857.407,99	36.629.385,71	13,19	27,80

Custos de transporte

Palha de Cana-de-açúcar				
Municípios	G2A (US\$/ano)	G2B (US\$/ano)	G3A (US\$/ano)	G3B (US\$/ano)
Orlândia	110.833,90	94.208,81	166.250,84	141.313,22
Sales Oliveira	153.887,13	130.804,06	230.830,70	196.206,09
Nuporanga	175.698,59	149.343,80	263.547,88	224.015,70
São Joaquim da Barra	171.687,69	145.934,54	257.531,54	218.901,81
Morro Agudo	605.990,97	515.092,32	908.986,45	772.638,48
Guará	194.446,52	165.279,54	291.669,77	247.919,31
Jardinópolis	250.392,10	212.833,29	375.588,15	319.249,93
Batatais	363.190,87	308.712,24	544.786,30	463.068,35
Pontal	224.285,43	190.642,62	336.428,15	285.963,93
São José da Bela Vista	129.647,06	110.200,00	194.470,59	165.300,00
Ituverava	418.503,05	355.727,59	627.754,57	533.591,39
Ipuã	256.751,22	218.238,54	385.126,83	327.357,81
Brodowski	126.348,65	107.396,36	189.522,98	161.094,53
Sertãozinho	200.834,74	170.709,52	301.252,10	256.064,29
Viradouro	122.132,37	103.812,51	183.198,55	155.718,77
Ribeirão Preto	281.423,98	239.210,38	422.135,97	358.815,58
Pitangueiras	326.838,81	277.812,99	490.258,22	416.719,49
Franca	21.425,98	18.212,08	32.138,97	27.318,12
Jaborandi	2.689,83	2.286,36	4.034,75	3.429,53
Terra Roxa	130.821,70	111.198,44	196.232,54	166.797,66
Restinga	136.803,64	116.283,10	205.205,46	174.424,64
Buritizal	110.040,99	93.534,84	165.061,48	140.302,26
Miguelópolis	454.903,77	386.668,20	682.355,65	580.002,30
Jeriquara	38.870,31	33.039,76	58.305,46	49.559,64
Guaíra	721.218,97	613.036,12	1.081.828,45	919.554,18
Patrocínio Paulista	198.282,54	168.540,16	297.423,81	252.810,24
Cristais Paulista	40.739,60	34.628,66	61.109,41	51.942,99
Total	5.968.690,39	5.073.386,83	8.953.035,58	7.610.080,24

Palha de Soja

Municípios	G2A (US\$/ano)	G2B (US\$/ano)	G3A (US\$/ano)	G3B (US\$/ano)
Sorriso	3.564.268,08	3.029.627,87	5.346.402,13	4.544.441,81
Vera	927.911,18	788.724,51	1.391.866,78	1.183.086,76
Lucas do Rio Verde	1.669.930,14	1.419.440,62	2.504.895,20	2.129.160,92
Sinop	1.146.697,23	974.692,64	1.720.045,84	1.462.038,97
Nova Ubiratã	2.651.155,53	2.253.482,20	3.976.733,29	3.380.223,30
Ipiranga do Norte	1.474.672,64	1.253.471,74	2.212.008,95	1.880.207,61
Nova Mutum	3.749.758,91	3.187.295,07	5.624.638,36	4.780.942,60
Tapurah	1.823.503,92	1.549.978,34	2.735.255,89	2.324.967,50
Santa Rita do Trivelato	1.939.825,29	1.648.851,50	2.909.737,94	2.473.277,25
Total	18.947.722,92	16.105.564,48	28.421.584,38	24.158.346,72

Palha de Milho

Municípios	G2A (US\$/ano)	G2B (US\$/ano)	G3A (US\$/ano)	G3B (US\$/ano)
Sorriso	4.848.153,97	4.120.930,87	7.272.230,95	6.181.396,31
Vera	933.559,44	793.525,52	1.400.339,16	1.190.288,29
Lucas do Rio Verde	2.018.906,75	1.716.070,74	3.028.360,13	2.574.106,11
Sinop	1.067.066,03	907.006,13	1.600.599,04	1.360.509,19
Nova Ubiratã	2.598.830,85	2.209.006,22	3.898.246,27	3.313.509,33
Ipiranga do Norte	1.078.079,82	916.367,84	1.617.119,72	1.374.551,77
Nova Mutum	2.960.361,77	2.516.307,51	4.440.542,66	3.774.461,26
Tapurah	740.862,62	629.733,23	1.111.293,93	944.599,84
Santa Rita do Trivelato	1.274.497,32	1.083.322,72	1.911.745,97	1.624.984,08
Total	17.520.318,57	14.892.270,78	26.280.477,85	22.338.406,17

Palha de Arroz

Municípios	G2A (US\$/ano)	G2B (US\$/ano)	G3A (US\$/ano)	G3B (US\$/ano)
Uruguaiana	1.099.545,13	934.613,36	1.649.317,70	1.401.920,05
Barra do Quaraí	399.473,70	339.552,64	599.210,54	509.328,96
Itaqui	1.467.235,72	1.247.150,36	2.200.853,58	1.870.725,55
Quaraí	232.793,92	197.874,84	349.190,89	296.812,25
Alegrete	1.214.154,85	1.032.031,63	1.821.232,28	1.548.047,44
Total	4.413.203,33	3.751.222,83	6.619.805,00	5.626.834,25

Palha de Trigo

Municípios	G2A (US\$/ano)	G2B (US\$/ano)	G3A (US\$/ano)	G3B (US\$/ano)
Apucarana	28.262,67	24.023,27	42.394,00	36.034,90
Califórnia	7.966,69	6.771,68	11.950,03	10.157,53
Arapongas	24.888,69	21.155,39	37.333,04	31.733,08
Cambira	5.225,61	4.441,77	7.838,42	6.662,66
Marilândia do Sul	26.745,69	22.733,84	40.118,54	34.100,76
Londrina	44.199,94	37.569,94	66.299,90	56.354,92
Rio Bom	9.434,65	8.019,45	14.151,98	12.029,18
Jandaia do Sul	3.622,72	3.079,32	5.434,09	4.618,97
Novo Itacolomi	4.353,32	3.700,32	6.529,98	5.550,48
Mandaguari	3.201,89	2.721,61	4.802,84	4.082,41
Mauá da Serra	7.633,87	6.488,79	11.450,81	9.733,19
Sabáudia	4.912,12	4.175,30	7.368,18	6.262,95
Rolândia	30.297,40	25.752,79	45.446,10	38.629,19
Marumbi	3.806,08	3.235,17	5.709,12	4.852,76
Marialva	12.430,00	10.565,50	18.645,01	15.848,26
Tamarana	18.130,80	15.411,18	27.196,19	23.116,76
Faxinal	13.363,80	11.359,23	20.045,69	17.038,84
Cambé	10.941,88	9.300,60	16.412,82	13.950,89
Sarandi	3.652,68	3.104,78	5.479,02	4.657,16
Kaloré	8.992,46	7.643,59	13.488,68	11.465,38
Astorga	6.107,98	5.191,79	9.161,98	7.787,68
São Pedro do Ivaí	3.868,68	3.288,38	5.803,02	4.932,56
Ibiporã	6.820,43	5.797,36	10.230,64	8.696,04
Borrazópolis	12.892,24	10.958,40	19.338,36	16.437,60
Cruzmaltina	1.477,21	1.255,63	2.215,82	1.883,45

São João do Ivaí	3.223,63	2.740,09	4.835,45	4.110,13
Ortigueira	14.463,44	12.293,92	21.695,16	18.440,88
Assaí	27.954,90	23.761,67	41.932,35	35.642,50
São Jerônimo da Serra	46.911,13	39.874,46	70.366,70	59.811,69
Total	395.782,60	336.415,21	593.673,90	504.622,81

Palha de Soja e Milho

Municípios	G2A (US\$/ano)	G2B (US\$/ano)	G3A (US\$/ano)	G3B (US\$/ano)
Sorriso	8.412.422,05	7.150.558,75	12.618.633,08	10.725.838,12
Vera	1.861.470,62	1.582.250,03	2.792.205,94	2.373.375,05
Lucas do Rio Verde	3.688.836,89	3.135.511,36	5.533.255,33	4.703.267,03
Sinop	2.213.763,26	1.881.698,77	3.320.644,89	2.822.548,15
Nova Ubiratã	5.249.986,38	4.462.488,42	7.874.979,56	6.693.732,63
Ipiranga do Norte	2.552.752,45	2.169.839,58	3.829.128,68	3.254.759,38
Nova Mutum	6.710.120,68	5.703.602,58	10.065.181,02	8.555.403,86
Tapurah	2.564.366,55	2.179.711,56	3.846.549,82	3.269.567,35
Santa Rita do Trivelato	3.214.322,61	2.732.174,22	4.821.483,91	4.098.261,32
Total	36.468.041,48	30.997.835,26	54.702.062,22	46.496.752,89

Custos de gasificação (Caso G1)

Palha de Cana-de-açúcar							
Municípios	Número de trens	Escala de produção por trem (kt/ano)	Produção anual de gás de síntese (MWh/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/MWh)
Orlândia	1	52,2	166.683,46	27.374.690,22	1.345.196,44	5,64	27,26
Sales Oliveira	1	75,3	240.357,55	34.940.253,65	1.716.969,37	5,64	24,33
Nuporanga	1	80,2	256.045,55	36.444.530,78	1.790.889,78	5,64	23,86
São Joaquim da Barra	1	77,5	247.234,79	35.603.600,99	1.749.566,36	5,64	24,12
Morro Agudo	1	264,0	842.677,51	80.635.906,27	3.962.460,68	5,64	16,62
Guará	1	75,6	241.382,35	35.039.497,99	1.721.846,25	5,64	24,30
Jardinópolis	1	96,0	306.530,39	41.090.040,21	2.019.170,82	5,64	22,57
Batatais	1	137,0	437.087,62	52.055.490,57	2.558.014,71	5,64	20,25
Pontal	1	83,4	266.184,23	37.400.357,35	1.837.859,24	5,64	23,58
São José da Bela Vista	1	46,6	148.656,96	25.363.607,60	1.246.371,53	5,64	28,25
Ituverava	1	147,0	469.183,08	54.573.578,46	2.681.753,94	5,64	19,82
Ipuã	1	86,7	276.571,08	38.367.076,95	1.885.363,99	5,64	23,30
Brodowski	1	40,9	130.685,27	23.275.836,14	1.143.778,12	5,64	29,41
Sertãozinho	1	64,2	204.835,46	31.406.843,58	1.543.337,06	5,64	25,57
Viradouro	1	38,6	123.271,68	22.387.026,63	1.100.101,89	5,64	29,96
Ribeirão Preto	1	88,8	283.484,00	39.003.768,46	1.916.651,11	5,64	23,12
Pitangueiras	1	101,6	324.106,73	42.646.124,72	2.095.637,05	5,64	22,19
Franca	1	6,5	20.742,83	6.823.379,96	335.301,93	5,64	52,83
Jaborandi	1	0,8	2.592,85	1.705.844,99	83.825,48	5,64	103,89
Terra Roxa	1	39,5	125.938,62	22.708.763,22	1.115.912,07	5,64	29,76
Restinga	1	40,6	129.642,69	23.151.878,45	1.137.686,82	5,64	29,49
Buritizal	1	32,6	104.010,48	19.989.669,16	982.295,38	5,64	31,60
Miguelópolis	1	130,3	415.950,56	50.363.435,00	2.474.866,85	5,64	20,56
Jeriquara	1	11,0	35.188,73	9.705.619,79	476.935,63	5,64	44,58
Guaíra	1	200,6	640.187,97	67.136.579,06	3.299.101,69	5,64	18,04
Patrocínio Paulista	1	53,8	171.776,57	27.929.520,89	1.372.460,90	5,64	27,00
Cristais Paulista	1	11,0	35.083,41	9.686.244,29	475.983,52	5,64	44,62
Total	27	2082,5	6.646.092,43	896.809.165,38	44.069.338,62	5,64	22,71

Palha de Soja

Municípios	Número de trens	Escala de produção por trem (kt/ano)	Produção anual de gás de síntese (MWh/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/MWh)
Sorriso	2	427,6	3.218.809,08	207.509.622,09	10.197.054,35	5,64	11,50
Vera	1	176,3	663.641,84	61.606.083,38	3.027.332,30	5,64	15,91
Lucas do Rio Verde	1	310,2	1.167.631,20	89.785.227,70	4.412.059,73	5,64	13,43
Sinop	1	191,9	722.307,38	65.185.219,43	3.203.211,58	5,64	15,51
Nova Ubiratã	1	439,7	1.654.865,47	113.285.995,22	5.566.891,01	5,64	12,12
Ipiranga do Norte	1	231,3	870.627,92	73.828.292,37	3.627.933,50	5,64	14,66
Nova Mutum	1	521,9	1.964.175,19	126.995.376,17	6.240.572,08	5,64	11,53
Tapurah	1	212,5	799.683,54	69.761.080,69	3.428.070,10	5,64	15,04
Santa Rita do Trivelato	1	218,3	821.512,58	71.024.890,76	3.490.173,92	5,64	14,92
Total	10	3.157	11.883.254,21	878.981.787,81	43.193.298,58	5,64	13,21

Palha de Milho

Municípios	Número de trens	Escala de produção por trem (kt/ano)	Produção anual de gás de síntese (MWh/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/MWh)
Sorriso	1	601,6	1.917.908,17	139.617.229,63	6.860.811,87	5,64	13,07
Vera	1	107,0	341.030,23	44.148.477,40	2.169.462,89	5,64	21,86
Lucas do Rio Verde	1	229,4	731.352,23	73.418.392,14	3.607.790,94	5,64	17,35
Sinop	1	116,5	371.293,08	46.723.107,06	2.295.980,58	5,64	21,30
Nova Ubiratã	1	282,6	901.007,60	84.373.509,54	4.146.127,08	5,64	16,30
Ipiranga do Norte	1	114,6	365.389,53	46.226.521,28	2.271.578,28	5,64	21,41
Nova Mutum	1	299,0	953.222,49	87.602.532,63	4.304.801,76	5,64	16,03
Tapurah	1	68,9	219.634,93	32.924.669,18	1.617.923,24	5,64	25,04
Santa Rita do Trivelato	1	116,5	371.407,71	46.732.723,34	2.296.453,12	5,64	21,30
Total	9	1936,0	6.172.245,99	601.767.162,19	29.570.929,76	5,64	16,90

Palha de Arroz

Municípios	Número de trens	Escala de produção por trem (kt/ano)	Produção anual de gás de síntese (MWh/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/MWh)
Uruguaiana	1	408,7	1.240.850,93	107.890.236,55	5.301.742,61	5,64	15,35
Barra do Quaraí	1	109,7	333.164,03	44.902.909,10	2.206.535,77	5,64	22,78
Itaqui	1	352,2	1.069.368,24	97.705.855,45	4.801.280,58	5,64	16,04
Quaraí	1	53,5	162.516,26	27.824.899,84	1.367.319,80	5,64	28,43
Alegrete	1	271,3	823.829,47	82.109.603,03	4.034.878,37	5,64	17,33
Total	14	1.195	3.629.728,93	360.433.503,96	17.711.757,14	5,64	17,27

Palha de Trigo

Municípios	Número de trens	Escala de produção por trem (kt/ano)	Produção anual de gás de síntese (MWh/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/MWh)
Apucarana	1	9,2	32.689,44	8.612.360,74	423.212,72	5,64	42,48
Califórnia	1	2,7	9.510,71	3.781.456,56	185.821,35	5,64	63,31
Arapongas	1	7,7	27.418,91	7.659.799,54	376.403,71	5,64	44,95
Cambira	1	1,6	5.728,73	2.697.051,42	132.533,52	5,64	74,67
Marilândia do Sul	1	8,3	29.277,31	8.002.112,57	393.225,03	5,64	44,01
Londrina	1	12,9	45.844,42	10.790.500,43	530.246,83	5,64	38,12
Rio Bom	1	2,7	9.748,95	3.844.345,25	188.911,71	5,64	62,80
Jandaia do Sul	1	1,0	3.686,32	2.010.231,06	98.783,06	5,64	86,23
Novo Itacolomi	1	1,2	4.265,16	2.215.513,61	108.870,68	5,64	82,22
Mandaguari	1	0,9	3.125,76	1.800.890,49	88.496,03	5,64	91,02
Mauá da Serra	1	2,1	7.409,20	3.201.583,10	157.326,28	5,64	68,66
Sabáudia	1	1,3	4.679,49	2.356.766,42	115.811,86	5,64	79,76
Rolândia	1	8,0	28.482,77	7.856.673,37	386.078,12	5,64	44,41
Marumbi	1	1,0	3.558,97	1.963.664,09	96.494,75	5,64	87,23
Marialva	1	3,2	11.515,94	4.295.861,43	211.099,28	5,64	59,49
Tamarana	1	4,6	16.451,35	5.449.017,94	267.765,57	5,64	53,00
Faxinal	1	3,4	12.060,06	4.430.133,48	217.697,43	5,64	58,61
Cambé	1	2,8	9.870,81	3.876.315,09	190.482,71	5,64	62,55
Sarandi	1	0,9	3.290,27	1.863.537,92	91.574,54	5,64	89,50
Kaloré	1	2,2	7.924,07	3.348.235,26	164.532,79	5,64	67,18
Astorga	1	1,5	5.285,76	2.556.164,02	125.610,29	5,64	76,65
São Pedro do Ivaí	1	0,9	3.241,52	1.845.086,86	90.667,85	5,64	89,94
Ibiporã	1	1,6	5.666,58	2.677.509,54	131.573,23	5,64	74,93

Borrazópolis	1	3,0	10.662,91	4.081.010,96	200.541,50	5,64	61,00
Cruzmaltina	1	0,3	1.210,70	956.917,08	47.023,05	5,64	124,27
São João do Ivaí	1	0,7	2.559,10	1.576.069,10	77.448,28	5,64	97,18
Ortigueira	1	3,2	11.394,08	4.265.501,83	209.607,41	5,64	59,70
Assaí	1	6,1	21.718,83	6.557.547,94	322.238,90	5,64	48,46
São Jerônimo da Serra	1	9,0	31.834,58	8.461.550,82	415.801,89	5,64	42,85
Total	29	104	370.112,68	123.033.407,93	6.045.880,36	5,64	53,19

Palha de Soja e Milho

Municípios	Número de trens	Escala de produção por trem (kt/ano)	Produção anual de gás de síntese (MWh/ano)	CI (US\$)	CF (US\$/ano)	CV (US\$/t)	LC (US\$/MWh)
Sorriso	2	701,8	5.282.589,22	288.717.198,24	14.187.606,98	5,64	9,98
Vera	1	273,8	1.030.610,09	82.615.973,12	4.059.761,47	5,64	13,94
Lucas do Rio Verde	1	519,3	1.954.608,50	126.582.679,32	6.220.292,09	5,64	11,55
Sinop	1	298,1	1.121.840,22	87.422.206,94	4.295.940,53	5,64	13,59
Nova Ubiratã	1	697,3	2.624.401,77	154.059.320,00	7.570.498,39	5,64	10,61
Ipiranga do Norte	1	335,8	1.263.808,20	94.650.273,74	4.651.128,83	5,64	13,12
Nova Mutum	2	397,2	2.989.897,72	197.550.886,27	9.707.680,56	5,64	11,75
Tapurah	1	275,3	1.036.023,43	82.905.017,25	4.073.965,14	5,64	13,92
Santa Rita do Trivelato	1	324,5	1.221.168,77	92.509.191,90	4.545.915,74	5,64	13,26
Total	11	4.922	18.524.947,94	1.207.012.746,78	59.312.789,73	5,64	11,90