

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Sistema produtivo do café Brasileiro destinado à  
exportação: uma avaliação ambiental e econômica  
do aproveitamento energético do resíduo de  
beneficiamento**

**Lílian Carla Ferreira Freitas**

**Itajubá, Novembro de 2021**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Lílian Carla Ferreira Freitas**

**Sistema produtivo do café Brasileiro destinado à  
exportação: uma avaliação ambiental e econômica  
do aproveitamento energético do resíduo de  
beneficiamento**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Energia como parte  
dos requisitos para obtenção do Título de Mestre  
em Ciências em Engenharia de Energia.**

**Área de concentração: Energia, Sociedade e Meio  
Ambiente**

**Orientador: Prof. Dra Maria Luiza Grillo Renó  
Co-Orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva  
Lora**

**Itajubá, Novembro de 2021**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Lílian Carla Ferreira Freitas**

**Sistema produtivo do café Brasileiro destinado à  
exportação: uma avaliação ambiental e econômica  
do aproveitamento energético do resíduo de  
beneficiamento**

**Banca Examinadora:  
Prof. Dra. Maria Luiza Grillo Renó  
Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora  
Prof. Dra. Regina Barros  
Prof. Dra. Ana Filipa Ferreira**

**Itajubá, Novembro de 2021**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, meu Senhor, Criador e Sustentador do Universo. Para Ele são todas as coisas e sem Ele, nada somos e nada podemos fazer.

Aos meus orientadores, Maria Luiza Grillo Renó e Electo Eduardo Silva Lora por dividirem seu grande conhecimento, pela orientação, auxílio, pela paciência e confiança; agradeço em especial à Maria Luiza pela amizade e cuidado.

Aos membros da banca pelo auxílio e disponibilidade.

Ao Ronaldo pela compreensão e apoio constantes.

Aos meus pais, Carlos e Alzemira, e em especial à minha mãe pelo apoio incondicional. Aos meus irmãos Samuel, Flávio e Ana Paula. Agradeço especialmente ao Flávio e Ana pelo incentivo e auxílio em todas as etapas desta caminhada.

Aos meus sobrinhos Sara e Antônio, pelas alegrias.

À Nágila, pela amizade/companheirismo em todo o mestrado. Agradeço em especial a amiga Lidiane, Natália e Jorge pela amizade. Aos amigos do Nest: Fernando, York, André, Éric, Aleksandro, Regis, Taís e Filipe. Aos amigos da Unifei: Nelson Calderón e Ivan Santos. A todos, obrigada pela amizade e pelo auxílio no decorrer de todo trabalho.

Às meninas da república pela atenção, paciência e pelo convívio.

Agradeço aos alunos que já passaram pelo Nest e que são fonte de aprendizado e substancial conteúdo através de suas teses/dissertações.

Aos produtores de café arábica do município de Santa Rosa da Serra, Carlos José de Freitas, Guilherme Cunha, Watson Ferreira, e aos Agrônomos Edson, Eduardo e Gabriel pela fundamental colaboração.

À Cassia pela disponibilidade e atenção sempre.

À UNIFEI em especial ao Nest, pela estrutura e oportunidade de crescimento.

À fundação CNPQ pela bolsa de mestrado.

*“Nele estão escondidos todos os tesouros da sabedoria e do conhecimento”*

*Apóstolo Paulo, Epístola aos Colossenses. Capítulo 2, verso 3.*

## RESUMO

Considerando as mudanças climáticas do cenário atual mundial, devido ao aumento da temperatura global, somado à necessidade de um equilíbrio social no uso da energia elétrica, reduzindo o número de cidadãos sem acesso a eletricidade, tem-se como uma das soluções, o significativo e crescente uso de fontes renováveis. Como o Brasil é um país de cultura agrícola, as alternativas que façam uso dos resíduos agroindustriais são importantes. Por mais de cem anos o Brasil é o maior produtor mundial de café e, portanto, a utilização de seus resíduos faz-se necessária. Foi realizado um estudo ambiental por meio da avaliação do ciclo de vida do sistema produtivo do café do município de Santa Rosa da Serra (MG), até a sua exportação. O estudo foi dividido em três cenários, sendo o cenário 1, o cenário base, em que a casca é descartada ao ar livre; cenário 2, com a utilização desta casca como adubo orgânico e cenário 3, com aproveitamento energético da casca para gaseificação, gerando energia que é utilizada posteriormente em grupo motor-gerador e todos em suas variedades manual e mecanizado. Os inventários foram elaborados para os cenários existentes e foram averiguados os impactos ambientais deste ciclo produtivo com a utilização deste resíduo. A quantidade de energia e potência produzida com a casca de café (energia disponível), para os estados brasileiros de modo geral, resultou em um total de 54.333,9 kW de potência. Foi realizada uma análise econômica e técnica para utilização da casca do café para gaseificação, considerando os 5 municípios que são os maiores produtores de café do Estado de Minas Gerais. Patrocínio é o município que apresenta uma maior potência disponível de 1.040,2 kW. A partir da análise econômica foi verificado que dentre os cinco municípios avaliados (na produção de energia), apenas o município de Patrocínio apresentou um VPL positivo. O LCOE mostra que empreendimentos utilizando a tecnologia de gaseificação com a casca do café, embora seja tecnicamente viável, de acordo com a análise econômica se torna inviável. No estudo ambiental, a categoria de mudanças climáticas foi a mais afetada tanto no estudo de caso 1 (manual e mecanizado), como no estudo de caso 3 (manual e mecanizado), entretanto, fortemente para o estudo de caso 1 mecanizado, o que pode ser explicado pois este manejo utiliza mais maquinário e maior quantidade de insumos para cada tonelada de café produzida.

**Palavras Chave:** Produção de Café, Gaseificação, aproveitamento energético, Avaliação do Ciclo de Vida.

## ABSTRACT

Considering the climate changes in the current world scenario, due to the increase in global temperature, added to the need for a social balance in the use of electricity, reducing the number of citizens without access to electricity, one of the solutions is the significant and growing use of renewable sources. As Brazil is a country of agricultural culture, alternatives that make use of agro-industrial residues are important. For over a hundred years, Brazil has been the world's largest producer of coffee and, therefore, the use of its residues is necessary. An environmental study was carried out through the evaluation of the life cycle of the coffee production system in the municipality of Santa Rosa da Serra (MG), until its export. The study was divided into three scenarios, scenario 1, the base scenario, in which the bark is discarded outdoors; scenario 2, with the use of this bark as organic fertilizer and scenario 3, with the energy use of the bark for gasification, generating energy that is later used in the motor-generator group and all in its manual and mechanized varieties. The inventories were prepared for the existing scenarios and the environmental impacts of this production cycle with the use of this residue was investigated. The amount of energy and power produced with the coffee husk (available energy), for the Brazilian states in general, resulted in a total of 54,333.9 kW of power. An economic and technical analysis was carried out for the use of coffee husks for gasification, considering the 5 municipalities that are the largest coffee producers in the State of Minas Gerais. Sponsorship is the municipality with the highest available power of 1,040.2 kW. From the economic analysis, it was verified that among the five municipalities evaluated (in energy production), only the municipality of Patrocínio presented a positive NPV. The LCOE shows that projects using the technology of gasification with the coffee husk, although it is technically viable, according to the economic analysis, it become unfeasible. In the environmental study, the climate change category was the most affected both in case of study 1 (manual and mechanized) and in case of study 3 (manual and mechanized), however, strongly for mechanized case study 1, which can be explained because this management uses more machinery and a greater quantity of inputs for each ton of coffee produced.

**Key Words:** Coffee Production, Gasification, Energy Use, Life Cycle Assessment.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>12</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>13</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>16</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>17</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>19</b>
<b>SIMBOLOGIA .....</b>	<b>20</b>
<b>1. CAPÍTULO 1 – APRESENTAÇÃO.....</b>	<b>22</b>
<b>1.1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>22</b>
<b>1.2 OBJETIVOS.....</b>	<b>29</b>
1.2.1 Objetivo Geral.....	29
1.2.2 Objetivos Específicos.....	29
<b>2. CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>31</b>
<b>2.1 PANORAMA ENERGÉTICO E FONTES RENOVÁVEIS.....</b>	<b>31</b>
2.1.1 Emissões de GEE.....	34
<b>2.2 CADEIA PRODUTIVA DO CAFÉ.....</b>	<b>36</b>
2.2.1 Adubação Orgânica.....	44
<b>2.3 CASCA COMO INSUMO ENERGÉTICO.....</b>	<b>45</b>
<b>2.4 BIOMASSA E ROTAS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA .....</b>	<b>49</b>
2.4.1 Processos de Conversão da Biomassa.....	52
2.4.2 Gaseificação da biomassa .....	53
2.4.3 Tipos de Gaseificadores .....	59
2.4.4 Sistema de Limpeza .....	63
2.4.5 Motor de Combustão Interna .....	66
<b>2.5 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA .....</b>	<b>67</b>
2.5.1 Metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida .....	68
2.5.2 Definição do Objetivo e Escopo.....	68
2.5.3 Inventário do Ciclo de Vida (ICV).....	69
2.5.4 Impacto do Ciclo de Vida (AICV).....	71
2.5.5 Interpretação do Ciclo de Vida.....	72
2.5.6 Limitações.....	73
<b>2.6 ESTUDOS ANTERIORES.....</b>	<b>74</b>
2.6.1 Gaseificação dos resíduos do cultivo do café (casca) .....	74
2.6.2 Ciclo de Vida do Café.....	78
<b>3. CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA.....</b>	<b>86</b>
<b>3.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA .....</b>	<b>91</b>
3.1.1 Objetivo e escopo do estudo .....	91

<b>3.2</b>	<b>FERRAMENTAS DE ANÁLISE.....</b>	<b>94</b>
3.2.1	Software SimaPro® .....	94
3.2.2	Software AspenPlus® .....	97
3.2.3	Potência Térmica, Disponibilidade e potencial técnico da biomassa .....	99
3.2.4	Cálculo do Fertilizante Orgânico .....	102
3.2.5	Ferramentas de Análise Econômica .....	103
<b>4.</b>	<b>CAPÍTULO 4 - INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA .....</b>	<b>108</b>
<b>4.1</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO.....</b>	<b>108</b>
4.1.1	Plantio em viveiro .....	109
4.1.2	Preparo do solo e Plantio.....	110
4.1.3	Cultivo.....	111
4.1.4	Colheita.....	116
4.1.5	Processamento.....	117
4.1.6	Classificação II e Preparo.....	120
4.1.7	Transporte .....	121
4.1.8	Exportação .....	123
4.1.9	Emissões geradas na etapa agrícola (cultivo) .....	124
<b>4.2</b>	<b>PROJETO DE GERAÇÃO E RESULTADOS .....</b>	<b>129</b>
4.2.1	Justificativa da escolha da tecnologia de Gaseificação .....	129
4.2.2	Aproveitamento do Resíduo para Gaseificação .....	130
4.2.3	Central de Geração de eletricidade.....	132
4.2.4	Geração de eletricidade .....	135
<b>4.3</b>	<b>RESULTADOS DA SIMULAÇÃO .....</b>	<b>136</b>
<b>4.4</b>	<b>APROVEITAMENTO DO RESÍDUO COMO FERTILIZANTE ORGÂNICO .....</b>	<b>143</b>
<b>5.</b>	<b>CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO ECONÔMICA .....</b>	<b>144</b>
<b>6.</b>	<b>CAPÍTULO 6 - AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA.....</b>	<b>149</b>
<b>6.1</b>	<b>RESULTADOS DA AICV .....</b>	<b>149</b>
6.1.1	Comparação geral entre os estudos de caso .....	150
6.1.2	Resultados por categoria de impacto.....	153
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>169</b>
<b>7.1</b>	<b>RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>171</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>172</b>
<b>8.</b>	<b>APÊNDICE 1.....</b>	<b>187</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Consumo de café per capita no ano de 2018.....	25
Figura 1.2 Produção mundial de café entre 2000 e 2019. ....	26
Figura 2.1 Participação de Renováveis na Matriz energética. ....	31
Figura 2.2 Perfil energético no Brasil. ....	33
Figura 2.3 Média global de CO2 na atmosfera entre os anos de 2016 e 2020 (ppm). ....	35
Figura 2.4 Milhões de sacas produzidas por continente.....	37
Figura 2.5 Representação da estrutura do fruto do café. ....	39
Figura 2.6 Fluxograma do processamento pós-colheita do café.....	42
Figura 2.7 Fluxograma do ciclo de vida do café.....	43
Figura 2.8 Opções de obtenção da casca por meio dos dois tipos de beneficiamento do café. ....	45
Figura 2.9 Resumo das rotas de aproveitamento energético da biomassa.....	53
Figura 2.10 Processos de gaseificação da biomassa. ....	55
Figura 2.11 Resumo das etapas da gaseificação no gaseificador downdraft. ....	58
Figura 2.12 Esquema de um gaseificador contracorrente.....	60
Figura 2.13 Esquema de um gaseificador cocorrente. ....	61
Figura 2.14 Esquema de um gaseificador de fluxo cruzado.....	62
Figura 2.15 Filtro de material granular de leito movente. ....	65
Figura 2.16 Filtro de material granular de leito movente.....	66
Figura 2.17 Fases da Avaliação do Ciclo de Vida. ....	68
Figura 2.18 Consumo de fertilizantes e consumo de pesticidas em relação a produção de café verde.....	79
Figura 2.19 Resultados da ACV utilizando o Eco-Indicador 99.....	81
Figura 3.1 Fluxograma resumo do trabalho.....	86
Figura 3.2 Cenário Base - Estudo de Caso 1. ....	87
Figura 3.3 Estudo de Caso 3.....	88
Figura 3.4 Estudo de Caso 3.....	88
Figura 3.5 Entradas e saídas do sistema de geração elétrica. ....	89
Figura 3.6 Entradas e saídas do sistema de geração elétrica. ....	90
Figura 3.7 Localização geográfica do município.....	93
Figura 3.8 Localização geográfica do município por satélite e destaque para as plantações de café. ....	94
Figura 3.9 Modelagem do processo de gaseificação em AspenPlus®. ....	98
Figura 4.1 Viveiro de mudas de café a) estágio inicial; b) estágio final. ....	110
Figura 4.2 Sequência de atividades para execução do plantio.....	111
Figura 4.3 Fluxos entre as localidades consideradas para o transporte. ....	115
Figura 4.4 cafeeiro a) plantas com café verde b) plantas com café em maturação. ....	115
Figura 4.5 Colhedora de café em operação. ....	117
Figura 4.6 Ilustração gráfica do secador utilizado (vertical). ....	118
Figura 4.7 a) Ilustração do secador existente; b) secador e madeira para alimentação da fornalha.....	119
Figura 4.8 Vista geral da unidade de secagem e do resíduo gerado.....	119
Figura 4.9 Beneficiamento/estocagem em a) e descascadora em b).....	120
Figura 4.10 Esquema do transporte 1 e 2. ....	123
Figura 4.11 Efeito de diferentes razões de equivalência na eficiência do gás a frio.....	131

Figura 4.12 Sequência de equipamentos utilizados na geração elétrica.....	132
Figura 4.13 Etapas que constituem o estudo de caso 3. ....	133
Figura 4.14 Representação do sistema de geração elétrica a partir da gaseificação do resíduo do cultivo cafeeiro.....	134
Figura 4.15 Composição do gás em função da Razão de equivalência.....	138
Figura 4.16 PCI em função da Razão de equivalência.....	139
Figura 4.17 Composição do gás gerado para os trabalhos analisados (I).....	140
Figura 4.18 Composição do gás gerado para os trabalhos analisados (II).....	141
Figura 5.1 VPL em função de taxas de juros.....	145
Figura 5.2 LCOE em função de taxa de juros .....	147
Figura 5.3 LCOE de fontes de geração de energia .....	148
Figura 6.1 Categorias de impacto para cada estudo de caso.....	152
Figura 6.2 Potencial de alterações climáticas por estudo de caso.....	154
Figura 6.3 Potencial de depleção da camada de ozônio .....	156
Figura 6.4 Potencial de acidificação terrestre.....	157
Figura 6.5 Potencial de eutrofização de água doce .....	158
Figura 6.6 Potencial de toxicidade humana.....	159
Figura 6.7 Potencial de formação de oxidantes fotoquímicos .....	160
Figura 6.8 Potencial de formação de material particulado .....	162
Figura 6.9 Potencial de ecotoxicidade terrestre .....	163
Figura 6.10 Potencial de ecotoxicidade de água doce.....	164
Figura 6.11 Potencial de ocupação agrícola do solo .....	165
Figura 6.12 Potencial de transformação natural do solo .....	166
Figura 6.13 Potencial de depleção da água .....	167
Figura 6.14 Potencial de depleção de combustíveis fósseis.....	168

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Maiores produtores de eletricidade por fontes renováveis. ....	32
Tabela 2.2 Potência outorgada por fonte (centrais em operação). ....	34
Tabela 2.3 Participação relativa dos Estados na produção Brasileira. ....	37
Tabela 2.4 Participação relativa das regiões produtoras de café do Estado de Minas Gerais.....	38
Tabela 2.5 Ranking dos países na exportação, importação e consumo do grão de café. ....	38
Tabela 2.6 Composição química das cascas de café. ....	48
Tabela 2.7 Composição das cinzas da casca de café.....	48
Tabela 2.8 Agente de gaseificação e suas características. ....	54
Tabela 2.9 Faixa de concentração de NH <sub>3</sub> e HCN no gás produto .....	56
Tabela 2.10 Zonas e reações que ocorrem nos gaseificadores.....	58
Tabela 2.11 Qualidade requerida do gás para geração de potência. ....	63
Tabela 2.12 Remoção de partículas e alcatrão por diferentes sistemas de limpeza. ....	64
Tabela 2.13 Resumo dos principais métodos utilizados para ACV. ....	72
Tabela 2.14 Composição química das cascas de café seguindo diferentes fontes. ....	74

Tabela 2.15 Resultados da gaseificação da casca de café conforme a literatura. ....	75
Tabela 2.16 Resumo dos estudos anteriores em ACV para café. ....	83
Tabela 3.1 Categorias de impacto, de dano e unidades. ....	96
Tabela 3.2 Blocos do modelo apresentado (gaseificação em AspenPlus®). ....	99
Tabela 3.3 Fator de Disponibilidade utilizado para o resíduo do café (casca). ....	100
Tabela 3.4 Rotas de Conversão termoelétrica para biomassa. ....	101
Tabela 3.5 Índice de conversão utilizado. ....	102
Tabela 3.6 Quantidade de matéria seca, nutrientes e relação C/N da casca de café (em %). ....	103
Tabela 3.7 Valores dos equipamentos utilizados para gaseificação de biomassa. ....	105
Tabela 3.8 Incremento percentual para estimativa de custo de investimento. ....	106
Tabela 4.1 Definições dos cultivos Mecanizado e Manual. ....	108
Tabela 4.2 Parâmetros de plantio das mudas em viveiro na UF. ....	110
Tabela 4.3 Parâmetros de atividades em plantio na UF. ....	111
Tabela 4.4 Insumos utilizados no cultivo do cafeeiro mecanizado na UF. ....	112
Tabela 4.5 Insumos utilizados no cultivo do cafeeiro de cultivo manual na UF. ....	113
Tabela 4.6 Consumo de diesel de acordo com as atividades do cultivo conforme a UF - MEC. ....	113
Tabela 4.7 Consumo de diesel de acordo com as atividades do cultivo conforme a UF - MAN. ....	114
Tabela 4.8 Detalhe do transporte por caminhão considerados no cultivo na UF. ....	115
Tabela 4.9 Consumo para o beneficiamento na UF. ....	121
Tabela 4.10 Rendimento energético dos caminhões. ....	122
Tabela 4.11 Etapas do Transporte (dos grãos) pós cultivo com diesel consumido na UF. ....	123
Tabela 4.12 Emissões estimadas de N <sub>2</sub> O e CO <sub>2</sub> relativas ao corretivo agrícola e fertilizante nitrogenado. .....	124
Tabela 4.13 Emissões estimadas relativas ao uso da lenha na secagem. ....	125
Tabela 4.14 Emissões devido uso dos tratores agrícolas (em kg/l de diesel consumido). ....	125
Tabela 4.15 Emissões devido uso de veículos de carga média e pesada. ....	126
Tabela 4.16 Emissões devido ao uso de tratores agrícolas. ....	126
Tabela 4.17 Inventários de sistemas de produção e fonte de dados. ....	127
Tabela 4.18 Emissões calculadas devido ao uso de veículos de carga pesada e média para a UF. ....	128
Tabela 4.19 Análise imediata, elemental e demais características da biomassa utilizada (base seca). ....	132
Tabela 4.20 Características da biomassa e do agente de gaseificação. ....	132
Tabela 4.21 Energia disponível e potência de acordo com as regiões produtoras de café. ....	135
Tabela 4.22 Energia disponível e potência de acordo com os Estados Brasileiros. ....	135
Tabela 4.23 Energia disponível e potência de acordo com as regiões de Minas Gerais. ....	136
Tabela 4.24 Energia disponível e potência de acordo com os municípios com maior produção do Estado. .....	136
Tabela 4.25 Composição do gás de síntese. ....	137
Tabela 4.26 Principais saídas na etapa da gaseificação. ....	137
Tabela 4.27 Principais saídas na etapa de geração por meio de MCI. ....	137
Tabela 4.28 Fração molar típica para reatores. ....	142
Tabela 4.29 Quantidade de fertilizante orgânico necessário (em kg). ....	143
Tabela 5.1 Resultados econômicos do investimento. ....	144
Tabela 5.2 LCOE conforme fontes de geração. ....	146
Tabela 6.1 Valores de categorias de impacto para cada estudo de caso. ....	151

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NOAA	Administração Oceânica e Atmosférica Nacional - USA (National Oceanic and Atmospheric Administration)
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change)
IEA	Agencia Internacional de Energia (International Energy Agency)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
Mtoe	Tonelada equivalente de petróleo (Million Tonnes of Oil Equivalent)
SIN	Sistema Interligado Nacional
UNICA	União da Industria da Cana de Açúcar
CECAFE	Conselho dos Exportadores de Café do Brasil
GEE	Gases de Efeito Estufa
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
LCA	Life Cycle Assessment (Avaliação do ciclo de vida)
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
CO2 eq	CO2 equivalente
ICO	International Coffee Organization (Organização Internacional do café)
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
SEAPAMG	Secretaria de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais
UNEP	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (United Nations Environment Programme)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ISO	Organização Internacional de Normalização (International Organization for Standardization)
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
LCI	Life Cycle Inventory (Inventário do Ciclo de Vida)
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
CFD	software citado por diversos autores para modelagem
FVIT	software citado por diversos autores para modelagem
UF	Unidade Funcional
FVH	Fazenda Vista Hermosa (citada)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
BR	Rodovia Brasileira
MCI	Motor de Combustão Interna
VPL	Valor Presente Líquido
TIR	Taxa Interna de Retorno
VA	Valor Atual
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
LCOE	Custo nivelado de eletricidade

MEC	Tipo de cultivo Mecanizado
MAN	Tipo de cultivo Manual
SP-RP	São Paulo (Estado) para Rio Paranaíba (município de MG)
RP-LA	Rio Paranaíba (município de MG) para lavoura
AR-LA	Arcos (município de MG) para lavoura
LA-SR	Lavoura para Santa Rosa da Serra (município de MG)
RS-RP	Santa Rosa da Serra para Rio Paranaíba (ambos municípios de MG)
RP-MC	Rio Paranaíba para Monte Carmelo (ambos municípios de MG)
MC-PS	Monte Carmelo (município de MG) para Porto de Santos
HCOALGEN	Modelo do AspenPlus® para Entalpia
DCOALIGT	Modelo do AspenPlus® para densidade
RYield	Reator não estequiométrico
Rstoic	Reator Estequiométrico
RGibbs	Reator de Gibbs
sep	Separador
REDUREG	Região de Redução
COMBREG	Região de Combustão
PIROLREG	Região de Pirólise
DECOMPO	Biomassa decomposta após a pirólise
CHAR	Fração carbonácea sólida
GASCHAR	Gás e fração carbonácea sólida
GASBRUTO	Gás bruto produzido após a redução
RESID+UM	Resíduo e umidade
MV	Materiais Voláteis
CF	Carbono Fixo

## **SIMBOLOGIA**

E = Energia produzida anualmente;

i = Taxa de desconto (juros);

$C_n$  = Custo anual;

n = ano;

PT = Potência Térmica;

Fc = Fator de conversão;

Fr = fator de relação;

Fd = fator de disponibilidade;

Ed = Energia disponível do gaseificador (MJ/ano);

$t_{\text{café}}$  = Produção de café (kg/ano);

PCI = Poder calorífico inferior da biomassa (MJ/kg);

$\dot{m}$  = Vazão mássica

$\eta_g$  = Eficiência do gaseificador (%);

P = Potência do gerador a ser instalado (kW);

$\Delta t$  = Tempo de atendimento do motor de combustão interna;

$\eta_m$  = Eficiência do motor de combustão interna (%);

# 1. CAPÍTULO 1 – APRESENTAÇÃO

## 1.1 INTRODUÇÃO

Desde 1970, a temperatura média global tem aumentado a uma taxa de 1,5°C, em comparação com os últimos 700 anos, a uma taxa de 0,01°C por século (NOAA, 2019), portanto a atual taxa de crescimento é significativamente maior, ocasionando a intensificação das alterações climáticas. Limitar o aquecimento global em 1,5°C requer substanciais transformações sociais e tecnológicas, que são, por sua vez, dependentes dos caminhos para o desenvolvimento sustentável global e regional (IPCC, 2018).

O ano de 2020 registrou elevadas temperaturas globais médias, tanto para superfície terrestre como para a superfície oceânica; a temperatura média de aumento da superfície terrestre e oceânica foi de 0,98°C em 2020 e 0,95°C em 2019. Sendo o ano de 2020 considerado o segundo ano mais quente, conforme os dados de temperatura da NOAA (NOAA, 2021). Nove dos dez anos mais quentes ocorreram desde 2005. A temperatura média da Terra aumentou 0,08 °C por década desde 1880, e a taxa de aquecimento nos últimos 40 anos foi mais do que o dobro, sendo 0,18°C por década desde 1981 (NOAA, 2021).

Em 2019, ocorreram extremos quentes e extremos frios. No Canadá, em Lansdowne House, a temperatura chegou a -47,5°C em janeiro de 2019 e no mesmo mês no hemisfério sul, foram registradas altas históricas, como 38,3°C em Santiago e 37,4°C no Rio de Janeiro. Ou seja, a tendência global é de contínuo aumento da temperatura e desequilíbrio ambiental.

Paralelamente, no cenário mundial, existe outro grave problema, que consiste no número de pessoas ainda sem acesso à energia elétrica. Este número caiu de 1,7 bilhões de pessoas no ano 2000, para 1,1 bilhão de pessoas em 2016, e para 860 milhões em 2018, com previsão de continuar com decaimento, chegando a 620 milhões em 2030, entretanto, existe a projeção de aumento em 2050, indo para 740 milhões de pessoas (IEA, 2017a; IEA, 2020). Este dado é interessante, pois mostra o aumento do desenvolvimento tecnológico da sociedade (ao aumentar o acesso a eletricidade), mas é paralelamente preocupante, pois ainda existe um grande número de pessoas sem acesso à eletricidade no mundo. No mundo cerca de dois terços da população vive com menos

de 10 dólares por dia, ou seja, ainda hoje, a maioria das pessoas do mundo, vivem na pobreza, sem acesso às necessidades básicas (OUR WORLD IN DATA, 2020).

Neste contexto, com as duas grandes problemáticas globais citadas, onde coexistem o desequilíbrio ambiental e o desequilíbrio social, é necessário o crescimento e maturação das fontes renováveis, pois além de atender às questões ambientais, estas fontes ainda contribuem para erradicação da pobreza, segurança energética, e facilita o acesso à eletricidade, convergindo com os objetivos do desenvolvimento sustentável. Um maior uso das fontes de energias renováveis é requerido para a redução da poluição, das emissões de dióxido de carbono, e do consumo de fontes fósseis (ZHOU et al., 2013).

O Brasil encontra-se em uma posição de vantagem nesse contexto, pois sua oferta interna de energia apresenta um total de 48,4% de fontes renováveis, em suas variadas formas (hidráulica 12,6%; derivados da cana 19,1%; lenha e carvão vegetal 8,9% e outras renováveis 7,7%), (EPE, 2021).

Estudos feitos pela Agencia Internacional de Energia (IEA), mostram que a bioenergia é o recurso de maior crescimento projetado no consumo de fontes renováveis entre os anos de 2017 e 2023. A biomassa transformada em combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos representará 30% do crescimento do consumo de renováveis nesse mesmo período. O consumo total de energias renováveis no Brasil atualmente vai ao encontro da projeção estabelecida em 2018, para o ano de 2023, de 45%. A estimativa é que para este mesmo ano (2023), para o Brasil, a bioenergia corresponda a 67,7 Mtoe, seguida da hidroeletricidade e da energia eólica, com 30,3 Mtoe e 4,5 Mtoe, respectivamente (IEA, 2018).

A energia renovável é a quarta maior fonte de energia primária no mundo, onde a biomassa (tradicional e moderna) é o recurso renovável mais utilizado (GARCIA et al., 2017; REN et al., 2019; SHEN et al., 2009; WU et al., 2012).

Em 2015, o consumo da biomassa e resíduos para uso final global foi de 51 EJ, onde a maior parte deste valor (55,4%), equivalente a 28,2 EJ, correspondente ao uso da biomassa tradicional, seguido pelo seu uso no setor industrial (15,9%) e para eletricidade e cogeração (12,4%); os demais usos são em quantidades menores (IEA, 2017).

No Brasil, em 2018, a produção de bioeletricidade para a rede elétrica atingiu 21,5 mil GWh no Sistema Interligado Nacional (SIN) (UNICA, 2019). Importante mencionar que 83% desta bioeletricidade foi ofertada em período de seca, onde a energia elétrica é mais onerosa para o

consumidor. Portanto, a biomassa apresenta importância para o cenário brasileiro e para o cenário global.

Há abundância de bioenergia, especialmente nos trópicos, onde durante todo o ano há uma intensa radiação solar, pois, as plantas armazenam a energia que é oriunda da fotossíntese, e podem transformar a energia solar em energia química. Isto torna a biomassa vegetal e de resíduos uma abundante fonte energética. Biomassa pode ser descrita como uma mistura heterogênea de matéria orgânica e de matéria inorgânica (esta última em menor quantidade) se apresentando em diversas fases sólidas e líquidas com diferentes conteúdos (BISHT e THAKUR, 2019).

A biomassa apresenta vantagens em relação às demais fontes renováveis (que são intermitentes), pois pode ser armazenada e está disponível em todos os períodos do ano, considerando diferentes culturas, além de apresentar baixo teor de nitrogênio e enxofre levando a emissões pobres em  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_2$  (BILGEN et al., 2015; OZTURK et al., 2017; SREEJITH et al., 2014). O uso da biomassa gera benefícios ambientais e socioeconômicos, por meio da utilização de resíduos. A preocupação com os problemas ambientais tem promovido o aumento das pesquisas sobre a destinação dos resíduos agroindustriais.

O café se apresenta como a mais importante *commodity* agrícola do mundo; em relação ao comércio mundial é o segundo produto mais comercializado, ficando atrás apenas do petróleo, com um crescimento de quase 200% em sua produção desde 1950. O café também é uma importante base de subsistência dos pequenos agricultores nos países produtores (BIRKENBERG e BIRNER, 2018; SALOMONE, 2003). São consumidos diariamente cerca de 1,4 bilhão de xícaras de café por dia, em todo o mundo (ICO, 2019) e um consumidor médio da bebida, é responsável por gerar aproximadamente 3 quilogramas de casca (resíduo do beneficiamento), por ano (HUSKEE, 2020).

A produção Brasileira de café no ano de 2020, foi de 63,08 milhões de sacas de 60 kg beneficiadas, o que equivale a um total de 3,78 milhões de toneladas do grão. De acordo com o Conselho dos Exportadores de Café do Brasil (CECAFE, 2021), no ano de 2020, foi exportado um total de 44,7 milhões de sacas (2,68 milhões de toneladas), considerando o café verde, solúvel, torrado e moído (o termo café verde é utilizado para o café seco vendido em grãos), sendo um recorde histórico para as exportações. O valor exportado compõe uma receita em dólares equivalente a aproximadamente US\$ 5,6 bilhões de dólares, com o preço médio da saca (60 kg) em torno de US\$ 125,49. Já no ano de 2021 o preço da saca também alcançou recordes, sendo

vendida a US\$ 174,81 no mês de julho (CECAFE, 2021). Os preços do café registraram uma alta constante nas médias mensais, para o ano de 2021 e essa alta está relacionada à menor safra de café arábica deste ano (2021). O Brasil possui a maior produção mundial deste grão, com uma participação de 28.8% da produção mundial total. O Estado de Minas Gerais é o maior produtor no país.

O consumo per capita para o ano de 2018 (em kg) é mostrado na Figura 1.1, considerando os primeiros 25 países que mais consomem a bebida, por habitante, onde o primeiro é a Finlândia, seguido por Noruega, Islândia e Dinamarca. A Figura 1.2 apresenta a evolução da produção entre os anos 2000 e 2019, onde é possível visualizar que a produção do café está em constante crescimento. Percebe-se que a produção brasileira tem significativa contribuição para o mercado global, como já citado e esta produção tem aumentado, com os anos, embora possa ocorrer uma pequena variação entre um ano e outro.

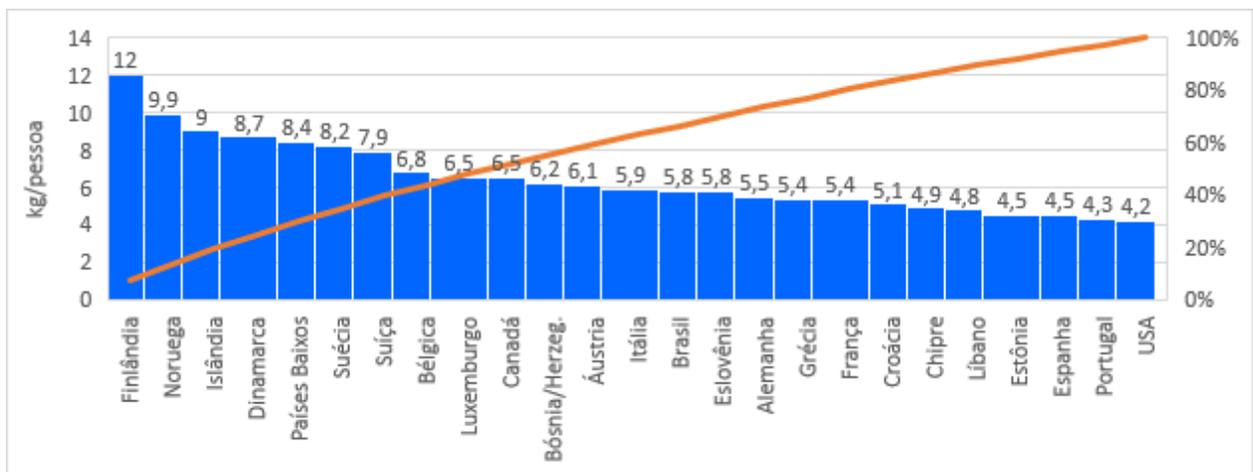


Figura 1.1 Consumo de café per capita no ano de 2018.

Fonte: Bernard, 2018.

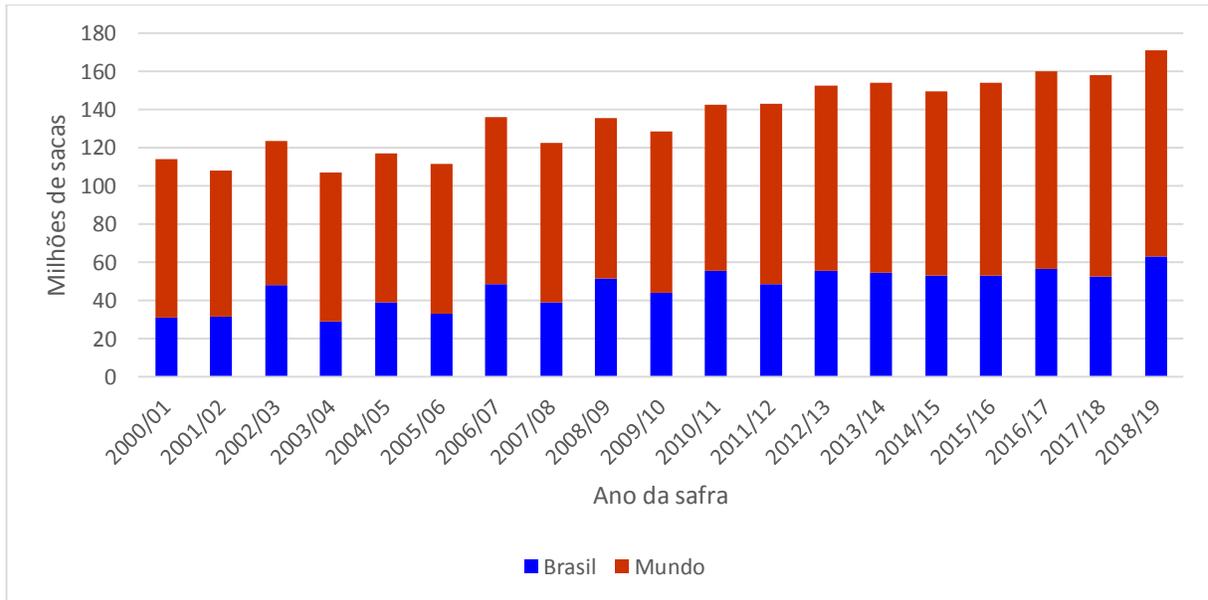


Figura 1.2 Produção mundial de café entre 2000 e 2019.  
Fonte: ICO, 2019

As formas de preparo têm mudado significativamente, com as tecnologias disponíveis atualmente, e isto altera não apenas fatores como qualidade e sabor da bebida, mas também, os impactos ambientais gerados pela porção preparada (HICKS, 2017).

A indústria cafeeira constitui-se, uma das mais importantes atividades para a economia do Brasil, pela geração de renda e empregos. Entretanto, a agricultura e a agropecuária contribuem para as mudanças climáticas, principalmente por converter florestas em terras agrícolas e devido à emissão de metano e óxido nitroso, provenientes do manejo de gado e da aplicação de fertilizantes nas lavouras (BELLARBY et al., 2008).

Salienta-se que mesmo após a preparação, os resíduos de café constituem um recurso valioso e ainda contêm quantidades significativas de açúcares, óleos, antioxidantes e outros compostos de alto valor, e são ainda uma fonte potencial de energia (MCNUTT e HE, 2019). Conforme Oliveira et al., 2018, a produção de café exige intensiva utilização da energia (térmica, mecânica e elétrica), especialmente para o processo de secagem. O uso dos resíduos como fonte de energia pode ocasionar a redução dos custos de produção final e ainda melhorar a sustentabilidade das pequenas propriedades.

Grande quantidade e variedade de resíduos são gerados durante o processamento do café após a colheita, por via seca ou pela via úmida e também pelas indústrias de cafés solúveis (casca

ou polpa do café, grãos com defeito, a borra do café consumido, etc). Estes resíduos normalmente são dispostos de forma inadequada, podendo gerar danos ambientais (DURÁN et al., 2017; FRANCA e OLIVEIRA, 2009).

A casca é um dos resíduos obtidos durante o descasque das cerejas do café, no beneficiamento, após a colheita, de modo a obter grãos de café limpo, no processo de secagem. Atualmente, apenas uma pequena parcela deste resíduo é utilizada na geração de energia e para a combustão direta em fornos e caldeiras. Outra parte é empregada para adubação orgânica (aplicação direta) nas próprias lavouras de café. No entanto, esse resíduo pode ser utilizado na gaseificação, gerando produtos com maior valor agregado e com aplicações potenciais mais importantes do que a própria matéria prima (GEORGE et al., 2018). A produção desta biomassa é sazonal, mas ainda assim gera quantidade significativa de resíduos. O café apresenta alto potencial para promover a bioeconomia, pois conduz ao aumento da eficiência do uso de recursos e diminuição dos impactos ambientais ao longo de sua cadeia produtiva.

A energia pode então ser gerada a partir da biomassa lignocelulósica utilizando tecnologias de conversão termoquímica, tais como gaseificação, combustão, pirólise etc. A conversão térmica da biomassa se constitui uma opção já estabelecida para geração de energia e/ou geração de produtos químicos a partir de fontes renováveis e ainda atua na redução das emissões provenientes de recursos fósseis (TOSTI et al., 2019). Conforme Oliveira et al., 2018, o Brasil é o país com os mais avançados programas de conversão de energia a partir da biomassa. Dentre as tecnologias de conversão da biomassa, a gaseificação é considerada a mais vantajosa e promissora. O gás gerado na gaseificação possui uma combustão mais eficiente, em termos de calor e geração de potência, se comparado a combustão direta e ainda permite uma ampla variedade de biomassas como matéria prima (ADAMS e MCMANUS, 2014; DAMBROSIO, 2017; WORLEY, 2012).

Entre os mais importantes benefícios da gaseificação da biomassa estão a sustentabilidade, a redução dos GEE, o desenvolvimento regional econômico, social, o desenvolvimento agrícola, e a maior segurança no fornecimento de energia (DEMIRBAS e DEMIRBAS, 2007; OLIVEIRA et al., 2013).

A gaseificação é uma tecnologia que consiste na conversão termoquímica de combustíveis sólidos, em um ambiente pobre em oxigênio, removendo os voláteis da matriz de carbono presente na celulose e hemicelulose da biomassa, produzindo um gás combustível, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> e insumos químicos, através de um conjunto de rotas reativas homogêneas e heterogêneas, com um

considerável conteúdo energético e impactos ambientais mínimos (FARZAD et al., 2016; HENÃO, et al., 2019; KUMAR e PAUL, 2019).

Um desafio fundamental para alcançar a intensificação da sustentabilidade é o desenvolvimento de sistemas agrícolas, que podem ter sua produtividade aumentada e dissociada do aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e dos demais impactos ambientais (NOPONEN et al., 2012). Como o café é intensivamente produzido e consumido, este possui uma grande cadeia de abrangência e influência. Logo, há a necessidade de aplicação da ferramenta ACV (Avaliação do Ciclo de Vida) no processo de produção do café, para avaliar o uso de práticas sustentáveis e obtenção de um produto com menor impacto para o meio ambiente e sociedade.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta importante, utilizada para avaliação ambiental de cadeias produtivas. Esta metodologia é amplamente utilizada e reconhecida internacionalmente por pesquisadores e técnicos e aplicada para variadas áreas (DOMÍNGUEZ-PATIÑO et al., 2014). A ACV pode ajudar na identificação de oportunidades de melhorias ambientais dos produtos ou processos em vários pontos de seu ciclo de vida, na tomada de decisões pela indústria, organizações governamentais e não-governamentais (por meio do planejamento estratégico, definição de prioridades, projetos, etc).

Diversos estudos têm sido publicados sobre o ciclo de vida do café, mas cada um com suas particularidades e focos diferentes. Portanto, o Brasil necessita de estudos como o que será executado. Para a análise ambiental do cultivo cafeeiro segundo as condições brasileiras, utilizando ACV, existem apenas dois trabalhos que são COLTRO et al., 2006 e COLTRO et al., 2012. Os demais trabalhos que possuem abordagens diferentes e para diferentes regiões do globo, serão avaliados na seção 2.6. A abordagem do presente trabalho ainda não foi vista em pesquisas publicadas, onde há uma ACV, fundamentado nas condições brasileiras, para determinação de impactos ambientais do cultivo do café com o incremento da avaliação de diferentes cenários, incluindo uma abordagem de aproveitamento dos resíduos do beneficiamento via seco, por meio da utilização da gaseificação e por meio da adubação orgânica. Será realizado também uma avaliação econômica para estes cenários.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O objetivo do estudo é realizar uma avaliação ambiental e econômica da cadeia produtiva do café destinado à exportação, para as condições brasileiras, focando no aproveitamento dos resíduos gerados para uso como fertilizante orgânico e para uso como combustível na gaseificação.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Revisão bibliográfica para fundamentação teórica sobre o contexto energético Brasileiro, sobre o cultivo do cafeeiro, sobre a tecnologia de aproveitamento do resíduo gerado e Análise do Ciclo de Vida;
- Averiguação e organização de dados técnicos e de pesquisa para confecção dos inventários do ciclo de vida para a produção do café até a exportação, com base na realidade do Estado de Minas Gerais;
- Desenvolvimento de quatro estudos de caso sendo: 1) cenário base com a produção de café e beneficiamento via seca até entrega para exportação; 2) produção de café até a entrega para exportação com utilização da casca resultante do beneficiamento, como adubo orgânico; 3) produção de café até a entrega para exportação com utilização da casca resultante do beneficiamento, para implementação da gaseificação e aproveitamento do gás gerado para geração elétrica nas propriedades de estudo;
- Modelagem no software AspenPlus para verificação da composição do gás de síntese a ser utilizado no processo de geração elétrica;
- Realizar uma avaliação ambiental dos estudos de caso propostos com base na avaliação do ciclo de vida para identificar os maiores e menores impactos ambientais causados;
- Realizar uma avaliação econômica dos estudos de caso propostos para averiguação do cenário que apresente maior desempenho energético e maior ganho econômico para o produtor;

- Comparar os resultados e apresentar conclusões sobre cada estudo proposto.

## 2. CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica necessária para exequibilidade do trabalho e entendimento da necessidade deste estudo.

### 2.1 PANORAMA ENERGÉTICO E FONTES RENOVÁVEIS

Diante do cenário de problemas ambientais existentes, a matriz energética e elétrica brasileira se destaca por possuir notável contribuição de fontes renováveis em sua composição, o que não ocorre na maioria dos países. A Figura 2.1 mostra a considerável diferença entre a composição da matriz energética mundial e brasileira, especialmente porque a matriz brasileira é composta em 48,4% por fontes renováveis (19,1% biomassa da cana; 12,6% hidráulica; 8,9% lenha e carvão vegetal; 7,7% lixívias e outras renováveis) e 51,6% de fontes não renováveis, contrapondo com apenas 13,8% da matriz mundial correspondendo às fontes renováveis e a matriz do grupo de países pertencentes ao OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico), com 11% de renováveis. Pela Figura 2.1 ainda pode ser verificado o crescimento de 2,3% das fontes renováveis na matriz brasileira de 2019 para 2020.

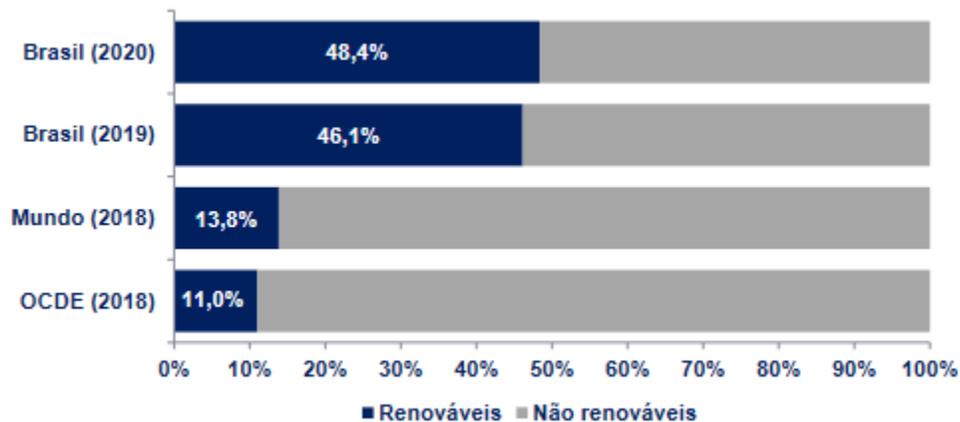


Figura 2.1 Participação de Renováveis na Matriz energética.

Fonte: EPE, 2021.

Portanto, ao avaliar de modo simples a relação do consumo de energia por unidade de energia produzida, o Brasil possui uma relação favorável, se comparada com outros países. Ao contabilizar a emissão de GEE pelo número total de habitantes, verifica-se que o país emite menor

quantidade de GEE por habitante que a maioria dos outros países. A Tabela 2.1 apresenta os maiores produtores mundiais de eletricidade por meio de fontes renováveis e o Brasil encontra-se na terceira posição, atrás apenas da China e Estados Unidos. Esse valor total representa um aumento de 5 a 6 vezes o valor desde 1960. A China destaca-se como maior produtor e exportador mundial além de ser o maior investidor.

Tabela 2.1 Maiores produtores de eletricidade por fontes renováveis.

<b>Fontes Renováveis</b>	<b>TWh</b>
China	1398
Estados Unidos	568
Brasil	430
Canadá	423
Índia	212
Alemanha	187
Rússia	169
Japão	165
Noruega	141
Itália	109
Restante do mundo	1732
<b>Mundo</b>	<b>5 534</b>

Fonte: IEA, 2017b

Apesar da condição favorável do Brasil em relação às fontes renováveis de energia, é de suma importância a preocupação com o aumento da eficiência nos processos e equipamentos, visto que existe uma demanda de energia crescente e trata-se de um país em desenvolvimento, portanto há uma demanda reprimida, ainda a ser definida de acordo com a melhora da economia. Deve ainda ser salientado que existem equipamentos, veículos, processos, sistemas e transportes que são significativamente ineficientes, onde há ainda um potencial de economia do consumo energético em paralelo a essa demanda crescente do consumo.

As fontes renováveis permitem alcançar o acréscimo no acesso aos níveis básicos de serviços de uso final, promovendo aumento na qualidade de vida de comunidades carentes. Para os países desenvolvidos a inclusão de fontes renováveis são oportunidades de elevar o desempenho e modernização dos serviços. Portanto a busca por mecanismos de obtenção de energia por fontes renováveis e aproveitamento de resíduos existentes nos processos constitui-se uma forma de desenvolvimento que visa garantir a sustentabilidade ambiental, segurança energética e equidade energética.

Conforme o World Energy Council (WEC, 2018), o Brasil reduziu a dependência externa de energia, e passou de 7,4% em 2015 para 2,1% em 2016, aumentando a diversidade de oferta e políticas de demanda de energia. A Figura 2.2 representa graficamente as reservas de combustíveis fósseis, a composição do fornecimento de energia primária e a diversidade da geração de eletricidade para o país.

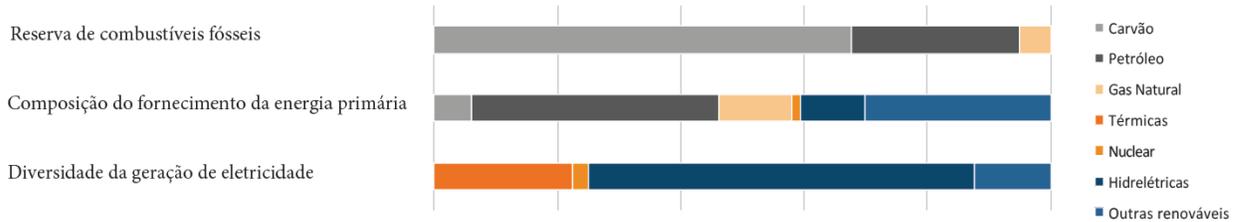


Figura 2.2 Perfil energético no Brasil.  
Fonte: WEC, 2018.

As fontes renováveis são uma ferramenta importante para dissociar o crescimento econômico do aumento da demanda energética, pois pode ocorrer a geração de energia, de variadas formas, promovendo o desenvolvimento da localidade, sem a necessidade de aumentar a demanda por energia elétrica da rede, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável. Estas fontes alternativas e o consumo de combustíveis fósseis contribuem para o desenvolvimento econômico, social, acesso à energia, garantem o fornecimento energético e ainda mitigação das mudanças climáticas e menores impactos negativos causados ao meio ambiente e à saúde humana (EDENHOFER et al., 2011).

Conforme ANEEL (2020a), a capacidade instalada e outorgada no Brasil é de 170.086 MW, excluindo a quantidade importada (8.170 MW). A biomassa representa 9% dessa potência outorgada pela ANEEL, na matriz elétrica do Brasil, estando na 4ª posição, atrás das fontes hídrica, fóssil e eólica, como está representada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Potência outorgada por fonte (centrais em operação).

<b>Capacidade Instalada</b>	<b>Tipo</b>	<b>%</b>	<b>MW</b>
Hídrica	Renovável	64	109.071
Fóssil	Não Renovável	16	26.202
Biomassa em geral	Renovável	9	14.971
Eólica	Renovável	9	15.377
Nuclear	Não Renovável	1	1.990
Solar	Renovável	1	2.473
<b>Total</b>			<b>170.086</b>

Fonte: ANEEL, 2020a.

A Resolução Normativa da ANEEL n° 482/2012, criada em 2012, e atualizada em 2015 (ANEEL, 2015), possibilita a geração de energia elétrica pelo próprio consumidor, a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e ainda permite o fornecimento do excedente para a rede de distribuição em sua localidade, através da micro e minigeração distribuídas (ANEEL, 2019). A microgeração distribuída consiste em uma central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (kW) e a minigeração distribuída a central com potência acima de 75kW e menor que 5MW, interligadas na rede de distribuição. Neste sistema qualquer tipo de energia renovável pode ser utilizado. Dentre os benefícios da geração distribuída pode ser salientada, a redução de carga nas redes, a redução dos impactos com obras de ampliação do sistema elétrico, a diversificação da matriz energética e a economia no gasto com energia elétrica para as unidades geradoras.

Para os casos onde a geração de energia elétrica for superior ao consumo energético no mesmo período, o consumidor adquire créditos que serão utilizados nas próximas faturas (com limite de 60 meses) da energia elétrica. Desta forma o uso dos excedentes de geração de eletricidade é uma forma de economia para os consumidores.

### **2.1.1 Emissões de GEE**

A crescente emissão de gases poluentes, que provocam efeito estufa constitui-se uma preocupação global, por isso os países se comprometem a implementar medidas e políticas que reduzem a emissão dos GEE. Em 2015, em uma Convenção sobre Mudanças Climáticas na cidade de Paris foi feito um acordo mundial que seria contabilizado a partir de 2020, mas o mesmo entrou em vigor em 2016. O acordo estabelece que os países implementariam medidas e políticas voluntárias para mudanças na economia e nos demais setores objetivando estabilizar o aquecimento

da Terra abaixo de 2°C e progressivamente limitá-lo a 1,5°C. Conforme SEEG, 2018, o compromisso do Brasil foi reduzir as emissões de GEE em 37% até 2025 em relação a 2005, e em 43% até 2030 com base no mesmo ano.

Em fevereiro de 2019, a concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente na atmosfera era de 411.75 ppm e no mesmo período de 2020, aumentou para 414.11 ppm. Em maio de 2020, esse valor chegou a 417,1 ppm, o que equivale a um aumento de 2,4 ppm no mesmo período em 2019 e 2020; o valor médio para o ano de 2020 foi de 412,5 ppm (NOAA 2019; NOAA 2020). Portanto, pode ser observado um aumento constante da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Conforme NOAA, 2020, a concentração atual de CO<sub>2</sub> na atmosfera apresentou um acréscimo de 25% desde 1958 e um aumento de 40% desde a revolução industrial. É importante ressaltar que apenas em 2008 e 2009, não houve um aumento constante das emissões globais, devido a recessão econômica global. A Figura 2.3 apresenta o crescente aumento do CO<sub>2</sub> na atmosfera, reforçando a significância de fontes alternativas nos diversos setores da economia.

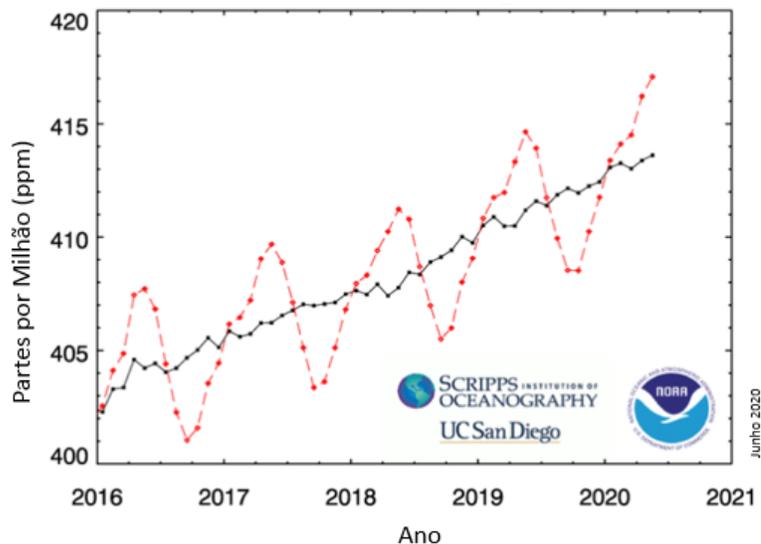


Figura 2.3 Média global de CO<sub>2</sub> na atmosfera entre os anos de 2016 e 2020 (ppm).  
Fonte: NOAA, 2020.

De acordo com o SEEG, em 2016, o Brasil emitiu 2,27 bilhões de toneladas brutas de GEE, medidas em gás carbônico equivalente (CO<sub>2</sub> eq.) e neste valor, 51% é devido ao desmatamento da Amazônia e do cerrado mineiro. As atividades de agricultura e pecuária, que compõem o setor da agropecuária são a segunda maior fonte de emissões do país, o que corresponde a 22% das emissões do ano de 2016 equivalentes a um valor de 49,3 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>eq.

Neste contexto é fundamental o estudo de alternativas para redução dos GEE na economia de modo geral, e especialmente na agropecuária, que tem contribuído substancialmente na emissão de gases poluentes.

## **2.2 CADEIA PRODUTIVA DO CAFÉ**

O café é uma das bebidas mais populares do mundo, portanto traz consigo um grande peso econômico e ambiental. E o Brasil se destaca neste cenário por ser o maior produtor mundial de café (produção em grãos). Apresenta uma área plantada de 2,16 milhões de hectares; desse total 316,6 mil hectares (14,7%) estão em formação e 1,84 milhão de hectares (85,3%) em produção (CONAB, 2019). Portanto a tendência é que ocorra ainda um aumento adicional da produção de café no país nos próximos anos. Deve se destacar que a safra de 2020 foi considerada recorde dentro da série histórica do grão. Considerando os 8 primeiros meses do ano cafeeiro (outubro/2020 – maio/2021) as exportações aumentaram 2.2% se comparado ao mesmo período do último ano (2019/2020).

A América do Sul é o continente que possui a maior produção de café, com aproximadamente 48% da produção mundial, seguida pela Ásia com uma contribuição de 27,7%, África com 11%, América Central com 9,9%, América do Norte, 2,5% e Oceania 0,5% (ICO, 2020). A Figura 2.4 mostra as quantidades produzidas por continentes nos anos de 2009/10, 2014/15 e 2018/19, onde pode ser visualizado o crescimento da produção na maior parte dos continentes, especialmente na América do Sul e um declínio na produção da Oceania, nesta última safra.

Com a safra de 2020, foi indicada uma produção total no Brasil 63,08 milhões de sacas (CONAB, 2021), alcançando a maior produção já vista no país, devido à presença da bialidade positiva. A bialidade é caracterizada pela não continuidade na alta produtividade da colheita, ou seja, pela alternância anual de altas e baixas produtividades, sendo comumente atribuída à diminuição das reservas de nutrientes das plantas em anos de safra com altas produtividades. Como exemplo, o ano de 2021 apresentou uma safra menor que 2020, mas no ano de 2022, a safra será maior que a safra do ano de 2021. De acordo com Pereira et al., 2011, a magnitude da bialidade

pode ser calculada ao subtrair-se a média da produção dos anos de baixa produção da média dos anos de alta; sempre com o uso de um número par de anos.

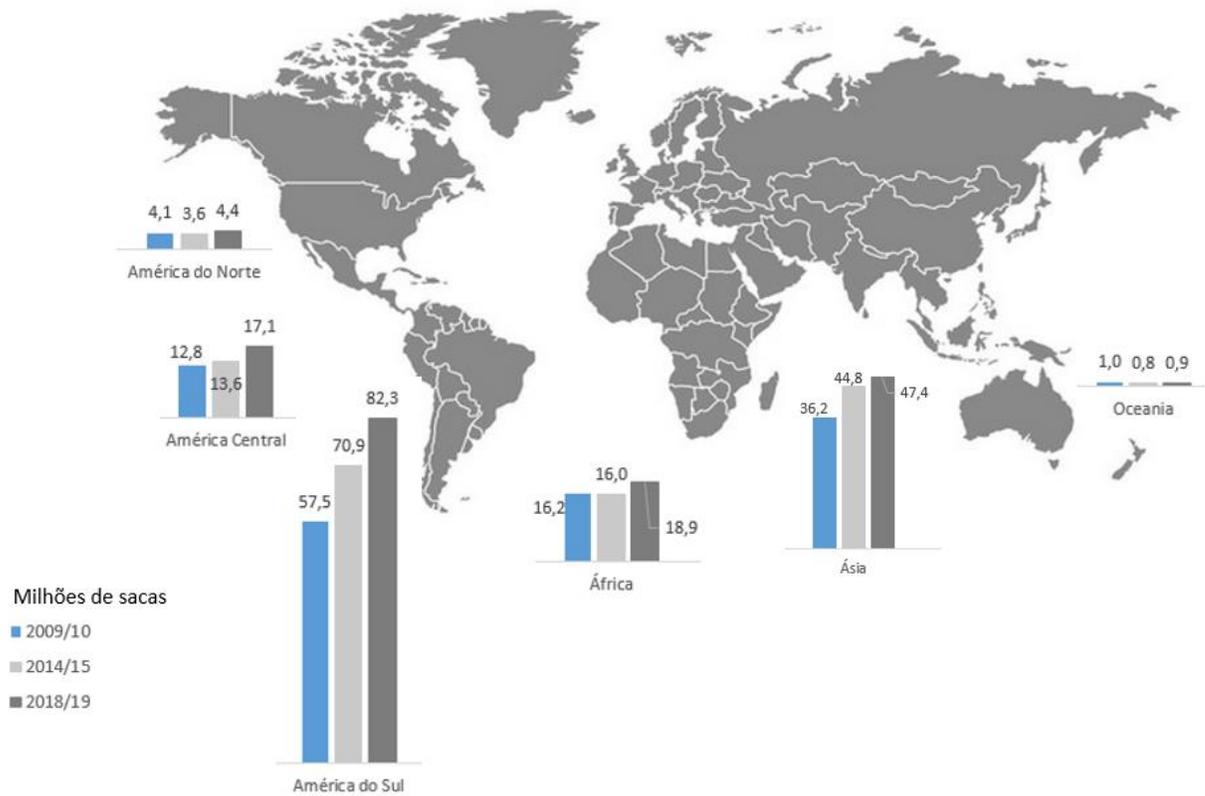


Figura 2.4 Milhões de sacas produzidas por continente.  
Fonte: ICO, 2020.

Como mostrado na Tabela 2.3 o Estado de Minas Gerais é o maior produtor de café com uma participação de 54,9% e seguido pelo Espírito Santo apresentando 22,1% da produção. A produção nos demais Estados é representativamente menor, como pode ser visto na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Participação relativa dos Estados na produção Brasileira.

Posição	Estado	Produção (toneladas)	Produção (mil sacas)	Participação %
1°	Minas Gerais	2.078.826	34.647	54,9%
2°	Espírito Santo	837.480	13.958	22,1%
3°	São Paulo	370.842	6.181	9,8%
4°	Bahia	239.202	3.987	6,3%
5°	Rondônia	146.694	2.445	3,9%
	Demais Estados	111.630	1.861	2,9%
	<b>Produção Total</b>	<b>3.784.674</b>	<b>63.077,90</b>	<b>100</b>

Fonte: CONAB 2021

No Estado de Minas Gerais, as regiões Sul e Centro-Oeste juntas produzem 55,3% contrapondo-se às regiões Norte, Jequitinhonha e Mucuri, que produzem apenas 2% de todo o escoamento de café do Estado. A Tabela 2.4 apresenta a produção dentro do Estado mineiro.

A Tabela 2.5 apresenta um resumo dos maiores exportadores, importadores e consumidores do grão do café, com a participação destes. Estes dados, em porcentagens, foram obtidos em 2021, com base na safra de 2020.

Tabela 2.4 Participação relativa das regiões produtoras de café do Estado de Minas Gerais.

Posição	Região	Produção (toneladas)	Produção (mil sacas)	Participação %
1º	Sul e Centro-Oeste	1.149.132	19.152	55,3%
2º	Triângulo, Alto Paranaíba e Noroeste	360.048	6.001	17,3%
3º	Zona da Mata, Rio Doce e Central	527.460	8.791	25,4%
4º	Norte, Jequitinhonha e Mucuri	42.186	703	2,0%
<b>Produção Total</b>		<b>2.078.826</b>	<b>34.647</b>	<b>100</b>

Fonte: CONAB 2021

Tabela 2.5 Ranking dos países na exportação, importação e consumo do grão de café.

Posição	Exportação		Importação		Consumo*	
<b>1</b>	Brasil	28,8%	União Européia	36,9%	União Européia	28,3%
<b>2</b>	Vietnã	19,7%	Estados Unidos	20,1%	Estados Unidos	16,0%
<b>3</b>	Colômbia	9,7%	Japão	6,4%	Brasil	14,2%
<b>4</b>	Indonésia	4,5%	Filipinas	4,7%	Japão	5,1%
<b>5</b>	Honduras	4,9%	Canadá	3,6%	Filipinas	3,8%
<b>6</b>	Índia	4%	Rússia	3,4%	Canadá	2,9%
<b>7</b>	Peru	3,1%	China	2,0%	Indonésia	2,6%
<b>8</b>	Etiópia	2,9%	Coreia do Sul	2,0%	Rússia	2,7%
<b>9</b>	Uganda	3,3%	Suíça	2,0%	Vietnã	1,8%
<b>10</b>	Outros (34)**	19,1%	Outros (34)**	18,9%	Outros(55)**	22,6%

\* Consumo com base no consumo doméstico

\*\* Quantidade de países incluídos em "Outros"

Fonte: Adaptado de SEAPAMG 2021

O café tem sido objeto de estudos em diversas áreas, por possuir efeito estimulante, presente nas bebidas mais consumidas no mundo, e ainda este produto possui resíduos que podem ser matéria prima para produção de carvão, para a indústria de alimentos, farmacêutica, cosméticos, adsorventes, fertilizantes, suplemento para alimentação animal, e podendo também, ser utilizado como combustível em caldeiras acopladas a secadores mecânicos (DURÁN et al., 2017; FRANCA e OLIVEIRA 2009).

O café para seu consumo como bebida é obtido pelo processamento dos grãos, de um número limitado de espécies da família *Rubiaceae* gênero *Coffea*. De acordo com Esteves (2006), existem mais de 100 espécies de cultivares cafeeiros, porém apenas duas representam importância econômica, *coffea arabica* (café arábica) e *coffea canéfora pierre* (café robusta ou conilon).

Conforme a Conab (2019), o café arábica representa mais de 70% da produção total de café do país. O mesmo é mais popular que o café robusta no mercado global, por produzir uma bebida fina, de maior qualidade, devido seu sabor doce, suave e aroma, características que são conhecidas em todos os países tradicionalmente produtores de café (FAZUOLI et al., 1999; PHROMMARAT, 2019). Entretanto, se comparado à variedade robusta, o café arábica apresenta metade do conteúdo de cafeína, além de sua produção exigir maior custo (DAMATA et al., 2008) e ainda ser mais suscetível a bienalidade. As variedades mais comuns no estado de Minas Gerais, como “Catuaí” e “Mundo Novo” são pertencentes à variedade arábica.

Entre os fatores que influenciam na qualidade do café, além da genética (teor de cafeína, adaptabilidade), estão os fatores ambientais e nutricionais da planta, o manejo da lavoura (práticas agronômicas e sustentáveis), a colheita em períodos corretos, e não menos importante, o adequado preparo.

Cada planta de uma lavoura de café produz centenas de grãos que são os frutos, chamados de cerejas. O fruto é formado pelo grão (endosperma + embrião), película prateada (epiderme), mesocarpo (polpa ou mucilagem), pergaminho (endocarpo) e, pela casca externa (exocarpo). A Figura 2.5 apresenta a estrutura típica do grão do café.

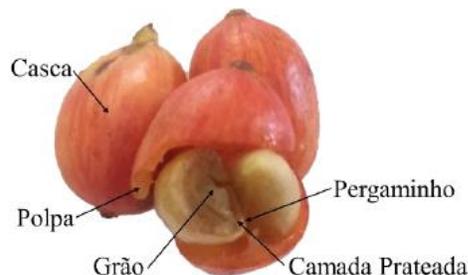


Figura 2.5 Representação da estrutura do fruto do café.  
Fonte: Dal-bo 2016.

A produção do café é constituída por uma fase agrícola e uma fase industrial, onde se tem respectivamente, a obtenção das sementes (matéria prima) e o tratamento destas para obter o produto final desejado (torrefação e embalagem).

A primeira etapa se inicia com a plantação de sementes em viveiros. Nesta etapa são escolhidas as plantas que irão compor as lavouras, ou seja, ocorre a escolha da espécie a ser cultivada. Posteriormente, ocorre a transferência das mudas para o solo, com posterior manejo do cafeeiro. A colheita ocorre uma vez a cada ano, sendo importante a definição do período exato para colheita de frutos com completa maturação.

A colheita pode ser feita, de modo geral, de duas formas: seletiva, ou não seletiva; podendo ser seletiva manual, não seletiva manual e não seletiva mecânica, esta última executada por meio de máquinas que promovem a derriça e recolhimento mecânico do café. Após a colheita é feita a limpeza do café, ou a separação das impurezas (folhas, galhos e outros) onde pode ser realizada a lavagem destes grãos ou não. O beneficiamento pode ser via úmida ou seca:

a) Via Seca: Trata-se do método mais utilizado no Brasil. Imediatamente após a colheita o fruto irá na sua forma íntegra para a secagem, em terreiros abertos, ou em secadores mecânicos. A secagem em terreiros ocorre com a exposição da semente à luz solar e este período pode variar de 8 a 30 dias, variando com o tipo do café, tipo do terreiro e condições climáticas. Este processo produz o café natural com diferentes características a partir dos diferentes graus de maturação do fruto. Após a secagem, ocorre a classificação ou beneficiamento, onde ocorre a limpeza e remoção de grãos defeituosos.

b) Via Úmida: Consiste na remoção mecânica da casca e despulpamento do café cereja após a lavagem e separação. Obtêm-se como produto o grão chamado “cereja descascado ou despulpado”. Após a remoção da casca, dá-se a remoção do mesocarpo do fruto por meio da fermentação controlada. Requer um volume considerável de água para este processo. Os grãos descascados são submetidos à secagem em terreiros ou em secadores mecânicos. Portanto, no beneficiamento via úmida, a secagem ocorre após o beneficiamento, ao contrário do método a seco, onde a secagem ocorre antes.

A fase de secagem consiste na desidratação do grão. Nesta fase também é importante a homogeneização do lote. Segundo Franca e Oliveira (2009), a casca do café obtida pelo processamento via seca, possui umidade entre 7% e 18%, já a casca obtida pela via úmida apresenta aproximadamente 75% de umidade. Após a secagem, e consequente eliminação dos componentes do fruto (polpa e casca) com a classificação, obtêm-se o chamado café natural, que será embalado em sacas de 60 kg e armazenado até a finalização dos lotes para subsequente transporte e entrega para as empresas distribuidoras ou a exportação a outros países.

A partir desta etapa, o café segue para a fase de beneficiamento direcionado conforme o tipo da bebida a ser preparada (café em cápsulas, em filtro, em embalagens diversas, etc). Então será transportado para torrefação, moagem e embalagem, de acordo com o seu uso final. O tipo de embalagem e o preparo a ser empregado depende do produto a ser consumido. Há variadas formas da bebida e estas variações dependem da cultura, tecnologia e tradição do local. Deve ser considerado que os diferentes tipos de bebidas causam impactos ambientais em diferentes proporções.

No Brasil, cerca de 75% do café é processado pelo método “via seca”, sendo que, para cada tonelada de grãos produzida, em média, uma tonelada de cascas é gerada (SILVA, 2012). Os principais subprodutos sólidos oriundos do cultivo e da preparação da bebida são: subprodutos do cultivo (cereja), os subprodutos do processamento (casca, polpa, película prateada), a borra (obtida após a preparação da bebida quente ou fria) e ainda, em menor quantidade, folhas e grãos defeituosos obtidos na colheita (BLINOVÁ et al., 2017; CRUZ, 2014). Para os casos do beneficiamento via úmida, há ainda, a água residuária como subproduto.

As Figuras 2.6 e 2.7 apresentam respectivamente, o fluxograma do beneficiamento (via seca e via úmida) para obtenção do grão, após a colheita e um fluxograma com o resumo das principais etapas no ciclo de vida do café.

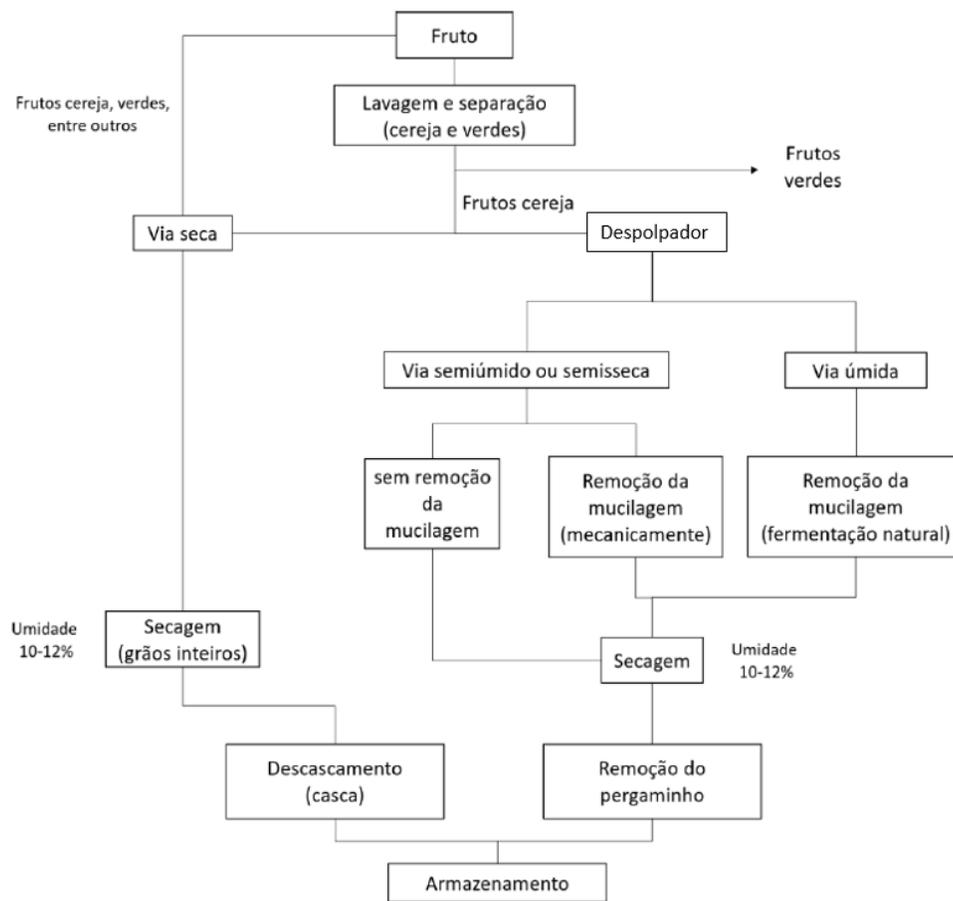


Figura 2.6 Fluxograma do processamento pós-colheita do café.  
 Fonte: Durán et al., 2017.

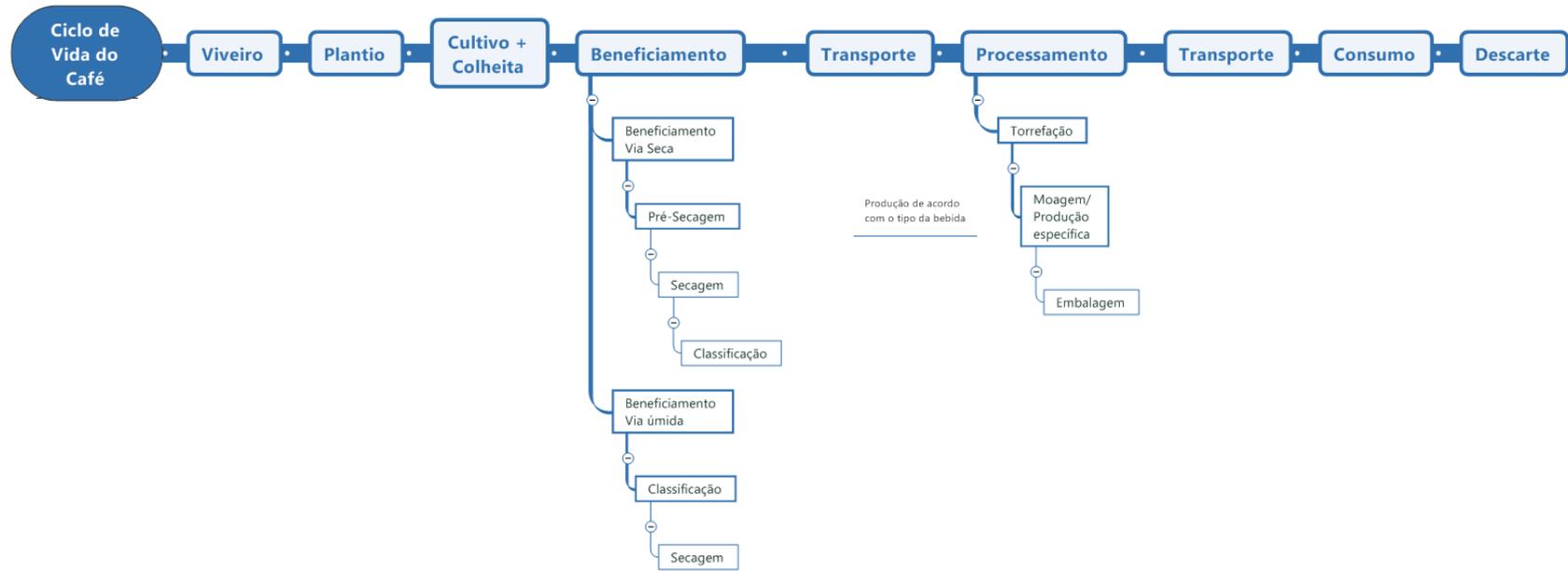


Figura 2.7 Fluxograma do ciclo de vida do café.

### 2.2.1 Adubação Orgânica

Fertilizantes ou adubos são compostos que contém um ou mais nutrientes necessários para as plantas, na forma disponível direta, ou na forma de ser ainda disponibilizado para o solo no decorrer do tempo (FURTINI et al., 2001). A prática do uso de fertilizantes orgânicos, que são resíduos animais ou vegetais, é denominada adubação orgânica.

A matéria orgânica desde que utilizada de forma equilibrada e balanceada, atentando ao seu conteúdo e ao seu preço final, pode substituir a adubação química. Essa substituição ocorrerá, pois, os fertilizantes minerais na sua maioria, são compostos basicamente por: nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Entretanto, o recomendado é a prática da associação, do fertilizante mineral com o orgânico, uma vez que o fertilizante orgânico sozinho poderia não ser suficiente para as modificações por vezes necessárias do solo e juntos podem potencializar a eficiência da adubação (CHAVES, 2002; MALTA et al., 2007).

A adubação constitui-se um dos tratos culturais mais importantes para o aumento e manutenção da produtividade e qualidade do cafeeiro. Por isso a adubação possui uma parcela significativa de gastos para os cafeicultores. E a utilização do adubo orgânico, proveniente do resíduo do processo de beneficiamento do café trará uma economia no custo de manejo do cafezal, além de redução das emissões e impactos causados pelo uso e produção de fertilizantes químicos.

Os nutrientes no composto orgânico, com exceção do potássio, encontram-se na forma orgânica, ou seja, necessitam da decomposição da matéria orgânica para a sua transformação na forma mineral. Esse processo denomina-se mineralização. Estes nutrientes precisam estar na forma mineralizada para serem então lentamente absorvidos pelo solo. A concentração de nutrientes irá depender da espécie da planta, da sua idade e do solo onde se desenvolveu.

Os fertilizantes orgânicos são caracterizados pela quantidade de água, pelos teores totais de nutrientes e pela relação C/N, devido sua importância na mineralização. Estes são considerados como condicionadores, pois promovem a melhoria em atributos do solo. Conforme Furtini et al., 2001 e Chaves, 2002 são listadas abaixo algumas características dos fertilizantes orgânicos:

- ✓ Ação tamponante do solo, no controle da acidez;
- ✓ Aumento no teor de CO<sub>2</sub>, e conseqüentemente aumento da fotossíntese nos solos adensados e aumento da acidificação de solos alcalinos;

- ✓ Maior disponibilidade de nutrientes (como fósforo);
- ✓ Melhora a estruturação do solo promovendo aeração;
- ✓ Aumento na capacidade de retenção de água, melhorando a umidade do solo;
- ✓ Aumenta a atividade e diversidade microbiana do solo;
- ✓ Maior estabilização da temperatura do solo;
- ✓ Maior agregação do solo;
- ✓ Maior retenção dos nutrientes aplicados ao solo, através dos fertilizantes;
- ✓ Complexar o alumínio com redução das formas tóxicas no solo, entre outras.

## 2.3 CASCA COMO INSUMO ENERGÉTICO

A Figura 2.8 mostra as duas opções de resíduos obtidos após a colheita do fruto do café, sendo este a casca úmida despulpada (resultado do beneficiamento via úmido) e a casca seca (resultado do beneficiamento via seca). A Figura 2.8 deixa claro que no beneficiamento via úmida o grão passará primeiramente para o despulpamento e posterior secagem e no beneficiamento via seca, o grão vai para a secagem e posteriormente para o beneficiamento. Ambos os grãos, oriundos dos dois tipos de beneficiamento, após a secagem estarão adequados para o armazenamento. Deve ser ressaltado que no Brasil, 75% do café produzido é beneficiado por via seca.

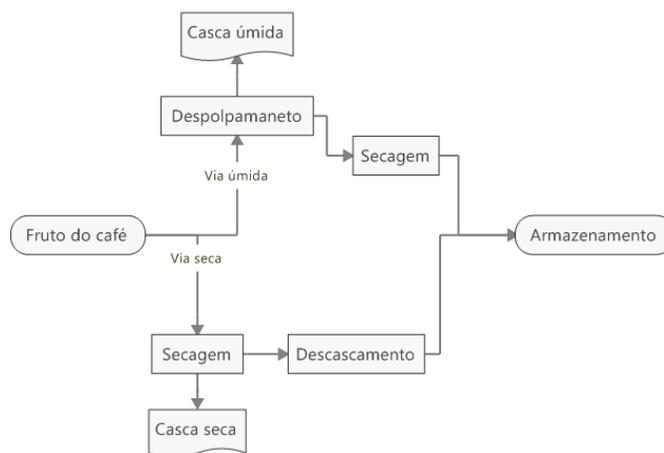


Figura 2.8 Opções de obtenção da casca por meio dos dois tipos de beneficiamento do café.  
Fonte: Dal-Bó 2016

A biomassa de resíduos agropecuários pode ser considerada uma fonte de energia significativa, pois a energia armazenada é o dobro do produto colhido nas lavouras e contém ainda cerca de quatro vezes a energia requerida para as atividades de obtenção dos principais cereais ou sementes oleaginosas. Os resíduos agrícolas são aqueles provenientes da colheita de lavouras e dos processos relacionados ao cultivo. Estes possuem um poder calorífico médio de 15,7 MJ/kg da matéria seca. (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Conforme Quirino (2003), são considerados como resíduos lignocelulósicos aqueles que possuem lignina e celulose em sua composição e são, predominantemente de origem vegetal como resíduos provenientes da madeira e outros que são obtidos de cultivares agrícolas, como o caso da casca do café. De forma geral, a biomassa apresenta uma composição de celulose (40-60%), hemicelulose (15-50%) e lignina (10-30%), conforme a planta e sua idade (LORA et al., 2012a). A biomassa lignocelulósica é considerada a mais promissora fonte renovável de fornecimento alternativa das cadeias de bioprodutos (VAZ, 2015).

O processamento do café seco, gera em torno de 45% a 50% de resíduos, no caso, a casca do café que na maioria das vezes são descartadas de forma inadequada, sendo deixados à céu-aberto no local de sua produção. Portanto, uma tonelada de grãos maduros gera em média, 50% de grão limpo e 50% de casca e polpa, após seu beneficiamento (COMÉRIO et al., 2016; SAITER 2008). Logo, o aproveitamento desse resíduo se constitui em uma alternativa importante e necessária.

Considerando o poder energético deste resíduo, o mesmo pode ser utilizado como combustível alternativo nos secadores de café, o que torna a casca do café uma excelente opção também para substituir parcialmente o carvão vegetal utilizado nos secadores de café (SAITER 2008). A casca ainda é utilizada como adubo sendo colocada diretamente no solo após a safra, devido grande quantidade de potássio (OLIVEIRA et al., 2013).

Orsini (2012), encontrou valores de 23,64 MJ/kg e 22,70 MJ/kg para o poder calorífico superior da casca do café na base seca, com base na análise imediata, materiais voláteis (MV) e carbono fixo (CF), respectivamente. Orsini (2012), comparou com outras biomassas, como o caso do bagaço da cana (17,33 MJ/kg), a casca de coco (19,04 MJ/kg), pínus (20,02 MJ/kg), entre outras e verificou que a casca do café é um bom combustível a ser utilizado, não apenas na fomalha dos secadores, ou adubo orgânico, como já ocorre, mas também com o objetivo de gerar energia elétrica em locais onde a produção seja significativa.

Saenger et al., 2001, realizaram um estudo sobre a combustão da casca do café e concluíram que este resíduo apresenta um alto teor de matéria volátil e baixo conteúdo de carbono fixo e cinzas. Os autores ainda alertaram para a rápida devolatilização, o que requer um sistema de queima para esta biomassa, que evite altas temperaturas próximas ao ponto de alimentação, e garanta distribuição uniforme do aquecimento. A casca do café apresenta baixa temperatura de fusão das cinzas durante a combustão, devido seu elevado teor de  $K_2O$  o que pode gerar alto custo de operação devido os problemas de incrustação, aglomeração, corrosão e outros.

A casca do café possui baixa densidade, o que pode acarretar também altos custos com transporte e armazenamento. Por possuir frágil composição, não é recomendado seu transporte por longas distancias, sendo adequada uma utilização no local ou próximo à área de produção.

Vale (2007) fez a caracterização energética da casca do café para posterior estudo da carbonização e verificou que o poder calorífico superior e inferior foi respectivamente, 3.933 kcal/kg ou 16,43 MJ/kg e 3.040 kcal/kg ou 12,71 MJ/kg. O autor destaca que o poder calorífico superior da casca do café é maior quando comparada a outros resíduos como casca de semente de algodão (11,70 MJ/kg), palha de arroz (14,63 MJ/kg) e sabugo de milho (12,12 MJ/kg).

Protásio et al., 2013, ao analisarem o potencial energético da madeira do eucalyptus, cedro australiano e pinus junto aos resíduos agrícolas como casca de arroz, bagaço de cana de açúcar, casca de café e resíduos do cultivo do milho, verificam que a casca do café apresentava maior densidade energética entre os materiais estudados. Portanto, é necessária uma adequada escolha do processo de conversão da biomassa a ser utilizada, de forma a aumentar a densidade deste recurso.

Os taninos, presentes na constituição da casca de café apresentam natureza tóxica, portanto, além de contribuir para problemas ambientais, ainda requer cuidado quanto a sua aplicação para ração animal (não podendo apresentar porcentagem superior a 10%). Já a cafeína é a substancia principal que confere ao café o fator estimulante. Este se encontra em uma concentração de 1,3% em base seca na casca ou na polpa (PANDEY et al., 2000).

A casca de café apresenta um teor de umidade médio de 13%, pois entende-se que neste ponto o grão de café já passou pela etapa da secagem, portanto reduziu a quantidade de água presente no grão. A Tabela 2.6 mostra a composição química das cascas em base seca.

Tabela 2.6 Composição química das cascas de café.

<b>Composição química das cascas de café (% em base seca)</b>		
	<b>Casca de café</b>	<b>Casca de café úmido</b>
Proteína	8 a 11	9 a 10
Lipídios	0.5 a 3	0.7 a 1.2
Minerais	3 a 7	5 a 6
Carboidratos	58 a 85	83 a 85
Celulose	43	16 a 25
Hemicelulose	7	9 a 11
Lignina	9	6 a 10
Cafeína	1	0.6
Taninos	5	0.8 a 1.2

Fonte: Franca e Oliveira 2009

A composição das cinzas, bem como sua quantidade presente na casca de café, é apresentada na Tabela 2.7, na qual verifica-se que os maiores constituintes da cinza da casca do café são o óxido de potássio ( $K_2O$ ), dióxido de silício ( $SiO_2$ ) e  $CaO$ , constituindo estes três compostos uma parcela de 80,15%. Logo, as cinzas além de serem livres de metais tóxicos, ainda possuem substâncias químicas fundamentais e que podem auxiliar a repor os nutrientes do solo.

Tabela 2.7 Composição das cinzas da casca de café.

<b>Conteúdo médio de umidade</b>	13%
<b>Conteúdo aproximado de Cinzas</b>	8 - 10%
<b>Composição das cinzas</b>	
$SiO_2$	14,65
$CaO$	13,05
$K_2O$	52,45
$P_2O_5$	4,94
$Al_2O_3$	7,07
$MgO$	4,32
$Fe_2O_3$	2,06
$SO_3$	0,53
$Na_2O$	0,66
$TiO_2$	0,27
$CO_2$ /outras substâncias	0

Fonte: Vassilev et al., 2010

## 2.4 BIOMASSA E ROTAS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA

Considerando a evolução temporal, existem dois momentos de intenso acréscimo no uso da biomassa, sendo um em 1973, devido à forte elevação dos preços do petróleo e o outro momento que se iniciou na década de 1990, quando a questão ambiental passou a ser foco de discussões em fóruns mundiais e tornou-se preocupação definitiva do setor energético.

A biomassa chamada tradicional é oriunda de processos não sustentáveis e a biomassa moderna é produzida em conformidade com os princípios do desenvolvimento sustentável. A utilização da biomassa como fonte energética ocorre desde a antiguidade, principalmente para a biomassa tradicional, a madeira, contudo a utilização da biomassa moderna tem experimentado notável crescimento. O uso da biomassa moderna também se apresenta como forma de elevar a modernização da propriedade, região e/ou sociedade (LORA e ANDRADE, 2009).

Nogueira e Lora (2003) apresentam uma correlação para o uso da biomassa e o grau de desenvolvimento do país. Os países que utilizam intensamente a biomassa para uso doméstico de subsistência são geralmente países de baixo desenvolvimento e países que utilizam intensivamente a energia de origem fóssil são majoritariamente países de alto e médio desenvolvimento. Há também países de alto desenvolvimento que utilizam mais a bioenergia por questões de incentivo como Suécia e Noruega e países de médio e alto desenvolvimento que utilizam intensivamente a biomassa por meio do uso de resíduos agroindustriais para aplicações energéticas, como é o caso do Brasil, Chile, Cuba, entre outros.

Segundo Demirbas et al., 2009, o potencial e rendimento da biomassa é médio para países temperados e alto para países tropicais e subtropicais. O potencial da produção de biomassa varia de um país para o outro, em função das condições climáticas, da cultura do país, do relevo, etc. Este recurso energético apresenta acentuado potencial de crescimento e uso devido à grande disponibilidade de biomassa existente e sua continuada geração. No Brasil, especialmente, devido à grande utilização ainda da fonte hidráulica na matriz energética, e por ser um país agroindustrial, há um considerável potencial de crescimento do uso da biomassa.

Outro aspecto a ser considerado para a biomassa é que esta, pode ser uma fonte de energia capaz de facilitar e potencializar o desenvolvimento de comunidades carentes, de áreas rurais e áreas isoladas da urbanização. Uma característica importante da bioenergia está no seu potencial de contribuição para as questões ambientais. O uso sustentável da biomassa como combustível gera

a mitigação do efeito estufa por meio do sequestro do carbono atmosférico pelas florestas/lavouras e ainda aumenta a independência energética dos combustíveis fósseis e também diversifica a matriz energética. (LÓPEZ GONZÁLEZ et al., 2014; LORA e ANDRADE, 2009).

A biomassa pode ser considerada a matéria orgânica, produto do armazenamento da energia solar que conduz a fotossíntese em compostos químicos. No processamento da biomassa de forma biológica ou química, ocorre a extração da energia armazenada nos compostos químicos e subsequente “produção” da energia combinada com oxigênio, onde o carbono então é oxidado para produção de CO<sub>2</sub> e água.

De acordo com Andrade (2007), a biomassa se destaca diante das outras fontes renováveis pois possui algumas características de combustíveis fósseis, como, a capacidade de ser transportada e armazenada. Ainda pode ser salientado que a biomassa permite o aproveitamento de resíduos de culturas tradicionais.

Algumas desvantagens da utilização de biomassa é que esta é um produto de baixa densidade física e energética e, portanto, ocupam espaço substancial para armazenamento e transporte. Em seu formato natural possui alto teor de umidade necessitando de um pré-aquecimento. Seu conteúdo energético é relativamente baixo, aproximadamente 9304 kJ/kg (ARENAS, 2006). Existem outros questionamentos sobre os impactos negativos da biomassa para os casos onde ocorre a queima direta e para casos onde grande área é dedicada exclusivamente para seu cultivo.

A biomassa pode ser definida ainda como um recurso energético alternativo que compreende toda matéria orgânica, como resíduos agroflorestais, resíduos animais e matéria orgânica proveniente de resíduos industriais, domésticos e municipais. Portanto, plantas como capim elefante, cana de açúcar, eucalipto e resíduos do processamento dos produtos agrícolas como casca de arroz, casca de café, fezes de animais, resíduos orgânicos diversos, gorduras, bagaço, plantas aquáticas e algas, entre outros podem ser consideradas como fonte de biomassa.

Caracteriza-se por conter um baixo teor de carbono, menor que 50%, um alto conteúdo de oxigênio, acima de 44% e um alto conteúdo de voláteis, superior a 85%, sendo estes compostos por hidrocarbonetos (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e hidrogênio (H<sub>2</sub>), também contém resíduos carbonosos e vapor de água (ARENAS, 2006). Demirbas (2004), compara o carvão com diversas biomassas e afirma que a biomassa apresenta menor poder calorífico, densidade, friabilidade, maior

teor de umidade e maior velocidade de queima quando pulverizada, que os carvões e ainda apresenta alta reatividade.

Analisando a potencialidade energética da biomassa vegetal, é importante verificar o percentual de carbono, pois pequenas variações deste pode acarretar em um substancial aumento no poder calorífico. Fazendo a mesma análise para o oxigênio, conforme Huang et al. 2009, o aumento nos teores de oxigênio da biomassa tende a reduzir o seu poder calorífico. Para Brand 2010, quanto mais elevado o teor de cinzas, menor o poder calorífico dos materiais lignocelulósicos. Dessa forma o oxigênio e as cinzas são também importantes fatores na caracterização da biomassa pois podem afetar negativamente o poder calorífico.

A caracterização das principais propriedades e a definição da origem da biomassa são etapas preliminares e fundamentais para a concepção de sistemas de conversão energéticos adequados. A umidade presente na biomassa afeta não apenas a operação do gaseificador, mas também a qualidade do gás produzido (OLIVEIRA et al., 2013).

A biomassa possui características técnicas importantes que devem ser consideradas, pois estas determinam a quantidade de energia disponível no resíduo considerado. São elas: composição química elementar, composição química imediata, umidade e poder calorífico. Abaixo estão simplificada e descritas.

- a) **Composição Química Elementar:** constitui a massa dos principais componentes da biomassa, em porcentagem, em relação a base seca. São os seguintes elementos: carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N) e cinzas.
- b) **Composição Química Imediata:** Relacionada apenas ao carbono fixo, materiais voláteis, cinzas e umidade.
- c) **Umidade:** apresenta-se como a quantidade de água existente na biomassa. É definida pela diferença entre a base úmida e base seca (após a secagem).
- d) **Poder calorífico:** definido pela quantidade de calor liberada através da combustão de uma unidade de massa ou volume de combustível (kJ/kg ou kJ/m<sup>3</sup>).

### 2.4.1 Processos de Conversão da Biomassa

A biomassa precisa passar por diferentes processos para ser amplamente utilizada como fonte de energia (LORA e ANDRADE, 2009). Estes processos transformam a energia química acumulada (carbono e hidrogênio) em combustíveis sólidos, líquidos e gasosos ou em eletricidade.

A conversão energética da biomassa é realizada por meio de processos que podem ser classificados em biológicos, físicos e químicos, ou esses últimos são agrupados em métodos físico-químicos. Simplificadamente, transformam o resíduo existente em energia (BHATIA et al., 2017; SHEN et al., 2019; ZHEN et al., 2017).

Os processos físicos são aqueles que não modificam a estrutura química do recurso, eles alteram somente a parte física, (exemplos: redução granulométrica, densificação e outros). Os processos termoquímicos são aqueles que modificam a estrutura química da biomassa, como combustão, gaseificação, pirólise, liquefação e outros. Os processos biológicos mais conhecidos são a fermentação alcoólica e a digestão anaeróbia (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Variadas rotas de conversão em escala comercial, estão em desenvolvimento, como combustão, transesterificação, gaseificação, hidrogenação, entre outros. A Figura 2.9 apresenta de forma sintética os principais produtos e reagentes dos principais processos de conversão incluindo seus produtos possíveis.

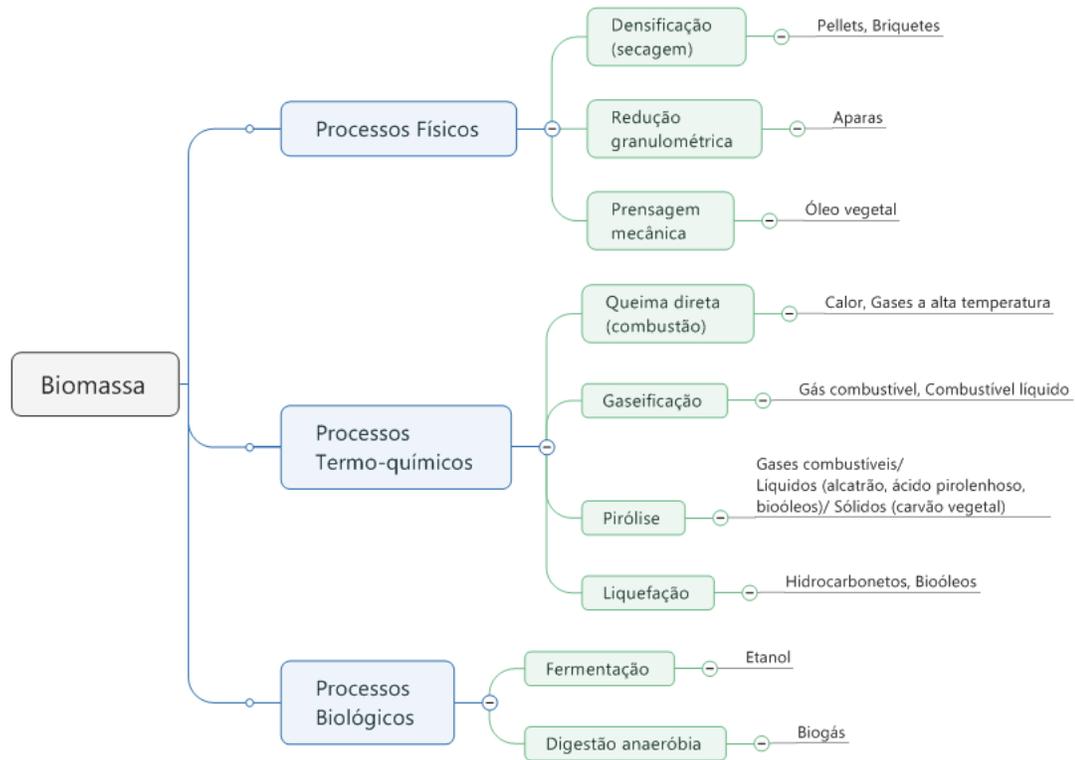


Figura 2.9 Resumo das rotas de aproveitamento energético da biomassa.  
Fonte: Lora e Andrade 2009.

## 2.4.2 Gaseificação da biomassa

A gaseificação pode ser definida como um processo termoquímico no qual o material sólido orgânico (geralmente resíduos como bagaço da cana de açúcar, casca de arroz, casca de café, serragem da madeira, casca de milho e outros) é convertido em um gás combustível, por meio da oxidação em condição de escassez de ar (se comparada à queima estequiométrica), por meio de reações homogêneas e heterogêneas; isto ocorrendo a temperaturas elevadas (800° a 1100° C) e em pressão atmosférica, ou superiores até 33 bar na presença de um agente de gaseificação (ANDRADE, 2007; FARZAD et al., 2016; KUMAR e PAUL, 2019; LORA et al., 2012).

Então, na gaseificação ocorre a oxidação parcial, ou seja, a oxidação incompleta do carbono e do hidrogênio presentes no combustível, produzindo compostos combustíveis como CO, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> e compostos não combustíveis, que podem ser gases comumente encontrados no processo de combustão, como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> (em pequenas quantidades), N<sub>2</sub> e algum hidrocarboneto como eteno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) e ainda carbono fixo, alcatrão e cinzas (BALAT 2009; LORA et al.,

2012,). Para Palacio et al., 2018, a gaseificação produz um gás com composição média entre 15-30% de monóxido de carbono (CO), 12-40% de hidrogênio (H<sub>2</sub>) e 4,5-9% de metano (CH<sub>4</sub>).

Deve-se destacar que a maior parte dos projetos de gaseificação são destinados a geração de energia térmica, ou seja, a geração de calor e a menor parte utilizada para geração de energia elétrica (LORA et al., 2012).

O agente de gaseificação mais frequentemente utilizado é o ar, se comparado aos demais agentes gaseificadores, em razão de ser o mais barato, abundante e também devido à segurança nas instalações. O oxigênio puro não é frequentemente utilizado para gaseificar biomassa, devido seu alto custo (DOHERTY et al., 2009). No processo onde o ar é utilizado como agente, o gás gerado possui poder calorífico baixo, entre 4 a 7 MJ/Nm<sup>3</sup>, e para os casos onde o agente de gaseificação utilizado é O<sub>2</sub> e vapor, o poder calorífico está entre 10 a 18 MJ/Nm<sup>3</sup>, (GOMEZ 1996; SCHUSTER et al., 2001).

Para que ocorra a gaseificação é necessária à presença do agente gaseificante, podendo este ser, ar, vapor de água, oxigênio ou uma mistura destes, em uma quantidade menor à estequiométrica. A Tabela 2.8 apresenta um resumo das principais características de cada agente gaseificante.

Tabela 2.8 Agente de gaseificação e suas características.

<b>Agente Gaseificante</b>	<b>Características</b>
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	Recomendado para obtenção de um gás produzido de alta qualidade; Maior concentração de H <sub>2</sub> e CO com quantidade de alcatrão insignificante; O uso do oxigênio afetará a viabilidade econômica do sistema.
CO <sub>2</sub>	Alta concentração de CO; Alto poder calorífico do gás produzido; Reações envolvidas no processo podem requerer maior tempo para completude.
Vapor	Redução da eficiência térmica do processo; Produz um gás de moderada qualidade.
Ar	Mais econômico agente gaseificante; Produz um gás de baixo poder calorífico; Produz um gás com moderado teor de alcatrão e cinzas.

Fonte: Bisht e Thakur, 2019

De acordo com Dambrosio et al, 2017, a gaseificação envolve vários parâmetros. Os fatores que mais interferem no desempenho do processo de gaseificação são: razão de equivalência, tipo do agente de gaseificação, tempo de residência da biomassa no gaseificador, características

próprias da biomassa (físico-químicos e energéticos) e a utilização ou não de catalizadores (LORA et al., 2012a).

A Figura 2.10 apresenta as etapas do processo de gaseificação da biomassa, onde inicialmente, por meio de reações primárias endotérmicas ocorre a formação de alcatrão, carvão pirolítico, gases e o desprendimento da umidade presente na biomassa. Ocorre simultaneamente, a oxidação de uma parcela da biomassa (o carbono é geralmente oxidado) de modo a elevar a temperatura da reação, para uma temperatura ideal entre 800° e 1200°C gerando a energia suficiente para desencadear a pirólise e conseqüentemente a gaseificação dos produtos gerados na pirólise. O calor gerado na combustão é utilizado para a secagem, pirólise e demais reações endotérmicas (SUSASTRIAWAN et al., 2017).

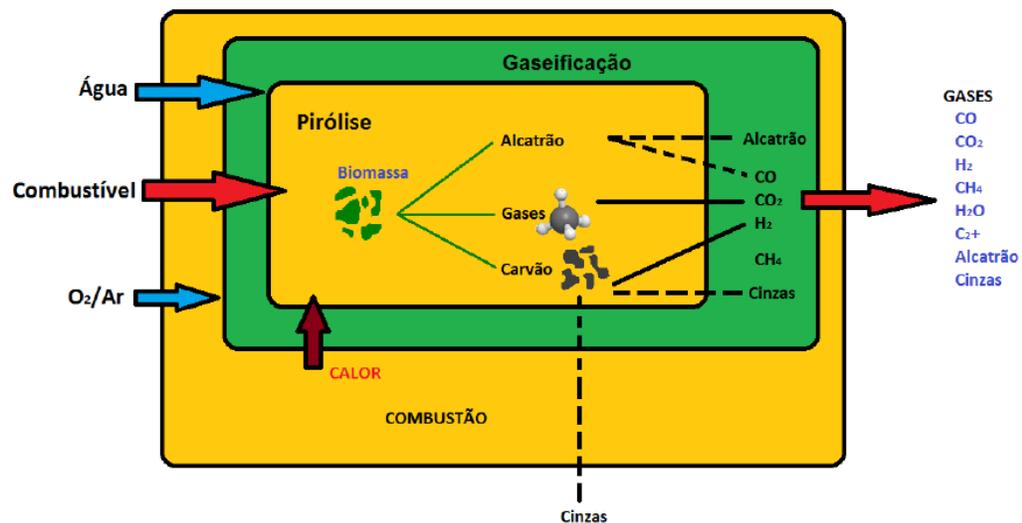


Figura 2.10 Processos de gaseificação da biomassa.  
Fonte: Gómez-Barea e Leckner, apud Ardila 2015.

Conforme Taba (2012), a temperatura de gaseificação influencia diretamente na composição do gás produzido, na concentração de alcatrão, taxa de reação e na aglomeração de cinzas, sendo, portanto, um dos parâmetros mais importantes na gaseificação. Outro parâmetro importante nesse processo é o teor de umidade da biomassa. Alto teor de umidade na matéria-prima reduz a temperatura da reação, e devido a evaporação que ocorre, pode acarretar o aumento do conteúdo de metano, e a redução do conteúdo de hidrogênio no produto gasoso. Assim, gaseificação da biomassa com alto teor de umidade requer maior entrada de energia (ISMAIL et al., 2016).

O produto gasoso obtido da gaseificação de biomassa com ar é um gás pobre, pois possui baixo poder calorífico, em torno de 4-7 MJ/Nm<sup>3</sup>. O maior ou menor poder calorífico gerado no combustível produzido está relacionado com a pressão de operação, o agente de gaseificação e principalmente com as características da biomassa utilizada.

Este gás produto é composto por uma mistura de gases, principalmente de hidrogênio (H<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e pode ser usado para operação de células de combustíveis, para síntese de biocombustíveis e de produtos industriais químicos, para o acionamento de turbinas a gás, fornos de secagem, caldeiras, sendo ainda um importante combustível para geração de eletricidade por meio de combustão direta, onde a produção fica isenta de poluentes atmosféricos como óxidos de enxofre e nitrogênio (SO<sub>x</sub>) e (NO<sub>x</sub>) (LORA et al., 2012; MENDONZA 2009).

Nas aplicações mais usuais da gaseificação, pode-se desconsiderar a formação térmica de NO<sub>x</sub>, pois a temperatura adiabática de chama do gás produto não ultrapassa 1100° C (Jansen et al., 2002). Como a temperatura de operação do gaseificador fica em torno de 800-900° C, reduzem a transformação do NH<sub>3</sub> e HCN do gás de síntese em óxidos de nitrogênio. Na Tabela 2.9 é apresentada a quantidade típica de NH<sub>3</sub> e HCN no gás produto, oriundo da gaseificação.

De forma geral, após a gaseificação espera-se um gás limpo (o quanto possível) com bom poder calorífico. A qualidade requerida do gás de síntese depende de qual é o processo que utiliza este gás como matéria prima. Para análise de qualidade do gás de síntese, são consideradas, quantidades de particulados, álcalis, alcatrão, e outras substâncias, bem como o tipo de reator utilizado no processo, o agente de gaseificação e os parâmetros de operação.

Tabela 2.9 Faixa de concentração de NH<sub>3</sub> e HCN no gás produto

<b>Gaseificador</b>	<b>NH<sub>3</sub> (mg/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>HCN (mg/Nm<sup>3</sup>)</b>
Leito Fixo	600-1800	60-110
Leito Fluidizado Borbulhante	500-1500	50-150
Leito Fluidizado Circulante	750-1500	150-250

Fonte: Jansen et al., 2002

A composição do gás gerado depende de algumas variáveis principais, como condições de operação do reator (temperatura e pressão), características do combustível (tipo, umidade, composição), tipo do reator e do agente oxidante e razão de equivalência (Lora et al., 2008). A razão de equivalência consiste na razão da quantidade de ar pela quantidade de combustível real

(utilizada), pela mesma razão de ar/combustível teoricamente necessária (estequiométrica). Portanto, a razão de equivalência é fundamental para definir o processo que irá ocorrer.

Os contaminantes neste gás são partículas sólidas, hidrocarbonetos condensáveis (alcatrão), compostos sulfúricos, metais alcalinos (primariamente potássio e sódio), cloreto de hidrogênio e nucleídeos radioativos (KOIDO e IWASAKI, 2018). Os níveis de contaminantes dependem da natureza da biomassa e do método de geração do gás, assim como o nível de limpeza necessário também pode ser influenciado substancialmente pela tecnologia de uso final, normas de emissão (WOOLCOCK e BROWN, 2013) e ainda conforme o uso final a ser aplicado.

#### **2.4.2.1 Etapas da Gaseificação**

No processo completo da gaseificação existem reações complexas e que podem ocorrer em uma sequência rápida de aproximadamente 1 segundo quando o tamanho das partículas é granulometricamente adequado de forma que ocorra a rápida transferência de calor (BAIN e BROER, 2011).

Naturalmente a biomassa possui um teor de umidade que necessariamente precisa ser reduzido. A secagem ocorre entre 100 e 200°C para alcançar esta redução da umidade (BASU, 2010). Nesta fase o teor de umidade é reduzido de 20-50%, até menos de 5%. Esta etapa pode ser realizada antes da alimentação no reator (para que a energia presente no reator não seja utilizada para remoção da umidade presente no combustível) ou no próprio reator.

A pirólise ocorre na ausência de agente oxidante no processo e consiste na decomposição térmica rápida da biomassa. As reações podem dar início em temperatura de 225°C e o processo continua progressivamente até a temperatura de 400-500°C. Há então a geração de três classes de produtos, que são as fases sólida, líquida e gasosa, possuindo os seguintes produtos, respectivamente: cinzas e particulados, vapores condensados de alcatrão e ácidos e monóxido de carbono, hidrogênio e nitrogênio. Para Buragohain et al., 2010, nesta etapa a biomassa é reduzida a carvão sólido e a condensação de gases hidrocarbonetos gera alcatrões líquidos.

A matéria volátil da biomassa diminui, produzindo água (originada da decomposição térmica da biomassa), gases não condensáveis depois do resfriamento (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> e hidrocarbonetos leves, principalmente metano) e vapores condensados de alcatrão. Os compostos gerados permanecem reagindo, estando expostos a altas temperaturas. Após a pirólise, o carvão

da biomassa é decomposto em carbono fixo e este reagirá com a  $H_2O$  e  $CO_2$  do agente de gaseificação; o  $CO$  produzido, por sua vez irá reagir com a água formando  $H_2$  (SUN et al., 2019).

Resumidamente, a Figura 2.11 apresenta as etapas que ocorrem no processo completo da gaseificação onde se tem: a secagem; a decomposição térmica (pirólise) subsequente; ocorre então a oxidação de parte do carbono fixo presente no combustível (fonte energética) e craqueamento do alcatrão (destruição térmica das moléculas dos compostos que formam o alcatrão), e reações homogêneas e heterogêneas entre os produtos na redução.

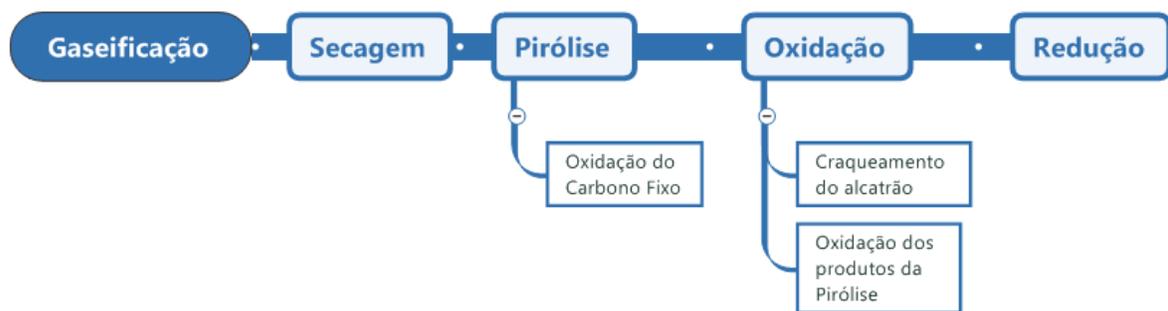


Figura 2.11 Resumo das etapas da gaseificação no gaseificador downdraft.

A Tabela 2.10 apresenta as áreas e as reações que ocorrem dentro nos gaseificadores no processo de gaseificação, incluindo suas respectivas temperaturas e energias de ativação.

Tabela 2.10 Zonas e reações que ocorrem nos gaseificadores.

Área/Zona	Temperatura C	Reações
Secagem	30-65	$H_2O$ (água) $\rightarrow$ $H_2O$ (vapor)
Pré-aquecimento	100-200	-
Devolatilização ou Pirólise	200-600	$C_xH_yO_z \rightarrow$ gases voláteis e alcatrão
Oxidação	1000-1200	$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO + 268 \text{ kJ/gmol}$ $C + O_2 \rightarrow CO_2 + 406 \text{ kJ/gmol}$ $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O + 242 \text{ kJ/gmol}$
Redução (primária)	800-1000	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2 - 131.4 \text{ kJ/gmol}$ $C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2 - 78.7 \text{ kJ/gmol}$ $C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO - 172.6 \text{ kJ/gmol}$ $CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2 + 42 \text{ kJ/gmol}$ $CO + 3H_2O \rightleftharpoons CH_4 + H_2O + 88 \text{ kJ/gmol}$
Redução (secundária)	800-1000	$C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO - 172.6 \text{ kJ/gmol}$ $CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O - 41.2 \text{ kJ/gmol}$ $C + 2H_2 \rightarrow CH_4 + 75 \text{ kJ/gmol}$
Cinzas	<500	-

Fonte: Adaptado de Buragohain et al., 2010.

### 2.4.3 Tipos de Gaseificadores

O gaseificador é o reator no qual ocorre a conversão termoquímica da biomassa em gás (LORA, et al., 2012). A classificação dos gaseificadores depende do tipo de construção, dos parâmetros de operação, como poder calorífico do gás produzido, tipo do agente gaseificador, pressão de trabalho e ainda tipo e forma da biomassa. Mas a classificação mais utilizada é pela direção de movimento relativo entre a biomassa e o agente de gaseificação (Sánchez, 2010).

Os reatores empregados em unidades industriais de grande porte são geralmente de Leito Fluidizado e os empregados nas unidades de médio e pequeno porte são os de Leito Fixo. O reator de leito fixo é o mais antigo e o mais utilizado, podendo ser cocorrente, contracorrente, ou de fluxo cruzado, de acordo com o caminho do fluxo do agente e da biomassa. Os reatores de leito fixo (contracorrente e cocorrente) e leito fluidizado são os mais utilizados.

#### 2.4.3.1 Leito Fixo Contracorrente

Neste reator a alimentação com a biomassa é realizada pela parte superior enquanto o agente gaseificador é fornecido na base do equipamento, ou seja, as direções de fluxo são opostas e a extração do gás é feita também pela parte superior do equipamento. O que confere uma conformação mais simples que os demais, sendo esta sua principal característica (SÁNCHEZ, 2010). Uma vantagem deste tipo de reator é que o tamanho, a forma e a umidade da partícula não interferem diretamente na eficiência do processo como ocorre no reator cocorrente.

Devido a sua formatação, possuem alta eficiência térmica, pois os gases quentes provenientes da região de combustão permitem o pré-aquecimento da carga de combustível inserido. Deve-se atentar para o projeto da grelha, nestes tipos de equipamentos, uma vez que estas necessariamente suportam a região de combustão, onde ocorrem elevadas temperaturas (ANDRADE, 2007; LORA et al., 2008).

A Figura 2.12 mostra a configuração deste reator, onde a oxidação ocorrerá na sua base e os gases de altas temperaturas passam pela região de redução e posteriormente, para a região de pirólise. Conforme Lora et al. (2008), na região de pirólise ocorre a formação de voláteis que contém alcatrão e que não passarão pelo craqueamento na combustão, portanto o gás gerado possui

baixa qualidade (alto teor de alcatrões), podendo conter de 20 a 100 g/Nm<sup>3</sup> de alcatrão. Devido à grande quantidade de alcatrão presente no gás gerado com o reator contracorrente, deve haver uma prévia e eficiente limpeza e condicionamento do gás, o que pode impedir a utilização desse gás em motor de combustão interna e limitar o uso desse gás, principalmente à queima direta em fornos e caldeiras.

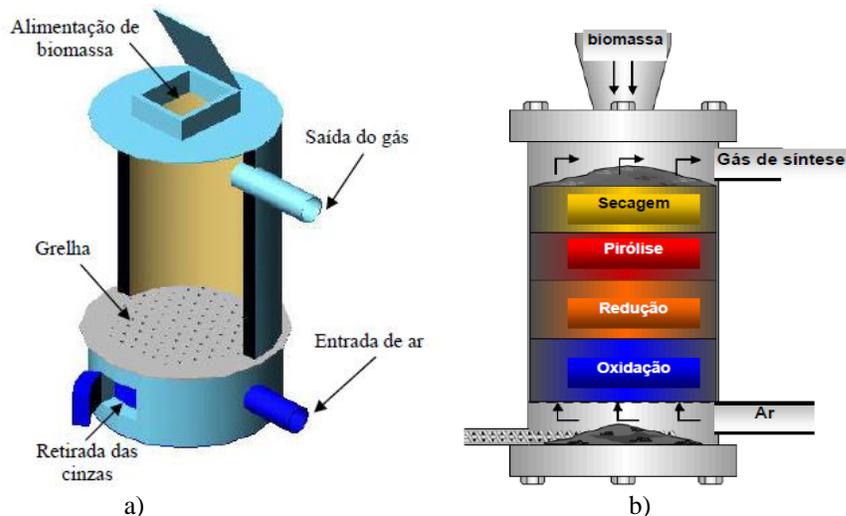


Figura 2.12 Esquema de um gaseificador contracorrente.  
Fonte: a) Andrade, 2007 b) Olofsson et al., 2005

### 2.4.3.2 Leito Fixo Cocorrente

O gaseificador de leito fixo cocorrente é o mais difundido para geração de potência mecânica e foi o mais utilizado inclusive em veículos (ANDRADE, 2007; SÁNCHEZ, 2010). Neste reator, a alimentação com a biomassa é feita pela parte superior formando um fluxo paralelo com o agente de gaseificação também inserido pela parte superior ou lateral do reator e a extração do gás é feita pela base.

As regiões em que se processam as reações são bem definidas. O combustível primeiramente passa pela secagem, segue para pirólise e posteriormente para regiões de combustão e finalizando com a redução. Logo, o alcatrão é direcionado para a região de combustão (com altas temperaturas), o que possibilitará o seu craqueamento. O alcatrão é então, convertido em um composto de menor peso molecular e em coque, e a mistura do gás na saída é praticamente livre de alcatrão. O teor de alcatrão presente no gás, em condições operacionais adequadas fica entre 0,1 e 1,2 g/Nm<sup>3</sup> (LORA et al., 2008). Ao gerar um gás com pouca quantidade de alcatrão, este processo

exige menor esforço para a limpeza do gás. Entretanto essa formatação requer um combustível com baixo teor de umidade.

Conforme Ardila (2015), o reator tipo dowdraft é preferido, em relação ao updraft para casos de queima em motor de combustão interna. A Figura 2.13 apresenta a conformação do gaseificador cocorrente com os itens mecânicos importantes para visualização e as respectivas áreas em que ocorrem as reações.

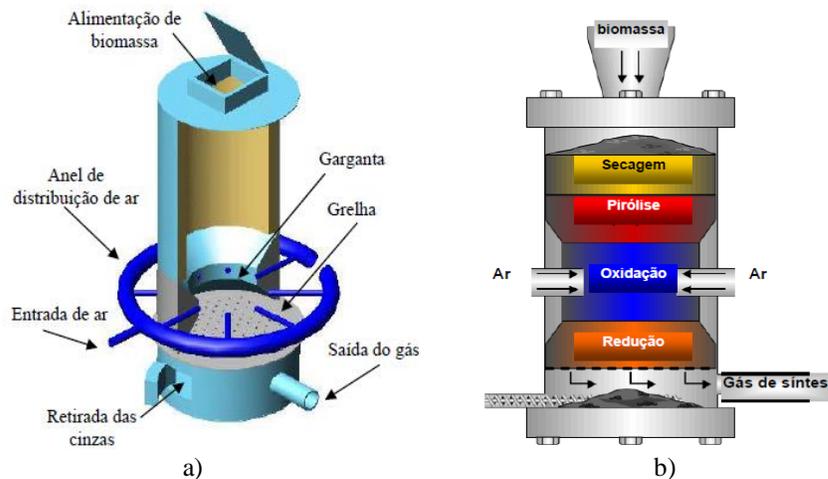


Figura 2.13 Esquema de um gaseificador cocorrente.  
Fonte: a) Andrade, 2007 b) Olofsson et al., 2005

Uma singularidade dos gaseificadores cocorrentes está na presença da uma redução no diâmetro interno da região de combustão, também denominada “garganta”, o que permite uma distribuição homogênea e adequada da temperatura nesta região, favorecendo o craqueamento do alcatrão. É na garganta que são colocados os injetores de ar. Na ausência desse estrangulamento pode ocorrer a compactação da biomassa em algumas regiões e conseqüentemente, o agente de gaseificação cria caminhos ou desvio dos obstáculos, dificultando e debilitando o processo de gaseificação. Entretanto a garganta limita a capacidade do gaseificador, devido a distância entre as entradas de ar, pois a temperatura é máxima na entrada de ar e vai diminuindo com a distância (ANDRADE, 2007; SÁNCHEZ, 2010).

### 2.4.3.3 Gaseificador de fluxo cruzado

No gaseificador de leito cruzado a alimentação é feita pela parte superior do reator e o agente de gaseificação é introduzido no sistema pelas laterais. Este reator apresenta uma conformação simples. Produz um gás de baixa qualidade contendo grande quantidade de voláteis, somado ao baixo poder calorífico e baixa estabilidade.

O gás combustível gerado possui características intermediárias entre os gaseificadores contracorrente e cocorrente (Lora et al., 2008). Necessita de maior quantidade do agente de gaseificação, se comparado aos demais reatores e por isso há uma região de combustão com temperaturas significativamente altas e conseqüentemente as reações se processam com maior velocidade com rápida liberação de gases. Portanto, apresenta como vantagem e desvantagem, respectivamente, a rápida resposta às variações de carga e a limitação devido à alta sensibilidade na presença de umidade bem como granulometria do combustível. A Figura 2.14 apresenta o gaseificador de fluxo cruzado.

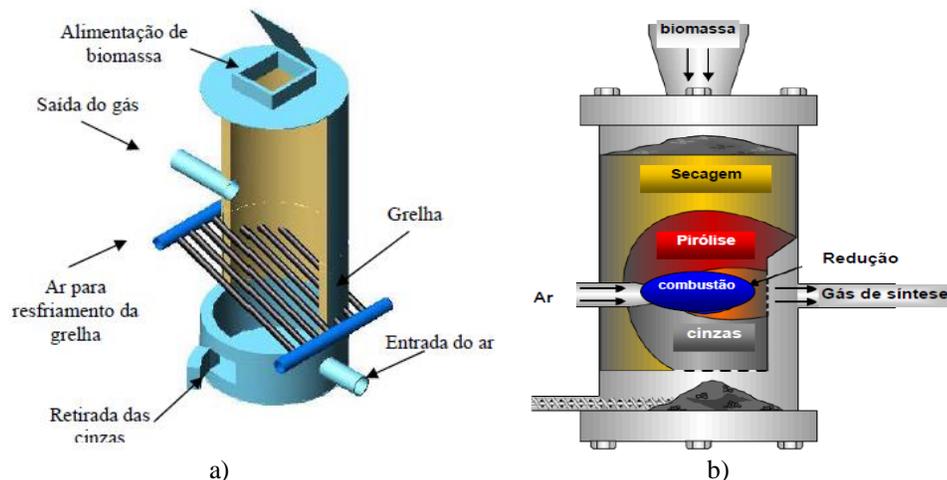


Figura 2.14 Esquema de um gaseificador de fluxo cruzado.

Fonte: a) Andrade, 2007 b) Olofsson et al., 2005

### 2.4.3.4 Gaseificação com leito fluidizado

No gaseificador em leito fluidizado a característica principal é o excelente contato entre sólido e gás, que promove uma circulação vigorosa das partículas envolvidas no processo e possibilita a uniformidade na temperatura do leito (ANDRADE, 2007). Nestes gaseificadores as

partículas do combustível são mantidas suspensas em um leito (comumente composto por areia, sílica ou alumina) e fluidizadas pelo fluxo do agente de gaseificação.

As temperaturas de processo são relativamente mais baixas em comparação com os reatores de leito fixo, reduzindo substancialmente a formação de óxidos de nitrogênio, de enxofre e de resíduos. Uma notável vantagem deste sistema está na facilidade de controle da temperatura média do leito, através da alimentação do agente de gaseificação e do combustível.

São divididos em gaseificadores de leito fluidizado tipo borbulhante ou tipo circulante. Nos gaseificadores borbulhantes as partículas arrastadas pelo processo não retornam ao leito que opera com velocidades menores que a velocidade de arraste pneumático. A alimentação de biomassa é feita diretamente na zona do leito. Já nos gaseificadores de leito fluidizado circulante as partículas arrastadas no processo são retornadas para o leito. (ANDRADE, 2007). Geralmente na parte superior destes reatores são acoplados ciclones que promovem a separação do material inerte e das cinzas contidas no gás.

#### 2.4.4 Sistema de Limpeza

Precisa-se da limpeza do gás produzido no sistema de gaseificação de biomassa, para seu aproveitamento no acionador primário. Esta limpeza é fundamental, pois, este gás contém uma determinada quantidade de contaminantes, tais como os particulados, as cinzas e especialmente, o alcatrão.

Conforme pode ser observado na Tabela 2.11, para operação do motor de combustão interna com gás de biomassa, este gás deve conter valores menores que 50 mg/Nm<sup>3</sup> de particulados e teor de alcatrão menor que 100 mg/Nm<sup>3</sup> (Hasler e Nussbaumer, 1999).

Tabela 2.11 Qualidade requerida do gás para geração de potência.

	Unidade	MCI	Turbina
Partículas	mg/Nm <sup>3</sup>	< 50	< 30
Tamanho das partículas	µm	< 10	< 5
Alcatrão	mg/Nm <sup>3</sup>	< 100	
Metais alcalinos	mg/Nm <sup>3</sup>		0,24

Fonte: Hasler e Nussbaumer (1999).

A Tabela 2.12, mostra a eficiência dos variados sistemas de limpeza, para os dois principais contaminantes do gás oriundo da gaseificação de biomassa (partículas e alcatrão) (Hasler e Nussbaumer, 1999). Como pode ser observado na Tabela 2.12, o filtro de areia, os lavadores venturi e o craqueamento catalítico são os sistemas com maior eficiência na remoção do alcatrão. Será apresentada uma revisão sucinta sobre ciclones e filtros de areia, pois serão considerados para serem utilizados para remoção de particulados e do alcatrão, respectivamente, neste trabalho.

Tabela 2.12 Remoção de partículas e alcatrão por diferentes sistemas de limpeza.

Sistema	Remoção de Partículas (%)	Remoção de alcatrão (%)
Filtro de areia	70-90	50-97
Torre de lavagem	60-98	10,0-25
Lavadores Venturi		50-90
Atomizador Rotacional	95-99	
Precipitador Eletrostático	>99	0-60
Filtro de Mangas	70-95	0-50
Separador de partículas rotacional	85-90	30-70
Absorvedor de alcatrão de leito fixo		50
Craqueamento catalítico do alcatrão		>95

Fonte: Hasler e Nussbaumer (1999).

#### 2.4.4.1 Remoção de particulados em ciclones

Os ciclones são equipamentos clássicos utilizados para a coleta de material particulado sólido. Devido a flexibilidade de aplicação do ciclone, o mesmo é utilizado com frequência, logo após a saída de gaseificadores, sem a necessidade de resfriamento do gás produto. O ciclone é um dos equipamentos mais simples e baratos para separação de particulados (BIZZO, 2010).

Estes equipamentos são utilizados para separar e coletar partículas por meio da ação da força centrífuga. Os ciclones não oferecem dificuldades para operar em elevada pressão e temperatura (1000 °C e 50 bar). As principais características dos ciclones são: eficiência na coleta, eficiência de fracionamento, diâmetro de corte e queda de pressão. No ciclone, a força centrífuga acelera as partículas sólidas em suspensão na corrente gasosa contra as paredes do ciclone. Quando a partícula sólida entra em contato com a parede, ela é coletada e cai na parte cônica do ciclone,

conectada a um reservatório de sólidos ou a outro tipo de dispositivo de retirada, como representado na Figura 2.15.

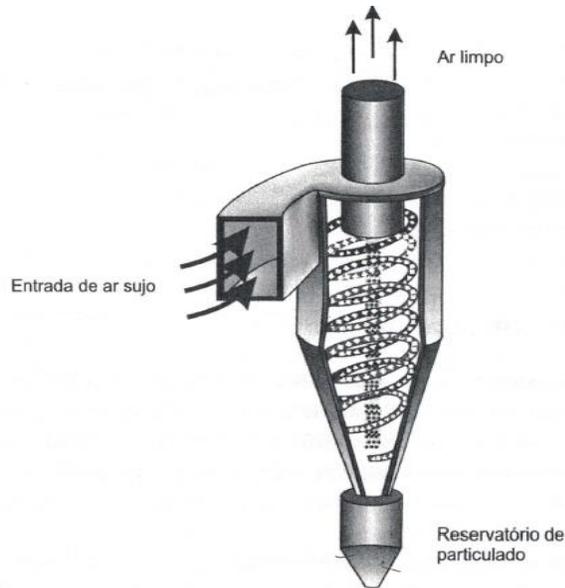


Figura 2.15 Filtro de material granular de leito movente.  
Fonte: Bizzo, 2010.

#### 2.4.4.2 Filtro de areia para remoção de partículas

O filtro de areia é um filtro de barreira. São denominados filtros de barreira, os filtros como: filtros de mangas (filtro de tecido), filtros de barreira rígida (cerâmicos e metálico) e filtro de leito granular (areia). Como observado na Figura 2.16, o filtro de areia, apresenta a maior remoção de alcatrão, diante dos demais sistemas de limpeza, além de ser o mais comum dentre os filtros de leito granular.

Neste filtro, o gás a ser limpo escoar verticalmente para cima enquanto o leito de mineral filtrante neutro (areia) move-se lentamente para baixo. O material particulado retido no leito granular é removido, continuamente, junto ao material do leito granular (BIZZO, 2010). Seu funcionamento consiste em uma camada primária e uma camada secundária de material particulado sobre o leito granular. A camada porosa executa a filtração. O aumento da camada de sólidos aumenta também a resistência ao escoamento e o filtro torna-se menos permeável, aumentando sua perda de carga. Portanto, para uma operação eficiente desse filtro, essa camada deve ser removida periodicamente.

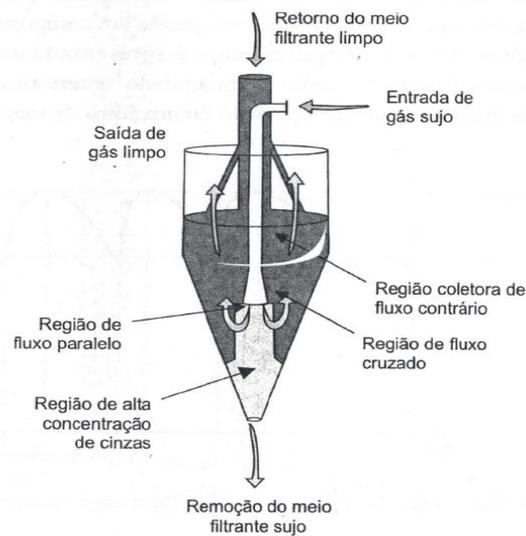


Figura 2.16 Filtro de material granular de leito movente.  
Fonte: Bizzo, 2010.

### 2.4.5 Motor de Combustão Interna

A baixa densidade energética da biomassa junto à sua produção dispersa favorece a aplicação a uma conversão energética em eletricidade ou combustíveis em pequenas instalações descentralizadas. Para utilização em plantas de baixa potência, a unidade de geração gaseificador/motor de combustão interna/gerador constitui a opção mais barata, em comparação a caldeira, condensador, motor a vapor, turbina, etc, uma vez que utiliza-se equipamentos menores.

Os gaseificadores cocorrentes acoplados a motores de combustão interna (MCI) são uma tecnologia interessante para geração de calor e potência em pequena escala, além de serem os mais difundidos (MARTÍNEZ et al., 2012). Para utilização do MCI na geração de eletricidade, o motor deve ser adaptado (para a operação com gás de baixo poder calorífico) e acoplado a um gerador elétrico que irão operar interligados à rede elétrica. Ocorrerá a geração de eletricidade quando a potência do eixo das máquinas térmicas for convertida em potência elétrica através dos geradores elétricos.

O MCI converte a energia química do combustível em energia térmica, através da oxidação com ar (combustão). Há então a expansão dos gases resultantes desta oxidação com o aumento da temperatura e pressão. Esta expansão dos gases converte o movimento linear do pistão em

movimento circular de eixo (virabrequim), sendo o movimento transmitido deste ao volante e do volante a qualquer outro mecanismo externo para utilizar o trabalho disponível (potência de eixo) (SÁNCHEZ, 2010). Para Jansen et al., 2002, a taxa de conversão de  $\text{NH}_3$  em  $\text{NO}_x$ , nos motores de combustão interna a gás é de 30%.

Os motores de combustão interna podem ser classificados de acordo com a ignição que será por centelha ou por compressão. O motor ciclo diesel opera com óleo diesel, cuja ignição ocorre espontaneamente devido à alta pressão na câmara de combustão. Já o motor ciclo otto tem ignição por centelha elétrica e pode operar com gasolina, etanol, GLP ou gás natural.

## 2.5 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Avaliação do Ciclo de Vida é um conceito e também uma metodologia para avaliar os efeitos ambientais de um produto ou atividade, por meio da avaliação ambiental do ciclo completo da existência de um produto, um processo ou atividade. Conforme UNEP (2016), a metodologia ACV é também um modelo quantitativo que realiza uma ampla abordagem dos danos ambientais. Em outros termos, utiliza-se a ACV para verificação e quantificação das consequências ambientais de produtos ou serviços, durante todo seu ciclo de vida, a partir da extração de materiais, produção industrial incluindo fase de uso e disposição final.

Conhecida como *cradle-to-grave assessment* (avaliação do berço ao túmulo), pode ser realizada com fronteiras intermediárias, tais como *gate to gate*, *gate to grave*, *gate to cradle* (do portão ao portão, do portão ao túmulo ou do portão ao berço).

Esta técnica possibilita a gestão dos recursos naturais, ao determinar o produto que consome mais ou menos determinado recurso natural, ou ainda, qual produto é mais sustentável, fundamentado nos valores de seu uso dentro do ciclo de vida. Os principais objetivos é a melhoria no desempenho ambiental dos processos produtivos, redução dos custos envolvidos e auxiliar na criação e difusão de produtos sustentáveis. Segundo Ormazabal (2017), a gestão ambiental tem sido uma fundamental preocupação para empresas, clientes e para todos os cidadãos de modo geral.

O escopo, as fronteiras e o nível de detalhamento de um estudo de ACV dependem do assunto e da finalidade pretendida do estudo (NBR ISO 14040, 2009).

## 2.5.1 Metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida

Para Chayer e Kicak (2015), a ACV se constitui a principal ferramenta, reconhecida internacionalmente, para avaliação do desempenho ambiental. É definida pela norma traduzida e publicada pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), a NBR ISO 14040 (2009). A Figura 2.17 apresenta graficamente, as 4 fases normatizadas.

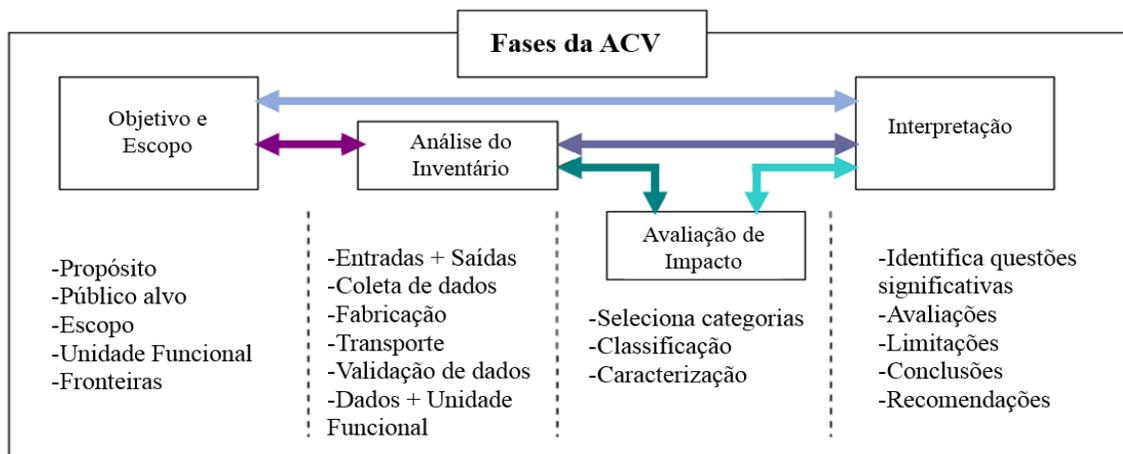


Figura 2.17 Fases da Avaliação do Ciclo de Vida.  
Fonte: NBR ISO 2009.

Um importante aspecto que deve ser verificado nesta metodologia é a qualidade dos dados a serem obtidos na ACV. Os resultados de um estudo completo dependem diretamente da qualidade dos dados disponíveis. Especialmente para casos de ciclos mais complexos, a qualidade dos dados é fundamental para reduzir os problemas e incertezas do processo (DE MONTE et al., 2005).

## 2.5.2 Definição do Objetivo e Escopo

Esta fase é qualitativa, devendo apresentar o propósito do trabalho, seu escopo e fronteiras, ou seja, expor de forma clara a aplicação pretendida, o público destinado e a justificativa para o estudo e a delimitação de início e fim do estudo. O escopo deve incluir a unidade funcional utilizada, o fluxo de referência, os limites geográficos do sistema analisado, o horizonte temporal,

estimativas e limitações de sua análise, pressupostos, métodos de alocação, as categorias de impacto consideradas e outras informações relevantes.

A etapa de definição do escopo de um estudo de ciclo de vida relaciona as fronteiras do sistema analisado com os fluxos e o nível de detalhamento do estudo, bem como sua unidade funcional de referência. Deve existir uma correta interligação com os resultados de modo a reduzir possíveis subjetividades.

### **2.5.2.1 Unidade Funcional e Definição de Fronteiras**

A unidade funcional é a unidade de referência quantitativa que será base para todos os fluxos de entradas e saídas no ciclo de vida. De acordo com a NBR ISO 14040 (2009), a unidade funcional é uma medida de desempenho das saídas funcionais do sistema de produto. Esta base de referência é fundamental para assegurar a comparabilidade de resultados da ACV. A unidade funcional deve ser definida claramente e mensurável.

Como estabelecido na NBR ISO 14040 (2009), as fronteiras do sistema determinam quais unidades de processos serão incluídas no estudo de ACV. Os critérios utilizados no estabelecimento das fronteiras do sistema devem ser identificados e justificados no escopo do estudo. As fronteiras do ciclo de vida de um produto ou sistema devem ser bem definidas pois elas possuem impacto direto no resultado da análise ambiental.

### **2.5.3 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)**

A segunda fase do estudo, denominada Inventário do Ciclo de Vida (ICV), pode ser entendida como uma matriz representativa do sistema de produção. Constitui-se como a fase quantitativa, na qual um fluxograma do sistema é construído com a exata definição das etapas e fronteiras técnicas do estudo. O objetivo principal ICV é identificar e quantificar o uso de energia, água e materiais e liberações (emissões atmosféricas e resíduos sólidos e líquidos) (CURRAN et al, 2005). Os dados obtidos são então inseridos em um software específico para avaliação ambiental e as cargas ambientais são calculadas e relacionadas a sua unidade funcional.

A coleta de dados é uma fase de intensiva demanda por recursos. Os principais dados requeridos pela pesquisa são: aspectos ambientais no geral, como emissões atmosféricas e efluentes em água e solo, produtos, co-produtos e resíduos realizados pelo sistema e entradas de energia, matéria-prima e toda entrada física (ABNT, 2009). O ICV descreve as tecnologias utilizadas nos processos produtivos, mas, dependendo da gestão e do local de produção, os resultados podem ser diferentes para sistemas de produção similares (JOHN et al., 2014).

Na etapa do ICV os dados coletados devem ser analisados para verificação de sua completude e compatibilidade com outras fontes para possíveis comparações posteriores. Segundo Passuelo (2007), a análise de inventário deve abranger a preparação para a coleta das informações pertinentes ao estudo, a coleta de banco de dados, sua devida validação e a associação dos dados relevantes.

A abordagem da ACV durante a alocação dos coprodutos pode ser atribucional ou consequential. Quando a abordagem é atribucional, esta descreve os impactos e fluxos de recursos como um sistema atribuído a certa quantidade da unidade funcional, diferentemente da ACV consequential que estima como os impactos e fluxos de recursos de um sistema se alteram em decorrência de uma mudança na saída da UF (THOMASSEN et al., 2008).

Abaixo são discriminadas as atividades necessárias para análise do inventário:

- a) **Preparação para coleta de dados:** Consiste na elaboração de fluxogramas que apresentem as unidades de processo junto às suas descrições e relações detalhadas. Devem ser coletadas todas as informações de entrada e saída de cada etapa do processo.
- b) **Refinamento dos limites do sistema:** A verificação e revisão de todos os limites do sistema é fundamental para a correta execução da metodologia. Os limites devem estar em concordância com aqueles definidos na fase de objetivo e escopo do estudo.
- c) **Alocação:** Geralmente, nos sistemas há variados processos e estes podem gerar co-produtos, então é necessária a distribuição proporcional (alocação das responsabilidades) do efeito ambiental ao produto principal e aos co-produtos. As entradas e saídas devem ser alocadas aos diferentes produtos de forma clara e essa atividade deve ser documentada e explicada junto ao procedimento de alocação (NBR ISO 14044). A alocação deve ser evitada, sempre que possível.

Conforme NBR ISO 14044 (2009), os principais métodos para alocação são:

✓ **Alocação baseada em propriedades físicas:**

As entradas e saídas do sistema são subdivididas entre seus diferentes produtos ou funções, de maneira a refletir as relações físicas entre eles; ou seja, as entradas e saídas são alteradas por mudanças quantitativas nos produtos do sistema. Quando a relação física não for suficiente, as entradas devem ser alocadas entre os produtos de forma a refletir outra relação entre eles. Uma alternativa é baseada no valor de mercado.

✓ **Alocação com base em valor de mercado:**

Neste caso, as entradas devem ser alocadas entre os co-produtos de acordo e proporcionalmente ao seu valor econômico.

#### **2.5.4 Impacto do Ciclo de Vida (AICV)**

Na terceira fase da ACV os dados obtidos na avaliação do inventário (ICV), são selecionados e quantificados para uma posterior classificação por categorias objetivando relacionar os dados do inventário com os impactos ambientais. A avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) consiste na aplicação de uma metodologia que relacione o inventário e os danos ou impactos ambientais potenciais, por meio de métodos existentes, como por exemplo, ReCiPe, CML 2002, EDIP, e outros.

Os dados do inventário são selecionados e atribuídos a categorias de impacto específicas. Posteriormente, na caracterização, os dados do inventário são multiplicados por fatores de equivalência para cada categoria de impacto. Em seguida, com os parâmetros incluídos na categoria de impacto, são somados, onde é obtido o resultado da categoria respectiva.

Esta fase apresenta uma estrutura geral que possui 3 componentes obrigatórios (conforme NBR ISO 14040, 2009) e 2 opcionais, sendo eles, respectivamente: seleção e definição das categorias de impacto, classificação, caracterização, normalização e ponderação.

Para Coltro et al., 2007, as categorias de impacto frequentemente associadas às atividades agrícolas são: consumo de energia, toxicidade humana, ecotoxicidade, depleção dos recursos naturais, mineralização do solo, erosão e uso do solo.

### 2.5.4.1 Método de avaliação de impacto na AICV

Existem vários métodos para realização da avaliação dos impactos de um AICV. O método transforma os resultados do inventário em um número limitado de indicadores. Essas pontuações revelam a gravidade relativa em uma categoria de impacto ambiental.

A abordagem do método por ser midpoint, endpoint ou integrar as duas. A abordagem midpoint utiliza indicadores ao longo do mecanismo ambiental antes de chegar ao ponto final da categoria. Já o endpoint considera todo o mecanismo ambiental até o ponto final da categoria, ou seja, refere-se a um dano específico relacionado com a área mais ampla de proteção, que pode ser saúde humana, ambiente natural ou recursos naturais (Mendes, et al., 2016). Portanto, a abordagem endpoint é mais específica e mais aprofundada. A Tabela 2.13 apresenta um resumo dos principais métodos utilizados para AICV.

Tabela 2.13 Resumo dos principais métodos utilizados para ACV.

Nome	Abordagem	Origem	Autores
CML 2001	Midpoint	Instituto de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden, Holanda	Guinée, J. B.
Eco-Indicator 99	Endpoint	Ministério do Planejamento e Ambiente Holandês	Goedkoop, M. e Spriensma, S.
EDIP 2003	Midpoint	Instituto de Desenvolvimento de Produtos da Universidade Técnica da Dinamarca	Hauschild, M. e Potting, J
IMPACT 2002+	Midpoint/Endpoint	Instituto Federal Suíço de Tecnologia de Lausanne, Suíça.	Jolliet, O.
ReCiPe	Midpoint/Endpoint	Holanda	Goedkoop, M., Huijbregts, M., Heijungs, R. e Struijs, J.
TRACI 2	Midpoint	-	Bare, J.

Fonte: Furtado 2014.

### 2.5.5 Interpretação do Ciclo de Vida

Durante a última fase do estudo, é elaborado um relatório contendo resultados consistentes provenientes da combinação entre avaliação do inventário (ICV) e avaliação de impacto obtidos (AICV), objetivando obter indicadores mensuráveis para conclusões que estejam convergentes com os objetivos iniciais apresentados.

De acordo com Renó (2011), a fase de interpretação pode ser caracterizada por duas etapas:

**a) Identificação das questões ambientais mais significativas**

Onde serão implementadas as informações do inventário com identificação das questões ambientais mais importantes e relevantes para o estudo.

**b) Avaliação**

Onde é feita uma síntese das etapas anteriores do estudo e da primeira etapa da interpretação dos resultados de modo a assegurar que as entradas e saídas representem informações significantes para o trabalho. Ainda pode ser executada a análise de sensibilidade para assegurar a confiabilidade dos dados.

Desta forma existirão subsídios para fundamentar conclusões e recomendações de implementações visando a redução dos impactos ambientais.

## **2.5.6 Limitações**

Uma das principais dificuldades na avaliação do ciclo de vida está na obtenção de dados confiáveis para o inventário, sobre o objeto da pesquisa. A maioria dos estudos são sobre aspectos e tecnologias específicas de uso.

Outras importantes limitações são: a falta de informações completas e detalhadas sobre os impactos, as suposições dos métodos empregados para a análise de inventários e a própria natureza subjetiva das considerações e escolhas feitas ao longo do trabalho.

## 2.6 ESTUDOS ANTERIORES

### 2.6.1 Gaseificação dos resíduos do cultivo do café (casca)

O presente trabalho baseou-se nos estudos existentes para consolidar seus objetivos. Embora existam poucos trabalhos que tratem dos subprodutos do café atrelado ao seu potencial energético, bem como as características específicas para o tratamento destes resíduos (MARTINEZ et al., 2019), As Tabelas 2.14 e 2.15 são referentes aos trabalhos analisados, que tratam da gaseificação da casca de café e nas mesmas são apresentadas as análises de composição imediata e elementar para a casca de café. Na Tabela 2.14 as letras W, A, MV e CF significam respectivamente, umidade, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo. Já na Tabela 2.15 é apresentada a composição e poder calorífico do gás produto da gaseificação, de acordo com o estudo e respectivo gaseificador utilizado.

Tabela 2.14 Composição química das cascas de café seguindo diferentes fontes.

ANÁLISE DA CASCA DO CAFÉ											
Autores	Análise Imediata (%)				Análise Elementar (%)						Poder Calorífico - biomassa -
	W	A	MV	CF	C	H	N	O	S	Cl	MJ/Kg
Wilson, et al., 2010	10,1	2,5	83,2	14,3	49,4	6,1	0,81	41,2	0,07	0,03	18,34
Rodrigues e Gordillo, 2011	7,22	0,68	76,6	15,5	46,51	6,77	0,43	46,2	0,09		17,94
Couto et al., 2013	25,3				40,1	5,6	5,2	49,1			20,9*
Kore et al., 2013	8,36	6,99	72,3	20,71	48,9	5,24	1,69	33,39	5,5		17,2
Oliveira et al., 2013	9,22	1,71	81,87	16,42	47,71	5,93		43,96			18,56
Silva et al., 2013	25,3	2,5	83,2	14,3	40,1	5,6	5,2	49,1			20,9*
Ismail et al., 2016	25,3	2,5	83,2	14,3	40,1	5,6	5,2	49,1			20,9*
George et al., 2018	10,4	7,9	64,4	17,3	41,82	6,07	0,77	50,3	0,14		
Oliveira et al., 2018	9,22	1,71	81,87	16,42	47,71	5,93		43,96			18,56

\*Poder Calorífico líquido

Tabela 2.15 Resultados da gaseificação da casca de café conforme a literatura.

RESULTADOS PRINCIPAIS DE ESTUDOS SOBRE GASEIFICAÇÃO DA CASCA DO CAFÉ						
Autores	Gaseificador	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	PCI Gás Produto (MJ/Nm <sup>3</sup> )
Wilson, et al., 2010	Reator construído	15,1	26,01	14,43		15,47
Rodrigues e Gordillo, 2011	Leito fluidizado	23,2	16,3	4,5	16,2	-
Couto et al., 2013	Leito fluidizado	12,4	11,4	1,6	18,7	-
Kore et al., 2013	Leito fluidizado borbulhante	40	21	6	20	-
Silva et al., 2013 (corrida 1)	Leito fluidizado borbulhante	12,4	11,4	1,6	18,7	-
Silva et al., 2013 (corrida 2)	Leito fluidizado borbulhante	7,6	11,1	2,4	17	-
Ismail et al., 2016 (corrida 1)	Leito fluidizado	12,4	11,4	1,6	18,7	3,34*
Ismail et al., 2016 (corrida 2)	Leito fluidizado	7,6	11,1	2,4	17	3,20*
Ismail et al., 2016 (corrida 3)	Leito fluidizado	7,5	10,6	2,5	18,5	3,07*
George et al., 2018	Leito fluidizado borbulhante	8,74-7,68	9,84-9,49	3,97-3,88	7,1-7,2	3-61-3,42
Oliveira et al., 2018	Cocorrente	8,06-5,22	15,3-12,32	18,15-11,39	13,16-11,12	9,03-6,49

\*Valor de PCS

Wilson et al., 2010, Oliveira et al., 2018 e George et al., 2018 realizaram trabalhos experimentais, de gaseificação da casca do café. Wilson et al., 2010, utilizam diferentes temperaturas (900°, 800° e 700°C) com nitrogênio e varia também a concentração de oxigênio em 2%, 3% e 4%. Os resultados mostraram que com 4% de oxigênio, aproximadamente 96,08% das cascas de café foram gaseificadas enquanto para 2% e 3% foram gaseificadas 82,80% e 71,29% respectivamente. As cascas são provenientes de Moshi na Tanzania. Para os autores, há uma influência positiva da elevação da temperatura sobre o processo de gaseificação. O aumento da temperatura de 700°C para 900 °C, nas condições de 2% da concentração de oxigênio, ocasionou um aumento de 6 vezes na produção de monóxido de carbono (CO) e nas condições de nitrogênio (N<sub>2</sub>), houve um aumento de 2.5 vezes na produção do CO.

Oliveira et al., 2018, apresentam um estudo detalhado sobre a gaseificação dos resíduos da produção de madeira (*eucalyptus*) e da produção de café (madeira e casca). O experimento foi realizado em um gaseificador cocorrente, utilizando o ar como agente gaseificante. O gás proveniente da casca do café apresentou o maior poder calorífico (16.73 e 18.56 MJ/kg) dentre as

3 biomassas analisadas, contendo principalmente  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  e  $\text{CO}_2$ , entretanto foi o gás de maior instabilidade em sua composição.

George et al., 2018, realizaram um estudo experimental sobre a co-gaseificação das cascas e do pó da madeira (serragem) do café em um reator de leito fluidizado borbulhante. Foi verificado que a gaseificação da casca do café é mais propensa a problemas como aglomeração, já o pó da madeira do café não é tão vulnerável a esta aglomeração. A presença de 57% de potássio nas cinzas da casca foi identificada como a principal causa da aglomeração, já que o potássio e o sódio são os maiores contribuintes para aglomeração. Em seu experimento verificou que a gaseificação da mistura (casca de café e serragem), reduz as chances de aglomeração e aumenta o rendimento do hidrogênio em 8%, se comparado ao processo de gaseificação da serragem sozinha, entretanto, um rendimento inferior (redução de 14%) se comparado a gaseificação da casca de café isoladamente. Os autores concluem que a co-gaseificação aumenta em 35% e em 30%, a eficiência do gás e a eficiência da conversão de carbono, respectivamente.

Rodrigues e Gordilho (2011), Couto et al., 2013, Ismail et al., 2016 e Silva et al., 2013, realizaram trabalhos de comparação entre o experimento e a modelagem computacional. Couto et al., 2013, e Ismail et al., 2016, fazem uma simulação da gaseificação da casca do café em um reator de leito fluidizado, utilizando os programas FVIT e CFD, respectivamente. Couto et al., 2013, utilizam uma planta piloto instalada em Portugal e encontram boa concordância em relação ao gás de síntese do modelo numérico com o experimental, embora um ligeiro desvio tenha sido demonstrado em relação ao  $\text{CO}$  e  $\text{H}_2$ .

Ismail et al., 2016 comparam os dados de três experimentos de gaseificação (corridas 1, 2 e 3) com os dados do modelo simulado. A composição do gás gerado experimentalmente também apresentou convergência com os resultados do modelo. Ismail et al., 2016 afirmam que o alto teor de umidade nas cascas de café tem efeito negativo na eficiência do gás a frio e no poder calorífico que diminui à medida que a taxa de equivalência aumenta. Este aumento na razão de equivalência ainda promove o aumento das concentrações de  $\text{N}_2$  e  $\text{CO}_2$ , diminuindo as concentrações de  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{CH}_4$  na composição do gás. Para Ismail et al. (2016) o aumento da umidade causa moderado aumento na temperatura do reator, todavia, o excesso de umidade torna difícil a manutenção desta temperatura.

Rodrigues e Gordilho (2011), fizeram a modelagem de gaseificação da casca do café utilizando misturas de ar e vapor para oxidação parcial e uma análise experimental para determinar

a energia de ativação. Foi utilizado um programa CEA para averiguar o efeito da razão de equivalência e a taxa de vapor do combustível no equilíbrio químico e na composição do gás.

Silva et al., 2013 utilizaram dados experimentais de um gaseificador de leito fluidizado borbulhante semi industrial e compara com dados obtidos de uma modelagem de gaseificação de biomassa em um programa CFD (code fluent). O modelo numérico foi construído de acordo com os dados experimentais. Silva et al., 2013 utilizaram cascas de café em duas condições de operações diferentes e verifica que os resultados da modelagem apresentaram boa concordância com os dados do experimento obtido nas duas diferentes corridas.

Kore et al., 2013 fizeram um estudo de caso na Etiópia. Foi feito um experimento utilizando gaseificação das cascas de café, utilizando reator de leito fluidizado borbulhante e este processo foi comparado com dados da literatura existente para os pellets de madeira (na mesma condição de operação). Os resultados mostraram que o teor de alcatrão pode ser gaseificado em um reator de leito fluidizante e que a composição do gás proveniente da casca do café tem boa concordância com a composição do gás originário da madeira.

Oliveira et al., 2013, analisaram os resíduos do café (casca e madeira) e da madeira *eucalyptus* para conversão termoquímica por meio da gaseificação e apresenta um mapeamento da energia disponível a partir destes resíduos para as cinco regiões brasileiras (norte, nordeste, sudeste, sul e centro-oeste). Sua pesquisa encontra baixo teor de umidade para as 3 biomassas analisadas, uma característica que favorece a aplicação em processos de conversão termoquímica. O estudo mostra que o Brasil apresenta 11,3 PJ de energia disponível por meio da casca do café, e deste total 9,4 PJ estão na região sudeste.

Miito e Banadda (2017), fizeram uma revisão teórica sobre o uso da gaseificação de cascas de café em Uganda, na África. A tecnologia não é amplamente utilizada e conhecida em Uganda (com apenas duas unidades de gaseificação), mas no país vizinho, o Quênia, a gaseificação é implementada utilizando pó de madeira e gera uma potência de 76 GWh. Em Uganda 91% do combustível é proveniente de madeira e como o país é o segundo maior produtor de café da África (produz 46,6 Mton de casca por ano), a implementação da gaseificação das cascas do café reduziria a dependência da madeira e reduziria os impactos ambientais em um país onde há muito desmatamento e erosão, devido ao intenso uso da madeira. Miito e Banadda, 2017 mostraram que a cafeicultura no país possui um potencial de 24 GWh para geração energética por meio das cascas do café.

McNutt e He, 2019 apresentam uma ampla revisão sobre a utilização da borra do café, que atualmente possui diversas aplicações e paralelamente tem sido ainda descartado.

### **2.6.2 Ciclo de Vida do Café**

Em se tratando de estudos sobre ACV do café, são encontrados variados estudos, embora cada um tenha um foco e região específicos. Devido a abrangência do trabalho a ser desenvolvido, que tem como berço a plantação do café em viveiro e posteriormente no solo, foram selecionados estudos que incluem a etapa agrícola, pois esta faz-se necessária para as análises a serem realizadas.

Alguns importantes trabalhos não foram utilizados pois possuem abordagens diferentes da abordagem do presente trabalho. Domínguez-Patiño, et al., 2014, fizeram uma ACV em tempo real tomando como referência o preparo de uma xícara de café em máquina com filtro; De Monte et al., 2005, realizaram um estudo comparativo entre diferentes sistemas de embalagens de café; Quack et al., 2009, Stratmann et al., 2009 e Brommer et al., 2011 são estudos focados na avaliação dos impactos ambientais relacionados aos tipos de preparo da bebida. Brommer et al., 2011 utilizaram os métodos PCF e PROSA, além da ACV para avaliação dos impactos ambientais; onde PCF em inglês Product Carbon Footprint ou pegada de carbono do produto e PROSA, do inglês, Product Sustainability Assessment, avaliação da sustentabilidade do produto.

Já Büsser e Jungbluth 2009, fazem uma ACV para dois tipos de produtos alimentícios: café e manteiga, com foco em suas embalagens, mas incluem detalhadamente a etapa do cultivo. Segundo os autores, a indústria de embalagens não deve apenas melhorar seus processos de produção, mas minimizar o material utilizado e criar funcionalidades deste, de modo a reduzir outros impactos ambientais. Analisaram diferentes formas de preparo do café e mostraram que para esta bebida, as formas de preparo e o cultivo tem maior impacto no ambiente, se comparado ao transporte e embalagem.

Coltro et al., 2012 fazem uma avaliação da produção de café em quatro regiões brasileiras e analisaram suas diferenças por meio da ACV. O estudo considera desde o cultivo até a exportação do café, após o processamento do grão (secagem). Os autores mostraram que os produtores podem reduzir a quantidade de produtos adicionados ao cultivo para melhorar o desempenho ambiental do processo, devendo ser considerado principalmente as boas práticas agrícolas de modo a tornar sustentável o produto.

Coltro et al., 2006 realizaram uma avaliação do ciclo de vida do cultivo do grão do café considerando o cultivo e processamento. A produção de fertilizantes, pesticidas, corretivos, bem como a utilização do transporte não foram considerados, apenas suas quantidades. Coltro et al., 2006 apresentaram um inventário do cultivo do grão do café, para colheitas referentes aos anos de 2001/02 e 2002/03 para 4 áreas incluindo 2 áreas do Estado de São Paulo (Marília e Alta Mogiana) e 2 áreas de Minas Gerais (Cerrado Mineiro e Sul de Minas). No trabalho são apresentados dois inventários, sendo um como base a unidade funcional 1.000 kg de café verde e outro como unidade funcional, 1 hectare de área cultivada.

Foi realizada a correlação entre uso de fertilizantes e pesticidas com a produtividade das lavouras e conclui-se que embora exista grande variedade das quantidades de uso destes, há casos em que o menor uso de fertilizantes gera uma maior produtividade, a depender das práticas da propriedade. Portanto há uma oportunidade de tornar sustentável o produto, reduzindo o uso de produtos químicos. Coltro et al., 2006 não apresentaram os impactos ambientais relativos aos dados inventariados. A Figura 2.18 apresenta a relação descrita acima e os pontos circulados mostram a média ponderada

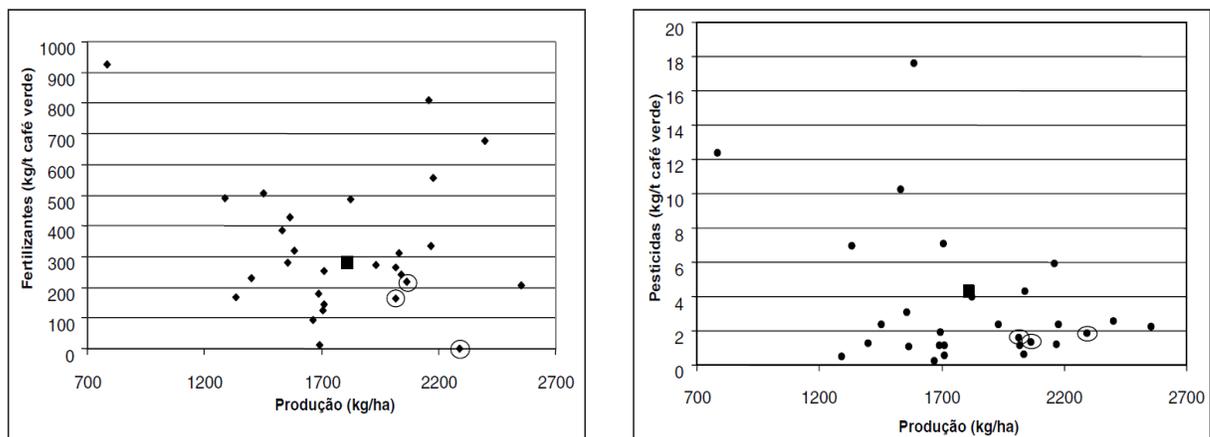


Figura 2.18 Consumo de fertilizantes e consumo de pesticidas em relação a produção de café verde.

Fonte: Coltro et al., 2006.

Hicks, 2017, realiza uma ACV comparativo de três diferentes formas de preparo do café (filtro de gotejamento, prensa francesa e máquina que utiliza café em cápsulas). O preparo por meio do filtro de gotejamento, teoricamente a forma mais simples, apresenta o maior impacto ambiental para todas as categorias. Já o café preparado em cápsulas, contrariando a crença popular, pode ser

a forma menos agressiva ao meio ambiente. As cápsulas possuem menor impacto ambiental quando comparado à prática convencional do preparo por filtro de gotejamento.

Humbert et al., 2009, estudam os impactos associados ao café solúvel, café utilizado com filtro de gotejamento e ao café expresso, visando a identificar os parâmetros para a otimização do processo. Os dados foram obtidos de produtores da Europa e de outros países fornecedores como Brasil, Colômbia e Vietnã, além de dados primários próprios da empresa executora da ACV. Conforme Humbert et al. (2009), a grande variabilidade no comportamento do consumidor interfere substancialmente no resultado final, considerando que a energia consumida para ferver a água pode ser maior do que a quantidade necessária. Assim, a energia requerida para obtenção do café solúvel é menor do que para o café expresso utilizado em cápsulas ou em filtros.

Comparando os produtos e etapas, a preparação da bebida utiliza maior quantidade de energia não renovável (cerca de 50% do total). Humbert et al. (2009), ressaltam que para o café expresso em cápsulas, a etapa de embalagem precisa de quantidade substancial de energia. Humbert et al., 2009, ainda relacionam a etapa do cultivo com a produção dos três tipos de café e verificam que a quantidade do grão usado para cada xícara produzida (17 g para o café com filtro de gotejamento, 4,4 g para o café solúvel e 8 g para o café expresso em cápsulas). Portanto, o café solúvel apresenta o menor impacto.

Phrommarat (2019), apresenta um estudo de ACV, a partir do grão arábico orgânico produzido e consumido na região do Norte da Tailândia, onde o processamento é realizado a úmido e fez a avaliação para três cenários de preparação da bebida, considerando o cultivo do ano de 2016 (julho a novembro). Foram analisados os seguintes cenários: máquina de café elétrica tradicional com gotejamento e utilizando filtro em aço (reutilizável); máquina tipo Moka (que não utiliza filtro); e chaleira elétrica utilizando cone de vidro e filtro de papel. A ACV foi realizada desde o cultivo até a disposição. Phrommarat 2019 concluiu que o preparo do café através do gotejador elétrico é a forma de menor impacto para o ambiente, enquanto o método de preparo na máquina tipo moka em copo quente é o pior, em dano ao ambiente. Neste estudo, o cultivo foi a etapa de maior dano para o ecossistema, nos três cenários. O preparo do café tipo moka apresenta maior impacto para a saúde humana.

Salinas (2008) fez um trabalho sobre o ciclo de vida da produção de café para uma área específica, a fazenda “Vista Hermosa” (FVH), na Guatemala. Este estudo considerou as entradas e saídas relacionadas diretamente ao cultivo, incluindo processamento e transporte destinado à

exportação. A lavoura estudada não faz uso de pesticidas e fungicidas, devido as práticas agrícolas e a altitude da lavoura, que favorecem a aplicação de fertilizantes naturais, oriundos das fases de processamento do café.

Salinas (2008) verifica que o transporte se constitui a maior causa dos impactos ambientais. O que é coerente, visto que a fazenda utiliza práticas sustentáveis. Para este caso específico, a distância do local de produção até o porto tem maior impacto que a distância do porto até o país de destino. A Figura 2.19 mostra a distribuição dos impactos de acordo com a pontuação obtida no Eco-Indicador 99.

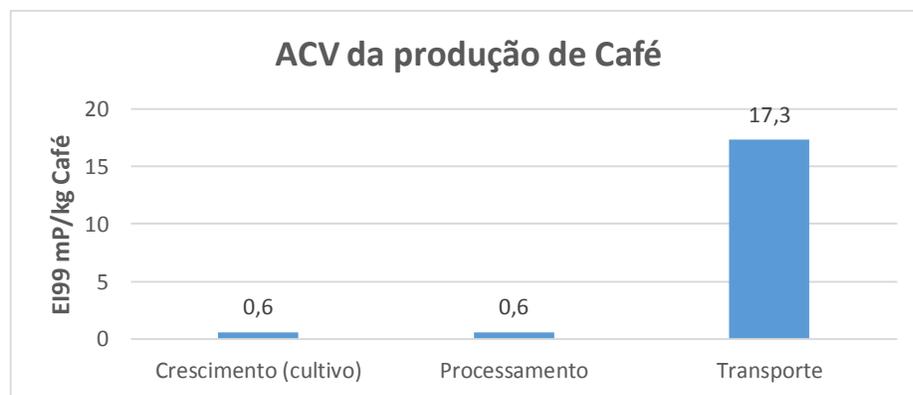


Figura 2.19 Resultados da ACV utilizando o Eco-Indicador 99.

Fonte: Salinas 2008.

Salomone (2003) faz um estudo completo, com avaliação de todas as etapas da vida do café, iniciando no cultivo do grão até seu processamento, transporte, uso e destinação final. Apresenta a avaliação sobre os impactos ambientais causados por uma empresa de torrefação e distribuição de café na Sicília, Itália.

Segundo Salomone (2003) as etapas de cultivo e consumo são as maiores causadoras dos impactos ambientais. O cultivo contribui significativamente para toxicidade e eutrofização (com um resultado superior a 97%) e o consumo contribui principalmente para a acidificação do ar, toxicidade, saúde humana, efeito estufa, depleção da camada de ozônio e produção de fotoquímicos oxidantes (mais de 68% para todas as categorias citadas). As contribuições feitas pelos transportes são limitadas, mas podem ocasionar a formação de oxidantes fotoquímicos, efeito estufa, auxiliar na toxicidade humana e acidificação do ar, bem como a depleção da camada de ozônio e a ecotoxicidade aquática. A disposição final contribui principalmente para a eutrofização e ecotoxicidade aquática, entretanto, nestas duas categorias de impacto, o cultivo tem maior

contribuição. As contribuições das etapas de processamento e embalagem são quase insignificantes (menos de 1,7% para todas as categorias), conforme Salomone (2003).

Como um estudo para obtenção de melhorias na gestão ambiental da empresa, sugere atividades visando a redução do uso do combustível muito utilizado (entregas locais), redução no consumo da energia elétrica, melhoria na gestão dos resíduos (usos alternativos), e outras ações que irão reduzir as emissões e aumentar a sustentabilidade da empresa.

Rega e Ferranti (2019), apresentam uma revisão dos trabalhos acerca da ACV do café descrevendo os resultados e as informações mais relevantes de cada trabalho. Rega e Ferranti incluem em seu trabalho alguns dos trabalhos acima citados. Concluem que não é fácil a estimativa de impactos ambientais para a cadeia produtiva do café, pois este se apresenta de diversas formas, bem como há variadas rotas de produção e preparação da bebida. Rega e Ferranti alertam que apenas a colaboração entre consumidores e produtores irá permitir a redução dos impactos ambientais envolvidos nesse processo.

A Tabela 2.16 apresenta um resumo dos artigos selecionados. Os estudos de Rega e Ferranti (2019) não apresentam um estudo de ACV realizado, por isso não aparece na Tabela resumo.

Tabela 2.16 Resumo dos estudos anteriores em ACV para café.

<b>Autores/Ano</b>	<b>Área de Abrangência</b>	<b>Unidade Funcional (UF)</b>	<b>Etapas incluídas</b>	<b>Categorias de Impacto</b>	<b>Fonte de Dados</b>	<b>Software/Método</b>
Büsser e Jungbluth 2009	-	1 xícara de café pronta para consumir	"cradle to gate" => Cultivo e processamento (lavagem e secagem)	Mudanças climáticas, Depleção da camada de ozônio, Acidificação, Eutrofização, Depleção abiótica, Oxidação fotoquímica, Toxicidade Humana, Toxicidade aquática, Demanda de energia acumulada e renovável.	Literatura, medidas próprias e Ecoinvent v2.01	SIMAPRO/CML 2001
Coltro L. et al. 2012	Brasil	1000 Kg de café verde	"cradle to gate" => Cultivo e processamento (lavagem e secagem)	Depleção dos Recursos Fósseis, Depleção dos Recursos Naturais, Mudanças Climáticas, Acidificação, Eutrofização, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade e Uso do Solo.	Foi utilizado o Inventário do trabalho de Coltro et al., 2006.	PIRA Environmental Management System – PEMS4.
Coltro L. et al. 2006	Brasil	Duas UF utilizadas: a)1000 Kg de café verde destinado à exportação b)1 hectare de área cultivada	"cradle to gate" => Cultivo e processamento (lavagem e secagem)	Depleção dos Recursos Fósseis, Depleção dos Recursos Naturais, Mudanças Climáticas, Acidificação, Eutrofização, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade e Uso do Solo.	Entrevistas e questionários realizados nas 56 propriedades incluídas nas áreas analisadas	PIRA Environmental Management System – PEMS4.
Hicks 2017	-	0,275 L (equivalente a uma porção da bebida preparada com uma cápsula)	"cradle to grave" => Cultivo, Processamento, Embalagem, Transporte, Uso e Disposição Final. Incluindo matéria prima para fabricação do filtro e da cápsula.	Categorias disponíveis no TRACI: Depleção da camada de Ozônio, Potencial de aquecimento global, Acidificação, Poluição, Eutrofização, Carcinogênicos, Não Carcinogênicos, Efeitos respiratórios e Ecotoxicidade.	Banco de dados existentes.	SIMAPRO/TRACI/ EarthShift 2015

Autores/Ano	Área de Abrangência	Unidade Funcional (UF)	Etapas incluídas	Categorias de Impacto	Fonte de Dados	Software/Método
Humbert et al. 2009	Europa, Brasil, Colômbia e Vietnã	1 xícara (1 dl de café pronto para o consumo)	"cradle to grave" => Cultivo, Processamento, Embalagem, Transporte, Consumo e Disposição Final.	Toxicidade Humana, Efeitos Respiratórios, Radiação Ionizante, Depleção da camada de Ozônio, Oxidação Fotoquímica, Ecotoxicidade Aquática, Ecotoxicidade Terrestre, Acidificação Terrestre, Ocupação do Solo, Acidificação Aquática, Eutrofização Aquática, Aquecimento Global, Energias não Renováveis e Extração mineral; Categorias de dano: Saúde Humana, Qualidade do Ecossistema, Alterações Climáticas, Recursos e Análise da Água.	Produtores dos países analisados, próprias informações de instalações de embalagens e uso da empresa (que realizou o estudo), literatura e dados da biblioteca existente no <i>ecoinvent</i> .	SIMAPRO 7/ Impact 2002
Phrommarat 2019	Norte da Tailândia	1 xícara de café arábico quente (13,5 g de café em 150 ml de água)	"cradle to grave" => Cultivo, Processamento, Embalagem, Transporte, Distribuição aos consumidores e Disposição Final.	Ocupação do solo, Mudanças climáticas, Ecotoxicidade aquática, Eutrofização aquática, Ecotoxicidade marinha, Transformação natural da terra, Acidificação terrestre, Ecotoxicidade terrestre, Ocupação urbana do solo, Toxicidade humana, Radiação ionizante, Depleção da camada de ozônio, Formação de material particulado, Formação de oxidantes fotoquímicos, Depleção de recursos fósseis e Depleção de metais.	Dados oriundos da província do Norte da Tailândia (Chiang Rai) para cultivo, transporte, processamento e consumo). Dados do preparo da bebida foram de medição própria. Demais dados foram obtidos da literatura e do banco de dados do Ecoinvent 3.1.	World ReCiPe H/H, 2000
Salinas 2008	Guatemala	1 Kg de café verde	"cradle to gate" => Cultivo e processamento e Transporte (exportação)	Saúde Humana, Qualidade do ecossistema e Recursos.	Dados da biblioteca do SIMAPRO e sites de fabricantes (para torrefação)	SIMAPRO 7/Eco-Indicador 99

<b>Autores/Ano</b>	<b>Área de Abrangência</b>	<b>Unidade Funcional (UF)</b>	<b>Etapas incluídas</b>	<b>Categorias de Impacto</b>	<b>Fonte de Dados</b>	<b>Software/Método</b>
Salomone 2003	Sicília, Itália	1 Kg de café embalado entregue ao consumidor final	"cradle to grave" => Cultivo, Processamento, Embalagem, Transporte, Distribuição aos consumidores e Disposição Final.	Acidificação do ar, Ecotoxicidade aquática, Eutrofização da água, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade Terrestre, Aquecimento Global, Depleção da camada de ozônio, Formação de oxidantes fotoquímicos.	Banco de dados da empresa, da literatura, métodos de estimativa e dados comerciais disponíveis	TEAM 3.0/Ecobilan Métodos CML, IPPC e WMO

### 3. CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

Conforme Birkenberg e Birner, 2018, os dados dos produtores são fundamentais, uma vez que as emissões da etapa agrícola correspondem a 60% do total das emissões para a cadeia de produção do café. Portanto foram feitas entrevistas presenciais e também via e-mail com os produtores e também com especialistas envolvidos na cadeia produtiva do café para aquisição dos dados primários, além de pesquisas na literatura para elaboração do inventário.

A partir do inventário, ferramentas computacionais são utilizadas. O software SimaPro® versão PhD 8.0.3.14, com a aplicação do método ReCiPe, utilizado para avaliação de impactos ambientais e o software AspenPlus® versão V10 para modelagem do processo de gaseificação. Posteriormente, verificou-se a viabilidade técnica e econômica dos cenários estudados. Na Figura 3.1 é apresentado um resumo do que foi realizado e qual a sequência das atividades no presente trabalho.

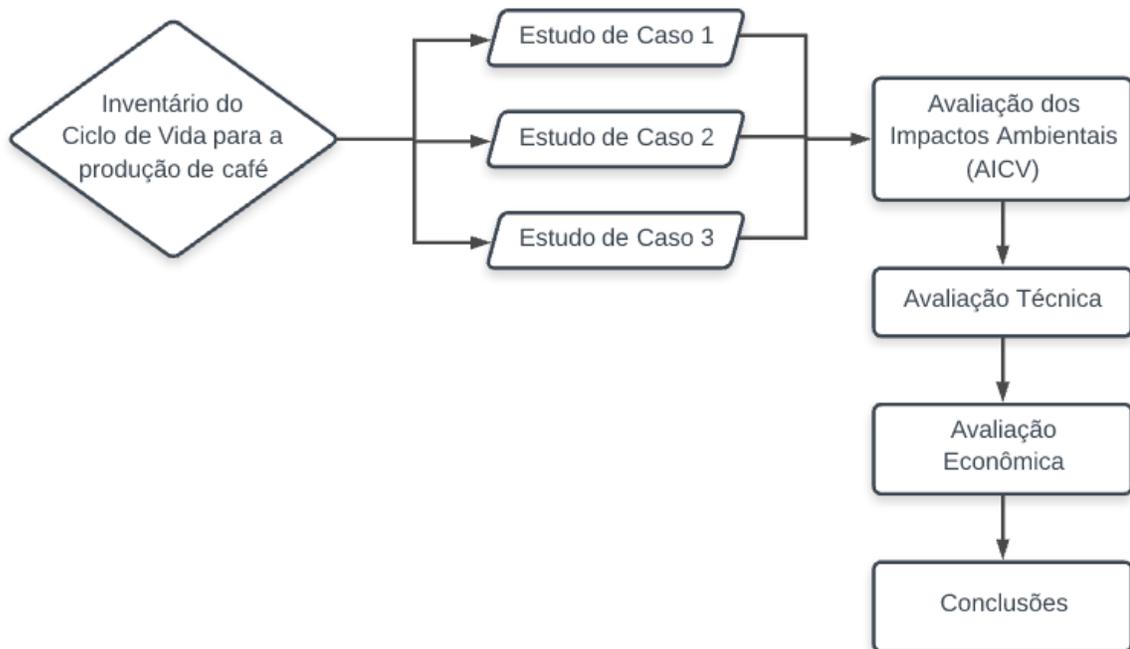


Figura 3.1 Fluxograma resumo do trabalho.

Os estudos de caso foram elaborados de forma a permitir uma visualização da cadeia de produção do café até sua exportação com foco na avaliação da possibilidade de uso do resíduo do beneficiamento como fertilizante orgânico para a lavoura existente e enquanto biomassa para geração de energia elétrica. Desta forma, foi possível avaliar o ganho ambiental para o uso do resíduo produzido.

#### a) Cenário Base – Estudo de Caso 1

O cenário base é apresentado como Estudo de Caso 1, detalhado na Figura 3.2. A plantação e o cultivo do café ocorrem com a posterior secagem, beneficiamento, classificação e transporte até a exportação, com o único objetivo de venda do grão. Neste caso, o resíduo gerado no processo de secagem do café (a casca), é descartado a céu aberto, ou seja, neste cenário base não há nenhum aproveitamento da casca.

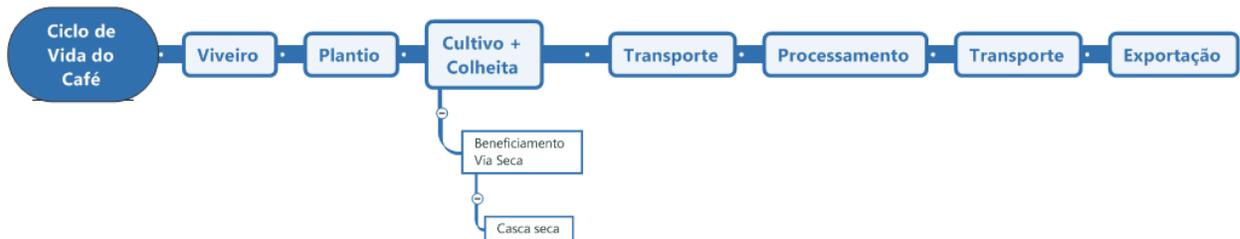


Figura 3.2 Cenário Base - Estudo de Caso 1.

#### b) Aproveitamento da casca como adubo orgânico – Estudo de Caso 2

O estudo de caso 2 representa a realidade da maioria das pequenas propriedades que produzem o café, e utilizam o resíduo da secagem nas lavouras como adubo orgânico. Este cenário é semelhante ao cenário base (estudo de caso 1), com a utilização da casca como adubo orgânico. A Figura 3.3 apresenta o estudo de caso 2.

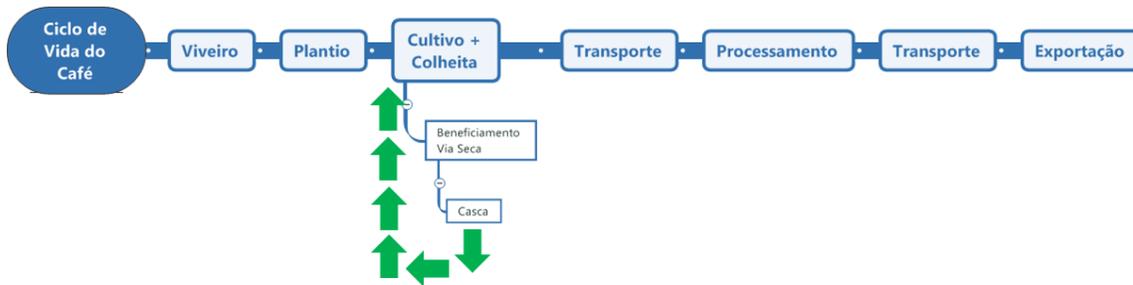


Figura 3.3 Estudo de Caso 3.

### c) Aproveitamento da casca para geração de energia elétrica – Estudo de Caso 3

No estudo de caso 3, o resíduo gerado pelo processamento via seca (em secador mecânico existente) é utilizado como fonte de biomassa para alimentação do gaseificador cocorrente, e o gás produzido irá alimentar o sistema com motor de combustão interna e gerador (ou grupo motogerador), configurando a geração de energia elétrica com uso da biomassa local. Este sistema inclui a produção da biomassa e a planta de gaseificação junto à planta de beneficiamento do café existente. Portanto, o estudo de caso 2 é basicamente o cenário 1 com a utilização do resíduo para geração de eletricidade. A Figura 3.4 representa o estudo de caso 3.

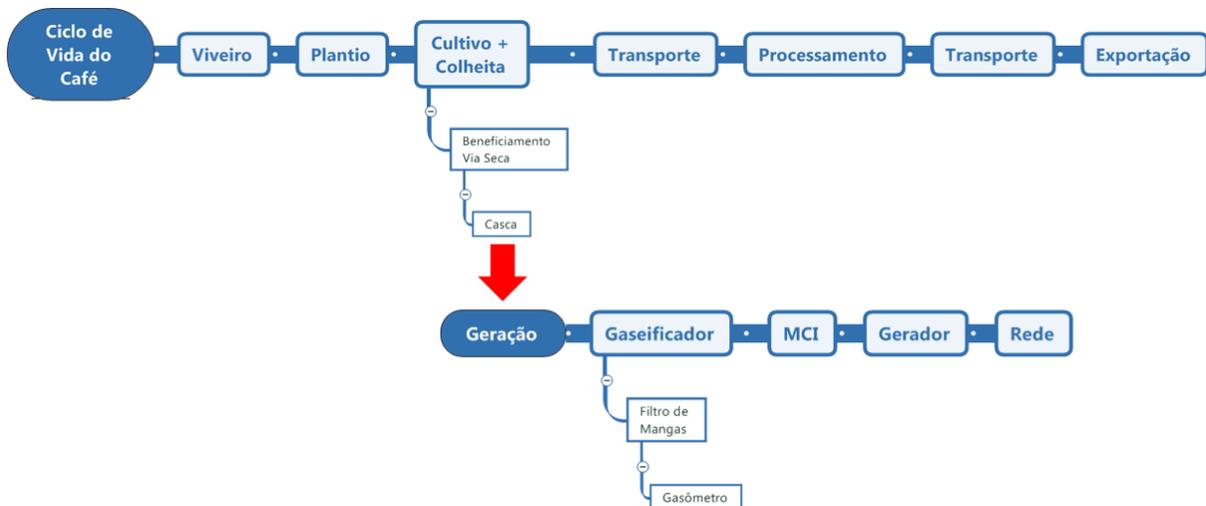


Figura 3.4 Estudo de Caso 3.

A Figura 3.5 mostra as entradas e saídas de modo geral para os sistemas onde se tem o aproveitamento da casca para a geração de eletricidade, utilizando a gaseificação e limpeza do gás, ou seja, é a representação do incremento existente no estudos de caso 3, onde há os itens relacionados na Figura 3.6. A Figura 3.6 apresenta a base de todos os cenários. Como todos os cenários possuem a fase de avaliação do ciclo de vida do café, esta Figura (3.6), traz as entradas e saídas desse processo base.

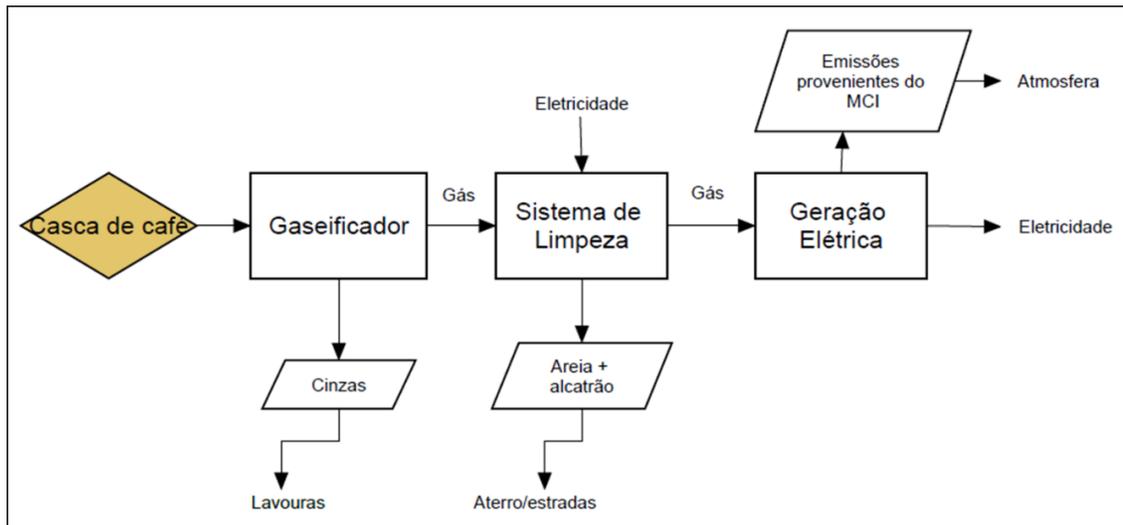


Figura 3.5 Entradas e saídas do sistema de geração elétrica.

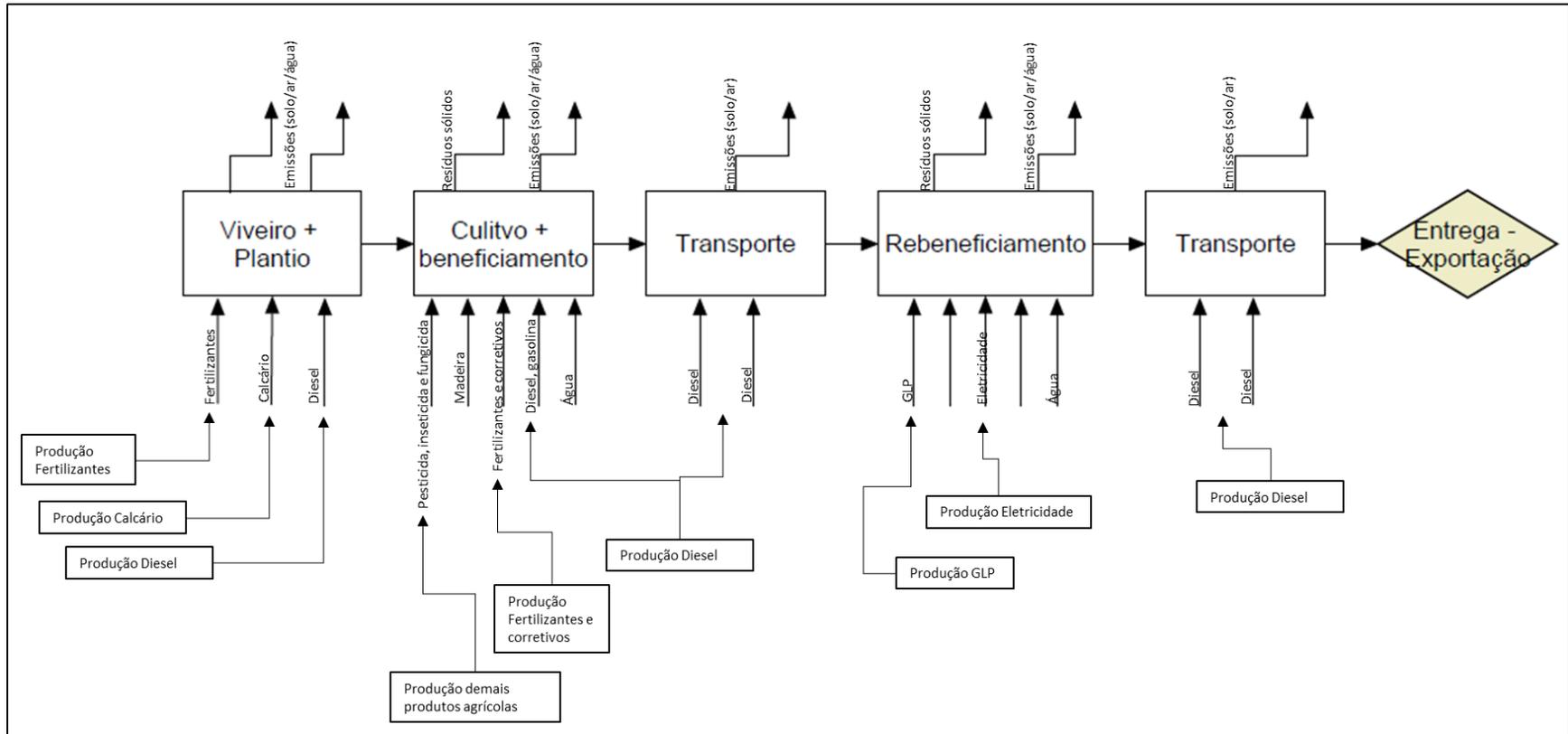


Figura 3.6 Entradas e saídas do sistema de geração elétrica.

## 3.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

O presente trabalho baseia-se nas normas parametrizadas da NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044 (2009), atendendo os requisitos necessários que possibilitam uma análise ambiental para a cadeia produtiva do café, de acordo com os seguintes itens:

### 3.1.1 Objetivo e escopo do estudo

O objetivo deste trabalho é uma avaliação dos impactos ambientais existentes na cadeia produtiva do café para as condições brasileiras. Foi escolhido para a análise, o município de Santa Rosa da Serra, localizado na região do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro, bem como os impactos da utilização da biomassa resultante do processo. A produção cafeeira analisada representa adequadamente o perfil Brasileiro no qual a plantação é de café arábica e o beneficiamento é feito via seca (majoritariamente). Nesta região existe a “cultura” de um cultivo em atendimento à qualidade necessária do café a ser exportado. A abordagem do trabalho foi do berço ao portão, uma vez que apresenta o estudo da produção do café, desde o plantio até a sua entrega para exportação.

Por meio da quantificação e qualificação dos potenciais impactos ambientais causados, pode-se implementar práticas alternativas e modificações nas práticas existentes, de modo a aumentar a sustentabilidade do produto. Este estudo apresenta significativa importância para produtores, para a indústria cafeeira, para o governo, para associações que operam com este produto (comercializadores/transportadoras) e para a comunidade em geral, possuindo então um abrangente público alvo. Devido ao grande consumo do café e sua substancial e necessária produção, qualquer modificação pode acarretar significativos impactos.

Algumas importantes considerações dentro do ciclo de vida devem ser ressaltadas:

- ✓ Todos os dados coletados são referentes a safra de 2017/2018;
- ✓ Foi considerando o transporte dos insumos agrícolas desde sua fábrica, passando pelo fornecedor e posterior entrega para os produtores em sua localidade.
- ✓ Foi considerada a produção dos insumos agrícolas como fertilizantes, corretivos e outros;

- ✓ Não foi considerada a vida útil da lavoura que varia significativamente entre regiões e de acordo com o manejo;
- ✓ A fabricação dos maquinários do cultivo também não foi considerada no sistema.

### **3.1.1.1 Unidade Funcional**

A unidade funcional estabelecida no presente trabalho é 1000 kg de café em grão, ou também denominado café seco pronto para exportação. Com esta unidade funcional obtêm-se a referência para normalizar os dados e assim efetuar comparações. Esta unidade funcional foi escolhida pois a maior parte das atividades relacionadas ao produto em questão operam com quilogramas, como a secagem, a capacidade de cargas para o transporte, a adubação e calagem, entre outras, além de ser utilizada em relevantes trabalhos correlatos.

### **3.1.1.2 Fronteira geográfica do Sistema**

Minas Gerais está localizado na região Sudeste do Brasil, com uma área cultivada de 1,2 milhões de hectares de café. Com clima tropical com subdivisões regionais devido as variações de altitude, que beneficia a produção cafeeira, o Estado possui a maior produção de grãos de café do país, como já mencionado, sendo sua produção geralmente acima de 50% da produção total do Brasil.

A temperatura média de aptidão para o cafeeiro está entre 18 e 23°C, portanto, as regiões do cerrado, triangulo mineiro, alto Paranaíba e sul de minas são áreas de boa adaptabilidade para a produção do café. Para o café arábica, a altitude recomendável é de 600 a 1200m. Portanto, apesar de Santa Rosa da Serra não pertencer a região de maior produção cafeeira no Estado (Sul e Centro-Oeste), o mesmo caracteriza bem o tipo de produção do país e produz um café que tem sido vendido para mercados internacionais.

Neste Estado, o município estabelecido para o estudo de caso foi Santa Rosa da Serra (MG), que apresenta uma economia predominantemente voltada para a cafeicultura, com um PIB percapita de R\$ 15085,67 (IBGE 2017). Santa Rosa da Serra é um município de pequeno porte (3377 habitantes), situado na mesorregião do Triangulo Mineiro e Alto Paranaíba. Está a uma

altitude de 1.040 metros e possui localização estratégica, tendo acesso a BR-354 e BR-262, importantes rotas comerciais do Estado. O município foi o quinto maior produtor de café do Estado de Minas Gerais em 2005 e no ano de 2018 apresentou uma produtividade de 40 sacas por hectare (EMATER, 2019). A Figura 3.7 mostra a localização da cidade e do Estado no país.

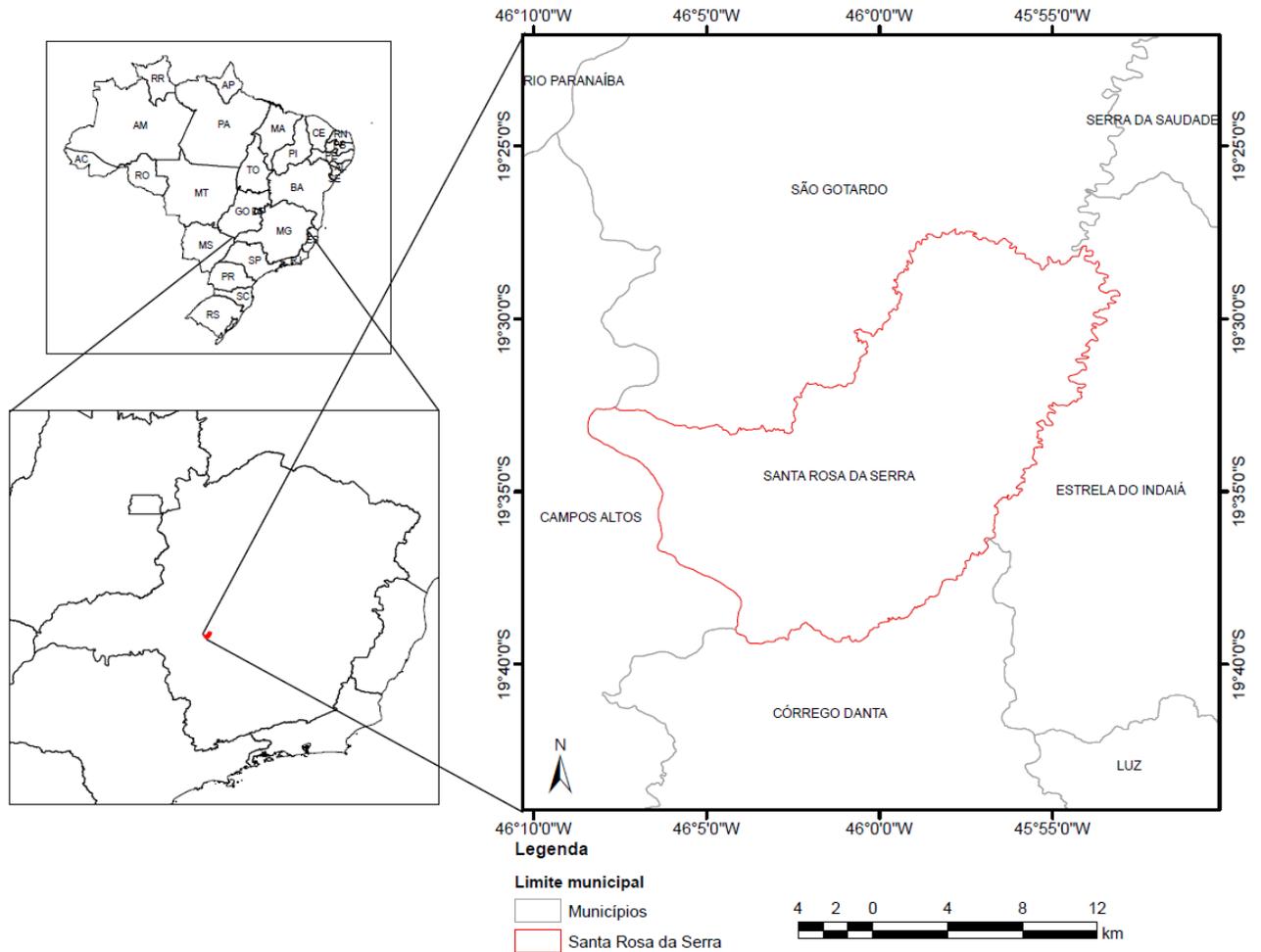


Figura 3.7 Localização geográfica do município.

A Figura 3.8 apresenta uma imagem de satélite com a plantação de café distribuída (em amarelo) em todo o município (EMATER, 2019).

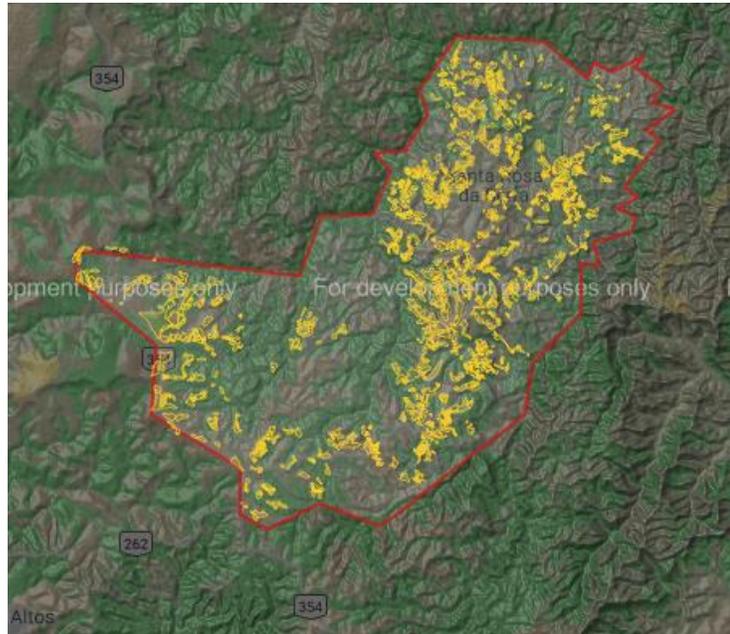


Figura 3.8 Localização geográfica do município por satélite e destaque para as plantações de café.  
Fonte: Emater, 2019.

## 3.2 FERRAMENTAS DE ANÁLISE

### 3.2.1 Software SimaPro®

O software SimaPro® (PhD 8.0.3.14) foi utilizado para execução da avaliação do ciclo de vida. Esta ferramenta foi criada em 1990 sendo esta considerada viável para executar a modelagem e analisar o desempenho ambiental de produtos e serviços, seguindo as normas e recomendações da NBR ISO 14040. Trata-se do software de ACV mais utilizado.

O programa possui dois componentes principais: uma base de dados de inventários elaborados por diversos autores e diferentes métodos de avaliação de impactos do ciclo de vida. A bases de dados pode ser expandida, modificada e criada pelo usuário (RENÓ, 2011). O software SimaPro® possibilita a modelagem de todas as fases de determinados processos, desde a extração da matéria prima até a produção de materiais, e produção do produto em si. O usuário deste software pode utilizar o seu próprio banco de dados atualizados do programa e pode também inserir as informações de entradas e saídas de todos as etapas do processo considerado e criar o seu inventário.

Conforme afirma PRÉ (2019), ReCipe é o método mais recente e harmônico disponível para execução da AICV. Este método pode ser considerado um método melhorado ou uma evolução dos métodos Eco indicador 99 e CML 2001, onde as categorias de impacto foram atualizadas. Portanto, neste trabalho, para a execução do AICV foi utilizando o método ReCipe, com abordagem midpoint, pois a abordagem endpoint é mais específica. Uma abordagem específica aumenta a possibilidade de erros. O método ReCipe tem escopo de aplicação global especialmente para as categorias de impacto de alterações climáticas, depleção da camada de ozônio e depleção de recursos (MENDES et al., 2016), logo, não é recomendado o afinamento para as categorias de dano. É um método completo com categorias importantes a serem consideradas no trabalho, alterações climáticas, uso do solo, eutrofização aquática, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática, e outras.

Conforme Bare et al. 2000, o ideal seria a possibilidade de fornecer os dois conjuntos de informações (midpoint e endpoint), dentro de uma estrutura consistente (rede de causa e efeito) pois possuem méritos e limitações complementares. Decisões podem ser tomadas utilizando a abordagem midpoint, uma vez que esta apresenta maior certeza, mas em alguns casos possui menor relevância. Já os indicadores endpoint oferecem maior relevância mas menor certeza (Bare et al., 2000).

A escolha do método a ser utilizado é de significativa importância pois, há itens de extrema importância para o estudo que não podem ser deixados de fora e dependendo do método, algumas categorias não são analisadas. Um exemplo: o método CML 2000 não inclui explicitamente, os ruídos, uso do solo e partículas finas; já o ReCiPe 2008 não inclui o ruído e apresenta uma forma limitada para lidar com a água (PRÉ, 2019).

As categorias de impacto referem-se aos impactos avaliados pelo método. ReCiPe se constitui em uma metodologia que apresenta duas classes de categorias de impacto. O primeiro grupo (midpoint) inclui 18 categorias de impacto e um segundo grupo (endpoint) com 3 categorias de impacto.

As categorias analisadas são as seguintes: mudanças climáticas, depleção da camada de ozônio, acidificação terrestre, eutrofização de água doce, toxicidade humana, formação de oxidantes fotoquímicos, formação de material particulado, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade de água doce, transformação do solo natural, depleção da água e depleção de combustíveis fósseis (LUÍZ, 2017). A Tabela 3.1 apresenta as categorias de impacto do método ReCiPe e as unidades

respectivas resultantes dos indicadores do método e em destaque (negrito) as categorias a serem utilizadas no presente trabalho.

Algumas vantagens do método ReCiPe:

- ✓ Utiliza mecanismos de impacto com escopo global, sempre que possível;
- ✓ Divergindo dos demais métodos (Eco-Indicator 99, EPS Method, LIME, and Impact 2002+), o ReCiPe não inclui impactos potenciais de extrações futuras na avaliação de impacto, mas considera que esse impacto já foi incluído no inventário.

Tabela 3.1 Categorias de impacto, de dano e unidades.

<b>Nome da categoria "midpoint"</b>	<b>Unidade resultante do Indicador do método ReCiPe</b>
<b>Mudanças Climáticas</b>	kg (CO <sub>2</sub> para o ar)
<b>Depleção da camada de Ozônio</b>	kg (CFC-11* para o ar)
<b>Acidificação Terrestre</b>	kg (SO <sub>2</sub> para o ar)
<b>Eutrofização Aquática</b>	kg (P para água doce)
Eutrofização Marinha	kg (N para água salgada)
<b>Toxicidade Humana</b>	kg (14DCB para o ar urbano)
<b>Formação de Oxidantes Fotoquímicos</b>	kg (NMVOC** para o ar)
<b>Formação de material particulado</b>	kg (PM10 para o ar)
<b>Ecotoxicidade Terrestre</b>	kg (14-DCB*** para solo industrial)
<b>Ecotoxicidade Aquática</b>	kg (14-DCB para água doce)
Ecotoxicidade Marinha	kg (14-DCB para água salgada)
Radiação Ionizante	kg (U <sup>235</sup> para o ar)
<b>Ocupação de Terras Agrícolas</b>	m <sup>2</sup> x ano (Terras agrícolas)
<b>Transformação natural do solo</b>	m <sup>2</sup> (área natural)
Ocupação Urbana do solo	m <sup>2</sup> x ano (área urbana)
<b>Depleção Aquática</b>	m <sup>3</sup> (água)
Depleção dos Recursos Minerais	kg (Fe)
<b>Depleção dos Recursos Fósseis</b>	kg (Petróleo)
<b>Categorias de Impacto "endpoint"</b>	<b>Unidade resultante do Indicador</b>
Dano à Saúde Humana	anos (perda de anos de vida por incapacidade)
Dano à Diversidade do Ecossistema	anos (perda de espécie durante o ano)
Dano à disponibilidade de Recursos	\$ (aumento do custo)

\* CFC-11: clorofluorcarbono

\*\* NMVOC: composto de carbono orgânico volátil não metano

\*\*\* 14-DCB: 1,4 diclorobenzeno

Fonte: Furtado, 2014

### 3.2.2 Software AspenPlus®

Nos últimos anos, houve um aumento no número de estudos sobre a modelagem de gaseificação de biomassa (SINGH, et al., 2013), pois a dificuldade de obtenção de dados experimentais favorece o aumento de estudos por meio de simulações e modelos matemáticos. Modelos de gaseificação em softwares são utilizados de modo a obter a composição química final do gás gerado. O software AspenPlus® é então, um simulador de processos que trabalha com equilíbrio químico, por meio da minimização de energia livre de Gibbs. Este software tem sido amplamente utilizado para modelagem de gaseificadores. A utilização de um software para modelagem de processos apresenta várias vantagens, dentre elas, a não necessidade de execução laboratorial destes processos para estudos, permite a análise de variáveis do sistema com mais flexibilidade, e ainda para o caso de laboratórios existentes, o modelo pode analisar diferentes condições, apresentando informações que possibilitam ou não a ampliação das plantas existentes.

A utilização deste software estende a tecnologia de modelagem para uma ampla variedade de processos, pois trata-se de um sistema no qual o projeto e simulação é flexível e baseado em subprogramas já agregados. Esta ferramenta possibilita o desenvolvimento de um modelo que represente adequadamente o processo e conseqüentemente prediz o comportamento do sistema (propriedades de correntes, condições de operação, dimensões de equipamentos), utilizando o balanço de massa e energia, equilíbrio de fases, equilíbrio químico ou ainda cinética (NÁSNER, 2015).

Contrastando com a maioria dos simuladores existentes, o AspenPlus® permite diferentes tipos de correntes de materiais no ambiente da modelagem, envolvendo sólidos, fluxos de vapor e líquido, podendo representar fluxos multifásicos e também lidar com substâncias complexas, como a biomassa. É necessário a entrada dos componentes da matéria-prima no modelo e estes estão divididos no programa em convencionais e não convencionais (DENG et al., 2019). A utilização dos componentes não convencionais se dá por meio das análises elementar e imediata.

No AspenPlus®, componente convencional é o nome designado aos componentes existentes, como  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $CO$ , e outros, com propriedades químicas conhecidas. Já os componentes não convencionais, como a biomassa e cinzas não possuem propriedades químicas definidas, ou seja, é necessária uma análise imediata e elementar para que suas propriedades (entalpia e densidade) sejam calculadas.

O software utiliza os métodos HCOALGEN e DCOALIGT para parametrizar as propriedades entalpia e densidade respectivamente, dos componentes não convencionais como a biomassa e cinza. O modelo utiliza os blocos apresentados com suas características gerais na Tabela 3.2.

A Figura 3.9 representa o processo de gaseificação, que consiste na alimentação da casca de café no reator, onde ocorre a decomposição desta biomassa por pirólise no reator RYield, com a formação de um produto denominado DECOMPO. O composto é formado por sólido e gases (CHAR e GASCHAR), que serão desagregados no separador 1 (SEPARA 1). O carvão é direcionado para a etapa de combustão (COMBREG), no reator RStoic, sendo adicionado a um agente combustor (ar atmosférico). Esta etapa promove a liberação do calor que sustenta o processo. Os gases oriundos do separador 1 são destinados diretamente para o componente de redução RGibbs, junto ao produto da combustão. O produto da redução (GASBRUTO), é composto pelo gás de síntese contendo resíduos indesejados e umidade. O separador 2 (SEPARA 2), executa a última etapa do processo, separando o gás energético (SYNGAS) dos resíduos (RESID+UM).

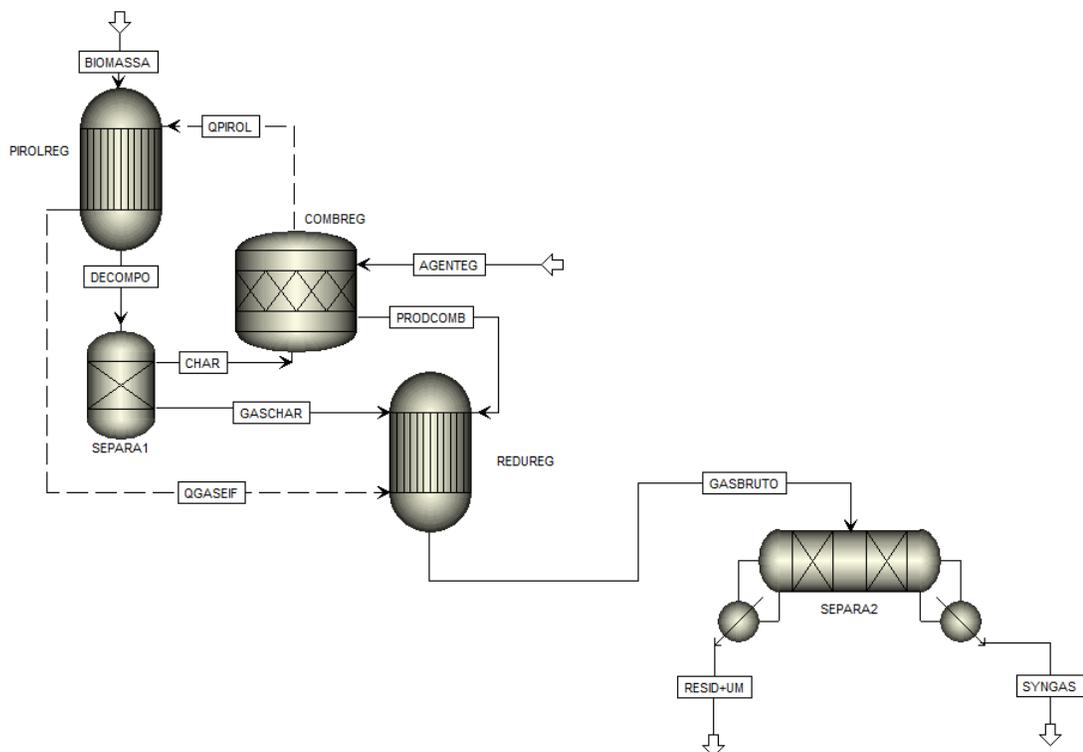


Figura 3.9 Modelagem do processo de gaseificação em AspenPlus®.

Tabela 3.2 Blocos do modelo apresentado (gaseificação em AspenPlus®).

Nome	Tipo	Descrição
PIROLREG	RYield	A fim de modelar a etapa pirólise (PIROLREG), foi implementado um reator não estequiométrico (RYield) que possibilita a definição dos produtos da decomposição térmica no início da gaseificação. Converte o fluxo de biomassa em sua composição elementar. A temperatura de pirólise foi fixada em 700 °C, a pressão em 1 bar e foi utilizada a fase líquida e vapor.
COMBREG	RStoic	A fim de modelar a região de combustão (COMBREG), foi implementado um reator estequiométrico (RStoic) que executa o processo de combustão do carvão produzido na etapa de pirólise através de equações químicas de oxidação. A temperatura de combustão foi fixada em 950 °C, a pressão em 1 bar com as fases líquida e vapor. A reação básica utilizada foi $C + O_2 \rightarrow CO_2$ , e o elemento limitante o oxigênio a uma fração de conversão de 95 %.
REDUREG	RGibbs	A fim de modelar a região de redução (REDUREG), foi implementado um reator de reação (RGibbs) que executa a redução a partir do modelo de minimização da energia livre de Gibbs. A pressão foi fixada em 1 bar e todos os compostos foram considerados como produtos.
SEPARA 1	Sep	Foi utilizado um separador que direciona 85% do carbono obtido durante a pirólise para a região de combustão.
SEPARA 2	Sep	O separador (SEPARA 2) opera como filtro e secador, removendo todos os contaminantes que alteram a composição dos gases de síntese.

### 3.2.3 Potência Térmica, Disponibilidade e potencial técnico da biomassa

O poder calorífico superior (PCS) é a energia total liberada pelo combustível, que pode ser determinado utilizando um calorímetro ou calculado a partir da composição elementar. Já o poder calorífico inferior (PCI) é a energia útil liberada pelo combustível, descontando as perdas devido à evaporação da água contida no combustível. Conforme Parikh et al., 2005, o cálculo do PCS pode ser realizado a partir de dados elementares, segundo a equação 3.1. Nesta equação, as siglas CF, MV e AS referem-se às quantidades de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, respectivamente. A equação 3.2 é utilizada para o cálculo do PCI do gás gerado pela gaseificação ( $PCI_{gg}$ ).

$$PCS = 0,3536 * CF + 0,1559 * MV - 0,0078 * AS \quad (3.1)$$

$$PCI_{gg} = (CO * 126,36 + H_2 * 107,98 + CH_4 * 358.18) \quad (3.2)$$

Energia térmica ou potência térmica (PT) é o conteúdo energético disponível em uma determinada vazão de um combustível, conforme a equação 3.3, onde  $\dot{m}$  é a vazão mássica e PCI o poder calorífico inferior.

$$PT = PCI \times \dot{m} \quad (3.3)$$

Para o cálculo da quantidade de resíduos produzida pela cafeicultura no Brasil, no Estado de Minas Gerais e da região do estudo, é utilizado o Fator de conversão (Fc), calculado pela fórmula 3.4.

$$Fc = \sum Fr * Fd \quad (3.4)$$

Denomina-se Fr o do fator de resíduos, que representa a quantidade de resíduos gerados com base na quantidade produzida e Fd o fator de disponibilidade. O Fator de disponibilidade representa em percentual, o total de resíduo extraído da biomassa, e para a casca do café, este valor tem sido utilizado com alguma variação, como mostrado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Fator de Disponibilidade utilizado para o resíduo do café (casca).

<b>Fator de Disponibilidade</b>	<b>Fonte</b>	<b>Base</b>	<b>Ano</b>
0,5	Carvalho F. C.	<i>Considera que o rendimento da casca seja 50% em relação ao café beneficiado.</i>	1992
0,5	Portugal Pereira et al.	-	2015
0,4	Atlas de Biomassa de Minas Gerais	<i>Considera que o restante das cascas deve permanecer no campo para garantir a sustentabilidade da cultura.</i>	2017
0,21	Magalhães et al.	<i>Considera que 21% da massa do grão é convertida em resíduo sólido.</i>	2008

Fonte: Carvalho 1992; Magalhães et al., 2008; Januário dos Reis e Sathler dos Reis, 2017.

Para este trabalho utilizou-se o Fator de Relação (Fr) igual a 1 e o Fator de Disponibilidade (Fd) igual a 0,5, pois além de ser o mais utilizado para o café, é o índice que mais se aproxima da realidade, em quantidade deste resíduo disponível nas propriedades (aproximadamente 50% do café produzido).

Os geradores apresentam eficiência em torno de 90% a uma carga nominal. A Tabela 3.4 apresenta a taxa de eficiência que pode ser considerada de acordo com a tecnologia para conversão de biomassa em eletricidade, onde pode ser observado que os motores de combustão interna, acoplados a gaseificadores, têm eficiência entre 27 e 31%. Em se tratando da conversão primária por meio da gaseificação, a capacidade elétrica para o MCI está entre 100 kW e 2 MW e há poucas ofertas comerciais e projetos com sucesso em seu desenvolvimento.

Tabela 3.4 Rotas de Conversão termoeletrica para biomassa.

Conversão Primária	Conversão Intermediária	Conversão Final	Capacidade Elétrica	Eficiência	Nível de desenvolvimento da tecnologia
Combustão	Geração a Vapor	Motor a Vapor	200 kW - 2 MW	10 - 12%	Comercial
		Turbina a Vapor	> 2 MW	15 - 40%	Comercial
	-	Motor Stirling	0,5 kW - 100 kW	14 - 20%	Demonstração
	-	Turbina a gás de queima externa	> 400 kW	25 - 30%	Demonstração, quase comercial
	-	Ciclo combinado	> 10 MW	40 - 55%	Demonstração/ quase comercial
Gaseificação	-	<b>Motor de Combustão Interna</b>	<b>100 kW - 2 MW</b>	<b>27 - 31%</b>	<b>Poucas ofertas comerciais e projetos de sucesso</b>
	-	Microturbinas	5 kW - 100 kW	15 - 25%	Alguns projetos demonstrativos
	Extração de H <sub>2</sub>	Células de combustível	20 kW - 2 MW	25 - 40%	Pesquisa e Desenvolvimento
Combustão + Gaseificação	-	"Co-firing"	> 20 MW	-	Comercial

Fonte: Sánchez 2010; Lora et al., 2012a.

Utilizando a tecnologia de gaseificação para verificar a energia disponível e entregue pelo gaseificador, o cálculo é dado pela equação 3.5 e na equação 3.6, é calculada a potência do gerador a ser instalado, ambos considerando 90% do tempo no ano.

$$E_d = t_{\text{café}} * F_c * \text{PCI} * \eta_g \quad (3.5)$$

$$P = \left( \frac{E_d}{\Delta t} \right) * \eta_m \quad (3.6)$$

Onde:

$E_d$  = Energia disponível do gaseificador (MJ/ano)

- $t_{\text{café}}$  = Produção de café (kg/ano)  
 $F_c$  = Fator de conversão  
 $PCI$  = Poder calorífico inferior da biomassa (MJ/kg)  
 $\eta_g$  = Eficiência do gaseificador em porcentagem (%)  
 $P$  = Potência do gerador (kW)  
 $\Delta t$  = Tempo de atendimento do motor de combustão interna  
 $\eta_m$  = Eficiência do motor de combustão interna em porcentagem (%).

### 3.2.4 Cálculo do Fertilizante Orgânico

Para o cálculo da quantidade de fertilizante orgânico necessário a ser utilizado, é preciso conhecer o teor de nutrientes neste fertilizante sólido com base na matéria seca e o índice de conversão da forma orgânica para a forma mineral. O índice de conversão representa o percentual médio de transformação da quantidade total do nutriente da forma orgânica para mineral. A Tabela 3.5 apresenta o índice de conversão que deve ser utilizado de acordo com o cultivo.

Tabela 3.5 Índice de conversão utilizado.

Nutrientes	Índice de Conversão*		
	1° Cultivo	2° Cultivo	3° Cultivo
N	40	30	10
P	50	20	10
K	100	-	-
Ca	50	20	10
Mg	50	20	10
S	50	20	10

\*tempo de cultivo de 100 a 150 dias, sendo um cultivo de espécie anual ou de período com máxima exigência de lavouras perenes.

Fonte: Furtini et al., 2001.

A Tabela 3.6 apresenta o teor de nutrientes e relação C/N da casca de café e nota-se que o conteúdo de nutrientes é relativamente baixo, por isso para essa adubação ser equivalente à mineral, é necessário uma maior quantidade. Portanto, para analisar a viabilidade da substituição orgânica pela mineral é necessário realizar uma análise econômica.

Tabela 3.6 Quantidade de matéria seca, nutrientes e relação C/N da casca de café (em %).

<b>Fertilizante orgânico</b>	<b>Matéria seca</b>	<b>N</b>	<b>P2O5</b>	<b>K2O</b>	<b>C/N</b>
Casca de Café	80 - 90	0,6 - 1,2	0,2 - 0,5	2,1 - 3,8	50 - 120

Fonte: Furtini et al., 2001.

Conhecendo o teor dos nutrientes no fertilizante orgânico sólido, conhecendo o teor da matéria orgânica seca e o índice de conversão da forma orgânica para a forma mineral, pode se calcular a quantidade necessária do fertilizante orgânico. A equação 3.7 apresenta:

$$X = \left( \frac{A}{\frac{B}{100} * \frac{C}{100} * \frac{D}{100}} \right) \quad (3.7)$$

Onde X é a quantidade do fertilizante orgânico sólido a se aplicar (kg/ha; ou g/planta); A representa a quantidade do nutriente a ser aplicado (kg/ha ou g/planta); B é o teor da matéria seca do fertilizante (%); C é o teor do nutriente na matéria seca (%) e D é o índice de conversão.

### 3.2.5 Ferramentas de Análise Econômica

Para avaliação da viabilidade econômica e consequente implementação desta prática para os produtores, será pesquisada a produção do resíduo nos municípios que são os maiores produtores de café do Estado. Conforme Sommerfeldt e Madani (2017), os indicadores mais utilizados para avaliações econômicas são o valor presente líquido, a taxa interna de retorno, o custo nivelado de energia, e o tempo de retorno de investimento, e estes indicadores são utilizados seguindo esta mesma ordem em porcentagens de uso de 45%, 41%, 39%, e 22%, respectivamente. Os parâmetros principais selecionados para averiguação do projeto de investimento neste trabalho são descritos abaixo.

#### a) Valor Presente Líquido

O Valor Presente Líquido (VPL) ou também denominado valor atual (VA) viabiliza o conhecimento de todas as necessidades de caixa, ou ganhos do projeto em termos do dinheiro de hoje. Constitui-se o valor atual do investimento e sua rentabilidade. O cálculo do VPL é feito

atualizando o fluxo de caixa de um investimento para o valor do dia, utilizando a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), uma taxa de desconto.

$$VPL = \sum_{t=1}^m \frac{E_n \cdot T - C_{om}}{(1+i)^n} - I \quad (3.8)$$

Onde tem-se: E = energia produzida anualmente, T = tarifa de venda de energia, i = taxa de desconto, m = vida útil do empreendimento, C<sub>om</sub> = custo de operação e manutenção, I = Custo de investimento e n = ano.

b) Taxa Interna de Retorno

A Taxa Interna de Retorno (TIR) permite encontrar a remuneração do investimento em termos percentuais, ou sua potência máxima. É a taxa de juros que iguala receitas e custos na data 0, anulando o VPL, não apresentando prejuízo ou lucro. A TIR mede o percentual de ganho do investimento, sendo um método bastante utilizado.

c) Custo nivelado da eletricidade

O custo nivelado da eletricidade ou em inglês *Levelized Cost of Electricity*, é conhecido como LCOE. O custo nivelado de energia é calculado descontando-se os fluxos de caixa líquido equivalentes no primeiro ano em que a usina inicia sua operação e divide-se pela receita anual de vendas de eletricidade gerada ao longo do tempo de vida do projeto (Dyoke et al., 2014). Assim irá estimar o custo da eletricidade produzida durante a vida útil da usina de geração. O LCOE é definido na equação 3.9.

$$LCOE = \frac{\sum \frac{C_n}{(1+i)^n}}{\sum \frac{E_n}{(1+i)^n}} \quad (3.9)$$

Onde: E é a energia produzida anualmente, i representa a taxa de desconto, C<sub>n</sub> o custo a cada ano e n o ano de análise.

### 3.2.5.1 Custo de Investimentos

Para calcular o investimento inicial total foi considerada a soma dos custos dos componentes individuais da planta a ser construída, incluindo sistema de gaseificação, limpeza e geração.

Deve-se salientar que a tecnologia de gaseificação embora presente em muitos estudos, ainda não é amplamente utilizada comercialmente, portanto, para precificar o gaseificador, foi utilizado o valor, em reais, por kW produzido, com base na média de trabalhos existentes do Instituto de pesquisa NEST, da Universidade Federal de Itajubá e uma cotação feita no mercado, (empresa AGTerm), conforme a Tabela 3.7 O valor médio do gaseificador por KW elétrico produzido, foi de R\$ 3.816 e este valor foi utilizado para a análise do custo de investimento.

Tabela 3.7 Valores dos equipamentos utilizados para gaseificação de biomassa

<b>Biomassa</b>	<b>Gaseificador</b>	<b>Valor</b>	<b>Moeda</b>	<b>Potência</b>	<b>Unidade</b>	<b>Fonte</b>
Madeira	Leito Fixo	177.832	real	50	kWe	Sales 2007
Madeira	Leito Fixo	362.938	real	100	kWe	Sales 2007
Madeira	Leito Fixo	1.833.500	real	500	kWe	Sales 2007
RSU	-	250.000	real	500	kWt	Luz 2013
RSU	-	430.000	real	1000	kWt	Luz 2013
Cavaco de madeira	-	243.000	real	50	kWe	Nascer 2015
Biomassa granulada	Leito Fixo	360.000	real	500	kWt	AGTerm 2020

O valor do sistema de limpeza foi considerado também como valor por kW baseado no trabalho de Sales 2007, onde o valor médio do sistema de limpeza é de R\$ 247.594,3 para um sistema de 500 kW, ou seja, tem-se um valor médio de R\$ 495,2 reais por kW. Os valores referentes ao grupo gerador foram cotados no mercado brasileiro no ano de 2020, em conformidade com as potencias consideradas. Mas vale ressaltar que o gaseificador engloba a maior parte do valor dentro do custo total do investimento em equipamentos. A Tabela 3.8 mostra outros custos, chamados de custos indiretos que também devem ser incluídos no custo total para implantação da unidade de geração elétrica como projeto de engenharia, obras civis, montagem dos equipamentos, instrumentação e controle, entre outros.

Tabela 3.8 Incremento percentual para estimativa de custo de investimento

<b>Atividade</b>	<b>Incremento Percentual (%)</b>
Projetos de Engenharia	7,9
Construção Civil	14,64
Montagem dos Equipamentos	5
Elétrica/Comissionamento da planta	4,4
Outros serviços	1,2

Fonte: Adaptado de Porcu et al 2019

O custo total de implantação da usina de geração de eletricidade é dado pela soma dos custos do investimento (Tabela 3.7) e dos custos indiretos aplicados (Tabela 3.8).

### 3.2.5.2 Custo de operação e manutenção

Os custos operacionais e de manutenção foram fixados em 5% do investimento inicial (Santos et al., 2018). Os custos com operação e manutenção de uma instalação incluem os custos fixos, como mão-de-obra, taxas, e custos variáveis, como transporte da biomassa, consumíveis, etc.

### 3.2.5.3 Considerações Gerais

1. O modelo econômico é feito baseado na venda da eletricidade para as propriedades que possuem maior produção do café e do resíduo, portanto, foram avaliados os cinco municípios do Estado de Minas Gerais que apresentam maior produção de café.
2. Avaliou-se o investimento variando sua taxa de juros em quatro cenários.
  - a) Taxa Selic de 3%, referente ao mês de maio do ano de 2020.
  - b) Taxa Selic de 6,04% a.a média acumulada do ano de 2019.
  - c) Considerando taxa de juros de 8,81% a.a. Esta taxa de juros é a soma da TLP (Taxa de Longo Prazo obtida em abril de 2020) de 4,94% a.a, com 2,87% a.a. de taxa de risco de crédito e 1% a.a. de remuneração básica do BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento) totalizando 8,81% a.a.
  - d) Taxa Selic, sendo de 10% a.a.

3. Foi definido que a precificação da energia seria dada pelo modelo de compensação, onde a energia produzida é comercializada enquanto crédito que pode ser utilizado em até 60 meses pela propriedade (explicado no item 2.1).
4. Considerou-se o valor para venda da eletricidade, de 0,4590 R\$.MWh<sup>-1</sup> valor segundo a média tensão, bandeira verde e horário fora de ponta.
5. Dólar utilizado para operações: R\$ 4,25 (média dos últimos 7 meses até junho/2020).
6. Taxa Mínima de Atratividade (TMA): 10%.
7. Vida útil do projeto: 20 anos

## 4. CAPÍTULO 4 - INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

Neste item são apresentados os dados utilizados para execução do inventário do ciclo de vida do processo de produção do café e do resíduo, bem como da sua utilização. Os dados referem-se ao cultivo manual e mecanizado (MAN e MEC), respectivamente, pois foram analisadas duas propriedades com práticas de manejo que possuem significativas diferenças. Esta divisão entre MAN e MEC ocorre para quase todas as etapas, tais como viveiro, preparo do solo e plantio, cultivo, processamento e parte do transporte; sendo que o transporte para o porto é considerado igual para ambos os modelos de cultivo.

A Tabela 4.1 mostra as características principais que caracterizam cada lavoura, como área, número de plantas, produção e produtividade.

Tabela 4.1 Definições dos cultivos Mecanizado e Manual.

	<b>Unidade</b>	<b>MEC</b>	<b>MAN</b>
Nome		Mecanizada	Manual
Área	ha	13	1
Número de plantas		50.000	3.000
Produção	kg	22.620	3.360
Produtividade	sacas/ha	29	56

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO

O café é um produto sazonal, pois durante a idade produtiva da planta, a colheita ocorre uma vez a cada ano. Por ser um produto que valoriza com a melhora da qualidade, as etapas de manejo como a correção do solo, o cuidado com pragas, e também a correta secagem, armazenagem e classificação são fatores fundamentais para agregar valor ao produto final.

Após o plantio no solo, o cafeeiro demora de 2 a 3 anos para alcançar sua idade produtiva, tempo que varia conforme a espécie plantada. Nesse período há pequenas colheitas, uma a cada ano, denominada “cata”, uma vez que a quantidade de grãos de café produzida pela planta ainda é pequena, pois a mesma ainda se encontra nos estágios iniciais de seu desenvolvimento.

Para este trabalho, considerou-se as etapas da cadeia até a exportação, incluindo produção de mudas, plantio, etc, mas foi considerado um cafeeiro em idade produtiva para a etapa de cultivo, sem contabilizar a vida útil da planta.

Caso seja considerada a vida útil da lavoura, deve ser assumido que a partir de 3 anos, a lavoura alcança sua idade produtiva, variando conforme a espécie e obedecendo uma bienalidade, como já explicitado, em que o cafeeiro não desempenha as altas produtividades por anos consecutivos. Com aproximadamente 15 anos, a plantação já começa a necessitar de outras intervenções, além do trato comum. É comum após os 15 anos ser executada a poda da lavoura, para que inicie um novo ciclo de produtividade da planta. As principais atividades que envolvem o processo produtivo são descritas a seguir.

#### **4.1.1 Plantio em viveiro**

Esta etapa não é considerada na maioria dos trabalhos, mas é de fundamental importância, pois é nesta fase que ocorre a preparação da muda e sua posterior transferência para o solo, e deve seguir as diretrizes agronômicas de manejo, pois uma muda de boa qualidade ou não, interfere totalmente no futuro cafeeiro.

Nesta fase é necessária a construção de um viveiro fechado e coberto com tela de sombreamento (sombrite). A tela irá reduzir a exposição das mudas aos raios solares, reter a umidade por mais tempo, reduzir a entrada de insetos e amenizar o vento. Após construído o viveiro, são produzidas as mudas. Para o cultivo é feita uma mistura composta por areia, material orgânico (esterco curtido) e fertilizantes. A cada mistura são utilizados 180 litros de areia, 60 litros de esterco e 5 litros de fertilizantes, formando a mistura de 245 litros. São necessários ainda os recipientes onde as sementes serão plantadas junto a esta mistura. Todo esse processo é feito manualmente, sem uso de maquinários.

As plantas ficam prontas para a transferência para o solo em um período de 6 a 7 meses, o que pode ser mais ou menos longo, a depender da espécie da semente. A Tabela 4.2 apresenta os itens relacionados na etapa do viveiro, para produção das mudas considerando que a madeira, sombrite e o recipiente de plástico utilizados na construção do viveiro não serão contabilizados, pois consideram-se existentes e disponíveis na propriedade. O viveiro onde são produzidas as

mudas de café é mostrado na Figura 4.1, em períodos diferentes, correspondendo a Figura 4.1 (a) início do plantio e a Figura 4.1 (b) a um momento em que as mudas já estão desenvolvidas e prontas para serem transferidas para o solo.

Tabela 4.2 Parâmetros de plantio das mudas em viveiro na UF.

Parâmetros	Unidade	Quantidade	
		MEC	Man
Areia	1	329,62	209,98
Húmus curtido (esterco)	1	109,87	69,9
Fosfato (super simples)	1	9,16	5,83

Fonte: Fazenda MEC, 2019 e Fazenda MAN, 2019.



Figura 4.1 Viveiro de mudas de café a) estágio inicial; b) estágio final.

Fonte: Fazenda MEC, 2019 e MF Rural, 2019.

#### 4.1.2 Preparo do solo e Plantio

Após a escolha da área para o plantio do cafezal, será realizado o preparo do solo. Este preparo se inicia com o revolvimento do mesmo, por meio de tratores que promovem a limpeza da área, para retirar a vegetação rasteira e promover a aeração do solo, facilitando o plantio. Então é realizada a calagem do solo, visando a corrigir a acidez, neutralizar o alumínio e manganês tóxicos, fornece cálcio e magnésio e ainda melhorar a disponibilidade de nutrientes (MESQUITA et al., 2016).

Com a área revolvida e tratada, segue-se a execução da preparação, com abertura de sulcos no solo (coveamento), de acordo com as linhas de plantio previamente demarcadas. Posteriormente, é realizada uma adubação, dentro do sulco, e então é realizado o plantio. Os tratores utilizados apresentam consumo específico de diesel de 4,49 (l/ha) (MACEDO et al., 2008). As demais atividades incluídas nessa etapa são realizadas manualmente. O diesel e os insumos utilizados estão discriminados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Parâmetros de atividades em plantio na UF.

Parâmetros	Unidade	Quantidade	
		MEC	MAN
Diesel (trator)	l	2,58	1,33
Calcário	kg	1725	891
Fosfato (supersimples)	kg	575	297

Fonte: Fazenda MEC, 2019 e Fazenda MAN, 2019.

Na Figura 4.2 é apresentada a sequência de atividades necessárias para tratar o solo e prepará-lo para receber a planta no viveiro.



Figura 4.2 Sequência de atividades para execução do plantio.

### 4.1.3 Cultivo

O cultivo inclui o processo de crescimento e manutenção da lavoura de acordo com a requerida produtividade da planta de café. É importante salientar a importância da análise do solo, feita por grupo técnico especializado (agrônomos) antes de se conduzir o início das práticas cultivares, uma vez que ações incorretas para o trato da lavoura podem prejudicar a produtividade e qualidade do produto.

A entrada mais relevante para o cultivo do café é quantidade de fertilizantes utilizados (NOPONEM, 2012). Os demais consumos são: água, pesticidas, inseticidas, fungicidas, calcário, diesel e gasolina. São realizadas várias aplicações por ano, dependendo do manejo feito pelo agricultor. As Tabelas 4.4 e 4.5 apresentam os insumos utilizados para o manejo mecanizado (MEC) e manual (MAN), respectivamente.

Tabela 4.4 Insumos utilizados no cultivo do cafeeiro mecanizado na UF.

<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Água	l	920
Combustível (diesel)	l	82,73
Fungicida	kg	1,30
Inseticida	kg	0,93
Herbicida	kg	4,27
Zinco	kg	1,28
Manganês	kg	0,40
Magnésio	kg	0,74
Sulfato de Magnésio	kg	81,84
Ferro	kg	0,34
Ácido Bórico (óxido de boro)	kg	5,52
Fosfato (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 28% - K <sub>2</sub> O 26%)	kg	0,67
Nitrato de Amônio	kg	769,62
Nitrato (Mn 4% - Zn 6%)	kg	2,45
Boro (B 10% - N 5%)	kg	0,80
Fosfato (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 8% - K <sub>2</sub> O 5%)	kg	1,13
Fosfato (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 30%)	kg	0,43
Carbonato de Cálcio e magnésio	kg	371,54

Fonte: Fazenda MEC, 2019.

Tabela 4.5 Insumos utilizados no cultivo do cafeeiro de cultivo manual na UF.

<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Água	l	534,60
Combustível (diesel - caminhão)	l	32,94
Combustível (gasolina)	l	8,38
Fungicida	kg	3,31
Inseticida	kg	0,79
Cobre (Cu 5% - N 5% - S 3%)	kg	2,67
Zinco (Zn 7% - N 5% - S 3%)	kg	3,30
Fosfato (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 8% - K <sub>2</sub> O 8%)	kg	2,53
Nitrato (N10% - Mn 4% - Zn 6%)	kg	3,61
Boro (B 10% - N 5%)	kg	2,67
Nitrato de amônio	kg	891
Carbonato de Cálcio e magnésio	kg	1782

Fonte: Fazenda MAN, 2019.

O consumo de combustíveis na etapa do cultivo, citados nas Tabelas 4.4 e 4.5, é detalhado nas Tabelas 4.6 e 4.7, de acordo com o tipo de equipamento ou veículo utilizado para os cultivos MEC e MAN.

Tabela 4.6 Consumo de diesel de acordo com as atividades do cultivo conforme a UF - MEC.

<b>Atividade/Equipamento</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Base</b>
Pulverizador Arbus 2.000	1	9,29	Trator
Máquina para Calcário	1	0,53	Trator
Pulverizador Herbicida	1	5,97	Trator
Máquina de Adubação	1	4,88	Trator
Pulverizador chão (fungicida/inseticida)	1	3,72	Trator
Roçadeira	1	7,38	Trator
Colhedora de café	1	18,98	Trator
Transporte dos corretivos agrícolas	1	10,74	Caminhão
Transporte dos demais produtos agrícolas	1	21,25	Caminhão
<b>Total - Base trator</b>	1	50,74	
<b>Total - Base caminhão</b>	1	31,99	

Fonte: Fazenda MEC, 2019.

Tabela 4.7 Consumo de diesel de acordo com as atividades do cultivo conforme a UF - MAN.

<b>Atividade/Equipamento</b>		<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Base</b>
Roçadeira	gasolina	1	7,13	Manual
Pulverizador	gasolina	1	1,25	Manual
Transporte dos Colhedores SR - LA	diesel	1	5,94	Caminhão
Transporte do café LA - US	diesel	1	5,94	Caminhão
Transporte dos corretivos agrícolas	diesel	1	6,54	Caminhão
Transporte dos demais produtos agrícolas	diesel	1	14,52	Caminhão
<b>Total - Base manual</b>		1	8,38	
<b>Total - Base caminhão</b>		1	32,94	

Fonte: Fazenda MAN, 2019.

A Tabela 4.8 é um detalhamento do transporte de corretivos e produtos agrícolas que são citados nas Tabelas 4.6 e 4.7. Esta Tabela (4.8) apresenta a distância percorrida e o consumo de diesel (na UF) para o transporte de produtos agrícolas (fertilizantes, herbicida, fungicida, etc) e corretivos. Na Tabela 4.8 está descrito transporte de produtos químicos SP-RP, considerando o transporte saindo do Estado de São Paulo (SP), na cidade de Paulínia até a cidade de Rio Paranaíba (RP); RP-LA, o transporte saindo do Rio Paranaíba (RP) para a lavoura (LA). Paulínia foi considerada, pois é a cidade onde é produzida a maior parte de produtos agrícolas utilizados na região. E os corretivos agrícolas (AR-LA), saem da cidade de Arcos (AR) para lavoura (LA). Arcos é a cidade onde são produzidos todos os corretivos agrícolas utilizados na região de estudo. Foi assumido que:

- ✓ O transporte de produtos químicos é executado por carreta com capacidade de 27 toneladas e consumo de 2 km/litro;
- ✓ O transporte dos produtos químicos para a cidade de Rio Paranaíba (ponto de recebimento) retorna carregado com as embalagens para a fábrica, portanto é contabilizado apenas a ida;
- ✓ O caminhão que transporta os produtos químicos para a lavoura vai carregado e volta vazio, portanto, foi contabilizada a distância de ida e volta;
- ✓ O caminhão que transporta os corretivos agrícolas para a lavoura vai até a cidade de Arcos (local de produção dos corretivos) vazio e volta carregado, pois o caminhão pertence a propriedade, portanto, foi contabilizada a distância de ida e volta e o mesmo possui um consumo de 3 km/litro e capacidade de 14 toneladas;

Tabela 4.8 Detalhe do transporte por caminhão considerados no cultivo na UF.

Etapas do Transporte	Distância Percorrida (km)		Diesel Consumido (l) na UF	
	MEC	MAN	MEC	MAN
Transporte produtos químicos SP - RP	599,4	599,4	11,1	11,1
Transporte produtos químicos RP- LA	176,6	92,3	10,15	3,42
Transporte Calcário AR - LA	270,6	274,6	10,74	6,54
	<b>1046,6</b>	<b>966,3</b>	<b>31,99</b>	<b>21,06</b>

A Figura 4.3 representa com os fluxos, o transporte considerado entre as localidades de produção, conforme descrito anteriormente.

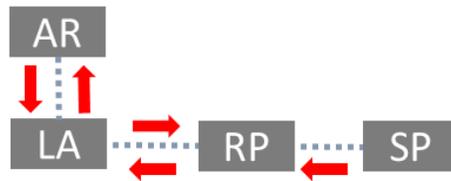


Figura 4.3 Fluxos entre as localidades consideradas para o transporte.

A Figura 4.4 representa uma lavoura em sua idade produtiva, sendo que na primeira foto (a) os grãos estão verdes iniciando o período de maturação e na segunda foto (b) os grãos estão em estágio de maturação mais avançado. A partir deste período (b) já deve ser bem avaliada toda a plantação para a correta determinação do início da colheita.



Figura 4.4 cafeeiro a) plantas com café verde b) plantas com café em maturação.  
Fonte: Fazenda MEC.

#### 4.1.4 Colheita

A colheita é considerada a fase mais onerosa para as pequenas propriedades, pois o pagamento à mão de obra é feito por sacos colhidos ou por quantidades medidas em lata ou tambor de 60 litros. Nesta etapa os insumos são apenas a mão de obra humana, considerando a colheita manual. As saídas são o café denominado cereja, que é o café maduro e as impurezas como galhos e folhas que são retiradas da planta junto aos grãos.

A forma mais comum de colheita no Brasil é a derriça total no pano (MESQUITA et al., 2016). Logo após a colheita deve ser realizada a limpeza do pano, ou a retirada das impurezas, que geralmente ficam no solo, no ponto específico da limpeza do pano (quando a coleta não é seletiva). Esse processo de limpeza pode ser executado manualmente ou por ventilação forçada ou ainda por separadores de ar e peneira (SOUZA e SILVA, et al., 2001). Quando a coleta é seletiva, são colhidos apenas as cerejas maduras. Para o trabalho realizado, foi considerada a coleta não seletiva, manual e mecanizada.

Os lavadores de café que são utilizados para limpeza e retirada de impurezas, não são utilizados na região do estudo, por isso não foi apresentado no estudo. Apenas o café de cata, assim denominado o café que cai no chão durante a colheita, será recolhido ou “catado”, após o término da colheita na lavoura, e então o café catado é lavado para seu posterior aproveitamento no consumo doméstico.

Para a colheita mecanizada é utilizada uma máquina de grande porte, denominada colhedora, em que a única mão de obra utilizada é o operador e o insumo: diesel. Neste mecanismo o café já sai da colhedora praticamente limpo, com pouca quantidade de folhas e galhos, que são retirados na própria máquina. Estas máquinas possuem hastes vibratórias de fibras que ao atuar em torno de cada planta promove a derriça dos grãos. Os grãos coletados são levados até o sistema de limpeza por transportadores internos nos sentidos horizontais e verticais, em que as impurezas são retiradas. A Figura 4.5 mostra uma colhedora operando em uma colheita.



Figura 4.5 Colhedora de café em operação.  
Fonte: RGS Máquinas Agrícolas.

O diesel consumido na colheita mecanizada foi apresentado na Tabela 4.5. Já para o cultivo manual (Tabela 4.6) foi apresentado o consumo de diesel para transporte dos colhedores do município de Santa Rosa da Serra para a lavoura, (SR-LA).

## 4.1.5 Processamento

A seguir será apresentada a fase de processamento via seca que é o método mais difundido no país e utilizado na região de estudo.

### 4.1.5.1 Secagem

Após a colheita, a secagem representa a fase de maiores riscos de perda da qualidade do café. A umidade relativa do ar e o manejo da secagem irão determinar em conjunto, a qualidade final do produto (MESQUITA et al., 2016). O café colhido nas lavouras, ou café natural, apresentando alto teor de umidade (45 a 55%) deve ser levado para terreiros planos, onde a exposição aos raios solares inicia o processo de secagem dos grãos. Ocorre então a desidratação do grão ou a pré-secagem, onde a umidade reduz para 30% e depois permanece nos terreiros ou segue para secadores mecânicos que promovem a secagem final até os grãos atingirem uma umidade

entre 10,5 e 12%, ideal para o beneficiamento. Acima de 12% e abaixo de 10% os grãos ficam vulneráveis a danos em sua estrutura durante o beneficiamento.

A secagem integralmente em terreiros é a mais utilizada no Brasil, mas na região do estudo a secagem é realizada de forma combinada, utilizando a pré-secagem em terreiros e a secagem final em secador mecânico tipo colunas ou vertical. Geralmente, a unidade de secagem também possui unidade de limpeza que executa o peneiramento, retirando as impurezas ainda restantes e deixando apenas o café seco e limpo. O presente trabalho considera a secagem de forma combinada, com pré-secagem em terreiros e secagem em secadores mecânicos, com sistema de classificação (ou beneficiamento) para retirada de impurezas e grãos defeituosos.

O secador mecânico opera com ar aquecido em fornalha e a temperatura deve ser monitorada pois o grão de café tolera uma temperatura de ar de secagem próximo a 40°C por um ou dois dias, 50°C por poucas horas e 60°C por menos de uma hora sem que o grão seja danificado (SOUZA e SILVA et al., 2001).

A Figura 4.6 é mostra um esquema do secador vertical e a Figura 4.7 mostra uma fotografia do secador existente na propriedade estudada. O volume de resíduo gerado no processo de secagem é mostrado na Figura 4.8.

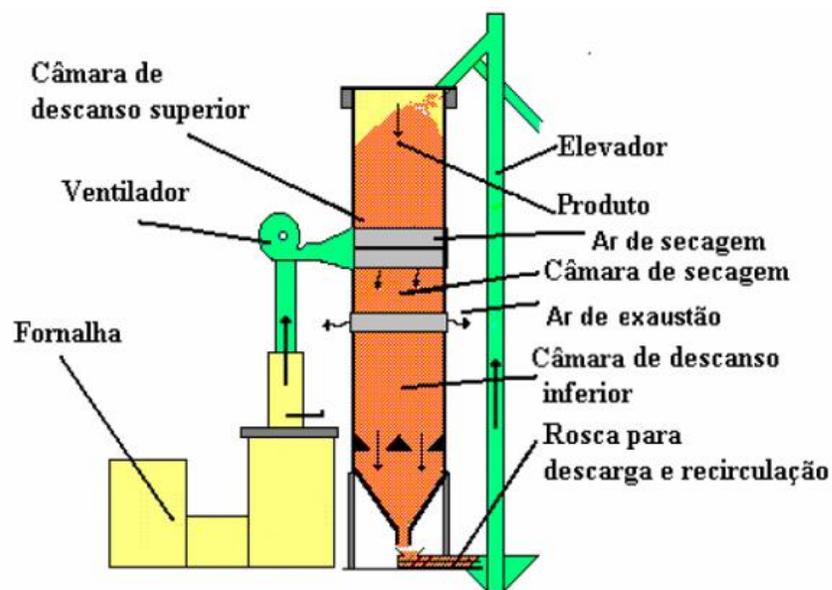


Figura 4.6 Ilustração gráfica do secador utilizado (vertical).  
Fonte: Souza e Silva et al., 2001.



Figura 4.7 a) Ilustração do secador existente; b) secador e madeira para alimentação da fornalha



Figura 4.8 Vista geral da unidade de secagem e do resíduo gerado.

#### 4.1.5.2 Classificação I

Chamou-se de classificação I pois esta etapa ocorre na unidade de secagem (no município de estudo) e a segunda classificação ocorrerá na unidade de classificação II para preparação dos lotes em Monte Carmelo (MG), como será apresentado a seguir.

A unidade de classificação contém, no mínimo os seguintes equipamentos: a) Bica de Jogo: conjunto de peneiras com diferentes tamanhos de furos que fazem a separação do café e das impurezas leves; b) Catador de pedras e metais: conjugado com sistema de ventilação, vai retirar as impurezas mais pesadas, incluindo materiais metálicos; c) Descascador: conjunto de navalhas e ventilação que farão a retirada da casca e do pergaminho do café. A casca (ou palha) é retirada pela ventilação e o produto será o café descascado e o café que não descascou; d) Classificador: É um sistema que separa o café por tamanho, forma e densidade; e) Separadora densimétrica: Separa os grãos por densidade; f) Catadeiras eletrônicas: com a finalidade de melhorar a qualidade do café.

E demais equipamentos como transportadoras, balanças e costuradeiras/ensacadeiras são utilizados em unidades de beneficiamento. Os equipamentos considerados no presente trabalho são mostrados na Figura 4.9.



Figura 4.9 Beneficiamento/estocagem em a) e descascadora em b)

#### 4.1.6 Classificação II e Preparo

Nesta etapa ocorre a classificação II ou rebeneficiamento para separação dos grãos defeituosos ainda existentes, teste de bebida para análise do produto e então as atividades de *blendagem* (ou mistura dos grãos de diferentes produtores) de acordo com a qualidade do grão de

modo a produzir lotes específicos em conformidade com os requisitos do comprador. O processo se inicia com a amostragem de todo o café proveniente das regiões produtoras. Essas amostras são experimentadas (teste de bebida) e analisadas na sua qualidade. Então, o café analisado é vendido (para exportação) e direcionado para a fase industrial, onde é feita a classificação II, ou seja, os grãos passarão por uma nova classificação (pois já haviam passado pela classificação I), até chegar à especificação conforme contrato de venda. A fase industrial para formação dos lotes não foi considerada no presente trabalho.

A Tabela 4.9 apresenta os insumos utilizados na etapa de secagem e classificação. A madeira é utilizada na fornalha do secador e a eletricidade é utilizada na classificação I e II, respectivamente, tanto para o secador (na unidade de secagem), quanto para a classificação já na unidade de preparo dos lotes vendidos. O gás GLP é utilizado para torra das amostras no teste da bebida. A água também é utilizada no teste da bebida. A Tabela 4.9 faz referência ao consumo para teste de bebida do café, para então proceder com a classificação II dos lotes de café.

Tabela 4.9 Consumo para o beneficiamento na UF.

<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Eletricidade - secagem	kWh	15,64
Eletricidade - classificação I	kWh	179,46
Eletricidade - classificação II	kWh	1925,5
Madeira (fornalha)	m <sup>3</sup>	0,42
Gás GLP	kg	74,29
Água	l	1000

#### **4.1.7 Transporte**

O produto limpo e seco é acondicionado em sacas de juta de 60 kg que serão armazenadas e/ou transportadas, quando vendidas. O trabalho considerou que o café produzido foi vendido para exportação, portanto, será acondicionado em sacas de juta e transportado até a cooperativa mais próxima (para estoque ou análise) e desta para a unidade de classificação II, em Monte Carmelo (MG), onde os grãos serão destinados a lotes específicos para então serem transportados até o porto de Santos.

Portanto, o transporte deste produto, neste caso, dentro do Brasil, é feito 100% por rodovias. O transporte do café é feito em caminhão truck e carreta, sendo transportado, na sua grande maioria em carga seca ou contêiner (BARTHOLOMEU e CAIXETA-FILHO, 2000). Na unidade de classificação, após a preparação dos lotes vendidos, o café é colocado em containers e estará desta forma, pronto para exportação. Para exportação, são utilizadas as seguintes formas de embalagem: sacaria de juta de 60 kg, big-bags que possuem maior capacidade (1200 kg) ou ainda pode ser feito a granel, sendo que a maior parte do transporte é feita em sacas de juta de 60 kg. Para o trabalho considerou-se o transporte feito em sacas de 60 kg, que é o mais utilizado no país.

O transporte do produto destinado ao porto de Santos foi separado em Transporte 1 e Transporte 2. O transporte 1 refere-se ao transporte do café da lavoura até a unidade de análise e o Transporte 2 considera o transporte dos sacos de café limpo desta unidade de análise até a unidade de classificação II e desta unidade para o porto. Portanto, para o transporte 1 considerou-se caminhões Truck, de baixo rendimento, com capacidade de 220 sacas, pois são caminhões pertencentes à empresa produtora de café, geralmente. Para estes casos, o consumo específico é de 3 km/l (IPEA, 1985). Para o transporte 2 são utilizadas carretas maiores, com capacidade de 450 sacas, com consumo de 2 km/l. Confirmando os dados do IPEA, na prática, foi verificada uma viagem feita por um motorista experiente transportando carga pesada e foi fornecida as informações de consumo para caminhão truck e carreta. As informações do IPEA e da observação prática estão na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 Rendimento energético dos caminhões.

Transporte de carga	IPEA			PRÁTICA	
	Capacidade de carga útil (t)	Consumo de diesel (km/l)	tkm úteis por litro	Capacidade de carga útil (t)	Consumo de diesel (km/l)
Caminhão Trucado	14	3,0	42	14	3,6-3,7
Carreta comum	26-27	2,0	52	34	2,4-2,5
Carreta Longa (treminhão)	48	1,5	72	-	-

Fonte: IPEA, 1985 e Badú, 2019.

Foi considerado que os motoristas destas carretas são experientes e seguem normas para um transporte e consumo eficiente, ou seja, não dirigem acima da velocidade determinada, não dirigem com pneus vazios e não dirigem com cargas acima da padronizada para sua carroceria.

Caso o motorista não siga estas normas para o transporte, o consumo de diesel ficará desequilibrado (TOCO, 2015). É clara a importância de motoristas bem treinados e da definição de metas ou indicadores para ganhos de eficiência no consumo de combustíveis (BARTHOLOMEU et al., 2010).

Na Figura 4.10 é apresentado o esquema do transporte 1 e 2, incluindo as siglas das localidades citadas.

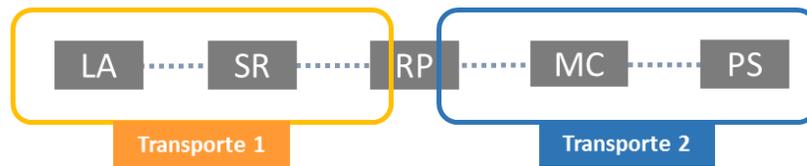


Figura 4.10 Esquema do transporte 1 e 2.

A Tabela 4.11 apresenta os dados de distância percorrida e o diesel consumido de acordo com a UF para os transportes 1 e 2, onde 1 engloba a distância da lavoura ao município Santa Rosa da Serra (LA-SR) e a distância deste município a unidade de análise (cooperativa) localizada em Rio Paranaíba (RS-RP). Já o transporte 2 inclui a distância desta unidade de análise até a unidade de classificação II, em Monte Carmelo (RP-MC) e a distância desta unidade de classificação II para o porto de Santos (MC-PS).

Tabela 4.11 Etapas do Transporte (dos grãos) pós cultivo com diesel consumido na UF.

Etapa do Transporte		Distância Percorrida (km)		Diesel Consumido (l) na UF	
		MEC	MAN	MEC	MAN
		Transporte 1	Transporte da LA - SR	8	8
	Transporte da RS - RP	168,6	84,3	4,01	2,01
Transporte 2	Transporte RP - MC	182,3	182,3	3,38	3,38
	Transporte MC - PS	702,3	702,3	13,01	13,01
<b>Total</b>		<b>1061,2</b>	<b>976,9</b>	<b>20,59</b>	<b>19,21</b>

#### 4.1.8 Exportação

O café é transportado em containers até o porto de Santos e então segue de navio para os destinos finais. Na unidade de classificação e preparo, o café é embalado e colocado em containers. O tipo de veículo é contratado de acordo com o contrato de venda do café. A embalagem dos grãos

para exportação pode ser em sacas de 60 kg ou a granel, sendo o mais comum o transporte em sacas. O presente trabalho limitou a fronteira no Porto de Santos, onde o produto será entregue para exportação.

#### 4.1.9 Emissões geradas na etapa agrícola (cultivo)

No estudo do ciclo de vida do café até o ponto de exportação (porto de Santos) são geradas emissões diversas que são em sua grande parte devido o cultivo, com as práticas agrônômicas de uso de fertilizantes químicos, bem como uso de equipamentos (tratores, caminhões, colhedoras e outros) e também uso de veículos no transporte rodoviário do produto dentro do território nacional.

Para estimar as emissões de  $N_2O$  a partir do consumo de fertilizantes nitrogenados foi determinada a quantidade de nitrogênio nos fertilizantes e então convertida essa quantidade em kg de  $N_2O-N$ , multiplicado pelo fator de emissão direta 0,01. No presente trabalho foram utilizadas apenas as quantidades de  $N_2O-N$ . Para as emissões relacionadas ao uso de corretivos agrícolas (calcário), que são utilizados intensivamente, foi verificada a quantidade de carbono presente neste corretivo, usando o fator de emissão direta 0,12. Para a transformação destes em  $CO_2eq$  (IPCC, 2006), o valor do  $N_2O-N$  deve ser multiplicado pela razão 44/28 e o valor do carbono deve ser multiplicado por 3,66 e ambos pelos fatores 298 e 25, respectivamente (GHG PROTOCOLO AGRICULTURA, 2014; IPCC, 2006). A Tabela 4.12 apresenta as emissões estimadas relativas ao uso dos corretivos e fertilizantes nitrogenados, bem como o  $CO_2$  equivalente.

Tabela 4.12 Emissões estimadas de  $N_2O$  e  $CO_2$  relativas ao corretivo agrícola e fertilizante nitrogenado.

Fonte	Consumo (kg)	Emissão de GEE (kg)		t $CO_2eq$
		$CO_2$	$N_2O$	
<b>MEC</b>				
Corretivo Agrícola	8400,00	1,01E+03		3,69E+00
Fertilizante Nitrogenado	17473,43		1,75E+02	8,18E+01
<b>MAN</b>				
Corretivo Agrícola	6000,00	7,20E+02		2,64E+00
Fertilizante Nitrogenado	3021,15		3,02E+01	1,41E+01

Na Tabela 4.13 é apresentada a estimativa de emissões do beneficiamento, relacionadas ao uso da lenha no secador mecânico, na etapa de secagem e para esse cálculo, é utilizada a quantidade

de lenha consumida no secador e os fatores de conversão, conforme apresentados nesta Tabela (4.13) (GHG PROTOCOL 2012).

Tabela 4.13 Emissões estimadas relativas ao uso da lenha na secagem.

Emissões - Secagem	Unidade	Fator de conversão (kg GEE.unidade-1)	Quantidade	
			MEC	MAN
CO <sub>2</sub>	kg	1917	7,05E+02	7,05E+02
CH <sub>4</sub>	kg	5,42609	2,00E+03	2,00E+03
N <sub>2</sub> O	kg	0,072348	2,66E+01	2,66E+01

As emissões devido ao uso de combustíveis fósseis estão relacionadas principalmente ao uso de tratores agrícolas e veículos de carga pesada e média. Estas emissões apresentadas nas Tabelas 4.14 e 4.15 foram base de cálculo para os valores encontrados nas Tabelas 4.16 e 4.18. As emissões concernentes ao uso de tratores aparecem apenas nas etapas de plantio e cultivo, sendo o cultivo MEC e MAN, por isso na Tabela 4.16 estão as emissões estimadas para as etapas de plantio e cultivo. A Tabela 4.18 apresenta a estimativa de emissões referentes ao uso de carretas e caminhões utilizados nas etapas de cultivo e transporte do café. Por este motivo, estão discriminadas as etapas de cultivo (MEC e MAN) e transporte 1 e 2, referenciando todo o transporte do café até a entrega deste no porto.

Tabela 4.14 Emissões devido uso dos tratores agrícolas (em kg/l de diesel consumido).

Emissões - Tratores	Quantidade
CO <sub>2</sub>	2,00E+00
HC	6,50E-03
CO	1,80E-02
NO <sub>x</sub>	4,50E-02
PM10	4,70E-03
SO <sub>x</sub>	3,20E-03

Fonte: Wang et al., 2003.

Tabela 4.15 Emissões devido uso de veículos de carga média e pesada.

<b>Especificação - unidade</b>	<b>Emissões - Veículos</b>	<b>Quantidade</b>
<i>Geral - g/km</i>	CO <sub>2</sub>	935
	NO <sub>X</sub>	7,69
	CO	1,76
	Particulados Finos (PF)	0,185
<i>Emissões dos constituintes dos particulados finos - g/km</i>	Carbono orgânico	0,0364
	Nitrato	0,0004
	Silício	0,0012
	Carbono	0,057
	Amônia	0,0013
	Sulfato	0,00185
<i>Emissões de fase gasosa, semi-voláteis e compostos orgânicos</i>		
<i>Gases Orgânicos - mg/km</i>	Alcanos	15,8
	Olefinas	17,3
	Aromáticos	14,1
	Formaldeído	22,3
	Acetaldeído	41,8
	Propanal	14
	Acetona	22
<i>Gases Orgânicos semi voláteis - mg/km</i>	PAHs**	1,8
	Ácidos aromáticos	2
<i>Compostos Orgânicos - mg/km</i>	Ácidos alcaloides	0,4
	Carbono	56

PAHs\*\*(hidrocarbonetos aromáticos poli-cíclico.

Fonte: Lloyd e Cackette, 2003.

Tabela 4.16 Emissões devido ao uso de tratores agrícolas.

<b>Emissões</b>	<b>Unidade</b>	<b>Etapa/Quantidade</b>		
		<b>Plantio MEC</b>	<b>Plantio MAN</b>	<b>Cultivo MEC</b>
CO <sub>2</sub>	kg	5,16E+00	2,66E+00	1,01E+02
HC	kg	1,68E-02	8,65E-03	3,30E-01
CO	kg	4,64E-02	2,39E-02	9,13E-01
NO <sub>X</sub>	kg	1,16E-01	5,99E-02	2,28E+00
PM10	kg	1,21E-02	6,25E-03	2,38E-01
SO <sub>X</sub>	kg	8,26E-03	4,26E-03	1,62E-01

Bases de dados de diferentes fontes foram utilizadas para considerar a produção dos insumos químicos e corretivos agrícolas, bem como a produção de eletricidade e combustíveis fósseis que fazem parte do ciclo de vida em estudo e estão apresentados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 Inventários de sistemas de produção e fonte de dados.

<b>Atividade</b>	<b>Fonte de dados</b>
Produção da Ureia (fertilizante nitrogenado)	Ribeiro, 2009
Produção do superfosfato simples	Viana, 2008
Produção de fertilizante potássico	Viana, 2008
Produção de corretivos agrícolas	Viana, 2008
Produção de Herbicidas e inseticidas	Viana, 2008
Produção do Diesel	Borges 2004
Produção da Gasolina	Borges 2004
Produção do Petróleo	Borges 2004
Carbonato de Cálcio e Magnésio	Davis e Haglund 1999/ Kongshaug 1998
Nitrato de Amônio	Davis e Haglund 1999/ Kongshaug 1998
Nitratos e Fosfatos	Davis e Haglund 1999/ Kongshaug 1998

Tabela 4.18 Emissões calculadas devido ao uso de veículos de carga pesada e média para a UF.

Emissões	Unidade	Etapa/Quantidade						
		Cultivo	Cultivo	Transporte 1		Transporte 2		
Emissões para o ar		MEC	MAN	MEC	MAN	MEC	MAN	
Gerais	CO <sub>2</sub>	g	1,10E+05	6,77E+04	1,25E+04	6,54E+03	3,06E+04	3,06E+04
	NO <sub>x</sub>	g	9,04E+02	5,57E+02	1,03E+02	5,38E+01	2,52E+02	2,52E+02
	CO	g	2,07E+02	1,28E+02	2,35E+01	1,23E+01	5,77E+01	5,77E+01
	Particulados Finos (PF)	g	2,18E+01	1,34E+01	2,48E+00	1,29E+00	6,06E+00	6,06E+00
Emissões dos componentes dos Particulados Finos	Carbono orgânico	g	4,28E+00	2,64E+00	4,87E-01	2,55E-01	1,19E+00	1,19E+00
	Nitrato	g	4,70E-02	2,90E-02	5,35E-03	2,80E-03	1,31E-02	1,31E-02
	Silício	g	1,41E-01	8,69E-02	1,61E-02	8,39E-03	3,93E-02	3,93E-02
	Carbono	g	6,70E+00	4,13E+00	7,63E-01	3,99E-01	1,87E+00	1,87E+00
	Amônia	g	1,53E-01	9,42E-02	1,74E-02	9,09E-03	4,26E-02	4,26E-02
	Sulfato	g	2,18E-01	1,34E-01	2,48E-02	1,29E-02	6,06E-02	6,06E-02
Gases Orgânicos	Alcanos	mg	1,86E+03	1,14E+03	2,11E+02	1,10E+02	5,18E+02	5,18E+02
	Olefinas	mg	2,03E+03	1,25E+03	2,31E+02	1,21E+02	5,67E+02	5,67E+02
	Aromáticos	mg	1,66E+03	1,02E+03	1,89E+02	9,86E+01	4,62E+02	4,62E+02
	Formaldeído	mg	2,62E+03	1,62E+03	2,98E+02	1,56E+02	7,31E+02	7,31E+02
	Acetaldeído	mg	4,91E+03	3,03E+03	5,59E+02	2,92E+02	1,37E+03	1,37E+03
	Propanal	mg	1,65E+03	1,01E+03	1,87E+02	9,79E+01	4,59E+02	4,59E+02
	Acetona	mg	2,59E+03	1,59E+03	2,94E+02	1,54E+02	7,21E+02	7,21E+02
Gases Orgânicos semi voláteis	PAHs	mg	2,12E+02	1,30E+02	2,41E+01	1,26E+01	5,90E+01	5,90E+01
	Ácidos aromáticos	mg	2,35E+02	1,45E+02	2,68E+01	1,40E+01	6,55E+01	6,55E+01
Compostos Orgânicos	Ácidos alcalóides	mg	4,70E+01	2,90E+01	5,35E+00	2,80E+00	1,31E+01	1,31E+01
	Carbono	mg	6,58E+03	4,06E+03	7,49E+02	3,92E+02	1,83E+03	1,83E+03

PAHs\*\*(hidrocarbonetos aromáticos poli-cíclico).

## **4.2 PROJETO DE GERAÇÃO E RESULTADOS**

### **4.2.1 Justificativa da escolha da tecnologia de Gaseificação**

A escolha pela tecnologia de gaseificação é decorrente das vantagens apresentadas por esta tecnologia. A utilização dos métodos biológicos é limitada por fatores ambientais, como temperatura e ausência ou proliferação de determinado organismo vivo, então os métodos físico-químicos são propícios para serem utilizados por serem menos danosos ao meio ambiente, entretanto, também possuem interferências e condicionantes, mas estes condicionantes são passíveis de controle.

A gaseificação, em especial, permite o uso de uma variedade maior de resíduos (BHATIA, et al., 2018), apresenta alta eficiência e capacidade de aquecimento; outros processos, como a pirólise e liquefação são mais complexos para desempenhar (SANSANIWAL, et al., 2017). A gaseificação ainda é executada por reatores possíveis de serem construídos e operados, viabilizando a sua implementação. A combustão, ou incineração, é preferível para recuperação de energia de materiais não biodegradáveis com baixo teor de umidade (SONG, et al., 2016).

Como já mencionado, a gaseificação é uma tecnologia promissora para conversão termoquímica de um combustível sólido em um gás com considerável conteúdo energético e mínimos impactos ambientais, também se destacando dentre as demais tecnologias termoquímicas.

Outra importante característica é que a gaseificação é considerada uma das principais tecnologias de conversão de biomassa interligada a motor de combustão interna, sendo frequentemente utilizada nas unidades de geração de potência de pequena escala. Se a planta não apresenta problemas de vazamento, a maior preocupação ambiental é o destino para as cinzas e alcatrão recolhidos do sistema de limpeza do gaseificador (SÁNCHEZ 2010), ou seja, é um processo de reduzido impacto ambiental, diferindo de outros métodos.

Portanto, a gaseificação é uma tecnologia preferível a outros processos termoquímicos para a conversão da casca de café em um combustível gasoso, visando a geração de eletricidade dessa pequena capacidade do sistema de geração resultante. Entretanto, existem melhorias a serem feitas no desenvolvimento desta tecnologia e em políticas que incentivem a implementação de plantas de gaseificação de biomassa em grande escala (BISHT e THAKUR, 2019).

### 4.2.2 Aproveitamento do Resíduo para Gaseificação

O resíduo proveniente do processo do beneficiamento do café será utilizado como combustível para a gaseificação, no estudo de caso 3. Os reatores de leito fixo (cocorrente), são os mais indicados para o aproveitamento energético de resíduos em pequena escala (para potências que variam entre 10kW e 10 MW) (DILASCIO e FAGUNDE BARRETO, 2009), portanto será utilizado este modelo de gaseificador. O ciclone é utilizado para remoção de partículas finas e o filtro de areia (combinado com carvão) é utilizado para remoção do alcatrão ainda presente no gás que sai do reator.

No estudo de caso 3, a casca de café é então alimentada no gaseificador cocorrente, a uma vazão de 10 kg/h tendo o ar como agente oxidante. Ambos (ar e biomassa) estão sob pressão atmosférica (1 bar). A pressão atmosférica foi escolhida pelo alto desenvolvimento desta tecnologia (CARPENTIERI M., 2005). Nenhum vapor é adicionado ao processo. O gás de síntese gerado no processo é direcionado para um ciclone, onde ocorrerá a sua limpeza, com remoção das partículas, e posteriormente, para um filtro de leito granular, onde será retirado o alcatrão. O fluxo de entrada de ar foi ajustado de modo a obter o melhor resultado em termos de poder calorífico do gás bruto. O gaseificador foi teoricamente modelado como um reator de equilíbrio. O gás produzido neste processo será o combustível para o motor de combustão interna.

Foi utilizada a razão de equivalência 0.35, pois a maioria dos trabalhos que tratam da gaseificação da casca do café utilizam uma ER entre 0.30 e 0.44. George et al., 2011 utilizam uma ER de 0,36 e Ismail et al., 2016, mostram que a maior eficiência do gás a frio se dá em uma ER de 0.3. Na Figura 4.11, mostra-se que a máxima eficiência a frio se dá em uma razão de equivalência de 0,3. Andrade (2020), também confirma uma ER de 0,35 para uma ideal utilização do processo de gaseificação.

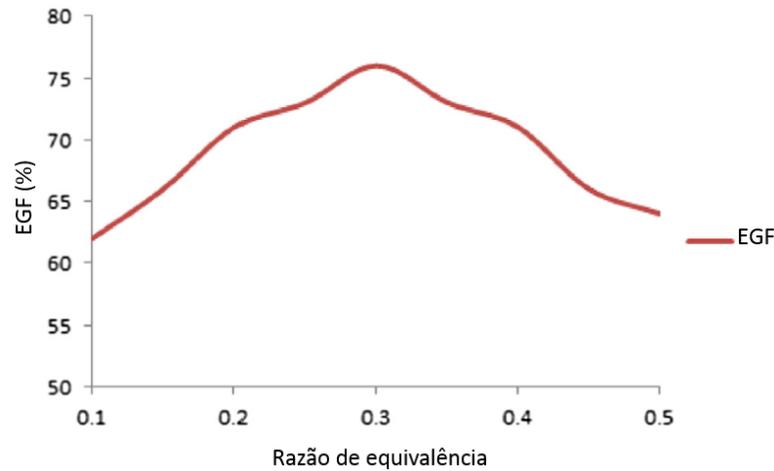


Figura 4.11 Efeito de diferentes razões de equivalência na eficiência do gás a frio.  
Fonte: Ismail et al., 2016.

A seguir são apresentadas relevantes considerações sobre o processo de gaseificação ocorrido.

- ✓ A biomassa considerada e apresentada na Tabela 4.19 e o seu poder calorífico (18,34 MJ/kg);
- ✓ A composição química do gás produzido na gaseificação apresenta uma composição que é calculada por meio do simulador de processos químicos AspenPlus®;
- ✓ As cinzas produzidas pela gasificação não serão consideradas como um resíduo sólido poluente pois elas tem muitos usos industriais possíveis (RAFASCHIERI et al., 1999), e serão aplicadas no cafeeiro junto ao fertilizante orgânico;

Os resultados das análises elementar e imediata da biomassa utilizada no trabalho são apresentados na Tabela 4.19 e os principais dados de entrada do sistema de gaseificação são apresentados na Tabela 4.20.

Tabela 4.19 Análise imediata, elemental e demais características da biomassa utilizada (base seca)

<b>Propriedades da Biomassa (base seca)</b>			
C (%)	49,40	Umidade (%)	10,10
H (%)	6,10	Materiais Voláteis (%)	83,2
O (%)	41,20	Carbono Fixo (%)	14,3
N (%)	0,81	Cinzas (%)	2,5
Cl (%)	0,03	PCS (MJ/kg)	18,34
S (%)	0,07		

Fonte: Wilson et al., 2010

Tabela 4.20 Características da biomassa e do agente de gaseificação.

<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Vazão mássica (taxa de consumo da biomassa)	kg/h	10
Relação ar/combustível	kg/kg de casca	0,79
Razão de equivalência		0,35
Temperatura	C	26,3
Vazão de ar	kg/h	16,25
Densidade do ar	kg/Nm <sup>3</sup>	1,2

### 4.2.3 Central de Geração de eletricidade

Como já descrito, a planta de geração é composta basicamente de um reator para a gaseificação, um sistema de limpeza e o sistema de geração. A Figura 4.12 mostra a sequência de equipamentos utilizados na planta de geração para o estudo de caso 3. E na Figura 4.13 está a apresentação deste estudo com as suas respectivas etapas.

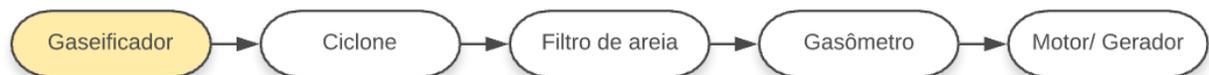


Figura 4.12 Sequência de equipamentos utilizados na geração elétrica.

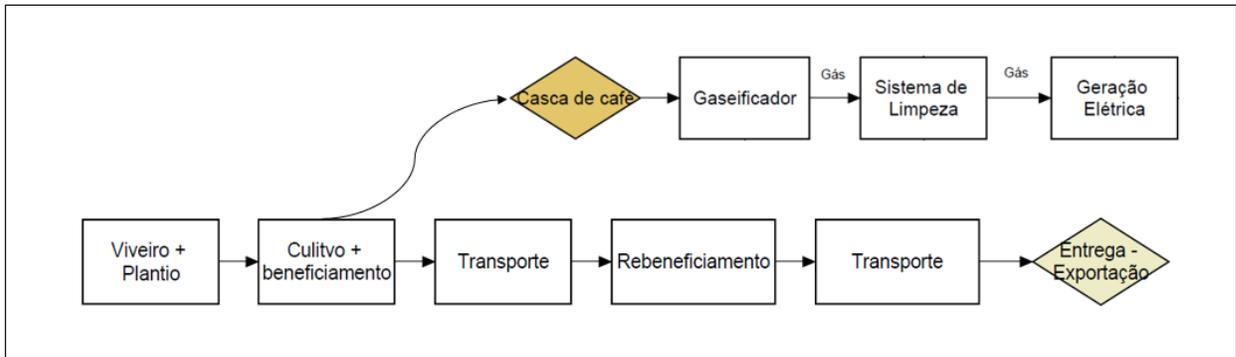


Figura 4.13 Etapas que constituem o estudo de caso 3.

De modo a tornar mais eficiente a utilização da biomassa em plantas de pequena escala, a planta de gaseificação e geração deve ser instalada próximo à planta de beneficiamento do café, onde é encontrada a fonte energética a ser utilizada (biomassa) e a demanda por energia, minimizando assim o transporte da biomassa. A planta apresenta uma composição simples, sendo assim mais atrativa e viável para a implantação na propriedade. Deve ser analisada a quantidade de café produzida e conseqüentemente de casca, pois uma quantidade pequena de casca (para o caso de pequenas lavouras), não irá gerar uma potência ideal durante o ano. A viabilidade financeira será analisada.

A Figura 4.14 apresenta o esquema da planta e nela estão os números de 1 a 8, que apresentam, na seqüência: 1- secador de café; 2- resíduo gerado pelo secador (casca de café); 3- gaseificador cocorrente; 4- ciclone; 5- filtro granular (areia e carvão); 6- gasômetro; 7- motor de combustão interna e gerador; 8- sistema de interligação para a rede.

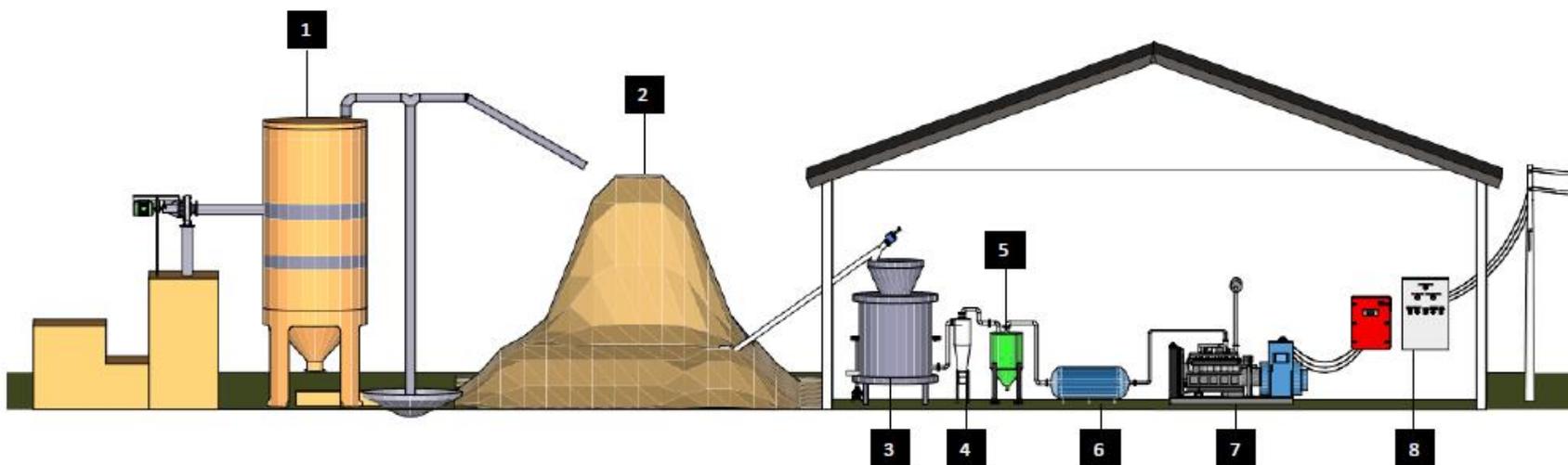


Figura 4.14 Representação do sistema de geração elétrica a partir da gaseificação do resíduo do cultivo cafeeiro.  
Fonte: Adaptado de Luz, 2013.

#### 4.2.4 Geração de eletricidade

Neste item averigua-se a quantidade de energia disponível existente em todo o território brasileiro para o uso da casca do café em sistemas de gaseificação e a potência disponível para geração elétrica, com MCI e gerador como mencionado no item anterior.

Considerou-se as eficiências de 10% para o motor de combustão interna, de 60% a eficiência do gaseificador e de 95% para o gerador elétrico.

As Tabela 4.21, 4.22 e 4.23 apresentam as quantidades de energia disponível para utilização com a casca de café, em MJ e a potência entregue ao gerador, em kW para as respectivas áreas: as regiões do Brasil, os Estados brasileiros e as regiões de Minas Gerais.

Tabela 4.21 Energia disponível e potência de acordo com as regiões produtoras de café.

<b>Região</b>	<b>Produção (mil sacas)</b>	<b>ED (MJ)</b>	<b>P (kW)</b>
Norte	2.198,7	725.834.844,0	2.422,7
Nordeste	3.000,0	990.360.000,0	3.305,7
Centro-Oeste	370,7	122.375.484,0	408,5
Sudeste	42.636,1	14.075.032.633,2	46.980,7
Sul	953,0	314.604.360,0	1.050,1
Outros*	150,8	49.782.096,0	166,2
<b>Total</b>	<b>49.309,3</b>	<b>16.277.989.417,2</b>	<b>54.333,9</b>

Tabela 4.22 Energia disponível e potência de acordo com os Estados Brasileiros.

<b>Região</b>	<b>Produção (mil sacas)</b>	<b>ED (MJ)</b>	<b>P (kW)</b>
MG	24.553,6	8.105.637.733,2	27.055,6
ES	13.498,0	4.455.959.760,0	14.873,4
SP	4.339,5	1.432.555.740,0	4.781,7
BA	3.000,0	990.360.000,0	3.305,7
RO	2.198,7	725.834.844,0	2.422,7
PR	953,0	314.604.360,0	1.050,1
GO	249,3	82.298.916,0	274,7
RJ	245,0	80.879.400,0	270,0
MT	121,4	40.076.568,0	133,8
Outros	150,8	49.782.096,0	166,2
<b>Total</b>	<b>49.309,3</b>	<b>16.277.989.417,2</b>	<b>54.333,9</b>

Tabela 4.23 Energia disponível e potência de acordo com as regiões de Minas Gerais.

<b>Região</b>	<b>Produção (mil sacas)</b>	<b>ED (MJ)</b>	<b>P (kW)</b>
Sul e Centro-Oeste	13.978,8	4.614.678.154,8	15.403,2
Triângulo, Alto Paranaíba e Noroeste	4.591,9	1.515.881.329,2	5.059,8
Zona da Mata, Rio Doce e Central	5.354,2	1.767.518.600,4	5.899,8
Norte, Jequitinhonha e Mucuri	628,7	207.559.648,8	692,8
<b>Total</b>	<b>24.553,6</b>	<b>8.105.637.733,2</b>	<b>27.055,6</b>

Já a Tabela 4.24 nos apresenta a energia disponível e a potência, como supracitado acima, mas para os municípios que possuem a maior produção de café no Estado de Minas Gerais. Esses dados serão utilizados para verificação da viabilidade econômica da futura planta.

Tabela 4.24 Energia disponível e potência de acordo com os municípios com maior produção do Estado.

<b>Município</b>	<b>Região</b>	<b>ED (MJ)</b>	<b>P (kW)</b>
Patrocínio	Alto Paranaíba	311.633.280,0	1.040,2
Três Pontas	Sul de Minas	160.834.464,0	536,8
Nova Rezende	Sul de Minas	143.481.156,0	478,9
Campos dos Gerais	Sul de Minas	140.790.678,0	469,9
Manhuaçu	Zona da Mata	117.401.676,0	391,9
<b>Total</b>		<b>874.141.254,0</b>	<b>2.917,8</b>

Por meio do estudo de viabilidade econômica realizado posteriormente, será possível a verificação da quantidade do resíduo necessária para viabilizar a geração elétrica, utilizando a tecnologia da gaseificação.

### 4.3 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

A abordagem da simulação do processo de gaseificação da biomassa é prever a composição do gás gerado no equilíbrio termodinâmico, por meio de cálculos da minimização da energia livre de Gibbs para os átomos de C, H, O, N e S do combustível e da mistura do agente de gaseificação. Esta simulação é então utilizada para avaliar dados experimentais e dados também modelados provenientes da literatura.

Os resultados do modelo foram calculados em conformidade com os dados de caracterização elementar e imediata da biomassa. De acordo com o modelo apresentado no item

3.2.2, o processo de gaseificação gera um gás com a composição relacionada na Tabela 4.25, composição esta encontrada na casca de café para uma razão de equivalência de 0,35.

Tabela 4.25 Composição do gás de síntese

<b>Gaseificação</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
CO	%	27,58
CO <sub>2</sub>	%	7,47
H <sub>2</sub>	%	25,28
N <sub>2</sub>	%	39,58
CH <sub>4</sub>	%	0,0751

A Tabela 4.26 mostra as principais saídas relacionadas ao processo simulado.

Tabela 4.26 Principais saídas na etapa da gaseificação.

<b>Saídas principais - Gaseificação</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Cinzas (NC)	kg/h	0,21576
PCI	MJ/Nm <sup>3</sup>	6,23

As emissões também são geradas no processo de geração elétrica. No caso deste estudo, a geração elétrica contribui para emissão dos gases de escape provenientes do motor de combustão interna. Deve ser salientado que não foram consideradas emissões de óxidos de nitrogênio nesta etapa, pois como supracitado na revisão bibliográfica, no item 2.4.2, para a gaseificação, pode-se desconsiderar a formação de NO<sub>x</sub>, devido a temperatura do processo de conversão. Considerando uma combustão completa, obtêm-se as principais saídas apresentadas na Tabela 4.27.

Tabela 4.27 Principais saídas na etapa de geração por meio de MCI.

<b>Saídas principais - MCI</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Fluxo de gás de síntese	kg/h	23,81
Temperatura do gás	C	775
Temperatura do ar	C	26,1
Pressão	bar	1
<b>Emissões provenientes da combustão em MCI</b>		
CO <sub>2</sub>	%	16,36
N <sub>2</sub>	%	70,36
H <sub>2</sub> O	%	11,84

O carvão é utilizado junto à areia para remoção do alcatrão no sistema de limpeza, e assim viabilizar o uso do gás pelo MCI. Arena 2015 faz um trabalho de ACV comparando o uso de duas tecnologias, a combustão e a gaseificação para recuperação de energia utilizado com resíduo sólido municipal, onde o sistema de limpeza utiliza 0,66 kg de carvão ativado, para cada 1000 kg de resíduo. Foi considerado para este trabalho, a mesma quantidade de carvão ativado para o sistema de limpeza com a casca de café.

A razão de equivalência (RE) é um dos mais significativos parâmetros a ser avaliados, pois ela tem substancial efeito no processo de gaseificação e na composição do syngas (Ismail et al., 2016). Como a RE para gaseificar biomassa fica entre 0,2 e 0,4 foi feito uma verificação da RE na gaseificação da casca de café para os valores de 0,20 a 0,45. A Figura 4.15 mostra um gráfico com a composição do gás proveniente da simulação de acordo com as razões de equivalência. A partir da verificação da Figura 4.15 pode ser visualizado que a medida que a RE aumenta, de 0,20 para 0,25, 0,30 e 0,35 nota-se a redução das quantidades de CO, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, e ainda com o aumento da RE há o aumento também das quantidades de CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>.

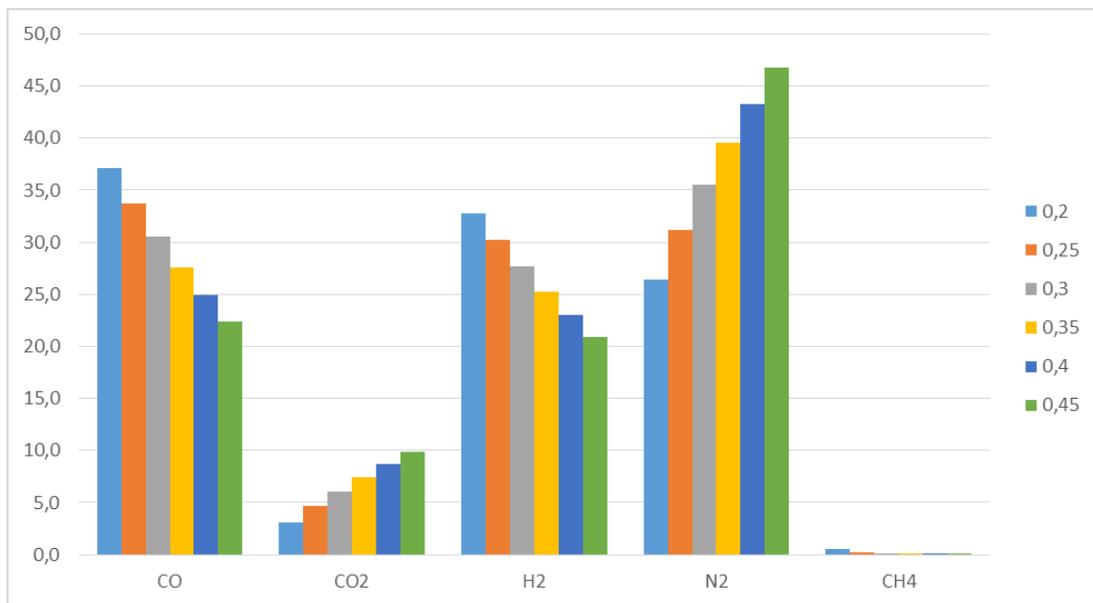


Figura 4.15 Composição do gás em função da Razão de equivalência

O processo de gaseificação das cascas de café produziu porcentagens significativas dos gases H<sub>2</sub> e CO, corroborando o processo mostrado por Wilson et al., 2010. Observa-se na Figura 4.15 que com o aumento da razão de equivalência, ocorre a redução também do rendimento do monóxido de carbono e do hidrogênio, o que também foi concluído por Lora et al., 2013 (para

casca de arroz). Tal fato é atribuído à oxidação do monóxido de carbono e do hidrogênio com a maior disponibilidade de oxigênio.

Como pode ser visto, para a RE de 0,35 há menor quantidade de metano, o que pode ser explicado pelo baixo conteúdo de umidade na casca de café, o que é confirmado por Ismail et al., 2016. Para razões de equivalência mais baixas, obtêm-se maior quantidade de H<sub>2</sub> e CO e esta maior quantidade de H<sub>2</sub> produz mais CH<sub>4</sub> por hidrogenação, portanto, para RE mais baixa, obtêm-se também maior quantidade de CH<sub>4</sub> (Pellegrini e Oliveira Jr, 2007).

Observa-se que o PCI reduz a medida que a RE aumenta, o que é justificado por se tratar de um processo de gaseificação com ar como agente gaseificante. Logo, a maior quantidade de ar reduz a quantidade dos gases combustíveis, como se vê na figura 4.16.

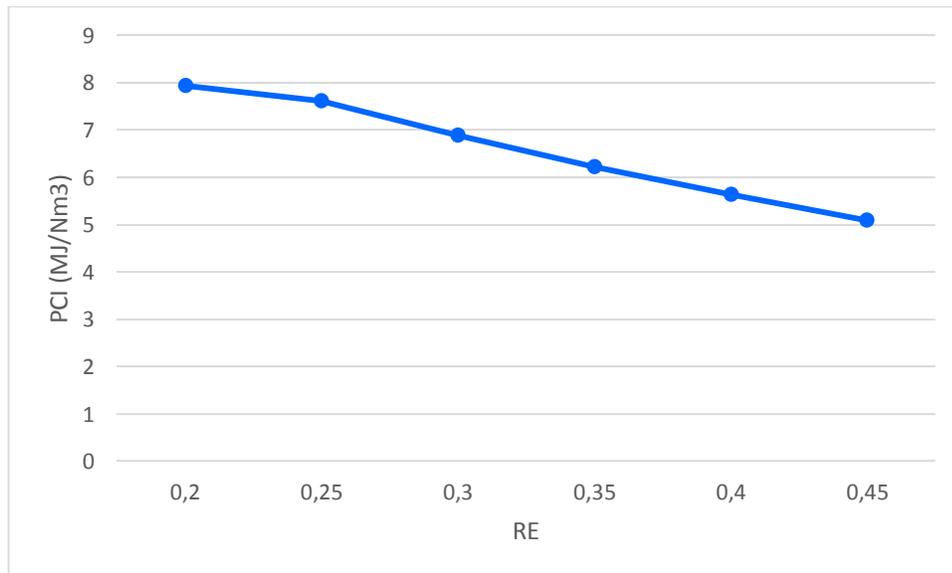


Figura 4.16 PCI em função da Razão de equivalência

Por meio da Figura 4.17 pode ser verificada a composição do gás gerado no modelo do presente trabalho (LI) e a composição de outros trabalhos experimentais da gaseificação com a casca de café. Estes trabalhos estão retratados no item 2.6.1. As siglas WI, GE e OL\_2 correspondem a Wilson et al., 2010, George et al., 2018 e Oliveira et al., 2018. Nota-se que existe uma variação entre a composição dos gases, tanto entre os trabalhos experimentais (entre si), quanto entre os trabalhos experimentais e o presente modelo. O conteúdo de CO foi aproximado, entre o modelo deste trabalho (27,6%) e entre o trabalho de Wilson (26,01%). O conteúdo de CO<sub>2</sub> foi aproximado entre o presente modelo (7,5%) e o trabalho de George (7,15%). Já as quantidades

de  $H_2$  e  $CH_4$  estão apresentando maior variação entre o modelo (LI) e os demais trabalhos experimentais (WI, GE e OL\_2).

O maior desvio padrão para a comparação entre o modelo atual e os trabalhos experimentais (WI, GE e OL\_2) foi encontrado para os valores de  $CO$  e  $H_2$ .

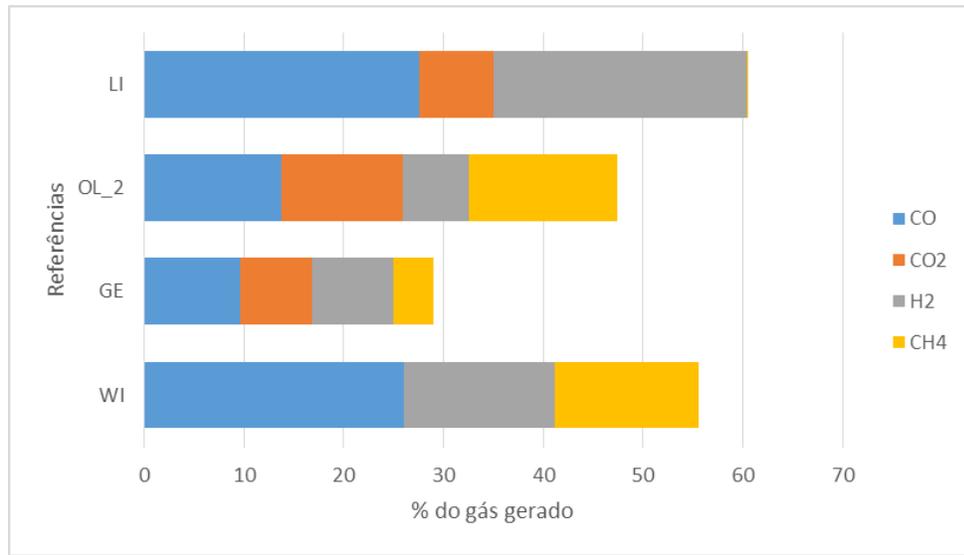


Figura 4.17 Composição do gás gerado para os trabalhos analisados (I)

Na Figura 4.18 pode ser verificado a diferença entre os valores de composição do gás entre os valores encontrados no presente trabalho (LI), e os valores dos trabalhos de Ismail et al., 2016 nas suas 3 simulações (IS\_1, IS\_2, IS\_3) e de Couto et al., 2013 (COT). Os trabalhos de Ismail et al., 2016 e de Couto et al., 2013 são trabalhos que compararam os dados experimentais com dados do modelo, como já citado, e os valores destes autores presentes na Figura 4.18 são os experimentais. Verifica-se que para o conteúdo de  $CO$  e  $H_2$  há uma maior variação, entre o presente modelo (LI) e os trabalhos dos autores (COT, IS\_1, IS\_2, IS\_3). Nota-se uma proximidade de valores entre alguns dos trabalhos (COT, IS\_1, IS\_2, IS\_3), para todos os gases ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$  e  $CH_4$ ). Pode ainda ser verificado que os trabalhos de Couto et al., 2013 (COT) e de Ismail et al., 2016 (na primeira simulação - IS\_1) apresentam igual composição do gás produzido, assim como o trabalho de Silva et al., 2013 possui valores iguais aos de Ismail et al., 2013. Os valores para todos os gases de SV\_1 são iguais aos valores de IS\_1 e os valores de SV\_2 são iguais aos valores de IS\_2.

Ainda na Figura 4.18 verifica-se que o trabalho de Kore et al., 2013 (KO) apresentam uma significativa diferença na composição do gás, se comparado ao presente modelo (LI) e aos trabalhos de Couto e Ismail. Apenas há uma aproximação para o conteúdo de CO, entre o modelo deste trabalho (LI) e o trabalho de Kore (KO). Salientando que os dados de Kore et al., 2013 são referentes a um resultado experimental com as cascas de café. Para essa análise, o maior desvio padrão foi encontrado para o conteúdo de H<sub>2</sub>.

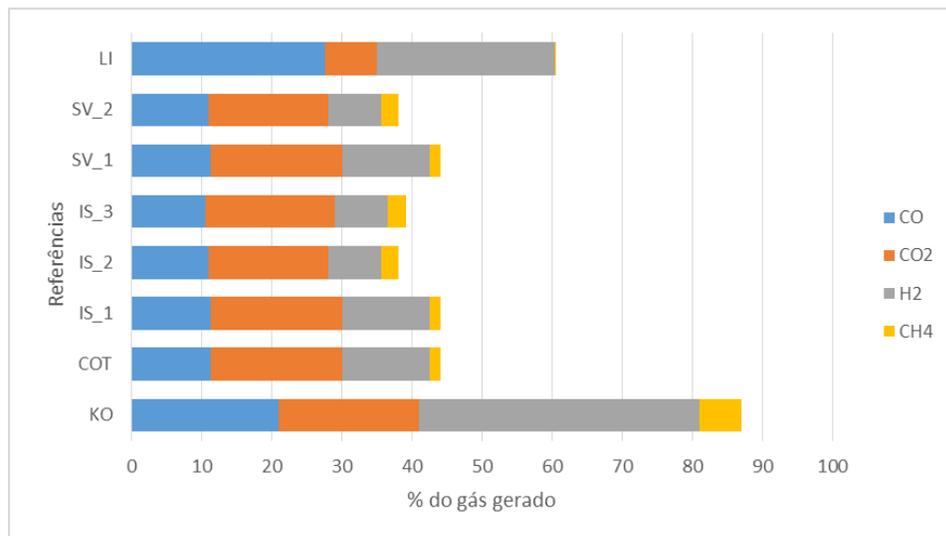


Figura 4.18 Composição do gás gerado para os trabalhos analisados (II)

A análise da fração molar do gás de síntese, cada publicação, como supracitado apresenta suas diferenças, pois possuem cada uma, parâmetros diferentes, como RE, reator, oxidante, temperatura, ou seja, cada composição carrega em si todas os efeitos dos parâmetros utilizados nos experimentos e modelos.

A Tabela 4.28 mostra a fração molar obtida pelo modelo do presente trabalho (LI) e as frações molares típicas de alguns gaseificadores. Sánchez (2010) mostra a composição típica para um gaseificador contracorrente que utiliza a madeira como biomassa. Lora (2014) e Zhenhong (2007), apresentam a composição típica para um gaseificador cocorrente também utilizando a madeira como biomassa. Pode-se verificar que o modelo deste trabalho (LI) possui uma fração molar mais próxima da fração molar típica do gaseificador cocorrente proposta por Zhenhong (2007), o que mostra a boa concordância para utilização deste reator para o presente trabalho.

Entretanto, verifica-se que pode existir uma variação nessa fração molar típica, como mostrado na Tabela 4.28.

Tabela 4.28 Fração molar típica para reatores

	<b>Sánchez, 2010</b>	<b>Lora, 2014</b>	<b>Zhenhong, 2007</b>	<b>Modelo (LI) atual</b>
	<b>Contracorrente</b>	<b>Cocorrente</b>	<b>Cocorrente</b>	<b>Cocorrente</b>
	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>Vapor/O<sub>2</sub></b>	<b>O<sub>2</sub></b>
CO	17,02	10 a 22	39,21	27,58
CO <sub>2</sub>	12,13	11 a 13	25,75	7,47
H <sub>2</sub>	17,20	15 a 21	30,51	25,29
CH <sub>4</sub>	0,76	1 a 5	0,28	0,08
N <sub>2</sub>	49,40	Restante	Restante	39,60

A fração molar encontrada para o presente trabalho segue os resultados de gaseificação típicos, onde, utilizando o ar como agente de gaseificação, obtêm-se um gás com alto conteúdo de N<sub>2</sub>, como visto na Tabela 4.28 e menor poder calorífico. Já para o gás que foi produzido utilizando misturas de ar e vapor, apresenta um conteúdo maior de H<sub>2</sub> e CO e conseqüentemente, maior poder calorífico, além de menor conteúdo de N<sub>2</sub>.

O gás combustível gerado no processo de gaseificação de resíduos agrícolas, como o caso da casca de café utilizando ar como agente de oxidação, apresentou bom conteúdo energético, portanto, a utilização destes resíduos na geração de energia deve ser encorajada. Como na cadeia de produção do café há uma grande demanda de energia (térmica, mecânica e elétrica), especialmente durante o processo de secagem, e o uso dos resíduos como fonte de energia podem ser uma opção atrativa também sob o ponto de vista econômico, o que será avaliado neste estudo, no próximo capítulo.

## 4.4 APROVEITAMENTO DO RESÍDUO COMO FERTILIZANTE ORGÂNICO

Esta adubação orgânica compreende os resíduos de origem vegetal, oriundos dos resíduos do beneficiamento via seca do café, que serão depositados no cafeeiro, no estudo de caso 3. Além de ser uma fonte de nutrientes, essa adubação representa fornecimento de matéria orgânica ao solo, especialmente naqueles arenosos, ou com argila de baixa atividade pois representam melhorias nos solos, em aspectos químicos, físicos e biológicos (FURTINI et al., 2001).

A Tabela 4.29 apresenta a quantidade de fertilizante orgânico necessária de acordo com a equação 3.7.

Considerações para o cálculo:

- ✓ Considerou-se as quantidades e teores de nutrientes tendo base a Tabela 3.6, sendo: “B” (matéria seca) = 85%; “C” (teor do nutriente) = 0,9 para N, 0,35 para P e 3 para K.
- ✓ Primeira safra em idade produtiva, ou primeiro cultivo, em conformidade com a Tabela 3.5, ou seja, os valores de “D” (fator de conversão) para NPK, são 40, 50 e 100, respectivamente.

Tabela 4.29 Quantidade de fertilizante orgânico necessário (em kg)

	MEC	MAN
<b>Total - Planta</b>	0,74	0,74
<b>Total - Lavoura</b>	36.843,14	2.210,59

## 5. CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Os resultados obtidos com a análise de potência gerada e com base na literatura existente para utilização do processo de gaseificação com casca do café indicam a instalação de uma planta de gaseificação e geração elétrica com uma geração abaixo de 10MW. O componente mais importante para essa instalação é a unidade de gaseificação, seguido do sistema de limpeza do gás. Portanto, neste capítulo serão apresentados os valores necessários para a avaliação econômica do sistema de gaseificação.

Sabe-se que a metodologia de avaliação econômica difere de acordo com o perfil dos investidores e seus objetivos, entretanto, para todos eles a avaliação econômica constitui um conjunto de indicadores que permitem a comparação por diferentes critérios. A análise econômico-financeira foi realizada por meio dos principais indicadores VPL, TIR e LCOE.

Foi elaborado um fluxo de caixa com todas as entradas e saídas de recursos financeiros para os cinco municípios do Estado de Minas, que possuem quantidades de resíduos diferentes e geram conseqüentemente potências diferentes como já apresentado. As entradas são referentes à venda da eletricidade produzida e as saídas para cada ano são referentes aos custos de operação e manutenção da usina. O fluxo de caixa viabiliza as análises econômicas. A Tabela 5.1 apresenta os resultados econômicos do investimento para a planta de gaseificação, como receita, custo de operação e manutenção, custo total do investimento, VPL e TIR para os municípios estudados, considerando a taxa de juros de 3% (Selic de maio/2020).

Tabela 5.1 Resultados econômicos do investimento

Município	Receita (R\$/ano)	Custo de O&M (R\$/ano)	Investimento Total	VPL	TIR
Patrocínio	4.275.933,97	3.499.212,05	<b>12.816.913,89</b>	<b>1.621.901,06</b>	4,39%
Três Pontas	2.007.105,36	1.642.286,20	<b>6.015.365,88</b>	<b>-587.777,93</b>	1,91%
Alfenas	1.842.586,49	1.506.131,65	<b>5.516.659,02</b>	<b>-511.060,68</b>	1,97%
Nova Rezende	1.622.522,25	1.325.507,15	<b>4.855.067,60</b>	<b>-436.232,93</b>	2,00%
Manhuaçu	1.485.091,08	1.215.104,06	<b>4.450.683,14</b>	<b>-433.957,97</b>	1,92%

O primeiro indicador utilizado, o VPL é um importante e fundamental indicador pois ele reconhece o valor do capital no tempo e desta forma mostra o impacto do investimento no evento futuro. Para os cinco municípios analisados, como mostrado na Figura 5.1, apenas para o município

de Patrocínio, que possui a maior geração de resíduos, o VPL foi positivo, apesar de seu valor de investimento ser maior. Com a maior produção de energia, Patrocínio apresenta também a maior receita dentre os empreendimentos analisados. Para os demais municípios estudados (Três Pontas, Alfenas, Nova Rezende e Manhuaçu) o VPL foi negativo. Portanto, apenas para uma o município de Patrocínio o projeto de instalação da usina é atrativo economicamente.

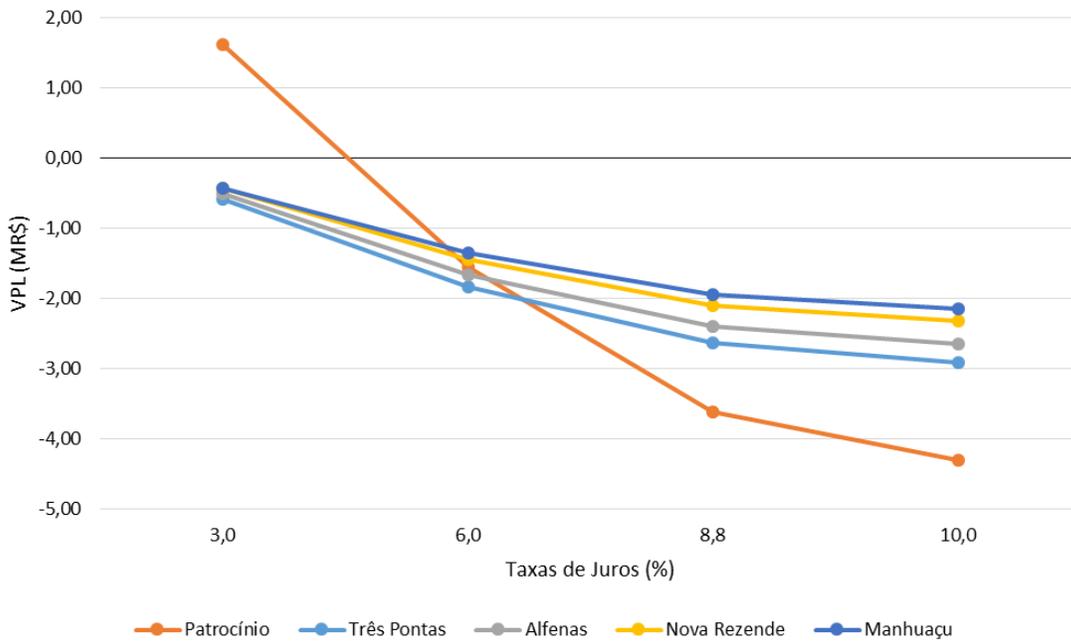


Figura 5.1 VPL em função de taxas de juros

Se a análise for feita conforme a TMA, considerando uma TMA de 10%, o empreendimento é inviável economicamente, pois conforme preconizado por Pamplona (2001), alguns autores consideram a TMA como a taxa de juros equivalente à maior rentabilidade de aplicações correntes com pouco risco, tornando o investimento atrativo se este render no mínimo o valor da TMA.

Analisando os valores da TIR, apresentados na Tabela 5.1 corrobora-se a assertiva de que somente o empreendimento da cidade de Patrocínio é viável e a confirmação de inviabilidade dos demais empreendimentos analisados, pois com os juros da taxa Selic, de 3% (maio de 2020), apenas o município de Patrocínio, obteve uma TIR acima da taxa Selic. Para os demais empreendimentos, a TIR foi menor que a taxa de juros considerada.

Como o LCOE representa a tarifa mínima para viabilidade econômica de um empreendimento energético (Santos, 2019), a Tabela 5.2 compara os resultados do LCOE de outras fontes de geração de energia, com o empreendimento de biomassa estudado. Pode-se observar que o custo da geração elétrica com casca de café supera todas as fontes consideradas na Tabela 5.2. A análise desta Tabela mostra que para estas regiões, onde o valor da geração elétrica supera as demais fontes renováveis, não torna viável economicamente a instalação de usina de biomassa para utilização da casca do café. Para que fosse viável, analisando esses valores de LCOE da Tabela 5.2, o valor da biomassa deveria ser inferior aos valores da geração com biogás, solar fotovoltaica, hidrocinética, eólica e demais. O valor do LCOE mínimo (414,8 R\$/MWh) encontrado para o presente estudo apenas se aproxima do máximo valor das fontes hidrocinética (308,75 R\$/MWh).

Tabela 5.2 LCOE conforme fontes de geração

<b>Fonte</b>	<b>Tarifa (R\$/MWh)</b>	<b>Referência</b>
PCH	227	ANEEL (2016a)
Eólica	247	ANEEL (2016c)
Térmicas a Gás Natural	258	ANEEL (2016b)
Hidrocinética	308,75 - 406,25	Santos 2019
Solar Fotovoltaica	320	ANEEL (2016c)
Biogás	337	Rangel 2016
Biomassa (casca de café)	414,8 - 476,8	-

A Figura 5.2 apresenta o LCOE de acordo com as taxas de juros apresentadas neste trabalho e mostra que para os cinco municípios estudados a variação do LCOE entre eles é mínima. O gráfico ainda mostra que a tarifa mínima para comercialização inicia em 414 reais para a taxa de juros de 3%, em 439 reais para 6,04%, em 464 reais para 8,8% e 476 reais para uma taxa referente a 10% ,ambos para cada MWh produzido.

Portanto, como medida conveniente da competitividade de diferentes tecnologias de geração, o LCOE nos mostrou que esta tecnologia, embora possa ser tecnicamente viável, de acordo com a análise econômica se torna inviável. Conforme EIA (2020), o LCOE não deve ser utilizado isoladamente para tomada de decisões de um investimento. Portanto, como neste trabalho, o LCOE confirma a inviabilidade do empreendimento desta natureza, para estes municípios analisados.

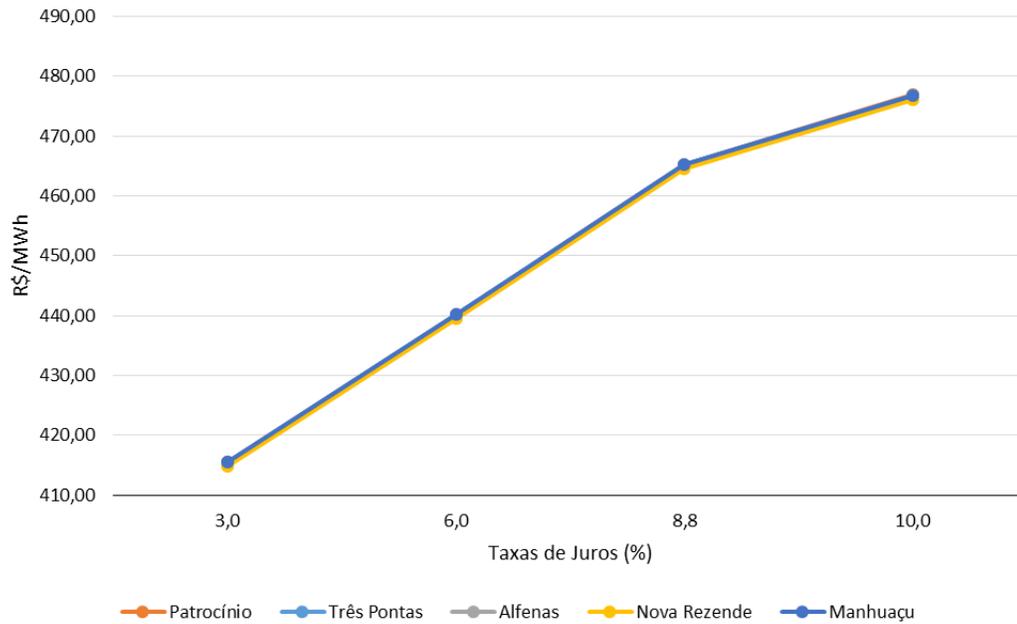


Figura 5.2 LCOE em função de taxa de juros

A Figura 5.3 apresentada pela Agencia Internacional de Energia (IEA, 2018a) mostra o LCOE em dólar por MWh para as principais fontes de energia, com base em usinas geradoras que irão entrar em operação em 2022. Observando a Figura 5.3, verifica-se que a tarifa em que a viabilidade do investimento energético se torna viável, especialmente para biomassa no âmbito internacional, se aproxima da tarifa que foi encontrado no presente trabalho, para a biomassa da casca do café. Portanto, o estudo apresenta credibilidade em dados próximos à realidade existente para o cenário da biomassa. Entretanto, ainda se apresenta inviável para os casos estudados.

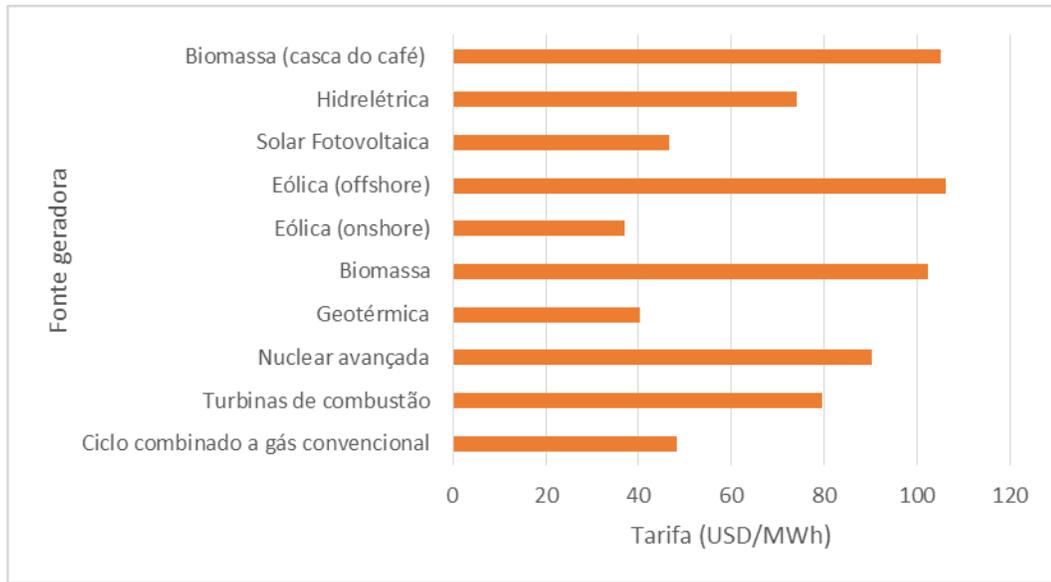


Figura 5.3 LCOE de fontes de geração de energia  
Fonte: IEA 2018a

## **6. CAPÍTULO 6 - AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA**

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes aos impactos ambientais ocasionados pela produção do café até a exportação, incluindo o incremento da utilização da casca como fertilizante orgânico e como combustível para gaseificação, conforme os cenários mostrados no item 3. Para atingir o escopo e objetivo do trabalho, foi aplicada a Análise do Ciclo de Vida.

O presente trabalho utiliza o software SimaPro® versão 8.0.3.14, como já informado no item 3.2.1 e o mesmo faz uso do método ReCipe. O SimaPro® executa a quantificação de impactos ambientais do ciclo de vida do produto e do processo. As análises ambientais se dão por meio das seguintes categorias de impacto: alterações climáticas, depleção da camada de ozônio, acidificação terrestre, eutrofização de água doce, toxicidade humana, formação de oxidantes fotoquímicos, formação de material particulado, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade de água doce, ocupação agrícola do solo, transformação do solo natural, depleção da água e depleção de combustíveis fósseis.

### **6.1 RESULTADOS DA AICV**

Os resultados são apresentados conforme os estudos de caso definidos para este trabalho no item 3. Como já explicado, os três cenários (estudo de caso 1, 2 e 3) foram trabalhados divididos em MAN e MEC, ou manual e mecanizado, respectivamente. Portanto estão assim divididos: Estudo de caso 1 - MAN (EC1 MAN), Estudo de caso 1 - MEC (EC1 MEC), Estudo de caso 2 - MAN (EC2 MAN), Estudo de caso 2 - MEC (EC2 MEC), Estudo de Caso 3 - MAN (EC3 MAN) e Estudo de caso 3 - MEC (EC3 MEC).

### 6.1.1 Comparação geral entre os estudos de caso

Por meio da comparação entre os estudos de caso 1, 2 e 3 percebe-se que o estudo de caso 1 em suas duas alternativas (MAN e MEC) apresenta impactos ambientais semelhantes ao estudo de caso 3, também avaliando suas duas alternativas (MAN e MEC), assim como há algumas categorias em que o estudo de caso 1 apresenta semelhança ao estudo de caso 2. Como o estudo de caso 1 é o estudo base, os estudos de caso 2 e 3 carregam em si os impactos do estudo 1, uma vez que uma vez que ambos (estudo de caso 2 e 3) são constituídos também da produção do café o incremento do aproveitamento da casca.

A Tabela 6.1 apresenta as treze categorias de impacto analisadas com as respectivas grandezas para cada estudo de caso e a Figura 6.1 mostra também os três estudos de caso com suas variações manual e mecanizado (EC1 MAN, EC1 MEC, EC2 MAN, EC2 MEC, EC3 MAN e EC3 MEC). Por meio da análise do gráfico pode-se visualizar que o processo mecanizado apresenta maiores impactos ambientais para as categorias de alterações climáticas, acidificação terrestre, formação de oxidantes fotoquímicos, formação de material particulado, transformação natural do solo e depleção de recursos fósseis. Já para as categorias depleção da camada de ozônio, eutrofização de água doce, toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade de água doce, ocupação agrícola do solo e depleção da água, o processo manual apresenta maior impacto que o processo mecanizado.

Tabela 6.1 Valores de categorias de impacto para cada estudo de caso

Categoria de Impacto	Unidade	Estudo 1		Estudo 2		Estudo 3	
		MAN	MEC	MAN	MEC	MAN	MEC
Mudanças climáticas	kg CO2 eq	3,1E+02	3,2E+02	-1,0E+04	-8,7E+03	2,9E+02	3,0E+02
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	2,7E-07	4,5E-07	-7,9E-05	-6,8E-05	-4,4E-07	-3,2E-07
Acidificação terrestre	kg SO2 eq	1,8E-01	2,0E-01	-3,4E+01	-3,0E+01	6,9E-02	8,3E-02
Eutrofização de água doce	kg P eq	1,6E-04	1,2E-04	-7,2E-03	2,8E-02	-1,1E-03	-1,2E-03
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	9,1E+04	9,1E+04	9,1E+04	9,1E+04	9,1E+04	9,1E+04
Formação de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	2,9E+03	2,9E+03	2,8E+03	2,8E+03	2,9E+03	2,9E+03
Formação de material particulado	kg PM10 eq	7,4E-02	8,5E-02	-7,8E+00	-6,8E+00	4,2E-02	5,1E-02
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq	5,1E+01	5,1E+01	1,6E+01	2,0E+01	5,0E+01	5,0E+01
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DB eq	1,4E+01	1,4E+01	3,9E+00	5,3E+00	1,4E+01	1,4E+01
Ocupação agrícola do solo	m2a	1,2E-01	1,2E-01	-1,7E+03	-1,5E+03	-4,4E+00	-4,8E+00
Transformação do solo natural	m2a	3,2E-04	3,2E-04	-1,5E-02	-1,3E-02	-1,2E-02	-1,3E-02
Depleção da água	m3	1,4E+01	1,3E+01	-2,2E+03	-1,9E+03	-4,2E+02	-4,6E+02
Depleção de combustíveis fósseis	kg oil eq	2,7E+00	2,7E+00	-3,4E+02	-3,0E+02	-1,3E+00	-1,6E+00

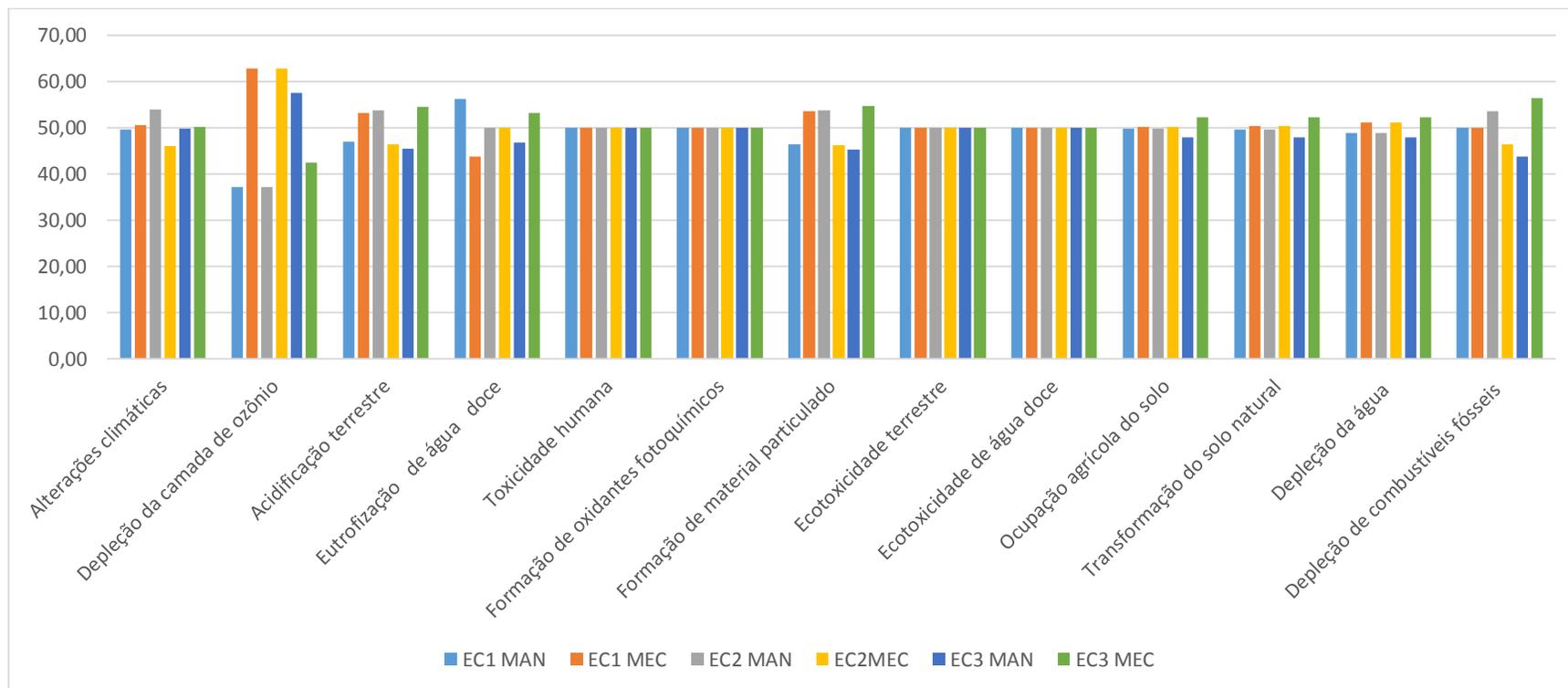


Figura 6.1 Categorias de impacto para cada estudo de caso

## 6.1.2 Resultados por categoria de impacto

São apresentados os resultados por categorias de impacto de acordo com os cenários analisados.

### 6.1.2.1 Mudanças climáticas

As mudanças climáticas estão relacionadas ao agravamento do efeito estufa, devido as emissões de gases poluentes como CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e outros, para a atmosfera, expressos como quilograma de dióxido de carbono equivalente (kg CO<sub>2</sub> eq). Somado a isso, as emissões de outros gases de efeito estufa, como o metano (CH<sub>4</sub>), também contribuem para as alterações climáticas.

Um benefício ambiental oriundo da energia de biomassa e já citado neste trabalho, é sua aparente neutralidade de carbono em relação à atmosfera, pois o CO<sub>2</sub> emitido pode ser equilibrado pelo CO<sub>2</sub> absorvido no cultivo da colheita de lavouras que cultivam biomassa. Portanto, pode não haver aumento líquido do CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Conforme a Figura 6,2, pode-se verificar que todos os estudos de caso contribuem para o agravamento das mudanças do clima, entretanto, variando em quantidade, conforme as etapas. No EC2 MAN a utilização do adubo orgânico também contribui de forma significativamente positiva, com um total de -10.140,19 kg de CO<sub>2</sub> eq, no EC2 MAN e -8.725,15 kg de CO<sub>2</sub> eq ao evitar a produção do fertilizante inorgânico.

A geração de eletricidade também contribui positivamente ao meio ambiente, com um total de -49,76 kg de CO<sub>2</sub> eq na etapa em que ocorre a geração da eletricidade no EC3 MAN e no EC3 MEC. Portanto, esta etapa de eletricidade considerada e a não utilização de fertilizantes inorgânicos gera benefícios ao ambiente.

Avaliando as etapas que mais contribuem para o agravamento das mudanças climáticas, como pode ser verificado no Apêndice 1, as etapas de processamento I, seguida pelo Transporte 2 (em todos os estudos de caso), são as maiores emissoras, com valores de 269,3 e 31,3 kg de CO<sub>2</sub> eq, respectivamente.

Avaliando as alterações climáticas, 86% do total corresponde ao processamento I no EC1 e EC 2 (MAN) e 84% para EC1 e EC2 (MEC), devido a quantidade de metano e dióxido de carbono liberados na queima da madeira e na eletricidade utilizada para secagem.

Analisando o estudo de caso 3 (MAN e MEC), a etapa de processamento I também é a maior contribuinte para as alterações do clima com 78% do total de impactos negativos ao ambiente.

Já o processo de gaseificação e os gases oriundos do MCI no estudo de caso 3, tem participação para agravamento das alterações climáticas, gerando 30 kg de CO<sub>2</sub> eq no EC3 MAN e 26 kg de CO<sub>2</sub> eq no EC3 MEC, devido a utilização da eletricidade nesse processo.

A maioria das emissões que causam o agravamento das alterações climáticas são ocasionadas pela queima de combustíveis fósseis, e neste estudo, sabe-se que isso ocorre no transporte do café, no plantio, no cultivo, por isso o processamento I e transporte 2 são as etapas que mais contribuem, no processamento I devido ao uso da eletricidade e madeira, que emitem metano e dióxido de carbono e no Transporte 2 devido ao transporte do café da unidade de análise para o porto, em um total de 884,6 km. O processamento I ao utilizar a eletricidade na secagem e classificação do café torna-se o maior contribuinte.

Entretanto, pelo gráfico o que fica claro é que o uso do fertilizante orgânico tem a maior importância nessa categoria ao apresentar uma grande quantidade de CO<sub>2</sub> equivalente evitados com a não utilização do fertilizante inorgânico.

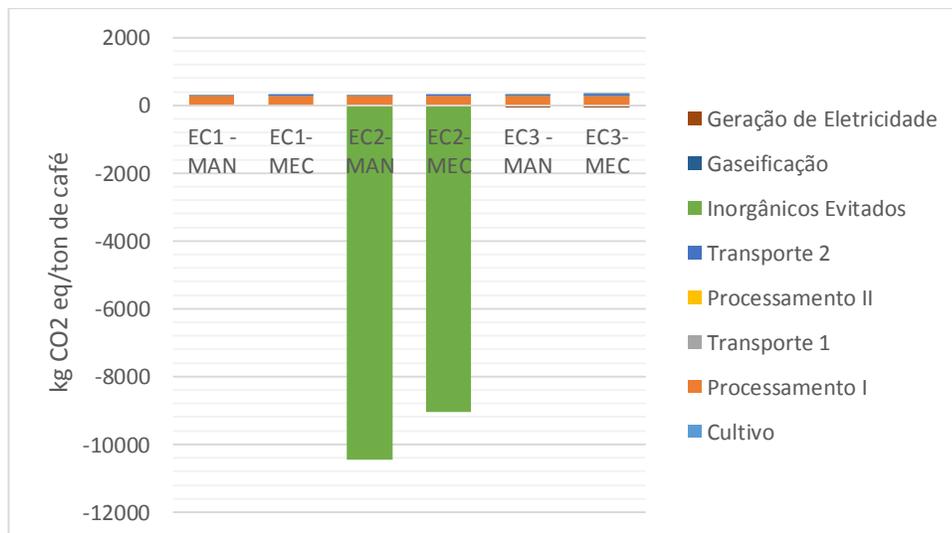


Figura 6.2 Potencial de alterações climáticas por estudo de caso

### 6.1.2.2 Depleção da camada de ozônio

A depleção da camada de ozônio está relacionada à destruição da camada de gás ozônio presente na estratosfera, que naturalmente faz a absorção de grande parte dos raios ultravioletas. A medida que a camada de ozônio é destruída, os raios solares ultravioletas incidem em maior intensidade e pode causar danos à saúde humana e ao meio ambiente. Os principais causadores da depleção da camada de ozônio são os compostos de cloro e brometo ou também conhecidos como clorofluorcarbonetos (CFCs).

Como apresentado na Tabela do Apêndice 1, a atividade de maior potencial para a depleção da camada de ozônio é a gaseificação, seguida pela etapa do cultivo nos estudos de caso 3 (MAN e MEC). Nos demais estudos de caso, a etapa do cultivo é a maior contribuinte para redução da camada de ozônio, entretanto, os valores são pouco expressivos, não apresentando grande interferência no ambiente. A gaseificação contribui com  $5,9E-7$  kg de CFC-11eq, no EC3 MAN e  $5,3E-7$  kg de CFC-11eq para o EC3 MEC.

O cultivo representa uma emissão de  $2,3E-7$  kg de CFC-11eq para os estudos de caso de base manual e  $4,1E-7$  kg de CFC-11eq para os estudos de caso de base mecanizada. Já o EC3 MAN e EC3 MEC, bem como o EC2 MAN e EC2 MEC contribuem positivamente, evitando os gases que agravam a depleção da camada de ozônio, ao gerar a eletricidade, com um valor de  $-1,3E-6$  kg de CFC-11eq, para o EC3 MAN e EC3 MEC e um valor de  $-7,9E-5$  kg de CFC-11eq no EC2 MAN e  $-6,8E-5$  kg de CFC-11eq no EC2 MEC. A Figura 6.3 apresenta o potencial de depleção da camada de ozônio.



Figura 6.3 Potencial de depleção da camada de ozônio

### 6.1.2.3 Acidificação terrestre

De forma geral, a acidificação ocorre com o aumento da acidez do ecossistema devido a deposição de substâncias inorgânicas na superfície terrestre como um todo, ou seja, em águas superficiais, lençóis freáticos e em solos. Estas substâncias são nitratos, sulfatos e fosfatos ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  e  $\text{NH}_3$ ) que reagem com os gases da atmosfera formando ácidos.

A etapa de transporte 2 é a de maior contribuição para acidificação terrestre, mas também, apresentando valores não significantes, com um total de 0,13 kg de  $\text{SO}_2$  eq para todos os estudos de caso, analisando-se a contribuição por tonelada de café produzido. A segunda maior contribuição para a acidificação terrestre está na etapa do cultivo, que varia de 0,032 a 0,056 kg de  $\text{SO}_2$  eq para os estudos de base manual e mecanizado, respectivamente.

E contribuindo com a redução da acidificação terrestre, o uso de fertilizantes orgânicos apresentam -35 kg de  $\text{SO}_2$  eq para o EC 2 MAN e -30 kg de  $\text{SO}_2$  eq para o EC 2 MEC, isso devido a substituição do nitrogênio mineral pelo nitrogênio orgânico. A atividade de geração elétrica também contribui positivamente, com um total de -0,2 kg de  $\text{SO}_2$  eq no EC 3 MAN e MEC. Estes resultados são representados por meio da Figura 6.4.

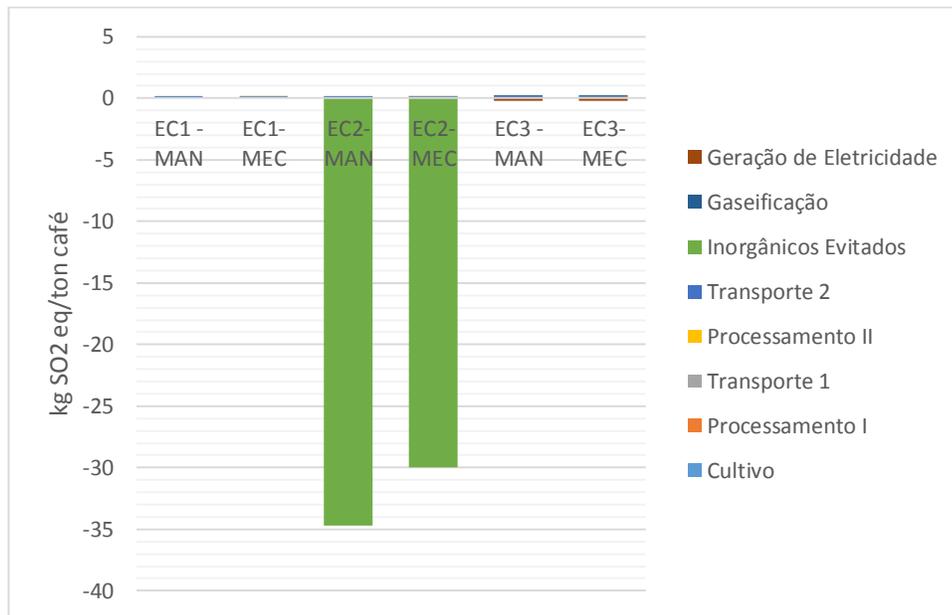


Figura 6.4 Potencial de acidificação terrestre

#### 6.1.2.4 Eutrofização de água doce

O processo de eutrofização de água doce refere-se a um enriquecimento artificial de nutrientes de plantas, os quais são principalmente o fósforo (P) e o nitrogênio (N) ocorrendo neste caso, em rios e lagoas. A eutrofização ocasiona aumento da matéria orgânica, redução de oxigênio e aumento na quantidade de dióxido de carbono nas águas. Este processo pode levar a um menor número de espécies e menor diversidade de plantas e peixes, e ainda pode causar danos à saúde humana junto aos danos ao ecossistema.

A etapa de geração de eletricidade no EC3 MAN e MEC contribui positivamente com um valor de -2,0022 kg de P eq. entretanto, como pode ser visto na Figura 6.5, a utilização do fertilizante orgânico que representa a maior contribuição positiva ao meio ambiente, nesta categoria, ao apresentar -0,26 kg de P eq no EC2 MAN e -0,23 kg de P eq no EC2 MEC.

Ainda analisando o EC2 MAN e MEC, com a utilização do adubo orgânico, ou seja, com o lançamento das cascas de café no solo, ocasiona a eutrofização de água doce pois parte deste resíduo irá para os lençóis de água ou para os córregos próximos do local de aplicação. No EC2 MAN o balanço entre o uso das cascas e a não utilização de fertilizantes inorgânicos fica positivo, sendo benéfico ao meio ambiente, com uma diferença de -0,0074 kg de P eq. Já para o EC2 MEC,

o balanço entre a utilização das cascas e a não utilização de fertilizantes inorgânicos fica negativa, portanto, neste caso, ocorre em maior proporção, a eutrofização de água doce com uma diferença de 0,03 kg de P eq.

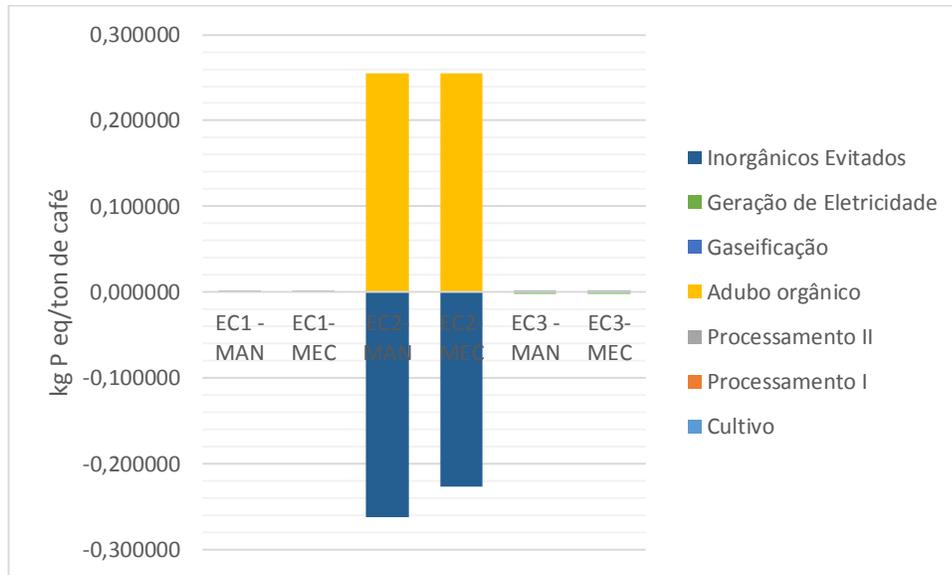


Figura 6.5 Potencial de eutrofização de água doce

### 6.1.2.5 Toxicidade humana

A medida da toxicidade é a capacidade de substâncias causarem danos à saúde em alguma condição de exposição à estas substâncias tóxicas acumuladas nos organismos expostos vivos. O dano pode afetar órgãos, alterar processos bioquímicos e alterar algum sistema enzimático do organismo vivo. Por isso é tão necessário o conhecimento da toxicidade de determinada atividade ou do uso de determinado produto para um completo conhecimento das condições desta atividade ou de uso seguro do produto perigoso, de modo a proteger a saúde humana. O grau de toxicidade de uma substância ou atividade pode levar a um maior risco de danos à saúde humana. As principais substâncias relacionadas são mercúrio, chumbo e arsênio liberadas para a atmosfera, zinco e chumbo liberados para o solo e arsênio, selênio e chumbo liberados para a água. Essas emissões podem ser provenientes da eliminação de cinzas, da construção de usinas, uso da eletricidade e outros.

Todas as substâncias, naturais ou sintéticas são potencialmente tóxicas, e portanto, diferem muito na sua toxicidade, mas deve ser avaliado a dosagem e o grau de exposição para avaliar os efeitos da toxicidade.

O transporte considerado da unidade de análise até o porto é a atividade que mais contribui para a toxicidade humana em 99% para todos os estudos de caso, com um valor de 91260 kg de 1,4-DB eq, isso porque as emissões do transporte rodoviário têm maior contribuição para a toxicidade da saúde humana.

A geração de eletricidade no EC3 (MAN e MEC) e a utilização do fertilizante orgânico no EC2 (MAN e MEC), geram efeitos positivos para a saúde humana, com um valor de -1,23 kg de 1,4-DB eq no EC3 e no EC2 MAN -33,32 kg de 1,4-DB eq e no EC2 MEC -27,9 kg de 1,4-DB eq. Entretanto, devido a grande diferença entre os valores, na Figura 6.6 nota-se apenas o efeito negativo causado pelo Transporte de veículos rodoviários na toxicidade humana.

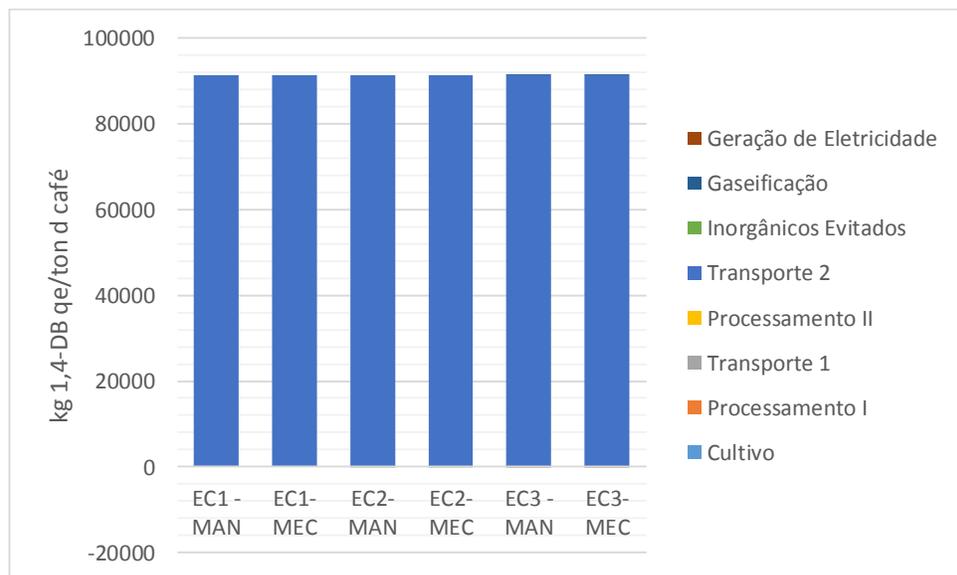


Figura 6.6 Potencial de toxicidade humana

### 6.1.2.6 Formação de oxidantes fotoquímicos

A formação de oxidantes fotoquímicos refere-se à formação da mistura de poluentes secundários formados por meio de reações entre óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis (VOCs), na presença de raios solares. Os compostos orgânicos voláteis são liberados na queima incompleta e evaporação de combustíveis e solventes.

Esses poluentes causam a chamada névoa fotoquímica ou “smog fotoquímico”, que reduz a visibilidade na atmosfera. Esta categoria é expressa em função do etano, mas também está associado à formação de ozônio no nível do solo, uma vez que o ozônio é o principal produto dessa reação e utilizado como indicador da presença de da presença de oxidantes fotoquímicos na atmosfera.

O transporte 2 é a atividade que mais contribui, para a formação de oxidantes fotoquímicos com 99% para todos os estudos de caso. Essa porcentagem é referente a 2853,6 kg de NMVOC para cada tonelada de café produzido. Estes valores podem ser visualizados na Tabela do Apêndice 1 e são representados pela Figura 6.7.

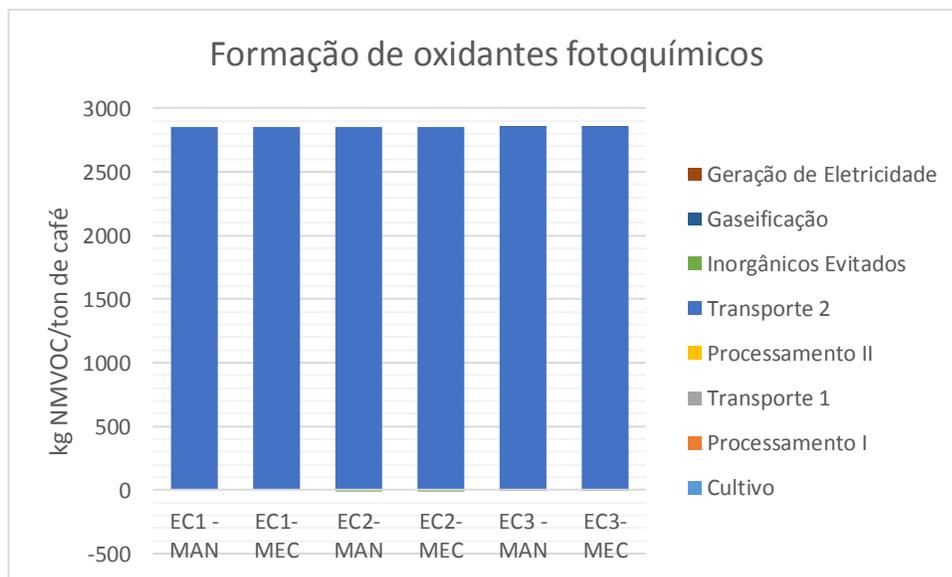


Figura 6.7 Potencial de formação de oxidantes fotoquímicos

### 6.1.2.7 Formação de material particulado

O material particulado é um conjunto de poluentes constituídos de poeiras, fumaças e diversos materiais sólidos e até líquidos que se mantêm suspenso na atmosfera devido ao seu reduzido tamanho. Esse material inclui as partículas totais em suspensão, as partículas inaláveis e as partículas inaláveis finas. Quanto mais reduzido o tamanho das partículas, maior o seu potencial de causar danos à saúde e maiores os efeitos provocados.

Os gases dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e compostos orgânicos voláteis (COVs), que são emitidos principalmente em atividades de combustão, formam o material particulado como resultado de suas reações químicas com o ar. Os veículos e os processos industriais são os principais causadores da emissão de material particulado para a atmosfera.

A emissão de partículas será maior na etapa de Transporte 2, ou seja, no transporte do café da unidade de análise para o porto, para todos os estudos de caso. Para essa atividade a emissão de partículas corresponde a 0,06 kg de PM10. Em segunda posição encontra-se a gaseificação, para os estudos de caso 3, com valores de 0,026 e 0,024 para EC2 MAN e EC2 MEC, respectivamente, como pode ser visto no Apêndice 1.

A geração de eletricidade no estudo de caso 3 e a utilização do fertilizante orgânico no estudo de caso 2 contribuem positivamente. Mas como pode ser verificado na Figura 6.8, o estudo de caso 2 tem maior contribuição positiva, apresentando -7,9 kg de PM10 no EC2 MAN e no EC2 MEC -6,84 kg de PM10, representando um valor superior diante do estudo de caso 3, que apresenta -0,06 kg de PM10, para EC3 MAN e MEC.

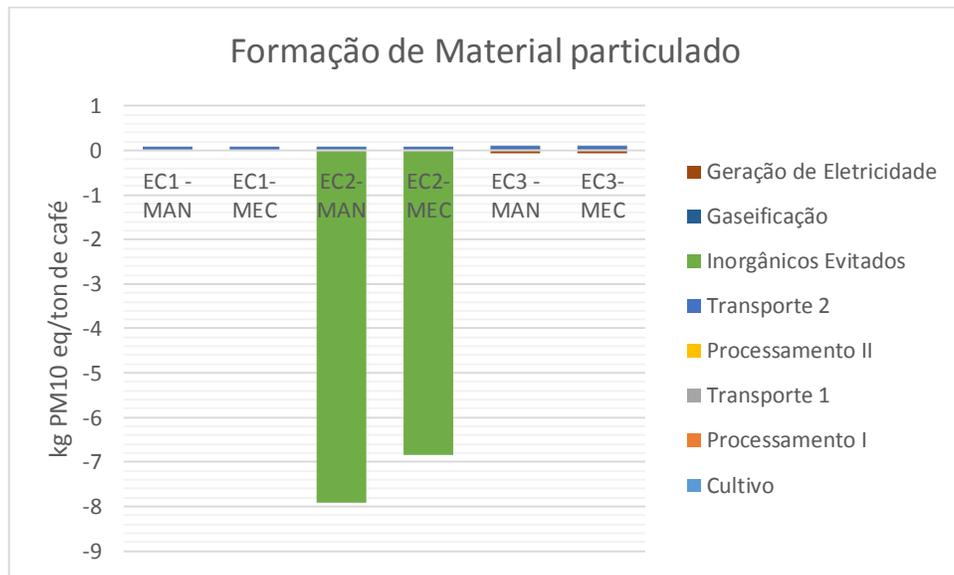


Figura 6.8 Potencial de formação de material particulado

#### 6.1.2.8 Ecotoxicidade terrestre e ecotoxicidade de água doce

Esta categoria está relacionada aos efeitos decorrentes de emissões de substâncias tóxicas nos ecossistemas terrestre e aquático doce. A ecotoxicidade refere-se a uma avaliação dos efeitos de produtos químicos nos organismos vivos terrestres e aquáticos, sejam eles vegetais ou animais.

Os fabricantes de produtos químicos e pesticidas submetem os dados do estudo de ecotoxicidade às autoridades reguladoras para apoiar o registro e a aprovação de comercialização de seus produtos. Mas o uso em dosagens diferentes das recomendadas, podem também causar danos ao meio ambiente.

Analisando a ecotoxicidade terrestre, todos os estudos de caso apresentam o transporte 2 como o maior contribuinte, com um valor de 50,5 kg de 1,4-DBeq. Para os estudos de caso 1 (EC1 MAN e EC1 MEC), 99% das emissões são no transporte da unidade de análise até o porto (transporte 2), o que representa o valor citado de 50,5 kg de 1,4-DBeq. Para os estudos de caso 2, assim como no estudo de caso 1, as emissões referentes ao transporte 2 são as maiores com o valor já citado, entretanto, a não utilização de fertilizantes inorgânicos gera uma contribuição positiva no total de -34,7 kg de 1,4-DBeq no EC2 MAN e -30,1 kg de 1,4-DBeq no EC2 MEC. Da mesma forma, a geração de eletricidade, nos estudos de caso 3 (EC3 MAN e EC3 MEC), gera contribuição

positiva no valor de -0,29 kg de 1,4-DBeq. Mas como o valor da contribuição do fertilizante orgânico é maior, a contribuição da geração de eletricidade não é representada na Figura 6.9.

A segunda maior contribuição para a ecotoxicidade terrestre está na etapa de gaseificação, mas com uma quantidade entre 0,12 e 0,13 kg de 1,4-DBeq no EC3 (MAN e MEC). Em se tratando da ecotoxicidade de água doce, a segunda maior contribuição também está na etapa de gaseificação com 0,028 e 0,032 kg de 1,4-DBeq no EC3 (MAN e MEC). Após a etapa de gaseificação, a etapa de transporte 1 é a de maior contribuição para a ecotoxicidade de água doce e a etapa de processamento 2 é a de maior contribuição para a ecotoxicidade terrestre com valores de 0,014 kg de 1,4-DBeq (para Transporte 1) e 0,0037 kg de 1,4-DBeq (para processamento 2), respectivamente. Os dados supracitados são apresentados no Apêndice 1 e representados por meio das Figuras 6.9 (ecotoxicidade terrestre) e 6.10 (ecotoxicidade de água doce).

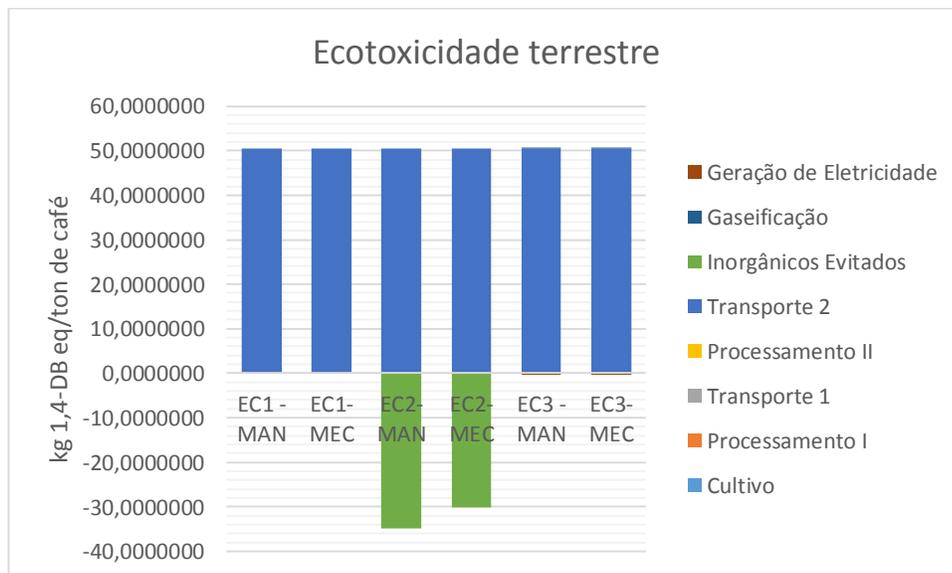


Figura 6.9 Potencial de ecotoxicidade terrestre

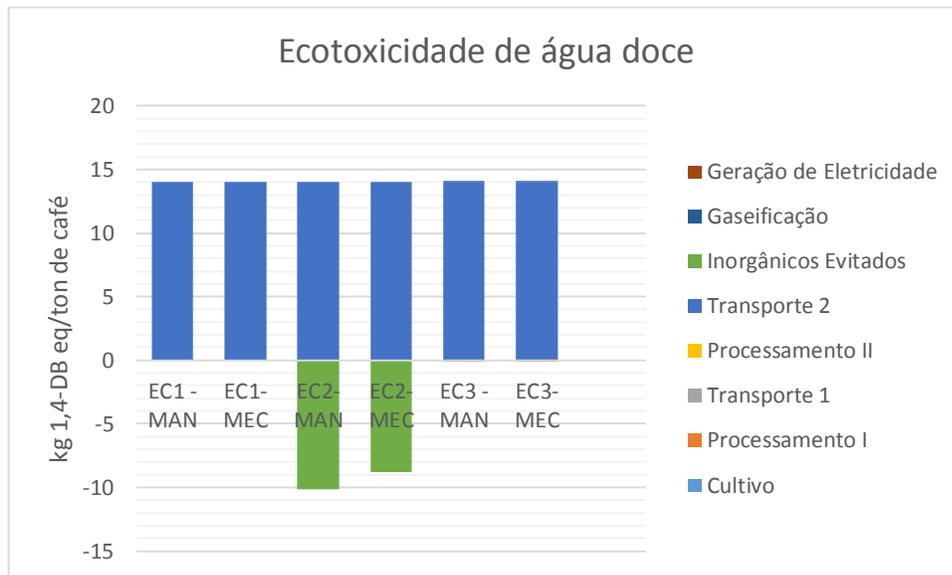


Figura 6.10 Potencial de ecotoxicidade de água doce

#### 6.1.2.9 Ocupação agrícola do solo e Transformação natural do solo

A categoria que verifica a ocupação agrícola do solo está relacionada a quantidade de solo destinada a agroindústria, ou a agricultura, intensiva e extensiva. Em outras palavras, a quantidade de solo destinada a ocupação e uso agrícolas. O uso da terra é a categoria de impacto ambiental em que a bioenergia tem um impacto ambiental maior em relação à maioria dos outros tipos de sistemas de energia, devido a quantidade de solo destinada para plantações.

O cultivo de culturas perenes contribui substancialmente para essa categoria de impacto. A gaseificação de biomassa usando resíduos do café em comparação, tem uma quantidade muito mais limitada de uso da terra agrícola.

Estudos mostram que entre 15% e 72% das terras do globo terrestre é destinada a cultivos alimentares, entretanto, até 2050 essas lavouras podem ser também lavouras energéticas, sem significantes consequências no preço dos alimentos (Smets et al, 2007).

O crescimento de terras utilizadas em cultivos de biomassa geralmente compete com culturas alimentares, florestas e urbanização. Mas no caso das lavouras de café e o uso do resíduo não haverá competição com cultivos pois as lavouras já existem para a obtenção do café.

Em se tratando de ocupação do solo agrícola e transformação natural do solo, para os estudos de caso 1 e 2 (MAN e MEC) a etapa de processamento II é a que mais contribui para a

ocupação e transformação do solo, devido ao uso da eletricidade e da água nessa etapa. Sendo o EC1 e EC2 (MAN e MEC) apresentam 90%. Já o EC3 (MAN e MEC) possui a etapa de gaseificação como a maior causadora da ocupação e transformação do solo, o que pode ser explicado pela utilização da eletricidade no processo. No EC3 (MAN e MEC), há a geração de eletricidade contribuindo positivamente com o sistema, com  $-2,27 \text{ m}^2$  para transformação do solo e  $-0,00833 \text{ m}^2$  para a ocupação do solo. As Figuras 6.11 e 6.12 representam respectivamente o potencial de ocupação agrícola do solo e de transformação natural do solo.

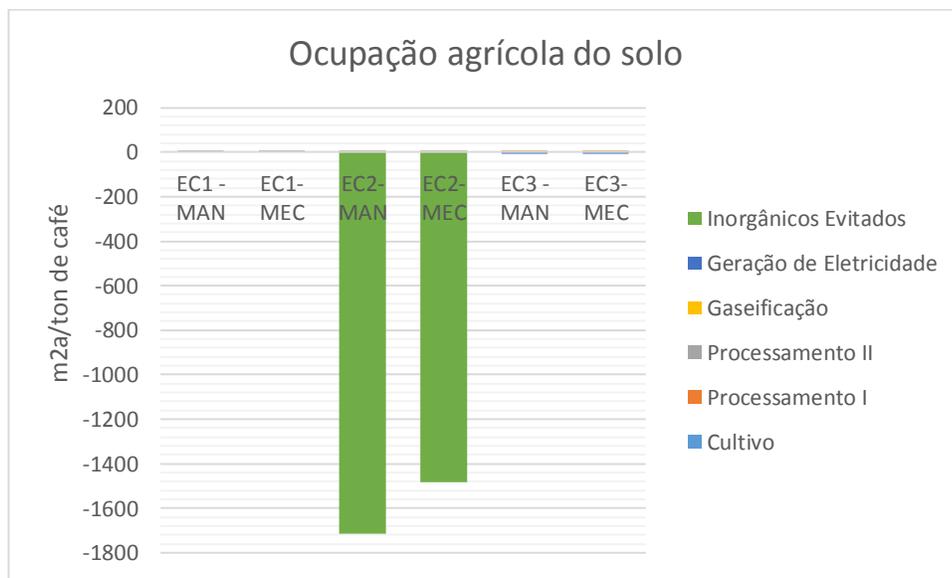


Figura 6.11 Potencial de ocupação agrícola do solo

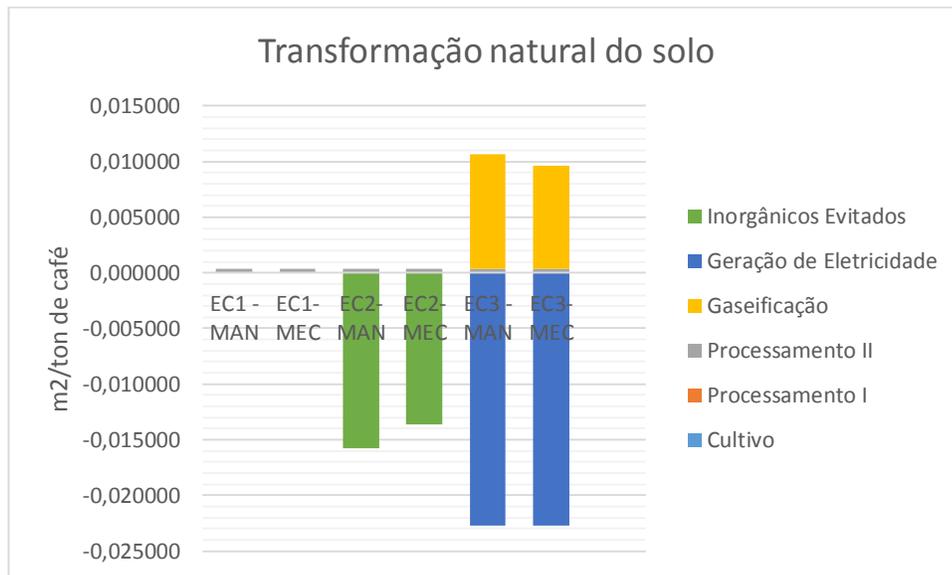


Figura 6.12 Potencial de transformação natural do solo

#### 6.1.2.10 Depleção da água

Refere-se a quantidade de água que é extraída da natureza. O uso da água na agricultura é uma séria questão bastante abordada. Entretanto, para os estudos de caso abordados, não foram encontrados dados de irrigação, como utilização da água. Vale salientar que esta categoria não recebe tanta atenção como as alterações climáticas.

Para a depleção da água, a etapa de maior contribuição é a gaseificação, devido a utilização de eletricidade; como para geração elétrica a água é a maior fonte, por meio das hidrelétricas, a utilização desta água torna-se a maior causadora da redução deste recurso natural. A depleção de água é responsável por 366 m<sup>3</sup> de água, no EC3 MAN, para a unidade funcional verificada (1000 kg de café). No EC3 MEC esse valor é de 327 m<sup>3</sup> de água.

A segunda etapa de maior contribuição é o processamento II, pois este utiliza água nos testes de bebida do café. Um total de 11,13 m<sup>3</sup> de água representa para todos os estudos de caso, o valor do impacto desta prática na depleção de água.

Como representado na Figura 6.13, a geração de eletricidade, bem como a utilização do adubo orgânico geram um efeito positivo no ambiente, em maior proporção. A geração de eletricidade contribui com -802 m<sup>3</sup> de água no EC3 MAN e MEC e os inorgânicos evitados

representam  $-1907 \text{ m}^3$  de água no EC2 MEC e  $-2204 \text{ m}^3$  de água no EC2 MAN, isso porque os fertilizante inorgânicos utilizam água na sua produção.

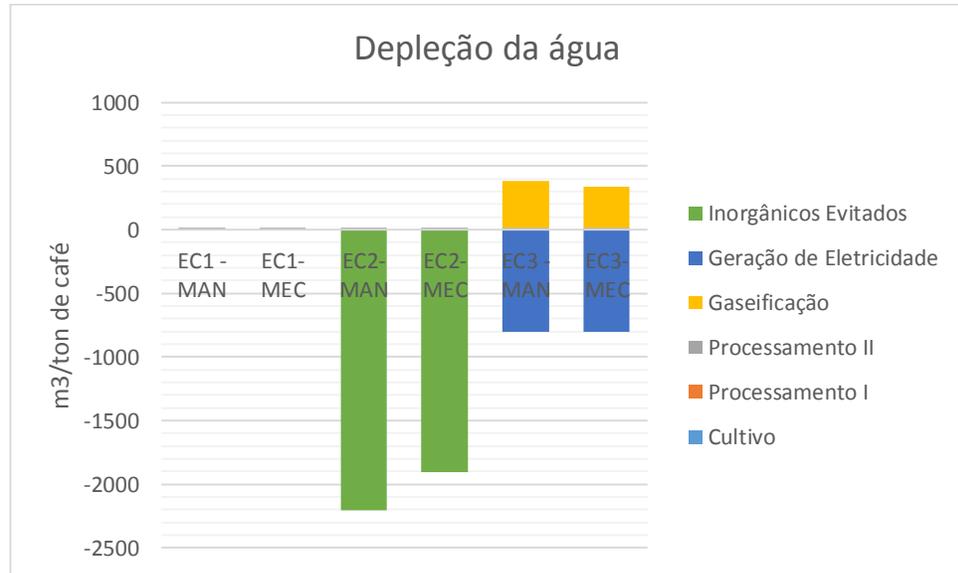


Figura 6.13 Potencial de depleção da água

#### 6.1.2.11 Depleção de combustíveis fósseis

Esta categoria está associada ao consumo e redução dos recursos naturais fósseis que são extraídos da natureza. Esta categoria se relaciona a redução das reservas e as principais substâncias analisadas são o petróleo bruto, o gás natural e o carvão mineral.

No processo de gaseificação há o uso de carvão na limpeza do gás, portanto, a etapa de gaseificação, neste trabalho, é a que mais contribui para a depleção de recursos fósseis, com um total de 3,37 kg de óleo equivalente no EC3 Man e 3 kg de óleo equivalente no EC3 MEC. A etapa de Transporte do café contribui, como a segunda maior contribuinte, com um total de 1,05 kg de óleo equivalente, em todos os estudos de caso, isso ocorre devido a utilização do diesel nos veículos rodoviários (carretas e caminhões) que transportam o café até sua entrega no porto.

Novamente, o uso do fertilizante orgânico e a geração de eletricidade contribui positivamente para a redução da depleção fóssil. Através da não utilização de fertilizantes inorgânicos, com um valor de  $-298,7 \text{ kg}$  de óleo equivalente no EC2 MEC e  $-345,3 \text{ kg}$  de óleo equivalente no EC2 MAN. A geração de eletricidade no estudo de caso 3, contribui com  $-7,35 \text{ kg}$

de óleo equivalente no EC3 (MAN e MEC). Entretanto, como se vê na Figura 6.14, a maior contribuição é dada pelos inorgânicos evitados, nesta categoria analisada.

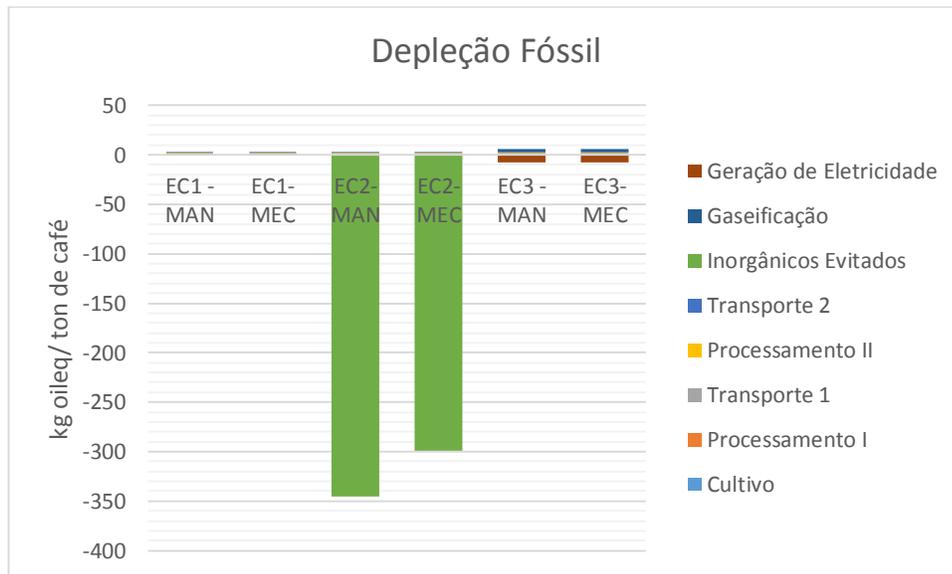


Figura 6.14 Potencial de depleção de combustíveis fósseis

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta dissertação apresentou um estudo sobre a produção do café arábica, no município de Santa Rosa da Serra, em Minas Gerais, por meio de dados reais em duas formas de manejo: manual e mecanizada. Foi analisado a utilização do resíduo produzido como insumo para gaseificação e como adubo orgânico para lavoura. Posteriormente, foi realizado um estudo econômico para o uso da energia elétrica produzida por meio da gaseificação e o estudo ambiental aplicando a ferramenta da Análise do Ciclo de Vida para os estudos de caso apresentados. Com base nos estudos realizados conclui-se que:

- ✓ Por meio do levantamento bibliográfico verificou-se que não há utilização da técnica de uso da casca de café para produção de energia elétrica no Brasil.
- ✓ Também por meio da revisão de bibliográfica cabe destacar que no Brasil há estudos ambientais sobre a produção do café, mas não sobre o uso da casca como insumo energético para gaseificação, até a data da pesquisa.
- ✓ A utilização da casca como insumo para a gaseificação é dependente da quantidade de casca utilizada, uma vez que pequenas propriedades não produzem suficiente quantidade para utilização em uma planta de geração elétrica.
- ✓ Analisando a quantidade de energia e potência produzida com a casca de café (energia disponível), para os estados brasileiros de modo geral, o total é de 54.333,9 kW de potência, entretanto deve-se atentar que esta potência somente seria produzida se todo resíduo do país fosse direcionado a uma única planta de produção elétrica. Em vias práticas, tornar-se-ia inviável essa produção.
- ✓ No estado de Minas Gerais o município de Patrocínio apresenta uma maior quantidade de potência disponível e que pode ser utilizada, sendo de 1.040,2 kW disponíveis.
- ✓ Na análise econômica foi verificado que dentre os cinco municípios verificados (na produção de energia), apenas o município de Patrocínio apresentou um VPL positivo, pois este possui a maior produção de café e resíduo cafeeiro no Estado. Portanto para os demais municípios, tanto os apresentados como os não apresentados, não seria economicamente viável a instalação de uma planta de geração elétrica utilizando o gaseificador.

- ✓ Também na análise econômica, pode ser visualizado que apenas o município de Patrocínio apresentou uma TIR de 4,39% sendo assim o único empreendimento viável no Estado.
- ✓ O LCOE permite concluir que empreendimentos utilizando a tecnologia de gaseificação com a casca do café, embora seja tecnicamente viável, de acordo com a análise econômica se torna inviável, pois o valor desta geração elétrica foi superior aos demais valores de geração, hoje praticados.
- ✓ Portanto, se a análise for feita apenas com VPL e TIR, municípios com uma produção superior a 68.667 t de café. E considerando que esta quantidade é a maior dentre os municípios de Minas Gerais, no país não há municípios com produção superior a esta.
- ✓ Utilizando o LCOE, o empreendimento torna-se inviável.
- ✓ O gás gerado no processo de gaseificação, simulado com a composição das cascas de café apresenta resultados de fração molares típicas para gaseificação desta biomassa, portanto em conformidade com os trabalhos existentes.
- ✓ No estudo ambiental, pode ser verificado que a categoria de alterações climáticas foi a mais afetada tanto no estudo de caso 1 (manual e mecanizado), como no estudo de caso 3 (manual e mecanizado), entretanto, fortemente para o estudo de caso 1 mecanizado, o que pode ser explicado pois este manejo utiliza mais maquinário e maior quantidade de insumos para cada tonelada de café produzida.
- ✓ Duas categorias que devem ser ressaltadas também é a ecotoxicidade humana e formação de oxidantes fotoquímicos que apresentaram maior contribuição, após as alterações climáticas. O estudo de caso 1 apresentou maior ecotoxicidade humana e o estudo de caso 3 maior formação de oxidantes fotoquímicos.
- ✓ Algumas categorias de impacto como depleção da camada de ozônio, eutrofização aquática, formação de material particulado, ocupação agrícola do solo e transformação natural do solo apresentaram valores inferiores a zero e portanto não apresentaram impacto significativo conforme os estudos de caso apresentados.
- ✓ Nota-se que o estudo de caso 1 apresentou a maior influência nos impactos, o que ocorre pois este estudo não apresenta nenhuma prática sustentável. Já os estudos 2

e 3 apresentam a utilização da casca do café, e esta prática reduz os efeitos dos impactos ambientais causados.

- ✓ Para as categorias de depleção da água e depleção fóssil os estudos de caso 2 e 3 apresentam valores significantes e negativos, o que indica que estes estudos são alternativas sustentáveis e que devem ser praticados para evitar e reduzir os impactos causados pela produção de café que não faz uso do aproveitamento de resíduos (como o estudo de caso 1).

## **7.1 RECOMENDAÇÕES**

Para que esta pesquisa tenha continuidade recomenda-se:

- ✓ Realização de estudos laboratoriais para conduzir a pesquisa a resultados mais próximos possíveis da realidade; sugere-se a execução da gaseificação de cascas de café em gaseificador de plantas piloto e o acompanhamento do desenvolvimento de plantas em campo com aplicação das cascas como adubo orgânico;
- ✓ Analisar sistemas onde seria possível a integração do resíduo cafeeiro com plantas de geração elétrica já existentes;
- ✓ Estudo exergoeconômico dos cenários;

## REFERÊNCIAS

ADAMS, P. W. R. e MCMANUS, M. C. Small-scale biomass gasification CHP utilisation in industry: Energy and environmental evaluation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 6, p. 129-140, 2014.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2016a). Leilão de Energia de Reserva contrata 180,3 MW de 30 usinas. Disponível em: <[https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset\\_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/leilao-de-energia-de-reserva-contrata-180-3-mw-de-30-pequenas-centrais-e-geradoras-hidretricas/656877?inheritRedirect=false](https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/leilao-de-energia-de-reserva-contrata-180-3-mw-de-30-pequenas-centrais-e-geradoras-hidretricas/656877?inheritRedirect=false)>. Acesso em: maio de 2020.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2016b). Primeiro leilão de geração de 2016 comercializa energia de 29 empreendimentos. Disponível em: <[https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset\\_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/primeiro-leilao-de-geracao-de-2016-comercializa-energia-de-29-empreendimentos/656877?inheritRedirect=false](https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/primeiro-leilao-de-geracao-de-2016-comercializa-energia-de-29-empreendimentos/656877?inheritRedirect=false)>. Acesso em: maio de 2020.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2016c). ANEEL aprova edital do 2º Leilão de Energia de Reserva de 2016. Disponível em: <[https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset\\_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/aneel-aprova-edital-do-2-leilao-de-energia-de-reserva-de-2016/656877?inheritRedirect=false](https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/aneel-aprova-edital-do-2-leilao-de-energia-de-reserva-de-2016/656877?inheritRedirect=false)>. Acesso em: maio de 2020.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2019). Agência Nacional de Energia Elétrica/Informações Técnicas/Regulação do Setor Elétrico/Distribuição/Geração Distribuída. 2018. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acesso em: outubro de 2019.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2020a). Matriz de Energia Elétrica no Brasil. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: janeiro de 2020.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2020b). Capacidade de Geração no Brasil. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: janeiro de 2020.

ANDRADE, R. V. **Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, 2007.

ANDRADE, R. V. Processo de gaseificação. Razão de equivalência ideal. 2020. Comunicação pessoal.

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

ARENAS, E. **Biomasa y carbón. Uma alternativa energética para Colombia**. Colombia. 2006.

Associação brasileira de normas técnicas (ABNT). NBR ISO 14044: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Brasil, 2009 (versão corrigida, 2014).

BADÚ, L. Comunicação Pessoal. Transporte e consumo de carga pesada. Uberaba, julho de 2019.

BHATIA, S. K., JOO, H-S., YANG, Y-H. Biowaste-to-bioenergy using biological methods – A mini-review. *Energy Conversion and Management*, v. 177, p. 640-660, 2018.

BHATIA, S. K., KIM, J., SONG, H-S., KIM, H. J., JEON, J-M., SATHIYANARAYANAN, G., YOON, J-J., PARK, K., KIM, Y-G., YANG, Y-H. Microbial biodiesel production from oil palm biomass hydrolysate using marine *Rhodococcus* sp. YHY01. *Bioresource Technology*, v. 233, p. 99-109, 2017.

BAIN, R. L.; BROEN, K. Gasification. In: *Thermochemical processing of biomass: conversion into fuels, chemicals, and power*, p. 47-77, John Wiley, 2011.

BALAT, M., BALAT, M., KIRTAY, E., BALAT, H. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 2: Gasification systems. *Energy Conversion and Management*, v. 50, n. 12, p. 3158-3168, 2009.

BARE, J. C., HOFSTETTER, P., PENNINGTON, D. W., UDO de HAES, H.A. Life Cycle Impact Assessment Workshop Summary: Midpoints versus Endpoints: The Sacrifices and Benefits. *Life Cycle Impact Assessment*, v. 5, p. 319-326, 2000.

BARTHELEMY, G. *Le retour des gazogenes*. Paris: Editions Alternatives, 1981.

BARTHOLOMEU, D. B., CAIXETA-FILHO, J. V. Caracterização de logística do transporte do café brasileiro. Trabalho apoiado pelo PIBIC/CNPq. In: **38º Congresso Brasileiro de Economia e Sociologia Rural**, Rio de Janeiro, 2000.

BASU, P. *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*, Academic Press, 2010.

BELLARBY, J., FOEREID, B., HASTINGS, A. F. S. J., SMITH, P. Cool Farming: climate impacts of agriculture and mitigation potencial. *Greenpeace Int* 44. 2008.

BERNARD, K. Top 10 Coffee Consuming Nations. **WorldAtlas**. 2018. Disponível em: <<https://www.worldatlas.com/articles/top-10-coffee-consuming-nations.html>>. Acesso em: Setembro de 2019.

BILGEN, S., KELEŞ, S., SARIKAYA, İ., KAYGUSUZ, K. A perspective for potential and technology of bioenergy in Turkey: Present case and future view. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 48, p. 228-239, 2015.

BIRKENBERG, A., BIRNER, R. The world's first carbon neutral coffee: Lessons on certification and innovation from a pioneer case in Costa Rica. *Journal of Cleaner Production*, v.189, p. 485-501, 2018.

BISHT, A. S., THAKUR, N. S. Small scale biomass gasification plants for electricity generation in India: Resources, installation, technical aspects, sustainability criteria & policy. *Renewable Energy Focus*, v. 28, p. 112-126, 2019.

BIZZO, W. A. Purificação do produto de gaseificação de biomassa. In: SÁNCHEZ, C. G. (Org). **Tecnologia da gaseificação de Biomassa**. Campinas, SP: Editora Átomo, 2010, cap 19, p. 393-422. ISBN 978-85-7670-126-2

BLINOVÁ, L., SIROTIK, M., BARTOSOVÁ, A., SOLDÁN, M. Review: utilization of waste from coffee production. *Research Papers*, v. 25, n. 40, 2017.

- BORGES, F.J. **Inventário do ciclo de vida do PVC produzido no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), - Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2004.
- BRAND, M. A. Energia de biomassa florestal. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2010.
- BROMMER, E., STRATMANN, B., QUACK, D. Environmental impacts of different methods of coffee preparation. **International Journal of Consumer Studies**, v. 35, p. 212-220, 2011.
- BRUNETTI, F. Motores de Combustão Interna. 3º Edição. São Paulo: Blucher, 2012. Volume 2. ISBN 978.85.212-0709.2
- BURAGOHAİN, B., MAHANTA, P., MOHOLKAR, V. S. Biomass gasification for decentralized power generation: The Indian perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Assam, v. 14, p. 73-92, 2010.
- BÜSSER, S., JUNGBLUTH, N. The role of flexible packaging in the life cycle of coffee and butter. The role of flexible packaging in the life cycle of coffee and butter. Special Issue "Life Cycle Performance of Aluminium Applications". **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 14, p. 80-91, 2009.
- CARPENTIERE, M., CORTI, A., LOMBARDI, L. Life cycle assessment (LCA) of an integrated biomass gasification combined cycle (IBGCC) with CO<sub>2</sub> removal. **Energy Conversion and Management**, v. 46, p. 1790-1808, 2005.
- CARVALHO, F. C. Disponibilidade de resíduos agroindustriais e do beneficiamento de produtos agrícolas. **Informações Econômicas**, v. 22, n. 12, 1992.
- CHAYER, J. A., KICAK, K. Life Cycle Assessment of coffee consumption: comparison of Single-serve coffee and bulk coffee brewing - Final Report. Montreal: Quantis Canada, 2015.
- CHAVES, J. C. D. Manejo do solo: Adubação e calagem, antes e após a implantação da lavoura cafeeira. Londrina: IAPAR, 2002. ISSN: 0100-3356
- COUTO, N., SILVA, V., MONTEIRO, E., BRITO, P. S. D., ROUBOA, A. Experimental and Numerical Analysis of Coffee Husks biomass Gasification in a Fluidized bed Reactor. **Energy Procedia**, v. 36, p. 591-595, 2013.
- COLTRO, L. Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão. Campinas: Centro de Tecnologia de Embalagem (**Cetea/Ital**), 2007.
- COLTRO, L., MOURAD, A. L., OLIVEIRA, P., BADDINI, J., KLETECKE, R. Environmental profile of Brazilian green coffee. **The International Journal of Life Cycle Assessments**, v. 11, n.1, p. 16-21, 2006.
- COLTRO, L., MOURAD, A. L., VERNINI DE OLIVEIRA, P. A. P. L. V., Andrade, J. P. B. O. Regional differences of coffee cultivation in brazil. **Coffee Science**, v. 7, n. 1, p. 31-41, 2012.
- COMÉRIO, L., KAFLER, L. M., CORRÊA, G. C., DAL-BÓ, V., LIRA, T. S., e ARRIECHE, L. S. Casca do café para a geração de energia: caracterização da biomassa e análise dos gases de combustão. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química e Encontro Brasileiro sobre o Ensino de Engenharia Química, **XXI COBEQ e XVI ENBEQ**, Fortaleza, CE. Anais... Fortaleza: setembro de 2016.
- Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021). Acompanhamento da Safra Brasileira - Café. Safra 2021. Segundo Levantamento. Brasília, v. 8, n. 2, p. 1-63, Maio de 2021.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2019). Acompanhamento da Safra Brasileira - Café. Safra 2019. Primeiro Levantamento. Brasília, v. 5, n. 1, p. 1-62, Janeiro de 2019.

Conselho dos Exportadores de Café do Brasil (Cecafe). Exportações Brasileiras de Café. Exportação Anual 2020. Disponível em: <<https://www.cecafe.com.br/dados-estatisticos/exportacoes-brasileiras/>>. Acesso em: Julho de 2021.

CRUZ, R. Coffee by-products: Sustainable Agro-Industrial Recovery and Impact on Vegetables Quality. Dissertação (Mestrado em Controle de Qualidade – Especialização em Água e Alimentos), Universidade do Porto, Porto, 2014.

CURRAN, M. A., MANN, M., NORRIS, G. The international workshop on electricity data for life cycle inventories. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, p. 853-862, 2005.

DAL-BÓ, VANESSA. **Potencialidades para o aproveitamento de biomassa de casca de café robusta para a geração de energia**. Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus – ES, 2016.

DAMATA, F. M., RONCHI, C. P., MAESTRI, M., BARROS, R. S. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n.4, p. 485-510, 2008.

DAMBRÓSIO, L., FORTUNATO, B., TORRESI, M., CAMPOREALI, S. M., FORNARELLI, F. Performance optimization of a gas-steam combined power plant partially fed with syngas derived from pomace. In: **Energy Procedia**, v. 126, p. 533-540, 2017.

DAVIS, J., e HAGLUND, C. LCI of fertiliser production. 1999. Extraído SimaPro.

DE MONTE, M., PADOANO, E., POZZETTO, D. Alternative coffee packaging: an analysis from a life cycle point of view. **Journal of Food Engineering**, v. 66, p. 405-411, 2005.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, p. 219-230, 2004.

DEMIRBAS, A. H. E DEMIRBAS I. Importance of rural bioenergy for developing countries. **Energy Conversion and Management**, v. 48, p. 2386-2398, 2007.

DEMIRBAS, M. F., BALAT, M., BALAT, H. Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. **Energy Conversion and Management**, v. 50, p. 1746-1760, 2009.

DENG, N., LI, D., ZHANG, Q., ZHANG, A., CAI, R., ZHANG, B. Simulation analysis of municipal solid waste pyrolysis and gasification based on Aspen plus. **Front. Energy**, v. 13, n. 1, p. 64-70, 2019.

DEVI, L.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J.G. A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. **Biomass & Bioenergy**, v. 24, p. 125-140, 2003.

DI LASCIO, M. A.; FAGUNDES BARRETO, E. J. Energia e Desenvolvimento Sustentável para a Amazônia Rural Brasileira: Eletrificação de Comunidades Isoladas. Brasília, Ministério de Minas e Energia, 2009.

DIFS, K., WETTERLUND, E., TRYGG, L., SODERSTROM, M. Biomass gasification opportunities in a district heating system. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, p. 637-651, 2010.

DOHERTY, W., REYNOLDS, A., KENNEDY, D. The effect of air preheating in a biomass CFB gasifier using ASPEN Plus simulation. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 9, p. 1158-1167, 2009.

DOMÍNGUEZ- PATIÑO, J., MARTÍNEZ, A. R., ROMERO, R. J., OROZCO, I. R. Life Cycle Assessment on Real Time in a Coffee Machine. **Journal of Chemistry and Chemical Engineering**, v. 8, p. 1142-1149, 2014.

DURÁN, C. A. A., TSUKUI, A., SANTOS, F. K. F., MARTINEZ, S. T., BIZZO, H. R., REZENDE, C. M. Café: aspetos gerais e seu aproveitamento para além da bebida. **Revista Virtual de Química**, Rio de Janeiro, v. 9, n.1, p. 107-134, 2017.

EDENHOFER O., PICHS MADRUGA, R., SOKONA, Y., SEYBOTH, K., MATSCHOSS, P., KADNER, S., ZWICKEL, T., EICKEMEIER, P., HANSEN, G., SCHLOMER, S., (eds). Summary for policymakers. In: **IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**. Cambridge, UK/New York, USA: Cambridge Univ. Press. 2011.

Energy Information Administration U.S. (EIA, 2020). **Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2020**. Disponível em: <[https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/electricity\\_generation.pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/electricity_generation.pdf)>.

EMATER - Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais. Portal do café de Minas Gerais. Perfil Produtivo Municipal de Santa Rosa da Serra. Disponível em: <<http://portaldocafedeminas.emater.mg.gov.br/Perfil/Municipio/418>>. Acesso: Outubro de 2019.

EPE Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2021**. Ano base 2020. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Acesso em: Junho de 2021.

ESTEVES, B. N. **Influência do processo de secagem por pulverização mecânica (spray dryer) no tamanho de partícula e densidade aparente do café solúvel**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FARZAD, S., MANDEGARI, M. A., GÖRGENS, J. F. A critical review on biomass gasification, co-gasification, and their environmental assessments. **Biofuel, Research and Journal**, v. 12, p. 483-495, 2016.

FAZENDA MAN. Comunicação Pessoal. Fazenda de cultivo manual. Santa Rosa da Serra, junho de 2019.

FAZENDA MEC. Comunicação Pessoal. Fazenda de cultivo mecanizado. Santa Rosa da Serra, junho de 2019.

FAZUOLI, L. C., MEDINA, FILHO, H. P., GUERREIRO FILHO, O., GONÇALVES, W., SILVAROLLA, M. B., LIMA, M. M. A. Coffee cultivars in Brazil. In: ÉME COLLOQUE HELSINKI, 18., Hensinki. Proceedings. Finlândia: Association Scientifique International du Café, 1999.

FRANCA, A. S., OLIVEIRA, L. S. Coffee processing wastes: current uses and future perspectives. In: Columbus F. (Ed). **Agricultural Wastes**. New York: Nova Science Publishers, Inc, 2009.

FURTADO, J. M. S. **Comparação de Métodos e Ferramentas de Análise de Impacto de Ciclo de Vida, aplicados a processos químicos alternativos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial), - Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2014.

FURTINI NETO, A. E., VALE, F. R., RESENDE, A. V., GUILHERME, L. R. G., GUEDES, G. A. A. **Fertilidade do solo e Nutrição de Plantas no Agronegócio**. Curso de Pós-Graduação “Lato Sensu” (Especialização) a distância, UFLA/FAEPE, Lavras, 2001.

GARCÍA, R., PIZARRO, C., LAVÍN, A. G., BUENO, J. L. Biomass sources for thermal conversion. Techno-economical overview. **Fuel**, v. 195, p. 182-189, 2017.

GEORGE, J., ARUN, P., MURALEEDHARAN, C. Experimental investigation on co-gasification of coffee husk and sawdust in a bubbling fluidised bed gasifier. **Journal of the Energy Institute**, v.92, n. 6, 1977-1986, 2019.

GHG PROTOCOL DA AGRICULTURA. Metodologia GHG protocol para agricultura. São Paulo: Unicamp; WRI Brasil, 2014. Disponível em: <<http://www.ghgprotocol.org/Agriculture-Guidance/Visão-Geral%3A-Projeto-Brasil-Agropecuária>>. Acesso em: Outubro de 2019.

GHG PROTOCOL. Centro de Estudos em Sustentabilidade da EAESP/FGV. **Ferramenta de cálculo 2012**. Disponível em: <<http://www.ghgprotocolbrasil.com.br/ferramenta-de-calculo>>. Acesso em: Outubro de 2019.

GÓMEZ, E. O. **Projeto, Construção e Avaliação Preliminar de um Reator de Leito Fluidizado para Gaseificação de Bagaço de Cana-de-Açúcar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 1996.

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

HASLER, P., NUSSBAUMER, TH. Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification. **Biomass and Bioenergy**, v. 16, p. 385-395, 1999.

HENAO, N. C., LORA, E. E. S., MAYA, D. M. Y., VENTURINI, O. J., FRANCO, E. H. M. Technical feasibility study of 200 kW gas microturbine coupled to a dual fluidized bed gasifier. **Biomass and Bioenergy**, v. 130, p. 105369, 2019.

HICKS, A. L. Environmental Implications of Consumer Convenience, Coffee as a Case Study. **Journal of Industrial Ecology**, v. 22, n. 1, p. 79-91, 2017.

HUANG, C., HAN, L., YANG, Z., LIU, X. Ultimate analyses and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, v. 29, n.6, p. 1793-1797, 2009.

HUMBERT, S., LOERINCIK, Y., ROSSI, V., MARGNI, M., JOLLIET, O. Life cycle assessment of spray dried soluble coffee and comparison with alternatives (drip filter and capsule espresso). **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 15, p.1351-1358, 2009.

HUSKEE. Good Design Award. Waste Made Beautiful, HuskeeCup - A Revolution in Coffee Husk Recycling. Disponível em: <https://huskee.co/>. Acesso em: Janeiro de 2020.

ICO International Coffee Organizational. Statistics of the International Coffee. Disponível em: <[http://www.ico.org/trade\\_statistics.asp](http://www.ico.org/trade_statistics.asp)>. Acesso em: Março de 2019 e junho de 2021.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Estatísticas, Pib municípios, 2017**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/downloads-estatisticas.html>>. Acesso em: Outubro de 2019.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). DE KLEIN, C.; NOVOA, R. S. A.; OGLE, S.; SMITH, K. A.; ROCHETTE, P.; WIRTH, T. C.; MCCONKEY, B. G.; MOSIER, A.; RYPDAL, K.; WALSH, M.; WILLIAMS, S.A.; 2006. Chapter 11: N<sub>2</sub>O Emissions from Managed Soils, and CO<sub>2</sub> Emissions from Lime and Urea Application, in: Gytarsky, M.; Hiraiishi, T.;Irving, W.;Krug, T.;Penman, J.; (Eds), IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC International Panel on Climate Change, Geneva, pp. 4:11.1 - 11.54, 2006

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Global warming of 1.5°C. Switzerland, 2018. ISBN 978-92-9169-151-7

International Energy Agency (IEA, 2017). **Renewables information: Overview**. Disponível em: <<https://www.iea.org/>>. Acesso em: maio de 2018.

International Energy Agency (IEA, 2017a). **Energy Access Outlook 2017**. Disponível em: <<https://www.iea.org/>>. Acesso em: março de 2019.

International Energy Agency (IEA, 2017b). **Key world energy statistics**. 2017. Disponível em: <<https://www.iea.org/>>. Acesso em: maio de 2018.

International Energy Agency (IEA, 2018). **Renewables 2018. Analysis and forecasts to 2023**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/renewables-2018>>. Acesso em: maio de 2018.

International Energy Agency (IEA, 2018a). **World Energy Outlook 2018**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>>. Acesso em: maio de 2020.

International Energy Agency (IEA, 2020). **SDG7: Data and Projections. Access to electricity**. November 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections/access-to-electricity>>. Acesso em: março de 2020.

Instituto de Planejamento Econômico e social (IPEA). Tecnologia, Custos, Capacidade de Carga e Consumo Energético de Veículos no Transporte Rodoviário de Bens. Instituto de pesquisas do IPEA. Junho de 1985.

ISMAL, T. M., EL-SALAM, M. A., MONTEIRO, E., ROUBOA, A. Eulerian – Eulerian CFD model on fluidized bed gasifier using coffee husks as fuel. **Applied Thermal Engineering**, v. 106, p. 1391-1402, 2016.

JANUÁRIO DOS REIS, R., SATHLER DOS REIS, L. **Atlas de Biomassa de Minas Gerais**. Belo Horizonte, Editora Rona Gráfica e Editora, 2017. ISBN 978-85-8239-052-8

JOHN, V. M., PACCA, S. A., ANGULO, S. C. Avaliação do ciclo de vida modular para construção sustentável. São Paulo: Associação Brasileira do Cimento Portland. (Documento para discussão). 2014.

KOIDO, K. e IWASAKI, T. Biomass Gasification: A review of its technology, gás cleaning applications, and total system life cycle analysis. Lignin - Trends and Applications (Chapter 7). **Intech** open science/open minds, 2018.

KONGSHAUG, G. IFA Technical Conference. In Energy Consumption and greenhouse gas emissions in fertilizer production. 1998. Extraído SimaPro.

KORE, S., ASSEFA, A. MATTHIAS, M., SPLIETHOFF, H. Steam Gasification of Coffee Husk in Bubbling Fluidized Bed Gasifier. **Bionature: The Fourth International Conference on Bioenvironment, Biodiversity and Renewable Energies**, 2013.

KUMAR, U., PAUL, M. C. CFD modelling of biomass gasification with a volatile break-up approach. **Chemical Engineering Science**, v. 195, p. 413-422, 2019.

LLOYD, A. C., CACKETTE, T. A. (2001). Diesel Engines: Environmental Impact and Control. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 51, p. 809-847, 2001.

LÓPEZ GONZÁLEZ, D., FERNANDEZ LOPEZ, M., VALVERDE, J. L. SANCHEZ SILVA, L. Gasification of lignocellulosic biomass char obtained from pyrolysis: Kinetic and evolved gas analyses. **Energy**, v. 71, n. 0, p. 456-467, 2014.

LORA, E. E. S., ANDRADE, R. V. Biomass as energy source in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 777-788, 2009.

LORA, E. E. S., ANDRADE, R. V., ÁNGEL, J. D. M., LEITE, M. A. H., ROCHA, M. H., SALES, C. A. V. B., MENDOZA, M. A. G., CORAL, D. S. O. Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis. In: LORA, E. E. S. e VENTURINI, O. J. (Org). **Biocombustíveis**. Rio de Janeiro, Editora Interciência, 2012, cap 6. ISBN 978-85-7193-228-9

LORA, E. E. S., ANDRADE, R. V., SANCHEZ, C. G., GÓMEZ, E. O., SALES, C. A. V. B. Gaseificação. In: CORTEZ, L. A. B., LORA, E. E. S., GÓMEZ, E.O (Org). **Biomassa para energia**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas: Editora Unicamp, 2008, cap. 9, p. 241-332. ISBN 978-85-268-0783-9

LORA, E. E. S., PÉREZ-GARCÍA, M., JAÉN, R. L. Processos Termoquímicos. In: MARTÍNEZ, J. M. R., LORA, E. E. S. (Org). **Bioenergía: Fuentes, conversion y sustentabilidad**. Bogotá: Charlie´s Impresores Ltda, 2014, cap 5, p. 165-216. ISBN 978-958-58880-0-5

LORA, E. E. S., ROCHA, M. H., VENTURINI, O. J., COBAS, V. R. M., SOTOMONTE, C. R. Biomassa in natura: Combustão e acionadores primários. In: LORA, E. E. S. e VENTURINI, O. J. (Org). **Biocombustíveis**. Rio de Janeiro, Editora Interciência, (2012a), cap 2. ISBN 978-85-7193-228-9

LUÍS, S. C. L. **Comparação de métodos de agregação de indicadores de poluição para ACV**. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente), - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2017.

LUZ, F. C. Avaliação técnico-econômica de plantas de gaseificação do lixo urbano para geração distribuída de eletricidade. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, 2013.

MACEDO, I. C., SEABRA, J. E. A., SILVA, J. E. A. R. Green House Gases Emissions in the Production and use of Ethanol from Sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, p. 582-595, 2008.

MAGALHÃES, E. A., SILVA, J. S., SILVA FILHO, J. N., OLIVEIRA FILHO, D. Donzeles SML. Casca de café associada à lenha como combustível para aquecimento indireto de ar de secagem. **Revista Brasileira de armazenamento** – Especial Café, v. 10, p. 66-72, 2008.

MALTA, M. R., ALVARENGA PEREIRA, R. G. F., CHAGAS, S. J. R., GUIMARÃES, R. J. Produtividade de lavouras cafeeiras (*coffea arabica* l.) Em conversão para o sistema orgânico de produção. **Coffee Science**, Lavras, v.2, n. 2, p. 183-191, 2007.

MARTÍNEZ, J. D., MAHKAMOV, K., ANDRADE, R. V., LORA, E. E. S. Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines. **Renewable Energy**, v.38, p. 1-9, 2012.

MARTINEZ, C. L. M., SERMYAGINA, E., CARNEIRO, A. C. O., VAKKILAINEN, E., CARDOSO, M. Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 123, p. 70-77, 2019.

MCNUTT, J., HE, Q.S. Spent coffee grounds: A review on current utilization. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 71, p. 78-88, 2019.

MENDES, N. C., BUENO, C., OMETTO, A. R. Avaliação de impacto do ciclo de vida: revisão dos principais métodos. *Production*, v. 26, n. 1, p. 160-175, 2016.

MENDOZA, M. A. M. **Projeto e avaliação computacional do desempenho de um gaseificador de leito fluidizado circulante para obtenção de gás de síntese a partir de bagaço de cana de açúcar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 2009.

MESQUITA, C. M., REZENDE, J. E., CARVALHO, J. S., FABRI JUNIOR, M. A., MORAES, N. C., DIAS, P. T., CARVALHO, R. M., ARAÚJO, W. G. **Manual do café - Colheita e Preparo (Coffea arábica L.)**. Belo Horizonte, EMATER-MG, 2016.

MF RURAL. O agronegócio passa por aqui. Mudanças de café. Disponível em: <<https://www.mfrural.com.br/detalhe/198368/mudas-de-cafe>>. Acesso em: novembro de 2019.

MIITO, G. J., BANADDA, N. A short review on the potential of coffee husk gasification for sustainable energy in Uganda [version 1; referees: 2 approved]. **F1000Research**, v. 6, 2017.

NÁSNER, A. M. L. **Modelagem de uma planta piloto de gaseificação de combustível derivado de resíduos (CDR), integrada a motor de combustão interna ciclo Otto, utilizando o software Aspen Plus™**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, 2015.

NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

NBR ISO 14044: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro, 2009.

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration. Global Greenhouse Gas. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/>>. Acesso em: Fevereiro de 2019.

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration. Assessing the Global Climate in 2019. Disponível em: <<https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-2019>>. Acesso em: Fevereiro de 2020.

NOGUEIRA, L. A. H, LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003. ISBN 85-7193-077-5

NOPONEN, M. R. A., EDWARDS-JONES, G., HAGGAR, J. P., SOTO, G., ATTARZADEH, N., HEALEY, J. R. Greenhouse gas emissions in coffee grown with differing input levels under conventional and organic management. **Agriculture Ecosystems & Environment**, 2012.

OLIVEIRA, J. L., SILVA, J. N., MARTINS, M. A., PEREIRA, E. G., OLIVEIRA, M. C. T. B. Gasification of waste from coffee and eucalyptus production as an alternative source of bioenergy in Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 27, p. 159-166, 2018.

OLIVEIRA, J. L., SILVA, J. N., PEREIRA, E. G. OLIVEIRA FILHO, D., CARVALHO, D. R. Characterization and mapping of waste from coffee and eucalyptus production in Brazil for thermochemical conversion of energy via gasification. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 52-58, 2013.

OLIVEIRA JÚNIOR, G. G., SILVA, A. B., MANTOVANI, J. R., MIRANDA, J. M., FLORENTINO, L. A. Levantamento de emissão de gases de efeito estufa pela metodologia do carbono equivalente na cultura do cafeeiro. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 4, p. 412-419, 2015.

OLOFSSON, I., NORDIN, A., SÖDERLINDU, U. Initial Review and Evaluation of Process Technologies and Systems Suitable for Cost-Efficient Medium-Scale Gasification for Biomass to Liquid Fuels. Report 05-02. Umeå University and Mid Swedish University, 2005.

ORMAZABAL, M., RICH, E., SARRIEGI, J. M., VILES, E. Environmental Management Evolution Framework: Maturity Stages and Causal Loops. **Organization & Environment**, v. 30, n. 1, p. 27-50, 2017.

ORSINI, R. D. R. **Estudo do aproveitamento do resíduo da lavoura cafeeira como fonte de biomassa na produção de hidrogênio**. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia nuclear), - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2012.

OUR WORLD IN DATA. **Global Extreme Poverty** by Max Roser and Esteban Ortiz-Ospina. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/extreme-poverty>>. Acesso em: Julho de 2020.

OZTURK, M., SABA, N., ALTAY, V., IQBAL, R., HAKEEM, K. R., JAWAID, M., IBRAHIM, F. H. Biomass and bioenergy: An overview of the development potential in Turkey and Malaysia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 1285-1302, 2017.

PALACIO, J. C. E., SANTOS, J. J. C. S., RENÓ, M. L. G., CARVALHO, J. C. F. J., CARVALHO, M., REYES, A. M. M., OROZCO, D. J. R. Municipal Solid Waste Management and Energy Recovery. **Energy Conversion - Current Technologies and Future Trends**, IntechOpen, p. 1-20, 2018.

PANDEY, A., SOCCOL, C. R., NIGAM, P., BRAND, D., MOHAN, R. ROUSSOS, S. Biotechnological potential of coffee pulp and coffee husk for bioprocesses. **Biochemical Engineering Journal**, v. 6, p. 153-162, 2000.

- PASSUELO, A. C. B. Aplicação da Avaliação do ciclo de vida em embalagens descartáveis para frutas: estudo de caso. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2007.
- PEREIRA, S. P., BARTHOLO, G. F., BALIZA, D. P., SOBREIRA, F. M., GUIMARÃES, R. J. Crescimento, produtividade e bionalidade do cafeeiro em função do espaçamento de cultivo. **Pesq. agropec. bras.**, v. 46, n.2, p.152-160, 2011.
- PHROMMARAT, B. Life Cycle Assessment of Ground Coffee and Comparison of Different Brewing Methods: A Case Study of Organic Arabica Coffee in Northern Thailand. **Environment and Natural Resources Journal**, v. 17, n. 2, p. 96-108, 2019.
- PORCU, A., SOLLAI, S., MAROTTO, D., MUREDDU, M., FERRARA, F., PETTINAU, A. Techno-Economic Analysis of a Small-Scale Biomass-to-Energy BFB Gasification-Based System. **Energies**, v.12, n. 494, p. 1-17, 2019.
- PORTUGAL PEREIRA, J., SORIA, R., RATHMANN, R., SCHAEFFER, R., SZKLO, A. Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Technoeconomic and environmental assessment in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 81, p. 521-533, 2015.
- PRÉ - SimaPro. **SimaPro Database Manual - Methods Library**. 2019.
- PROTÁSIO, T. P., COUTO, A. M., REIS, A. A., TRUGILHO, P. F. Seleção de clones de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 42, n. 97, p.15-28, 2013.
- QUACK, D., EBERLE, U., LIU, R., STRATMANN, B. Case study ‘Tchibo Privat Kaffee Rarity Machare’. Documentation. Case study within the PCF Pilotproject. Freiburg, 2009.
- QUIRINO, W. F. Utilização energética de resíduos vegetais. Laboratório de Produtos Florestais. **LPF/IBAMA**. Brasília. 2003.
- RAFASCHIERE, A., RAPACCINI, M., MANFRIDA, G. Life Cycle Assesment of electricity production from poplar energy crops compared with conventional fossil fuels. **Energy Conversion & Management**, v. 40, n. 14, p. 1477-1493, 1999.
- RANGEL, M. S. **Estudo da Viabilidade Econômica de Geração de Eletricidade por Fontes Renováveis no Brasil**. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. Minas Gerais. 2016.
- REGA, V. F., FERRANTI, P. Life cycle assessment of coffee production in time of global change. **Encyclopedia of Food Security and Sustainability**, Portici (Italy), v. 3, p. 497-502, 2019.
- REN, J., LIU, Y-L., ZHAO, X-Y., CAO, J-P. Biomass thermochemical conversion: A review on tar elimination from biomass catalytic gasification. **Journal of the Energy Institute**, 2019. (article in press).
- RENÓ, M. L. G. **Avaliação do Balanço Energético e dos Impactos Ambientais do Processo de Produção de Metanol a partir do Bagaço de Cana-de-açúcar, utilizando a ACV**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 2011.

RIBEIRO, P.H. **Contribuição ao Banco de Dados Brasileiro Para Apoio à Avaliação do Ciclo de Vida: Fertilizantes Nitrogenados**. Tese (Doutorado em Engenharia Química), - Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2009.

RGS Máquinas Agrícolas. Colhedora de Café Coffee express 100 e 200. Disponível em: <<http://rgsagricola.com.br/shop/colhedora-de-cafe-coffee-express-100-e-200/>>. Acesso em: novembro de 2019.

RODRIGUEZ, C., GORDILLO, G. Adiabatic Gasification and Pyrolysis of Coffee Husk Using Air-Steam for Partial Oxidation, **Journal of Combustion**, v. 2011, p. 1-9, 2011.

SAENGER, M., HARTGE, U. E., WERTHER, J., OGADA, T., SIAGI, Z. Combustion of Coffee Husks. **Renewable Energy**, v. 23, n.1, p. 103-121, 2001.

SAITER, O. **Utilização de resíduos agrícolas e florestais como fonte de energia para a secagem de grãos de coffeacaneophora var, Conilon**. Seropédica – RJ, 2008.

SALES, C. A. V. B. **Avaliação técnico econômica da conversão da biomassa em eletricidade utilizando tecnologias de gaseificação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia), - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, 2007.

SALINAS, B. Life cycle assessment of coffee production. 2008.

SALOMONE, R. Life cycle assessment applied to coffee production: investigating environmental impacts to aid decision making for improvements at company level. **Food, Agriculture & Environment**, v. 1, n. 2, p. 295-300, 2003.

SÁNCHEZ, C. G. **Tecnologia da Gaseificação de biomassa**. Campinas, SP: Editora Átomo, 2010. ISBN 978-85-7670-126-2

SANSANIWAL, S. K., PAL, K., ROSEN, M. A., TYAGI, S. K. Recent advances in the development of biomass gasification technology: a comprehensive review. **Renew Sustain Energy**, v. 72, p. 363–384, 2017.

SANTOS, I. F. S., BARROS, R. M., TIAGO FILHO, G. L. Economic study on LFG energy projects in function of the number of generators. **Sustainable Cities and Society**, v. 41, p. 587-600, 2018.

SANTOS, I. F. S. **Análise técnica e econômica de parques hidrocinéticos com base em previsões numéricas (CFD) e dados experimentais**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, 2019.

SCHUSTER, G., LÖFFLER, G., WEIGL, K., HOFBAUER, H. Biomass steam gasification – an extensive parametric modeling study. **Bioresource Technology**, v. 77, n. 1, p. 71-79, 2001.

SEAPAMG, Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais. **Café. Junho/2021**. Disponível em: <<http://www.agricultura.mg.gov.br/>>. Acesso em: Junho de 2021.

SEEG. Emissões de GEE do Brasil. Documento de Análise. Período 1970-2016. **Observatório do Clima**. 2018.

SHEN, D. K., GU, S., LUO, K. H., BRIDGWATER, A. V., FANG, M. X. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment. **Fuel**, v. 88, p. 1024-1030, 2009.

SHEN, J., ZHAO, C., LIU, Y., ZHANG, R., LIU, G., CHEN, C. Biogas production from anaerobic co-digestion of durian shell with chicken, dairy, and pig manures. **Energy Conversion and Management**, v. 198, p. 110535, 2019.

SILVA, J. P. **Caracterização da casca de café (coffea arábica, L) in natura, e de seus produtos obtidos pelo processo de pirólise em reator mecanicamente agitado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2012.

SINGH, R. I., BRINK, A., HUPA, M. CFD modeling to study fluidized bed combustion and gasification. **Applied Thermal Engineering**, v. 52, p. 585-614, 2013.

SOMMERFELDT, N., MADANI, H. Revisiting the techno-economic analysis process for building-mounted, grid-connected solar photovoltaic systems: Part one - Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 1379-1393, 2017.

SONG, J., YANG, W., LI, Z., HIGANO, Y., WANG, X. Discovering the energy, economic and environmental potentials of urban wastes: an input-output model for a metropolis case. **Energy Conversion and Management**, v. 114, p. 168-79, 2016.

SOUSA E SILVA, J., SAMPAIO, C. P., MACHADO, M. C., LO MONACO, P. A. Preparo, Secagem e Armazenagem. In: Juarez de Souza e Silva e outros. **Secagem e Armazenagem de Café - tecnologias e Custos**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa: Jard Editora Ltda, 2001, cap. 1, p. 1-60.

SOUZA, S. P. **Produção Integrada de Biocombustíveis: Uma proposta para reduzir o uso de combustível fóssil no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado - Ciências da Engenharia Ambiental), - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

SREEJITH, C. C., MURALEEDHARAN, C., ARUN, P. Performance prediction of steam gasification of wood using an ASPEN PLUS thermodynamic equilibrium model. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 33, n. 2, p. 416-434, 2014.

STRATMANN, B., GRIEBHAMMER, R., BUSH, E. PROSA highpressure coffee and espresso machines – developing the award criteria for a climate label. Freiburg, 2009.

SUN, Y., CHEN, J., ZHANG, Z. Biomass gasification using the waste heat from high temperature slags in a mixture of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O. **Energy**, v. 167, p. 688-697, 2019.

SUSASTRIAWAN, A. A. P., SAPTOADI, H., PURNOMO. Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 989-1003, 2017.

TABA, L. E., IRFAN, M. F., DAUD, W. A. M. W., CHAKRABARTI, M. H. The effect of temperature on various parameters in coal, biomass and co-gasification: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 5584-5596, 2012.

THOMASSEN, M. A., DALGAARD, R., HEIJUNGS, R., de BOER, I. Attributional and consequential LCA of milk production. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, p. 339-349, 2008.

TOSTI, L., ZOMEREN, A. V., PELS, J. R., DIJKSTRA, J. J. Assessment of biomass ash applications in soil and cement mortars. **Chemosphere**, v. 223, p. 425-437, 2019.

TOCO, P. Trucão com pé na estrada. Três vilões do consumo de combustível no caminhão. 2015. Disponível em: <<https://trucao.com.br/3-viloes-do-consumo-de-combustivel-no-caminhao/>>. Acesso em: Abril de 2020.

UNEP - United Nations Environment Programme. **Guidance on Organizational Life Cycle Assessment**. Copyright, 2015. ISBN: 978-92-807-3453-9.

UNEP - United Nations Environment Programme. Opportunities for National Life Cycle Network Creation and Expansion Around the World. Copyright, 2016.

UNICA - União da Indústria da Cana de Açúcar. A bioeletricidade em números. In: **Boletim/Unica**. Julho de 2019. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/>>. Acesso em: Fevereiro de 2020.

VALE, A. T., GENTIL, L. V., GONÇALEZ, J. C., COSTA, A. F. Caracterização energética e rendimento de carbonização e resíduos de grãos de café (cofeea arábica,L) e de madeira (Cedrelinga catenaeformis), DUKE. **Revista Cerne**, v. 13, n. 4, p. 416-420, 2007.

VASSILEV, S. V., BAXTER, D., ANDERSEN, L. K., VASSILEVA, C. G. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v. 89, p. 913-933, 2010.

VAZ, S. An analytical chemist's view of lignocellulosic biomass. **Bioresources**, v. 10, n. 3, p. 3815-3817, 2015.

VIANA, M.M. **Inventário do Ciclo de Vida do Biodiesel Etílico do Óleo de Girassol**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), - Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2008.

WANG, M., SARICKS, C., LEE, H. Fuel-cycle Energy and Emission Impacts of Ethanol-Diesel Blends in Urban Buses and Farming Tractors. Prepared for **Illinois Department of Commerce and Economic Opportunity Project Manager**: David Loos, USA, 2003.

WILSON, L., JOHN, G. R., MHILU, C. F., YANG, W., BLASIAK, W. Coffee husks gasification using high temperature air/steam agent. **Fuel Processing Technology**, v. 91, p. 1330-1337, 2010.

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

WORLD ENERGY COUNCIL (WEC). **World Energy Trilemma Report 2018**. In Partnership with Oliver Wyman. United Kingdom. N. 4184478. 2018.

WORLEY, M., YALE, J. Biomass gasification technology assessment. **National Renewable Energy Laboratory (NREL)**, Golden-Colorado, 2012.

WU, K. T., TSAI, C-J., CHEN, C-S., CHEN, H-W. The characteristics of torrefied microalgae. **Applied Energy**, v. 100, p. 52-57, 2012.

ZHEN, G., LU, X., KUMAR, G., BAKONYI, P., XU, K., ZHAO, Y. Microbial electrolysis cell platform for simultaneous waste biorefinery and clean electrofuels generation: Current situation, challenges and future perspectives. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 63, p. 119-145, 2017.

ZHOU, Z. B., BENBOUZID, M., CHARPENTIER, J. F., SCUILLER, F., TANG, T. H. A review of energy storage technologies for marine current systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 18, p. 390-400, 2013.

## 8. APÊNDICE 1

Tabela 8.1 Potencial de Alterações do clima conforme etapas para cada estudo de caso

Alterações climáticas								
	Cultivo	Processamento I	Transporte 1	Processamento II	Transporte 2	Inorgânicos Evitados	Gaseificação	Geração de Eletricidade
EC1 - MAN	2,667361472	269,2612637	7,176644625	2,252521139	31,27159463			
EC1- MEC	2,34043551	269,2612637	13,16999463	2,252521137	31,27159463			
EC2- MAN	2,667361472	269,2612637	7,176644629	2,252521137	31,27159463	-10452,81741		
EC2- MEC	2,34043551	269,2612637	13,16999463	2,252521137	31,27159463	-9043,448765		
EC3 - MAN	2,667361472	269,2612637	7,176644629	2,25252114	31,27159463		30,03056681	-49,76079185
EC3- MEC	2,340435509	269,2612637	13,16999463	2,252521136	31,27159463		26,85323307	-49,76079185

Tabela 8.2 Potencial de Depleção da camada de ozônio conforme etapas para cada estudo de caso

Depleção da camada de ozônio								
	Cultivo	Processamento I	Transporte 1	Processamento II	Transporte 2	Inorgânicos Evitados	Gaseificação	Geração de Eletricidade
EC1 - MAN	2,3E-07	0,00000000166	0,00000000013	0,00000003512	0,00000000013			
EC1- MEC	4,1E-07	0,00000000166	0,00000000013	0,00000003512	0,00000000013			
EC2- MAN	0,00000023239	0,00000000166	0,00000000013	0,00000003512	0,00000000013	-7,89E-05		
EC2- MEC	0,00000041278	0,00000000166	0,00000000013	0,00000003512	0,00000000013	-6,83E-05		
EC3 - MAN	0,00000023239	0,00000000166	0,00000000013	0,00000003512	0,00000000013		5,9E-07	-1,3E-06
EC3- MEC	0,00000041278	0,00000000166	0,00000000013	0,00000003512	0,00000000013		5,3E-07	-1,3E-06

Tabela 8.3 Potencial de acidificação terrestre conforme etapas para cada estudo de caso

Acidificação Terrestre								
	Cultivo	Processamento I	Transporte 1	Processamento II	Transporte 2	Inorgânicos Evitados	Gaseificação	Geração de Eletricidade
<b>EC1 - MAN</b>	0,014069684	0,000255398	0,031760363	0,00280176	0,128930967			
<b>EC1- MEC</b>	0,013597632	0,000255398	0,055930467	0,00280176	0,128930967			
<b>EC2- MAN</b>	0,014069684	0,000255398	0,031760363	0,00280176	0,128930967	-34,6679794		
<b>EC2- MEC</b>	0,013597632	0,000255398	0,055930467	0,00280176	0,128930967	-29,9936451		
<b>EC3 - MAN</b>	0,014069684	0,000255398	0,031760363	0,00280176	0,128930967		0,091330077	-0,200064318
<b>EC3- MEC</b>	0,013597632	0,000255398	0,055930467	0,00280176	0,128930967		0,081626256	-0,200064318

Tabela 8.4 Potencial de eutrofização de água doce conforme etapas para cada estudo de caso

Eutrofização de água doce								
	Cultivo	Processamento I	Transporte 1	Processamento II	Adubo orgânico	Inorgânicos Evitados	Gaseificação	Geração de Eletricidade
<b>EC1 - MAN</b>	0,000124	0,000003		0,000030				
<b>EC1- MEC</b>	0,000089	0,000003		0,000030				
<b>EC2- MAN</b>	0,000124	0,000003		0,000030	0,255456258	-0,262857967		
<b>EC2- MEC</b>	0,000089	0,000003		0,000030	0,255455029	-0,227416443		
<b>EC3 - MAN</b>	0,000124	0,000003		0,000030			0,001040035	-0,002278264
<b>EC3- MEC</b>	0,000089	0,000003		0,000030			0,000929532	-0,002278264

Tabela 8.5 Potencial de toxicidade humana conforme etapas para cada estudo de caso

Toxicidade Humana								
	Cultivo	Processamento I	Transporte 1	Processamento II	Transporte 2	Inorgânicos Evitados	Gaseificação	Geração de Eletricidade
<b>EC1 - MAN</b>	0,015552095	0,001571443	0,132125036	0,016308869	91260,23433			
<b>EC1- MEC</b>	0,011745485	0,001571443	0,149981489	0,016308869	91260,23433			
<b>EC2- MAN</b>	0,015552095	0,001571443	0,132125036	0,016308869	91260,23433	-32,3342279		
<b>EC2- MEC</b>	0,011745485	0,001571443	0,149981489	0,016308869	91260,23433	-27,9745567		
<b>EC3 - MAN</b>	0,015552095	0,001571443	0,132125036	0,016308869	91260,23433		0,561945496	-1,230977199
<b>EC3- MEC</b>	0,011745485	0,001571443	0,149981489	0,016308869	91260,23433		0,502238789	-1,230977203

Tabela 8.6 Potencial de oxidantes fotoquímicos conforme etapas para cada estudo de caso

Formação de Oxidantes Fotoquímicos								
	Cultivo	Processamento I	Transporte 1	Processamento II	Transporte 2	Inorgânicos Evitados	Gaseificação	Geração de Eletricidade
<b>EC1 - MAN</b>	0,002377793	0,035920518	0,060579238	0,002905344	2853,626726			
<b>EC1- MEC</b>	0,005012752	0,035920518	0,110944884	0,002905344	2853,626726			
<b>EC2- MAN</b>	0,002377793	0,035920518	0,060579238	0,002905344	2853,626726	-13,96355873		
<b>EC2- MEC</b>	0,005012752	0,035920518	0,110944884	0,002905344	2853,626726	-12,08083173		
<b>EC3 - MAN</b>	0,002377793	0,035920518	0,060579238	0,002905344	2853,626726		0,800722325	-0,190016244
<b>EC3- MEC</b>	0,005012752	0,035920518	0,110944884	0,002905344	2853,626726		0,716200675	-0,190016244

Tabela 8.7 Potencial de material particulado conforme etapas para cada estudo de caso

Formação de material Particulado								
	Cultivo	Processamento I	Transporte 1	Processamento II	Transporte 2	Inorgânicos Evitados	Gaseificação	Geração de Eletricidade
<b>EC1 - MAN</b>	0,002677123	0,000075	0,013302973	0,000819957	0,056911379			
<b>EC1- MEC</b>	0,003349579	0,000075	0,024150077	0,000819957	0,056911379			
<b>EC2- MAN</b>	0,002677123	0,000075	0,013302973	0,000819957	0,056911379	-7,914431024		
<b>EC2- MEC</b>	0,003349579	0,000075	0,024150077	0,000819957	0,056911379	-6,847316732		
<b>EC3 - MAN</b>	0,002677123	0,000075	0,013302973	0,000819957	0,056911379		0,026670032	-0,058422394
<b>EC3- MEC</b>	0,003349579	0,000075	0,024150077	0,000819957	0,056911379		0,023836341	-0,058422394

Tabela 8.8 Potencial de ecotoxicidade terrestre conforme etapas para cada estudo de caso

Ecotoxicidade Terrestre								
	Cultivo	Processamento I	Transporte 1	Processamento II	Transporte 2	Inorgânicos Evitados	Gaseificação	Geração de Eletricidade
<b>EC1 - MAN</b>	0,0001580	0,000373166	0,0000148	0,00368512	50,51235316			
<b>EC1- MEC</b>	0,0000766	0,000373166	0,0000247	0,00368512	50,51235316			
<b>EC2- MAN</b>	0,0001580	0,000373166	0,0000148	0,00368512	50,51235316	-34,77446747		
<b>EC2- MEC</b>	0,0000766	0,000373166	0,0000247	0,00368512	50,51235316	-30,08577522		
<b>EC3 - MAN</b>	0,0001580	0,000373166	0,0000148	0,00368512	50,51235316		0,133443623	-0,292316708
<b>EC3- MEC</b>	0,0000766	0,000373166	0,0000247	0,00368512	50,51235316		0,119265238	-0,292316708

Tabela 8.9 Potencial de ecotoxicidade de água doce conforme etapas para cada estudo de caso

Ecotoxicidade de água doce								
	Cultivo	Processamento I	Transporte 1	Processamento II	Transporte 2	Inorgânicos Evitados	Gaseificação	Geração de Eletricidade
<b>EC1 - MAN</b>	0,004814858	0,0000896	0,014463603	0,000949038	14,03420089			
<b>EC1- MEC</b>	0,000972163	0,0000896	0,014466346	0,000949038	14,03420089			
<b>EC2- MAN</b>	0,004814858	0,0000896	0,014463603	0,000949038	14,03420089	-10,16938998		
<b>EC2- MEC</b>	0,000972163	0,0000896	0,014466346	0,000949038	14,03420089	-8,798236257		
<b>EC3 - MAN</b>	0,004814858	0,0000896	0,014463603	0,000949038	14,03420089		0,032035292	-0,070175335
<b>EC3- MEC</b>	0,000972163	0,0000896	0,014466346	0,000949038	14,03420089		0,028631542	-0,070175336

Tabela 8.10 Potencial de ocupação agrícola do solo conforme etapas para cada estudo de caso

Ocupação agrícola do solo								
	Cultivo	Processamento I	Transporte 1	Processamento II	Transporte 2	Inorgânicos Evitados	Gaseificação	Geração de Eletricidade
<b>EC1 - MAN</b>	0,000629315	0,010635867		0,105042334				
<b>EC1- MEC</b>	0,001473221	0,010635867		0,105042334				
<b>EC2- MAN</b>	0,000837526	0,010635867		0,105042333		-1712,470098		
<b>EC2- MEC</b>	0,001473221	0,010635867		0,105042333		-1481,575252		
<b>EC3 - MAN</b>	0,000629315	0,010635867		0,105042334			3,803368872	-8,331520394
<b>EC3- MEC</b>	0,001473221	0,010635867		0,105042335			3,399260931	-8,331520398

Tabela 8.11 Potencial transformação natural do solo conforme etapas para cada estudo de caso

Transformação Natural do solo								
	Cultivo	Processamento I	Transporte 1	Processamento II	Transporte 2	Inorgânicos Evitados	Gaseificação	Geração de Eletricidade
<b>EC1 - MAN</b>	0,000002	0,000029		0,000286469				
<b>EC1- MEC</b>	0,000006	0,000029		0,000286469				
<b>EC2- MAN</b>	0,000002	0,000029		0,000286469		-0,015751722		
<b>EC2- MEC</b>	0,000006	0,000029		0,000286469		-0,013627894		
<b>EC3 - MAN</b>	0,000002	0,000029		0,000286469			0,010371853	-0,022720201
<b>EC3- MEC</b>	0,000006	0,000029		0,000286469			0,009269844	-0,022720201

Tabela 8.12 Potencial depleção da água conforme etapas para cada estudo de caso

Depleção da água								
	Cultivo	Processamento I	Transporte 1	Processamento II	Transporte 2	Inorgânicos Evitados	Gaseificação	Geração de Eletricidade
<b>EC1 - MAN</b>	2,281699159	1,024386512		11,13354523				
<b>EC1- MEC</b>	1,335610011	1,024386511		11,13354517				
<b>EC2- MAN</b>	2,281699159	1,024386505		11,13354516		-2204,428146		
<b>EC2- MEC</b>	1,335610012	1,024386504		11,13354523		-1907,201875		
<b>EC3 - MAN</b>	2,281699159	1,024386513		11,1335452			366,3189465	-802,4448525
<b>EC3- MEC</b>	1,334925922	1,024386512		11,13354523			327,3975581	-802,4448518

Tabela 8.13 Potencial depleção fóssil conforme etapas para cada estudo de caso

Depleção Fóssil								
	Cultivo	Processamento I	Transporte 1	Processamento II	Transporte 2	Inorgânicos Evitados	Gaseificação	Geração de Eletricidade
<b>EC1 - MAN</b>	0,420162505	0,009381893	1,052315209	0,186482708	1,052315209			
<b>EC1- MEC</b>	0,415518887	0,009381893	1,052315219	0,186482709	1,052315219			
<b>EC2- MAN</b>	0,420162505	0,009381893	1,052315215	0,186482709	1,052315215	-345,286348		
<b>EC2- MEC</b>	0,415518887	0,009381893	1,052315215	0,186482709	1,052315215	-298,7308874		
<b>EC3 - MAN</b>	0,420162505	0,009381893	1,052315215	0,186482708	1,052315215		3,371661313	-7,349229421
<b>EC3- MEC</b>	0,415439138	0,009381893	1,052315217	0,18648271	1,052315217		3,013404898	-7,349229439