

**Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

Quelbis Román Quintero Bertel

**Avaliação Técnico-Econômica da Conversão Termoquímica de Biomassa
Madeira e Herbácea em Energia Elétrica
“Sistemas Agroenergéticos”.**

Dezembro de 2015
Itajubá

Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Quelbis Román Quintero Bertel

Avaliação Técnico-Econômica da Conversão Termoquímica de Biomassa
Madeireira e Herbácea em Energia Elétrica
“Sistemas Agroenergéticos”.

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: **Conversão de Energia**

Orientador: **Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora**

Coorientador: **Prof. Dr. Vladimir Melian Cobas**

Dezembro de 2015
Itajubá

**Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

TESE DE DOUTORADO

**Avaliação Técnico-Econômica da Conversão Termoquímica de
Biomassa Madeireira e Herbácea em Energia Elétrica
“Sistemas Agroenergéticos”.**

Autor: Quelbis Román Quintero Bertel

Orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora.

Coorientador: Prof. Dr. Vladimir Melian Cobas

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora – IEM/ UNIFEI

Prof. Dr. Osvaldo Venturini – IEM/ UNIFEI

Prof. Dr. Arnaldo Martins Martinez Reyes - UNIFEI

Prof. Dr. Lourival Mendes Neto - UFSJ

Prof. Dr. Flavio Neves Teixeira - UFSJ

Dedicatória

Meu Deus, que me deu a vida.

Meus pais Román (Q.E.P.D) e Nilsa, que me deu a oportunidade de nascer.

Meus filhos Juliana, Gabriela e Quelbis Andrés que são a razão da minha existência.

Minha esposa Iliana quem é o impulso para continuar.

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos para Electo Eduardo Silva Lora, por aceitar em ser meu orientador desta tese. Por sua paciência e disposição.

Agradeço a Vladimir Rafael Melian Cobas, por concordar ser meu Co-Orientador

Agradeço ao pessoal no NEST por apoiar-me quando precise de sua ajuda. Em especial a Carlos Eymel, Dimas Rua, Diego Yepes, José Carlos.

Agradeço a Fernando Castanheira da SAE, pela informação enviada.

Agradeço ao CNPQ, FAPEMIG, CAPES, Instituto de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá.

Resumo

QUINTERO, B. Q. R. (2015). *Avaliação Técnico-Econômica de “Sistemas Agroenergéticos”*. 185 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

A tese tem como objetivo avaliar técnica e economicamente a conversão termoquímica por combustão e gaseificação da biomassa de cultivos energéticos madeireiros e herbáceos em energia elétrica através de diferentes tecnologias, fundamentado em seus potenciais teóricos, técnicos e econômico de maneira sincronizada numa abordagem conceitual de Sistemas Agroenergéticos. A partir das potencialidades agroambientais, aptidão dos solos e espécies vegetais existentes no Brasil, foram selecionadas 8 delas para a análise. Foi aplicada a metodologia multicritério de envolvente de dados (DEA) para a escolha da espécie com maior potencial para a geração de energia, resultando como as melhores o Eucalipto e Capim Elefante. Com estes cultivos foi estimado os potenciais teórico, técnico e econômico. O potencial teórico no Brasil usando 30% dos solos com aptidão para o Capim é de $17,3 \text{ EJ ano}^{-1}$ e com eucalipto $8,47 \text{ EJ ano}^{-1}$ em terras com aptidão florestal. No caso de um sistema agroflorestal, na proporção de 50% com Eucalipto e 50% com Capim Elefante, se produzirá $13,0 \text{ EJ ano}^{-1}$. Os sistemas analisados para a estimativa do potencial técnico foram Combustão com Ciclo Rankine Orgânico (C-ORC), Combustão com Ciclo Rankine Convencional (C-CRC), gaseificação com Motor de Combustão Interna (G-MCI), Combustão com Turbina de Queima Externa (C-EFGT) e Gaseificação com Turbina de Queima Externa (G-EFGT). Resultando ser o de maior potencial G-MCI e o de menor potencial G-EFGT. Os custos nivelados foram menores que os custos de referência reportados por IRENA na faixa de 300 – 3000 kW. Os preços de venda da energia elétrica para os sistemas analisados foram maiores que o Leilão A-5/2013.

Palavras chaves: *Biomassa, Sistemas Agroenergéticos, Agro energia, Eucalipto, Capim Elefante.*

Abstract

QUINTERO, B. Q. R. (2015). Techno- Economic Evaluation of Agro-energy Systems. 185 p. Ph.D. Thesis – Mechanical Engineering Institute, Federal University of Itajubá.

The thesis aims to carry-out a technical and economical evaluation of the thermochemical conversion by combustion and gasification of woody and herbaceous energy crops into electricity through different technologies, based on its theoretical, technical and economic potential while using the conceptual approach of agro-energy systems. From the agro-environmental potential, ability of existing soils and plant species in Brazil, eight of them were selected for analysis. Multicriteria data envelopment methodology (DEA) was applied to choose the species with the greatest potential for energy generation, resulting as the best Eucalyptus and Elephant grass. Based on these crops it was estimated the theoretical, technical and economic potential. The theoretical potential in Brazil using 30% of soils with aptitude for elephant grass is $17.3 \text{ EJ year}^{-1}$ and eucalyptus $8.47 \text{ EJ year}^{-1}$ in lands with forest aptitude. In the case of an agroforestry system in the proportion of 50% with Eucalyptus and 50% with elephant grass, the potential will be of $13.0 \text{ EJ year}^{-1}$. The systems analyzed for the evaluation of technical potential were the combustion based Rankine Organic Cycle (C-ORC), the combustion based Conventional Rankine Cycle (C-CRC), gasification with Internal Combustion Engine (G-MCI), combustion with externally fired gas turbine (C-EFGT) and gasification with Externally Fired gas Turbine (G-EFGT). The energetic system with the greatest potential it was the G-MCI and with the lower potential G-EFGT. The levelized costs were lower than the reference costs reported by IRENA in the range of 300 - 3000 kW. Selling prices of electricity for the systems analyzed were higher than the ones from Auction A-5/2013.

Keywords: *biomass, Agro energetics systems, agro energy, eucalyptus, elephant grass*

CONTEÚDO

Capítulo 1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO E ALCANCE DA TESE	1
1.2	OBJETIVO	2
1.2.1	Objetivos Específicos.....	2
1.3	Novidade científica.....	3
1.4	Resultados esperados.....	3
1.5	CONTEXTUALIZAÇÃO	3
1.5.1	Fontes Energéticas	3
Capítulo 2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA A IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA AGROENERGÉTICO.....	13
2.1	CULTIVOS ENERGÉTICOS.....	13
2.2	IMPORTÂNCIA DA FOTOSSÍNTESE PARA OS CULTIVOS ENERGÉTICOS	13
2.3	SUSTENTABILIDADE E CULTIVOS ENERGÉTICOS	15
2.4	POTENCIAL DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA AGROENERGÉTICO	16
2.4.1	Potencial teórico da produção da biomassa por fotossíntese	17
2.4.2	Potencial técnico da geração de eletricidade a partir de cultivos energéticos.....	20
2.4.3	Potencial econômico da geração de eletricidade mediante sistemas Agroenergéticos ...	48
2.4.4	Fundamentos teóricos das ferramentas a serem usadas para a seleção da biomassa	56
Capítulo 3	POTENCIAL TEORICO DOS SISTEMAS AGROENERGÉTICOS E POTENCIAIS DE GERAÇÃO NO BRASIL	63
3.1	SISTEMAS AGROENERGÉTICOS: Uma abordagem holística para o Brasil	63
3.1.1	Descrição geral do Brasil	63
3.1.2	Clima no Brasil	65

3.1.3 Disponibilidade de água no Brasil para a produção de Biomassa	66
3.1.4 Solos Brasileiros	66
3.1.5 Disponibilidade de terras para produção de alimentos no Brasil	70
3.1.6 Espécies vegetais no Brasil	72
3.2 POTENCIAL TEÓRICO DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE CULTIVOS ENERGÉTICOS MADEIREIROS E HERBÁCEOS NO BRASIL	73
3.2.1 Seleção dos Cultivos Energéticos Madeireiros e Herbáceos com maiores potenciais no Brasil.....	75
3.2.2 O poder calorífico do Eucalipto e o Capim Elefante.	83
3.2.3 Planejamento da produção de cultivos energéticos madeireiros e herbáceos com foco em sistemas Agroenergético no Brasil	83
3.2.4 Potencial teórico da geração de energia elétrica a partir do Eucalipto e do Capim Elefante no Brasil	85
Capítulo 4 POTENCIAL TÉCNICO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE CULTIVOS ENERGÉTICOS MADEIREIROS E HERBÁCEOS MEDIANTE SISTEMAS AGROENERGÉTICOS NO BRASIL	88
4.1 CICLO RANKINE CONVENCIONAL	88
4.2 CICLO RANKINE ORGÂNICO (ORC)	90
4.3 CICLO COMBUSTÃO COM TURIBINA DE QUEIMA EXTERNA (C-EFGT)...	92
Capítulo 5 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE EUCALIPTO E CAPIM ELEFANTE	101
5.1 CRITERIOS DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA ELETRICIDADE DA BIOMASSA	102
5.2 ESCOPO DA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE EUCALIPTO E CAPIM ELEFANTE	102
5.2.1 Características da implantação da biomassa	103
5.2.2 Configurações dos sistemas Agroenergéticos.....	107
5.3 ESTIMATIVA DOS CUSTOS	108

5.3.1	Custos da biomassa	108
5.3.2	Custos de geração	124
5.3.3	Custo nivelado de geração.....	145
5.3.4	Tarifa de Comercialização da eletricidade	147
5.4	Risco do investimento na geração de energia elétrica a partir de Eucalipto e Capim Elefante.....	149

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Fontes energéticas	4
Figura 1.2. Consumo de energia primária no mundo	4
Figura 1.3. Consumo de energia primária e eletricidade no Brasil	5
Figura 1.4. Tendência de consumo de energia primária e geração de eletricidade no mundo ...	7
Figura 1.5. Fontes de energia renováveis	8
Figura 1.6. Fluxograma para desenvolver um Sistema Agroenergético desde uma abordagem teórica – Potencial teórico	10
Figura 2.1. Sequestro de Carvão pela biomassa e o solo.....	14
Figura 2.2 Critérios de sustentabilidade para de projetos agroenergéticos	15
Figura 2.3. Potencial de implantação de um sistema Agroenergético.....	17
Figura 2.4. Potencial de uso dos solos.....	19
Figura 2.5. Ciclo Rankine Convencional	22
Figura 2.6. Gráfica dos diferentes tipos de fluidos para um ORC.....	25
Figura 2.7 Condições limites para diferentes fluidos tipo alcanos	27
Figura 2.8 Ciclo EFGT com combustão	31
Figura 2.9 Etapas do processo da gaseificação.....	32
Figura 2.10 Sistema Gaseificação – MCI.....	35
Figura 2.11. Ciclo termodinâmico GEFGT	41
Figura 2.13 Sistemas de transporte e a densidade aparente da biomassa	43
Figura 2.14 Secagem de madeira com radiação solar e gases de exaustão.	44
Figura 2.15 Ciclo de vida da colheita dos cultivos energéticos herbáceos.....	46
Figura 2.16 Empregos requeridos para projetos de bioenergia.	49
Figura 2.17 Custo nivelado de geração de eletricidade	54
Figura 2.18. Gráfico de envolvente de dados com um recurso e um produto	58
Figura 2.19. Representação gráfica dos modelos CCR e BCC	60
Figura 2.20. Fronteira BCC clássica e invertida.....	61
Figura 3.1. Componentes de um Sistema Agroenergético	64
Figura 3.2 Áreas susceptíveis a desertificação	70
Figura 3.3. Aproveitamento dos solos no Brasil	71
Figura 3.4. Área potencial para cultivos energéticos segundo sua capacidade de uso.....	74

Figura 3.5. Comparação da evapotranspiração do eucalipto com outros ecossistemas naturais no mundo.	82
Figura 3.6 Variação do PCI em relação ao conteúdo de umidade.....	83
Figura 3.7 Sistemas agroflorestais e cultivos madeireiros e herbáceos.....	84
Figura 3.8. Potencial teórico do Eucalipto e do Capim Elefante no Brasil em EJ ano ⁻¹	87
Figura 4.1. Ciclos termodinâmicos analisados	89
Figura 4.2. Esquema do ORC simulado em Cycle Tempo.....	90
Figura 4.3. Esquema do ORC simulado em Hysys	91
Figura 4.4. Esquema do ORC simulado em Gate Cycle	92
Figura 4.5. Eficiências globais dos sistemas CRC, ORC, GMCI e CEFGT para diferentes expansores na faixa de 10 - 350 kW.....	94
Figura 4.6. Eficiências globais dos sistemas CRC, ORC, GMCI e CEFGT para diferentes expansores na faixa de 500-3000 kW.....	95
Figura 4.7. Potencial Técnico de Geração de Energia Elétrica com Eucalipto e diferentes Tecnologias.....	97
Figura 4.8. Potencial Técnico de Geração de Energia Elétrica com Capim Elefante e diferentes Tecnologias.....	98
Figura 4.9. Potencial Técnico de Geração de Energia Elétrica com 50% em Eucalipto e 50% em Capim Elefante e diferentes Tecnologias	99
Figura 5.1. Tronco com sortimento em função de tipos de toras.	104
Figura 5.2 Descrição dos processos e sequencia para a estimativa do preço da biomassa	109
Figura 5.3 Custos operacionais das máquinas para colheita Vs. No. Horas efetivas trabalhadas	115
Figura 5.4. Planta física típica para usina térmica com Eucalipto e secagem solar da madeira.	127
Figura 5.5 Planta física típica para usina térmica com Eucalipto e secagem por convecção forçada da madeira.....	127
Figura 5.6 Planta física típica para usina térmica com Capim Elefante e secagem solar.....	128
Figura 5.7. Planta física típica para usina térmica com briquete de Capim Elefante e secagem solar	128
Figura 5.8 Consumo específico de madeira (U=30%) para as tecnologias CRC, ORC, C-EFGT, G-MCI e G-EFGT.	133

Figura 5.9 Consumo específico de Capim Elefante (U=10%) para as tecnologias CRC, ORC, C-EFGT, G-MCI e G-EFGT.	134
Figura 5.10 Área de terra requerida para projetos Agroenergéticos com Eucalipto na faixa de 10 – 300 kW.	135
Figura 5.11 Área de terra requerida para projetos Agroenergéticos com Eucalipto na faixa de 500 – 3000 kW.	135
Figura 5.12 Área de terra requerida para projetos Agroenergéticos com Capim Elefante na faixa de 10 – 300 kW.....	136
Figura 5.13 Área de terra requerida para projetos Agroenergéticos com Capim Elefante na faixa de 500 – 3000 kW.....	136
Figura 5.14. Geração de energia elétrica por hectare por ano para projetos Agroenergéticos com Eucalipto na faixa de 10 – 300 kW.....	137
Figura 5.15. Geração de energia elétrica por hectare por ano para projetos Agroenergéticos com Eucalipto na faixa de 500 – 3000 kW.....	138
Figura 5.16. Geração de energia elétrica por hectare por ano para projetos Agroenergéticos com Capim Elefante na faixa de 10 – 300 kW.....	138
Figura 5.17. Geração de energia elétrica por hectare por ano para projetos Agroenergéticos com Capim Elefante na faixa de 500 – 3000 kW.....	139
Figura 5.18 Custo nivelado de geração de eletricidade com Eucalipto para diferentes tecnologias.....	146
Figura 5.19 Custo nivelado de geração de eletricidade com Capim Elefante para diferentes tecnologias.....	146
Figura 5.20 Tarifa de comercialização que viabiliza a geração da eletricidade apartir de Eucalipto.....	148
Figura 5.21 Tarifa de comercialização que viabiliza a geração da eletricidade apartir de Capim Elefante.....	149
Figura 5.22. Probabilidade de alcançar a viabilidade econômica para os diferentes sistemas Agroenergéticos com Eucalipto.....	151
Figura 5.23. Probabilidade de alcançar a viabilidade econômica para os diferentes sistemas Agroenergéticos com Capim Elefante.....	151

Lista de Tabelas

Tabela 1.1. Emissões de CO ₂ na Geração de Eletricidade para diferentes fontes energéticas...	6
Tabela 2.1 Vantagens e desvantagens dos ciclos CRC e ORC	23
Tabela 2.2. Características termodinâmicas dos alcanos.....	26
Tabela 2.3 Tecnologias ORC e CRC comercialmente disponíveis para geração de eletricidade com biomassa.	30
Tabela 2.4 Custos específicos de investimentos para tecnologias de conversão termoquímica em sistemas Combustão-CRC e Combustão-ORC.....	30
Tabela 2.5. Capacidade térmica de diferentes tipos de gaseificadores.....	33
Tabela 2.6 Quantidades máximas permitidas de substâncias contaminantes em um gás de síntese para diferentes acionadores primários.	37
Tabela 2.7 Motores de combustão interna trabalhando com Syngas obtido da gaseificação de biomassa	38
Tabela 2.8 Projetos de gaseificação e combustão de biomassa	41
Tabela 2.9. Vantagens e desvantagens da peletização de biomassa madeireira e herbácea.....	47
Tabela 2.10. Características energéticas de algumas biomassas para diferentes densidades ...	48
Tabela 2.11 Geração de empregos no setor florestal no Brasil.	50
Tabela 3.1. Tipos de clima no Brasil	65
Tabela 3.2 Parâmetros hidrológicos das regiões hidrográficas brasileiras.....	66
Tabela 3.3. Extensão e distribuição das classes de solos no Brasil.....	67
Tabela 3.4 Aptidão agrícola das terras do Brasil.....	68
Tabela 3.5. Análise das espécies madeireiras e herbáceas como combustíveis sólidos.....	76
Tabela 3.6. Resultado da aplicação do método DEA na seleção da espécie madeireira e herbáceo como combustível sólido	77
Tabela 3.7. Algumas características produtivas e energéticas do Capim Elefante em solos acrisolos e planossolos com três cortes durante 22 meses - primeiro corte aos 9 meses – no Brasil.....	78
Tabela 3.8 Requerimentos climáticos de algumas espécies de Eucalipto	79
Tabela 3.9 Parâmetros das classes de aptidão edáfica para o <i>Eucalyptus (grandis, dunni e globulus)</i> na região do Corede Sul, no Estado do Rio Grande do Sul.....	80
Tabela 3.10 Composição de algumas espécies de Eucalipto.....	80

Tabela 3.11 Produções médias de Eucalipto por ano para diferentes densidades de plantio ...	81
Tabela 3.12 Requerimentos nutricionais de diferentes culturas no Brasil (kg há ⁻¹ ano ⁻¹	81
Tabela 3.13 Parâmetros usados para o cálculo do potencial energético do Eucalipto e do Capim Elefante no Brasil.....	85
Tabela 4.1 Parâmetros termodinâmicos usados no cálculo do ORC	91
Tabela 4.2 Parâmetros termodinâmicos usados no cálculo do C-EFGT	92
Tabela 4.3 Dados de referência para a modelagem dos ciclos termodinâmicos	93
Tabela 5.1 Produção esperada para o Eucalipto aos 2 anos de idade (S=30 e S=40)	106
Tabela 5.2 Produção esperada para o Eucalipto aos 6 anos de idade (S=30 e S=40)	106
Tabela 5.3. Configurações dos sistemas Agroenergéticos com biomassa de Eucalipto.....	107
Tabela 5.4 Configurações dos sistemas Agroenergéticos com biomassa de Capim Elefante	107
Tabela 5.5 Custo da hora de trator - subsolador	112
Tabela 5.6 Custos da hora de máquinas usadas no projeto	113
Tabela 5.7 Custos da hora das máquinas para colheita do Eucalipto	114
Tabela 5.8 Custos resumidos da produção de Eucalipto para diferentes densidades de plantação e Índice Sitio.....	116
Tabela 5.9. Custo do estabelecimento do cultivo de Capim Elefante	117
Tabela 5.10 Custo do Capim Elefante em Matéria Seca por hectare	118
Tabela 5.11. Custo do enfardado e transporte até a Usina do Capim Elefante (30 km).....	118
Tabela 5.12. Custo operacional do Conjunto Trator - Ancinho	119
Tabela 5.13Custo operacional do Conjunto Trator - Enfardadora	120
Tabela 5.14. Custo operacional do Conjunto Trator - Gaiolas.....	121
Tabela 5.15. Custo operacional do Conjunto Trator – Cefeira.....	122
Tabela 5.16. Investimento Fixo para uma fábrica de Brique de Alta Densidade	123
Tabela 5.17. Custo de fabricação do brique	124
Tabela 5.18. Custo total do brique de Capim Elefante	124
Tabela 5.19 Dimensionamento de uma usina termoelétrica CRC operando com Eucalipto..	129
Tabela 5.20 Dimensionamento de uma usina termoelétrica ORC operando com Eucalipto .	129
Tabela 5.21 Dimensionamento de uma usina termoelétrica C-EFGT operando com Eucalipto	130
Tabela 5.22. Dimensionamento de uma usina termoelétrica G-MCI operando com Eucalipto	130

Tabela 5.23. Dimensionamento de uma usina termoelétrica G-EFGT operando com Eucalipto	130
Tabela 5.24 Dimensionamento de uma usina termoelétrica CRC operando com Capim Elefante.....	131
Tabela 5.25 Dimensionamento de uma usina termoelétrica ORC operando com Capim Elefante.....	131
Tabela 5.26 Dimensionamento de uma usina termoelétrica C-EFGT operando com Capim Elefante.....	132
Tabela 5.27. Dimensionamento de uma usina termoelétrica G-MCI operando com Capim Elefante.....	132
Tabela 5.28. Dimensionamento de uma usina termoelétrica G-EFGT operando com Capim Elefante.....	132
Tabela 5.29 Pessoal técnico e administrativo nos projetos de geração termelétrica	140
Tabela 5.30. Rádios de transporte do Eucalipto para às diferentes potências.	141
Tabela 5.31 Custo específico da tecnologia C-EFGT	142
Tabela 5.32 Custo específico da tecnologia ORC	142
Tabela 5.33 Custo específico da tecnologia CRC	143
Tabela 5.34. Custos da tecnologia G-MCI reportada na literatura científica	143
Tabela 5.35 Custo específico da tecnologia G-MCI.....	144
Tabela 5.36 Custos de investimento para Sistemas Agroenergéticos com Eucalipto.	145
Tabela 5.37 Custos de investimento para Sistemas Agroenergéticos com Capim Elefante ..	145

Simbologia

ASD: Áreas Susceptíveis de Desertificação

CH: Conteúdo de Umidade

CRC: Ciclo Rankine Convencional

DB: Densidade Básica

DE: Domesticação da espécie

DEA: Análise de Envolvente de Dados

DGM: Disponibilidade de Germoplasma Melhorado

EFGT: Turbina de Queima Externa

EP: Expansor de Parafuso

GWP: Potencial de Aquecimento Global

M: Peso Molecular

MCI: Motor de Combustão Interna

ODP: Potencial de Destruição do Ozono

ORC: Ciclo Rankine Orgânico

PCI: Poder Calorífico Inferior

P_{crit} : Pressão Crítica

PCS: Poder Calorífico Superior

PPB: Produção Primária Bruta

PPL: Produção Primária Líquida

Pr: Produtividade

TA: Turbina Axial

T_{crit} : Temperatura Crítica

TG: Turbina a Gás

TR: Turbina Radial

TIR: Taxa Interna de Retorno

UNCCD: Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação

VPL: Valor Presente Líquido

Z: Fator de Compressibilidade

Capítulo 1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E ALCANCE DA TESE

O Crescimento da população e da renda são as duas forças mais poderosas na demanda por energia no mundo, com forte dependência dos combustíveis fósseis na geração de eletricidade. Segundo a IEA (2012), a participação destes tipos de combustíveis na geração de energia elétrica no mundo foi de 67,4% (petróleo 4,6%, carvão mineral 40,6 % e gás natural 22,2%), seguido pela hidroenergia (16%) e energia nuclear (12,9%), enquanto as energias renováveis (geotérmica, biomassa e resíduos sólidos, calor, solar e vento) tiveram uma participação de apenas 3,7%. Este desequilíbrio na disponibilidade de tecnologias viáveis para gerar eletricidade e os respectivos combustíveis, desencadeia uma complexidade no mercado destes, onde o custo do petróleo incide diretamente no desenvolvimento das tecnologias renováveis.

Neste mesmo sentido, a evolução do impacto gerado no meio ambiente pelo uso dos combustíveis fósseis é devido à liberação de partículas, CO₂ e óxidos de nitrogênio e enxofre na atmosfera. O impacto futuro do CO₂ no clima é potencialmente mais grave e irreversível (BERG *et al.*, 2013; BACH, 1981), o que requer uma procura de estratégias efetivas para minimizar os danos que pudessem ocorrer por estas mudanças climáticas e seus efeitos no regime hidrológico, além da degradação progressiva dos solos do planeta.

No mundo, em 2012, 25% das terras apresentavam um elevado estado de degradação, 8% apresentavam degradação moderada, 36% estavam em condições de estabilidade ou com uma ligeira degradação e 10% estavam "melhorando", enquanto cerca de 18% da superfície do planeta estava sem vegetação e 2% coberta por massas de águas continentais (FAO, 2012). Estimou-se que 33% das terras estavam degradadas com impactos negativos à biodiversidade. No Brasil, até o ano 2008, existiam 1.900 km² de terras degradadas, o que é equivalente a 22% do território e 5,4% da área total degradada no mundo (BAI et al., 2008).

Neste contexto, existe a necessidade de encontrar um recurso energético que substitua os combustíveis fósseis, além de contribuir a captura de CO₂, o regulamento do regime hidrológico e o aproveitamento e recuperação dos solos degradados.

Sabe-se que os vegetais, além da virtude de capturar CO_2 e produzir $(\text{CH}_2\text{O})_n$ através do processo da fotossíntese, são uma via idônea para aproveitar o CO_2 e armazená-lo em forma de carbono como energia renovável.

Outro aspecto importante nessa solução integral é a tecnologia escolhida, que deve ser adequada para o aproveitamento da biomassa como combustível, eficiente, menos poluente, facilmente adaptável em condições descentralizadas, além de ser econômica e mais confiável.

Sendo assim, é necessário identificar espécies vegetais para seu posterior uso como biocombustível como a finalidade de substituir os combustíveis fósseis na geração de eletricidade, aproveitando as potencialidades edafoclimáticas e o desenvolvimento de variedades de espécies vegetais madeireiras e herbáceas altamente produtivas adaptadas às condições dos solos degradados no Brasil em Sistemas Agroenergéticos.

1.2 OBJETIVO

Esta tese tem como objetivo avaliar técnica e economicamente a conversão termoquímica por combustão e gaseificação da biomassa de cultivos energéticos madeireiros e herbáceos em energia elétrica através de diferentes tecnologias.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Revisar aspectos teóricos da geração de energia elétrica a partir de cultivos energéticos
- Analisar o potencial teórico da geração de eletricidade a partir de cultivos energéticos madeireiros e herbáceos no Brasil
- Seleção do melhor cultivo energético madeireiro ou herbáceo para a geração de energia elétrica empregando métodos de análise de eficiência através do método de envoltório de dados;
- Analisar sistemas Agroenergéticos mediante o potencial técnico da geração de eletricidade a partir de cultivos energéticos madeireiros e herbáceos no Brasil;
- Avaliar a viabilidade econômico-financeira de Sistemas Agroenergéticos para a geração de energia elétrica usando diferentes tecnologias em diversos cenários de forma integral.

1.3 Novidade científica

A novidade deste trabalho é a integração de maneira sincronizada dos potenciais teórico, técnico e econômico para a geração de energia elétrica renovável a partir de cultivos madeireiros e herbáceos numa abordagem conceitual de sistemas Agroenergéticos.

1.4 Resultados esperados

Uma avaliação de diferentes sistemas Agroenergéticos por diferentes rotas térmica a partir de cultivos energéticos madeireiros e herbáceos de uma maneira mais promissora, através de indicadores de qualidade da biomassa (domesticação da espécie, disponibilidade de germoplasma melhorado, produtividade, PCI, umidade de equilíbrio, densidade), indicadores econômicos ($\text{R\$ m}^{-3}$ madeira, empregos diretos kW^{-1} , VPL, TIR) e indicadores energéticos (kWh kg^{-1} , kWh ha^{-1} , $\text{R\$ kWh}^{-1}$, hectare cultivada ano kW^{-1}) como fundamento para políticas governamentais no Brasil para este tipo de energia renovável.

1.5 CONTEXTUALIZAÇÃO

1.5.1 Fontes Energéticas

As fontes energéticas têm duas classificações genéricas: não renováveis e renováveis. Estas podem se subdividir em fontes primárias e secundárias. Como produtos finais dessas fontes, obtêm-se combustíveis, calor e eletricidade (Division Energy Statistic, 2004). Então, a eletricidade é uma fonte secundária de energia, que pode se classificar segundo a fonte primária: eletricidade renovável e não renovável. Ver figura 1.1. Neste estudo, o foco é a eletricidade renovável mediante o uso de biomassa de cultivos energéticos madeireiros e herbáceos em sistemas Agroenergéticos.

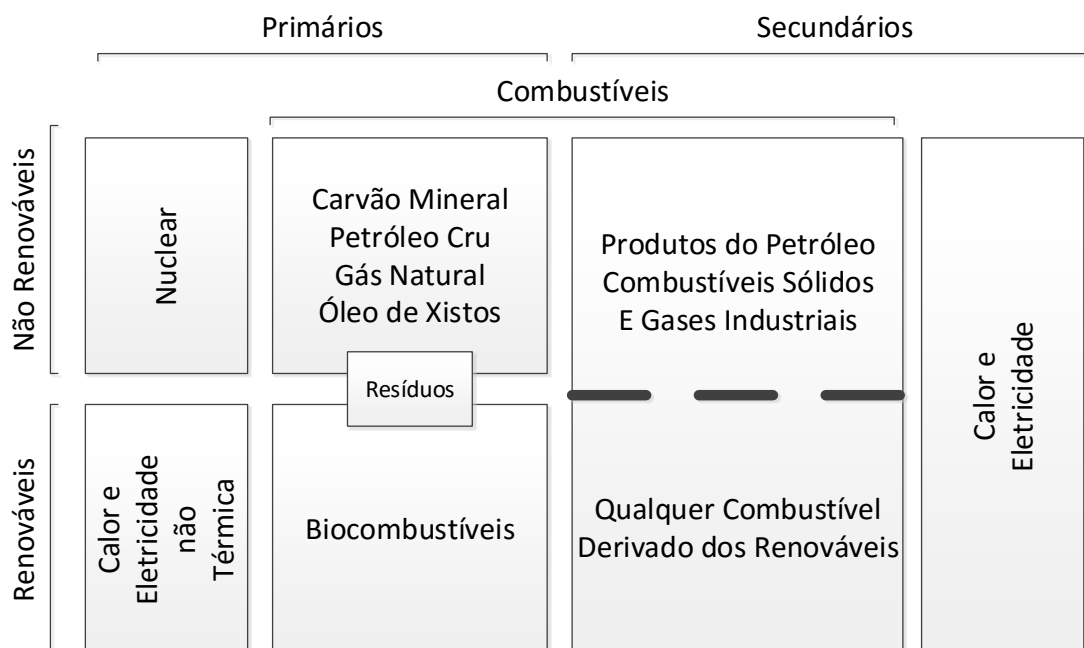


Figura 1.1. Fontes energéticas
Fonte: adaptado da Division Energy Statistic (2004)

O consumo de energia primária para o ano de 2010, no mundo, foi estimado em 12.717 Mtep, dos quais 13,2% da energia foi proveniente de fontes renováveis e 86,8% de fontes não renováveis (IEA, 2012), emitindo-se 30,3 GtCO₂ devido à combustão de carvão, petróleo e gás natural, sendo a geração de eletricidade e calor a mais representativa com 41% dessas emissões, seguido do transporte com 22% (IEA STATISTIC, 2011). Ver Figura 1.2.

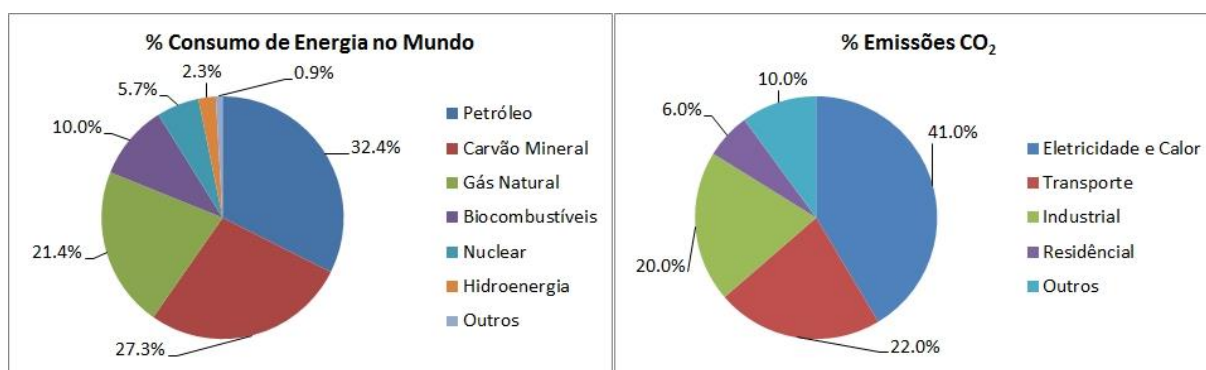


Figura 1.2. Consumo de energia primária no mundo
Fonte: Adaptado de IEA (2012)

No Brasil, para o ano de 2011, o consumo de energia primária foi de 256,74 Mtep. Na Figura 1.3, pode-se observar que desta quantidade, 54% correspondem a energias de fontes não renováveis e 45,8% fontes renováveis (MME; EPE, 2012). Embora as fontes de energia

renováveis sejam muito importantes para a matriz energética, o Brasil foi responsável por 1,3% das emissões globais de CO₂ na atmosfera pela queima de combustíveis fósseis. Além disso, foi o terceiro maior emissor de gases de efeito estufa no mundo devido, basicamente, à agricultura e às mudanças no uso da terra, atribuíveis, principalmente, à expansão da fronteira agrícola na Amazônia (IEA STATISTIC, 2011). Esta percentagem nas emissões globais de CO₂ pode ser maior devido ao aumento no consumo de petróleo e hidroenergia, paralelamente com uma diminuição na geração de eletricidade a partir da biomassa da cana que, segundo o MME e EPE (2012), foi de 3,5, 2,3 e -4,5 Mtep respectivamente.

No caso da eletricidade como energia secundária, no ano de 2011, o Brasil apresentou uma matriz de geração elétrica predominantemente de origem renovável, que respondeu por 89% da oferta, sendo 81,9% principalmente hidroelétrica. Porém, a estabilidade na geração e no custo da eletricidade não é estática no tempo, por causa do estocástico regime hidrológico e das mudanças climáticas, afetando os custos da eletricidade (CARPIO; PEREIRA, 2007). As outras fontes renováveis de geração, além de menos importantes, têm suas desvantagens: disponibilidade, intermitência, segurança, poluição, não captura de carbono em sua operação, etc.

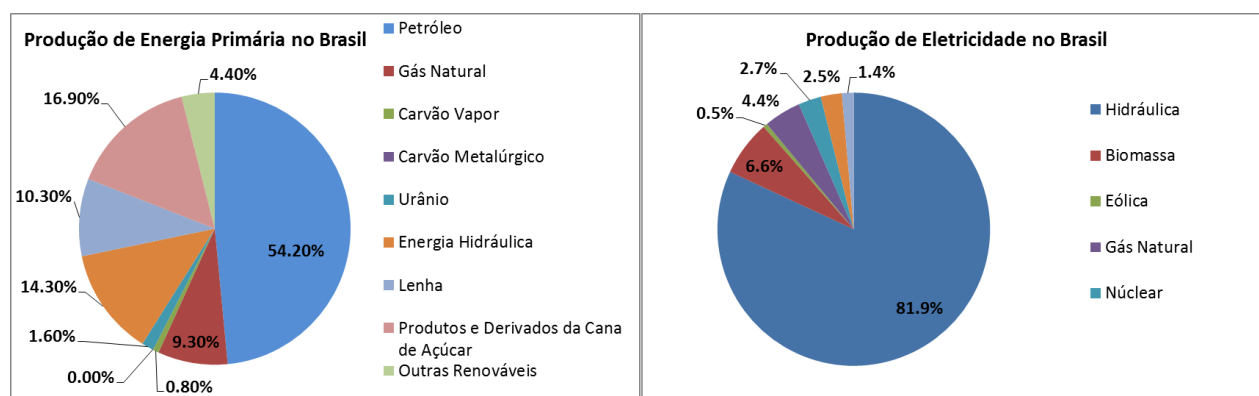


Figura 1.3. Consumo de energia primária e eletricidade no Brasil
Fonte: Adaptado de MME e EPE (2012).

1.3.1.1 Fontes energéticas não renováveis

Uma fonte não renovável é aquela que por processos naturais não pode ser substituída ou é substituída de uma maneira muito lenta com respeito à velocidade do seu consumo. Compõe este tipo de fonte: petróleo, gás natural, carvão mineral e urânio.

No mundo, existe uma forte dependência das fontes energéticas não renováveis, principalmente as de origem fóssil, devido ao menor preço por unidade energética produzida do que a obtida de fontes renováveis. O problema são as altas emissões de CO₂ pela queima dos combustíveis fósseis na geração de energia elétrica que, comparadas com as fontes renováveis, são muito maiores, com exceção da energia nuclear, causando danos ambientais irreversíveis para o planeta. Ver Tabela 1.1.

Tabela 1.1. Emissões de CO₂ na Geração de Eletricidade para diferentes fontes energéticas

Fonte Energética	Ton CO ₂ e / GWh		
	Média	Mínimo	Máximo
Petróleo	733	547	935
Gás Natural	499	362	891
Carvão mineral	888	756	1310
Nuclear	29	2	130
Hidroeletricidade	26	2	237
Vento	26	6	124
Biomassa	45	10	101
Solar PV	85	13	731

Fonte: WNA (2012)

Outro aspecto importante é a quantidade finita dessas fontes energéticas em relação à demanda que aumenta progressivamente. Estimou-se que, para finais de 2012 as reservas de petróleo seriam de 263,65 bilhões de tep, suficientes para 52,9 anos de produção mundial. No caso do gás natural, a estimativa foi de 187.300 bilhões de metros cúbicos o suficiente para atender 55,7 anos e o carvão atingiu 860.9 bilhões de toneladas suficientes para 109 anos (BP STATISTICS, 2013). Pode-se observar que o curto tempo de disponibilidade dessas fontes não renováveis não pode garantir a segurança energética do planeta, devido ao aumento progressivo nas projeções de consumo de energia e de geração de eletricidade (BP, 2012). Ver Figura 1.4.

Neste cenário, em 2012, o Brasil foi o nono maior consumidor de energia do mundo e o terceiro maior do hemisfério ocidental, atrás dos Estados Unidos e Canadá. Suas reservas de petróleo eram de 14 bilhões de barris, equivalente a 0,8% das reservas mundiais. Quanto ao gás natural, as reservas eram de 416.300 milhões de metros cúbicos equivalentes a 0,22% da reserva mundial (EIA, 2012). Embora sejam importantes, são quantidades finitas.

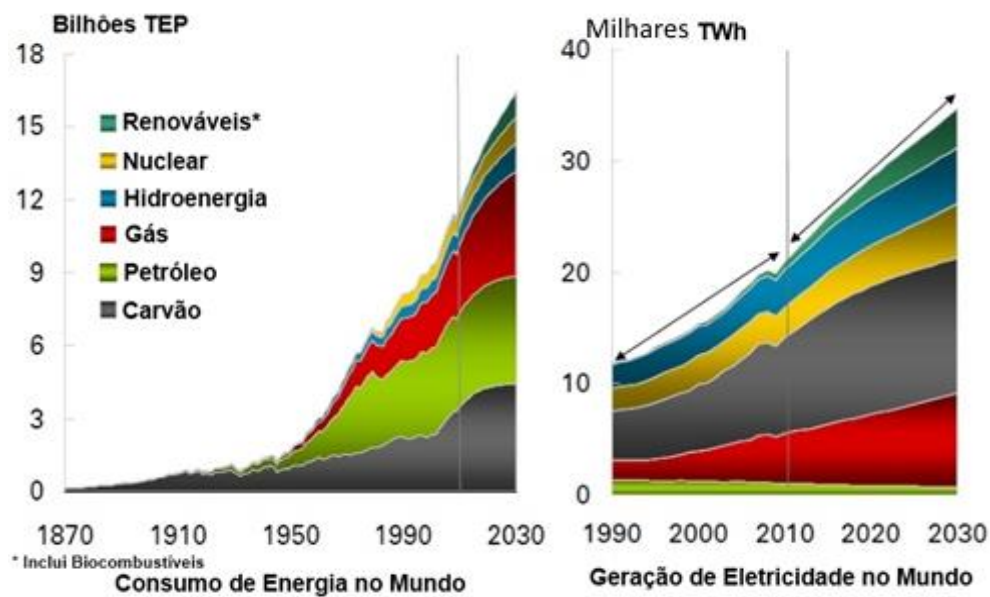


Figura 1.4. Tendência de consumo de energia primária e geração de eletricidade no mundo

Fonte: BP (2012)

1.3.1.2 Fontes energéticas renováveis

Podem ser definidas como o fluxo de energia natural e persistente que ocorrem no ambiente. Ou seja, a energia está no ambiente, independentemente de haver um dispositivo para interceptar e aproveitar esta potência, pelo o que é chamada energia verde ou energia sustentável (TWIDELL; WEIR, 1986). Os fluxos das fontes de energia renovável e sua origem podem ser vistos na Figura 1.5. Em princípio, a energia renovável é perpetua sempre quando não variam as condições ambientais, porém as densidades energéticas são baixas em relação às não renováveis.

Segundo o IPCC (2012), as energias de fontes renováveis podem se converter em um veículo para se ter acesso aos serviços energéticos modernos e apoiar na consecução dos objetivos de desenvolvimento do milênio nos seguintes aspectos:

- Contribuir com o desenvolvimento econômico e social de maneira sustentável.
- Acelerar o acesso à energia, particularmente para os 1,4 bilhões de pessoas sem acesso à eletricidade e 1,3 bilhões adicionais a partir da biomassa tradicional.
- Contribuir com um fornecimento de energia mais seguro, ainda com muitos desafios.

- Proporcionar benefícios ambientais com a redução das emissões de gases de efeito estufa – GEE - através de sistemas que capturam CO₂ na produção de biomassa para a geração de eletricidade ou sistemas que não usam a combustão na geração.

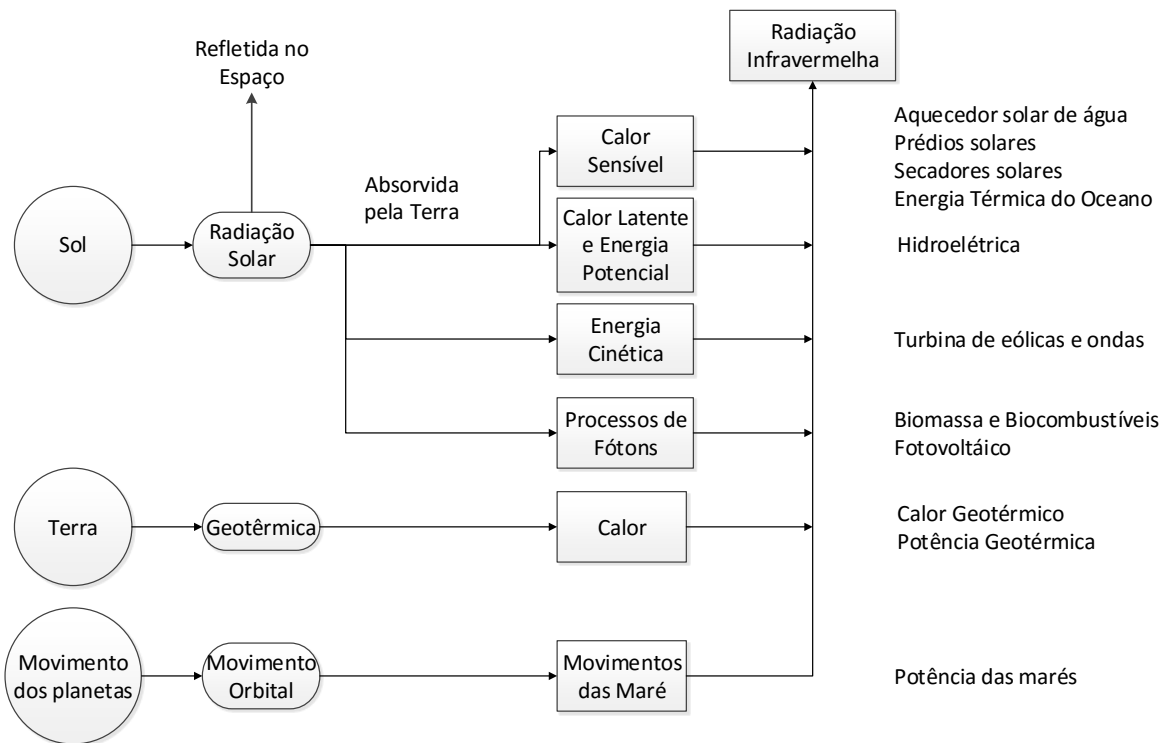


Figura 1.5. Fontes de energia renováveis
Fonte: Twidell e Weir (1986)

Embora a contribuição exata das fontes de energia renováveis para o desenvolvimento sustentável deva ser avaliada no contexto específico do país, elas oferecem oportunidades para o desenvolvimento econômico e social, para o acesso à energia nos sistemas não interconectados ou isolados, para o abastecimento de energia segura, para a mitigação das mudanças climáticas e para a redução dos impactos no meio ambiente e na saúde.

Um dos principais obstáculos para a expansão e aceitação dos combustíveis de fontes renováveis e tecnologias para o aproveitamento da energia da biomassa nos mercados mundiais é o não reconhecimento dos custos ambientais adversos e os riscos sociais relacionados com o uso dos combustíveis fósseis e nuclear. Adicionando a quantidade relativamente grande de subsídios e apoio às fontes de energia convencionais, impedindo o desenvolvimento da biomassa como combustível, afetando seu desempenho na oferta global de energia (BASSAM, 2010).

O fato de que a biomassa é uma fonte de energia renovável, seu uso não implica automaticamente que sua produção, conversão e utilização sejam sustentáveis (BUCHHOLZ; LUZADIS; VOLK, 2009).

O foco deste trabalho é o estudo de sistemas energéticos que capturem CO₂ na produção da biomassa e diminuam as emissões potencializadoras do efeito estufa na geração de eletricidade, mediante tecnologias termoquímicas avançadas, na procura da sustentabilidade. Estes sistemas são denominados “**Sistemas Agroenergéticos**”.

Um sistema Agroenergético é aquele que gera energia elétrica a partir de combustíveis alternativos produzidos com insumos agroflorestais mediante tecnologias termoquímicas aproveitando as condições agroambientais, recuperando os solos degradados, diminuindo o conflito entre a produção de alimentos e geração de energia.

Para o funcionamento deste sistema é necessário seguir passos lógicos para o funcionamento ótimo do Sistema Agroenergético. Ver figuras 1.6, 1.7 e 1.8.

Na figura 1.6 encontra-se descrito os aspectos mais relevantes na escolha do melhor cultivo energético, baseado no potencial de adaptação da espécie em áreas degradadas, a produtividade, domesticação da espécie e a disponibilidade do germoplasma melhorado com obtendo o potencial teórico do sistema Agroenergético.

Na figura 1.7, é descrito a estimacão do potencial técnico tendo como ponto de partida o potencial teórico. É feito um análise a partir das potencias necessárias e disponíveis nas tecnologias de combustão ou gaseificação e para os diferentes ciclos termodinâmicos selecionados.

Por último, na figura 1.8 encontra-se descrito como é estimado o potencial econômico a partir dos potenciais teórico e técnico.

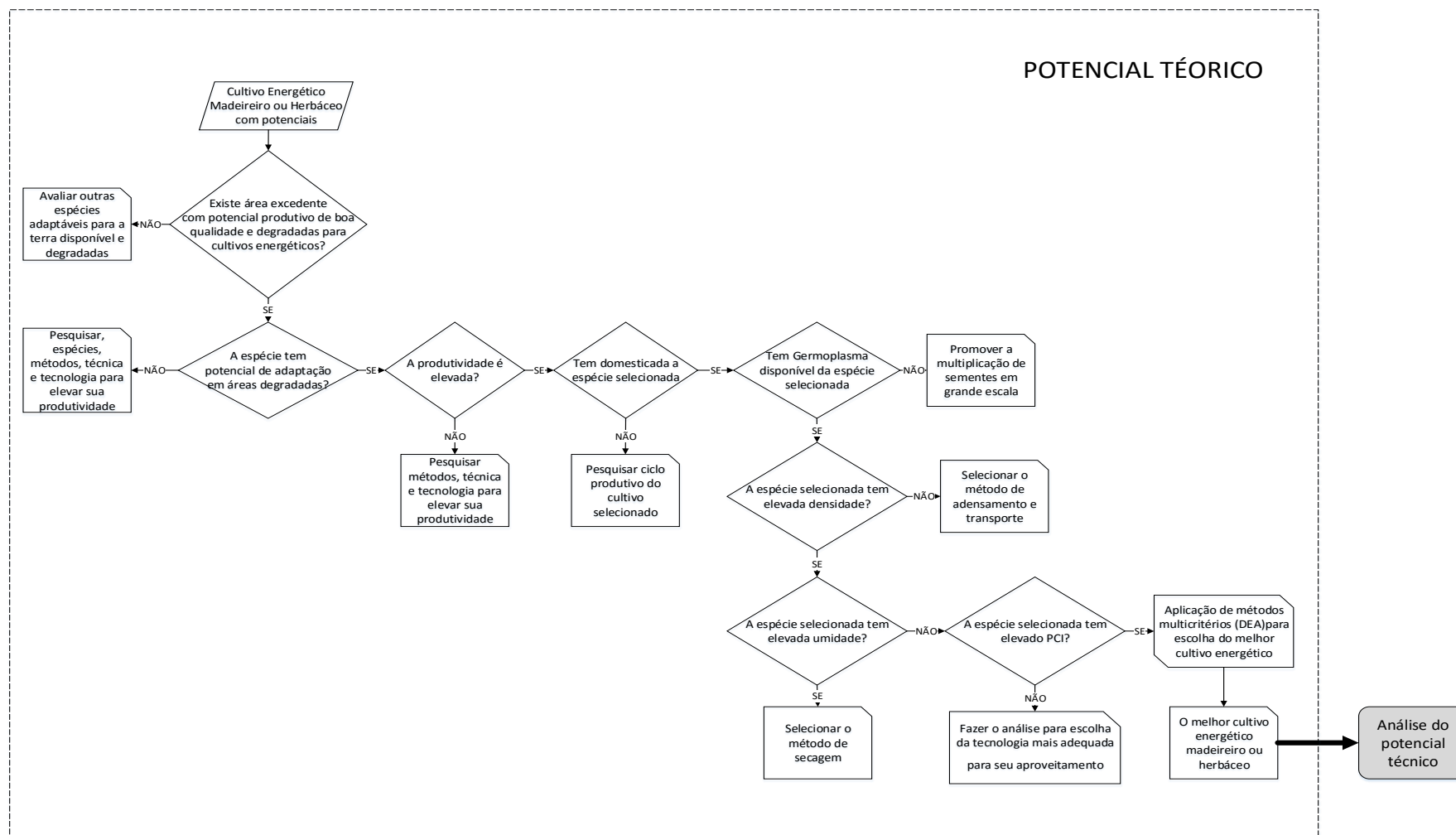


Figura 1.6. Fluxograma para desenvolver um Sistema Agroenergético desde uma abordagem teórica – Potencial teórico

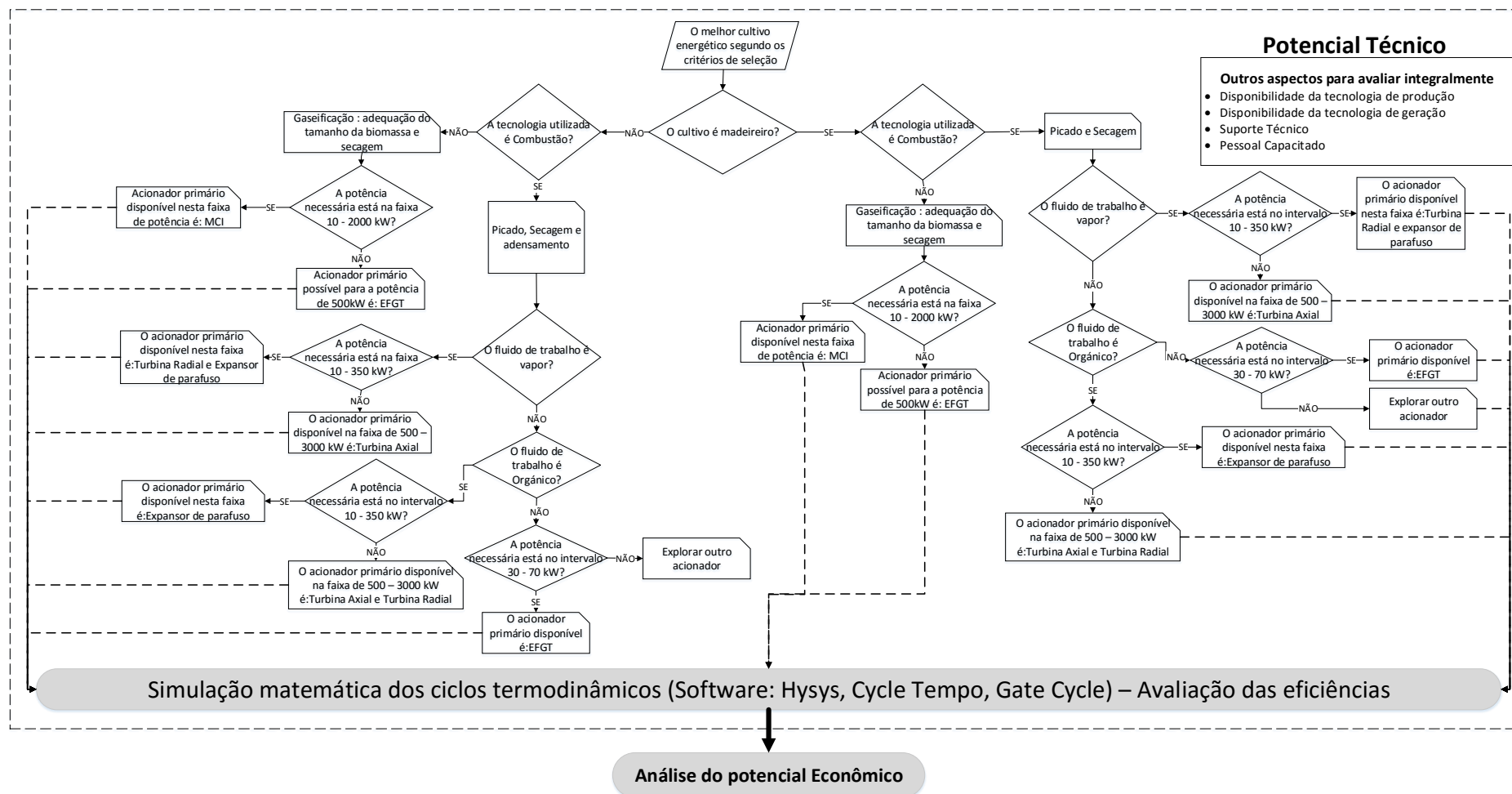


Figura 1.7. Fluxograma para desenvolver um Sistema Agroenergético desde uma abordagem teórica – Potencial técnico

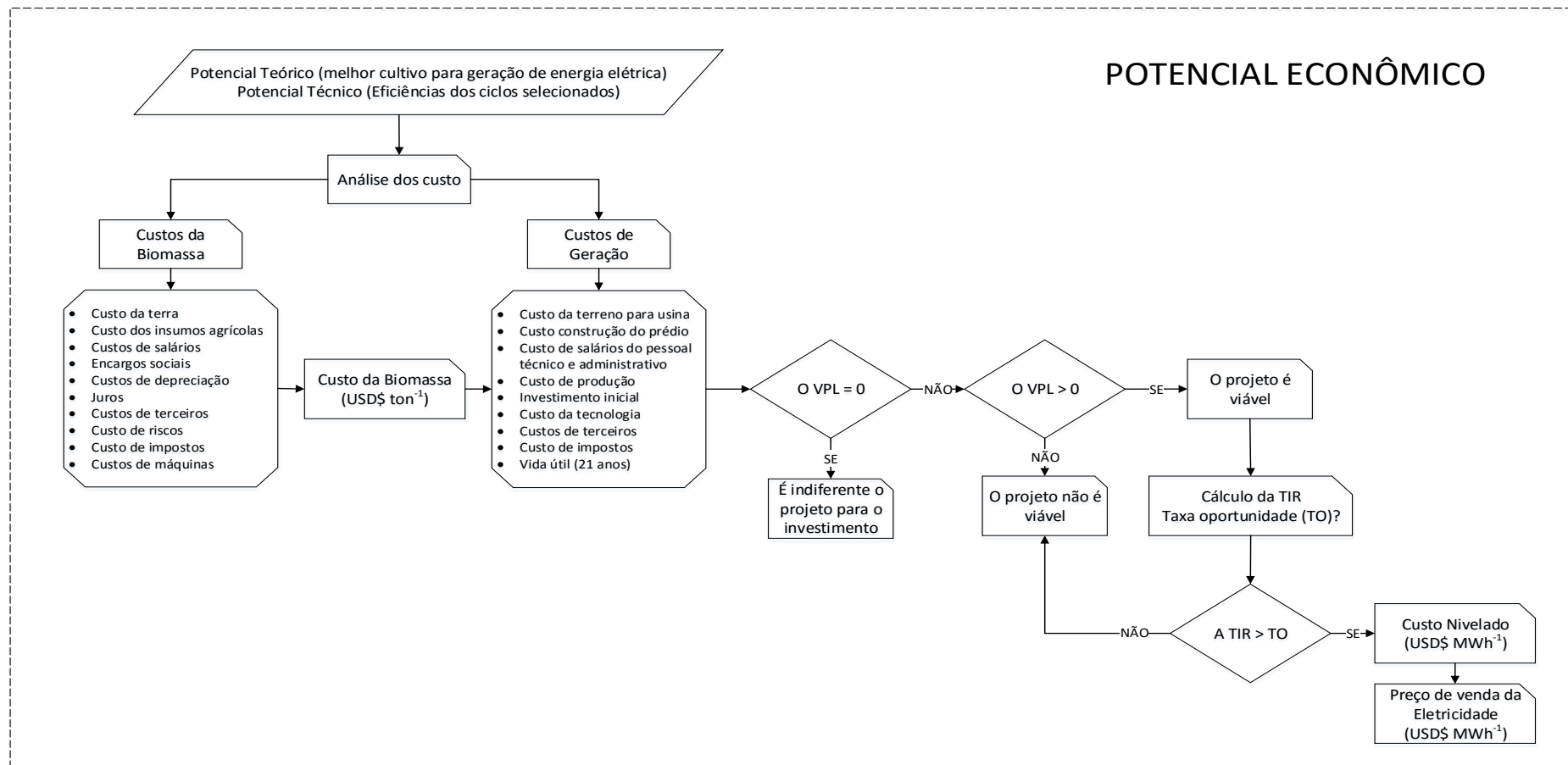


Figura 1.8. Fluxograma para desenvolver um Sistema Agroenergético desde uma abordagem teórica – Potencial econômica

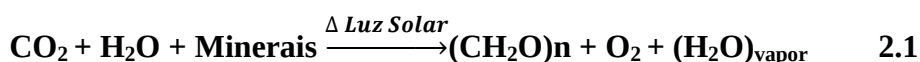
Capítulo 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA A IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA AGROENERGÉTICO

2.1 CULTIVOS ENERGÉTICOS

Os cultivos energéticos são aqueles implementados para a produção de biomassa e seu posterior uso como biocombustível sólido, líquido ou gasoso. Essas culturas não incluem a biomassa extraída da vegetação natural existente (STYLES; JONES, 2007). Exclui, também, a biomassa que foi submetida a processos geológicos resultando em compostos complexos com alta densidade energética, hoje utilizada como combustível.

2.2 IMPORTÂNCIA DA FOTOSSÍNTESE PARA OS CULTIVOS ENERGÉTICOS

Os cultivos energéticos captam o CO₂ do meio ambiente e o fixam na sua estrutura por meio do processo da fotossíntese, representada de uma maneira simples pela Equação 2.1. Embora esta simplicidade não reflete a complexidade das múltiplas reações de transformação de energia e compostos bioquímicos no decurso da conversão do CO₂; a água e os minerais do solo em hidratos de carbono e outros compostos orgânicos, usando a energia fornecida pelo sol.



O relevante deste processo é o papel que desempenha a luz solar. Aspectos como a intensidade, a qualidade espectral e a duração da incidência da luz afetam de maneira positiva ou negativa o processo fotossintético (LIMA V. *et al.*, 2010). Esses aspectos podem determinar o benefício ambiental, devido à possibilidade de absorver maior quantidade de CO₂, presente no ar, emitido em maior proporção pela queima de combustíveis fósseis e sua conversão espontânea em carbono renovável.

Outro aspecto importante é a eficiência fotossintética e a classificação botânica das plantas que, por sua vez, está ligado às rotas de carboxilação C3 ou C4. As plantas C3 são fotosinteticamente eficientes em temperaturas inferiores aos 20 °C enquanto que para as C4 a

eficiência fotossintética é quase constante a partir dos 10 °C, refletida na taxa de síntese de hidratos de carbono, que é de aproximadamente 25,5 % para as plantas C3 e 28,5% para as C4 (EHLERINGER; BJORKMAN, 1977). Estes compostos ficam armazenados em diversos componentes, sendo os principais: lignina, celulose e hemicelulose, em combinação com pequenas quantidades de constituintes menores (HOOD; NELSON; POWELL, 2011).

Ao utilizar cultivos energéticos como sumidouro de CO₂, é necessária uma gestão adequada do solo para assim influir positivamente sobre o ciclo global do carbono, considerando as possíveis mudanças no uso do solo, a sustentabilidade dos planos de manejo florestal ou dos solos em geral, as taxas de produtividade e como podem ser utilizados de forma eficaz os produtos e subprodutos da biomassa na geração de energia ao longo do tempo (SCHLAMADINGER; MARLAND, 1996). Ver Figura 2.1.

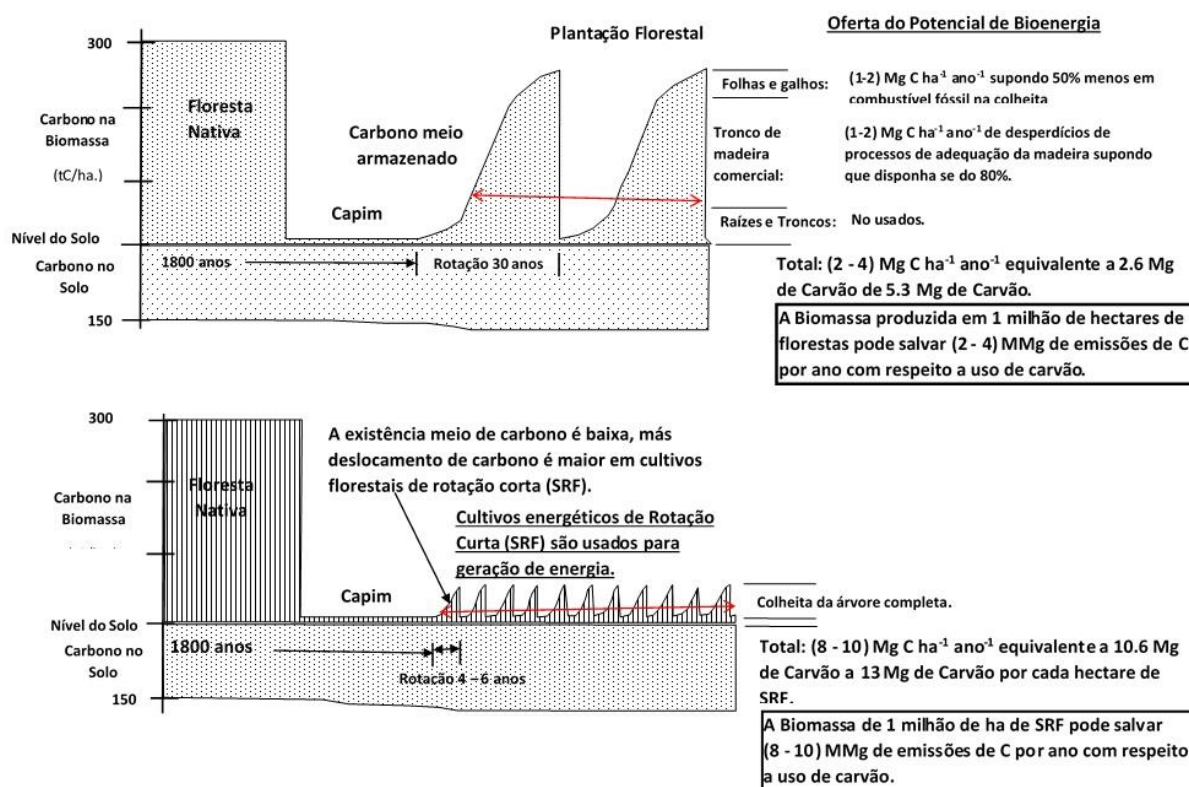


Figura 2.1. Sequestro de Carvão pela biomassa e o solo
Fonte: (SIMS, 2004)

Note-se que a dinâmica do carbono nos cultivos energéticos florestais - CEF - é diferente a das florestas nativas e depende do tempo de rotação que, por sua vez, afeta a quantidade de carbono capturado por ano. Isto sugere que a sustentabilidade da CEF como sumidouro de

carbono é função do uso simultâneo dos solos e da complementaridade dos ciclos de produção dos cultivos, onde os CEF de ciclo longo - madeireiros - são acumuladores de carbono a longo prazo e os de ciclo curto - herbáceos - são acumuladores de carbono com disponibilidade de energia renovável imediata a curto prazo.

2.3 SUSTENTABILIDADE E CULTIVOS ENERGÉTICOS

De acordo com a Agência de Política Ambiental dos EUA (EPA), a sustentabilidade é a harmonia produtiva que pode existir entre o homem e a natureza, que permite cumprir as exigências sociais, econômicas e de qualquer outro tipo das gerações presentes e futuras (EPA, 1999). Ou seja, a sustentabilidade é cumprida quando o projeto agroenergético tem um saldo de CO₂ negativo ou, pelo menos, neutro ao longo do ciclo de vida, além de incluir também outros aspectos como o ecológico, o cultural, o salubre e o econômico. Se qualquer desses aspectos não está incluído, pode pertencer a condições equitativas, toleráveis ou viáveis, mas não é sustentável.

Um enfoque geral da sustentabilidade para projetos agroenergéticos pode se descrever através de indicadores que evidenciem a dinâmica do projeto no local de implementação, integrado às rotas tecnológicas na produção dos cultivos y transformação para seu aproveitamento na geração de energia elétrica, além de garantir os limites máximos permitidos na legislação ambiental vigente sem degradação ao ambiente. Ver Figura 2.2. Complementarmente, neste tipo de projetos é necessário demonstrar a oferta sustentável da biomassa, condições viáveis para o negócio e programas de governo para o apoio social.

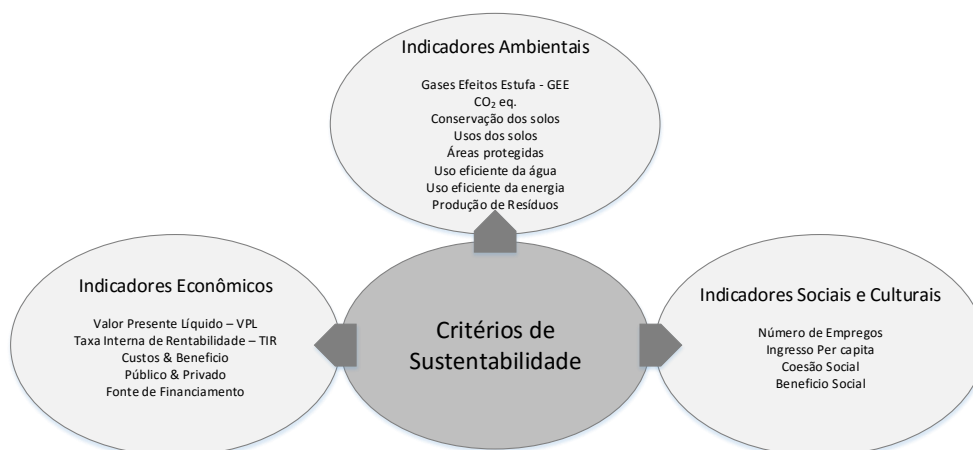


Figura 2.2 Critérios de sustentabilidade para de projetos agroenergéticos
Adaptado de: RIVA; FOPPAPEDRETTI; DE CAROLIS (2012)

Assim, o ponto de partida para garantir a sustentabilidade do cultivo energético é o cumprimento das leis da termodinâmica, além de disponibilidade e acesso às tecnologias para a produção agrícola e geração de energia no local onde vai ser implantado o projeto e o lucro econômico que o investimento deve gerar para que seja atraente. Finalmente, deve-se cumprir a legislação ambiental vigente e, assim, assegurar que os impactos sejam mais baixos do que os benefícios ambientais obtidos, tanto em cultura como em geração.

Na fase de produção de biomassa, é necessário projetar um sistema de gestão para o aproveitamento dos cultivos energéticos em função dos solos, das condições climáticas e da rota de carboxilação das espécies vegetais na busca da sustentabilidade.

Dessa forma, os cultivos energéticos podem ser a solução ideal aos problemas atuais de energia pois são fontes de carbono renovável através da captura de CO₂ do ambiente, hoje com altas concentrações na biosfera, e dispõem de capacidade de aproveitar e recuperar solos degradados, regularizar o ciclo da água e reciclar nutrientes, minimizando o conflito entre segurança energética, segurança alimentar e conservação ambiental.

Neste sentido, é importante abordar a implantação deste tipo de projetos mediante sistemas Agroenergéticos através de potenciais teóricos, técnicos e econômicos.

2.4 POTENCIAL DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA AGROENERGÉTICO

Pode-se considerar um sistema Agroenergético aquele que gera energia elétrica a partir de combustíveis alternativos produzidos com insumos agrofloretais mediante tecnologias termoquímicas buscando eliminar o conflito entre a produção de alimentos e a geração de bioenergia, recuperar terrenos degradados aproveitando, assim, as potencialidades agroambientais.

Para uma abordagem global destes sistemas, é necessário o estudo do potencial de implantação, que está composto pelo potencial teórico, pelo potencial técnico e pelo potencial econômico interligados à biodiversidade. Ver Figura 2.3.

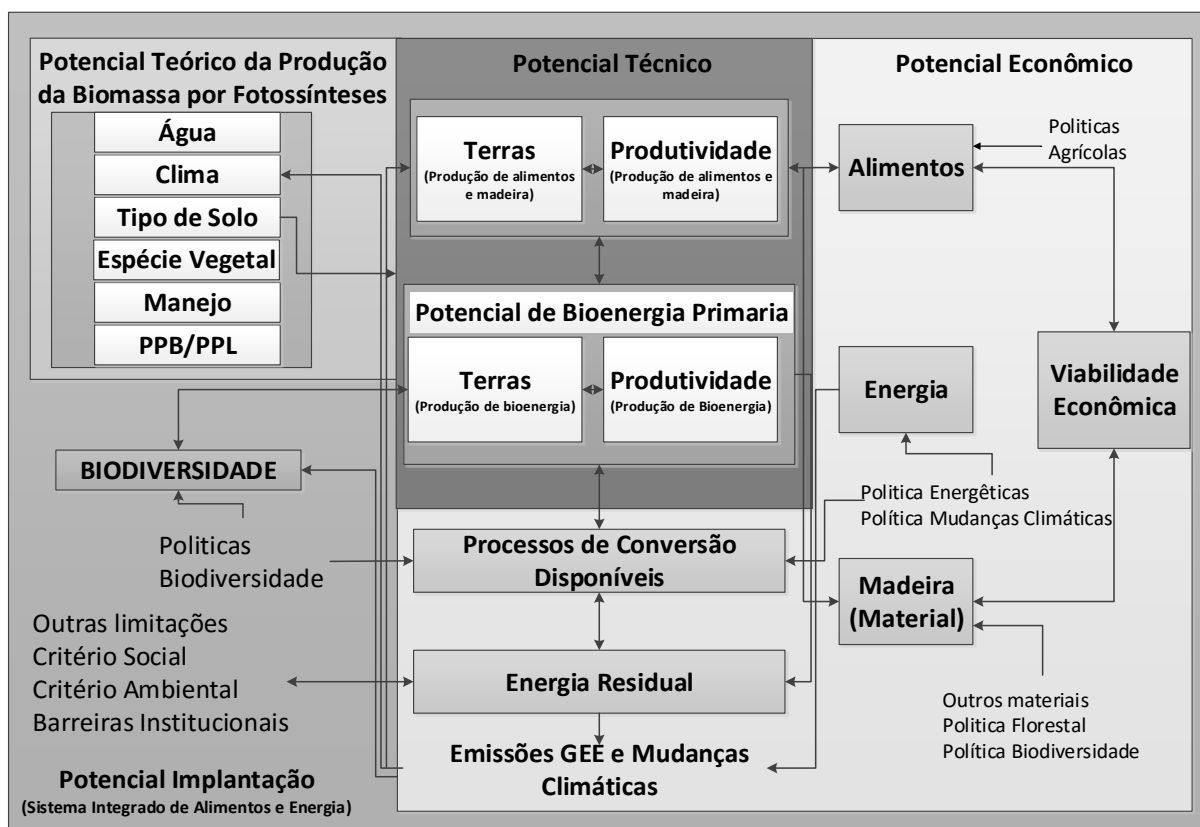


Figura 2.3. Potencial de implantação de um sistema Agroenergético.
Fonte: Adaptado de SMEETS; LEMP; DEES (2010)

Um sistema Agroenergético é muito complexo pois inclui aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais, além da importância de identificar as melhores potencialidades agroambientais para cada cultivo selecionado, controlando os produtos do sistema mediante indicadores adequados para garantir que o custo da energia elétrica acessível tenha baixas emissões de CO₂. É necessário também que as políticas públicas e de gestão estejam de acordo com as necessidades de desenvolvimento deste tipo de sistema no país.

2.4.1 Potencial teórico da produção da biomassa por fotossíntese

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC - define o potencial teórico como a quantidade de energia física que poderia ser usada em um local específico e durante um determinado período (por exemplo, ao longo de um ano inteiro). No contexto dos Sistemas Agroenergéticos, o potencial teórico está condicionado a água, clima, tipo de solo, espécie vegetal, manejo na produção da espécie e produção primária bruta de biomassa-PPB – e/ou produção primária líquida de biomassa- PPL.

Estas informações têm muita importância para se fazer a seleção da espécie madeireira e herbácea com maiores PPB e PPL para a geração de energia elétrica ambientalmente sustentável.

2.4.1.1 Água

A água é uma das mais importantes substâncias da crosta terrestre. É o constituinte do protoplasma celular em proporções que podem alcançar 95% do peso total. No protoplasma, ela participa em importantes reações metabólicas tais como as fotossínteses e a fosforilação oxidativa. Nas plantas, a água tem a função de manter o turgor celular, responsável pelo crescimento vegetal, o que é um fator fundamental na produção vegetal. Sua falta ou seu excesso afeta decisivamente o desenvolvimento das plantas (REICHARDT, 1985). Daí a importância de se fazer balanços hídricos para a quantificação e análise de sua disponibilidade para projetos que envolvam a produção de biomassa como fonte de energia.

2.4.1.2 Clima

O clima é um sistema com vários componentes que intercambiam continuamente matéria e energia mediante processos governados pela energia procedente do sol (FUENTES Y., 2000). Esses componentes são a atmosfera, a hidrosfera, a biosfera e a litosfera. Suas interações proveem a disponibilidade da luz solar, temperatura do ar, chuvas, velocidade dos ventos que, por sua vez, geram processos como a evapotranspiração, que é fundamental para a produção de biomassa.

2.4.1.3 Solos

Os solos são uma cobertura fina sobre a superfície da terra, com uma espessura que varia de centímetros a vários metros. Permitem o enraizamento das plantas para que possam obter a água, o oxigênio e os nutrientes e são a base de todos os ecossistemas terrestres, o que torna possível a vida na terra (PORTA CASANELLAS, 2008).

O crescimento da biomassa vegetal está necessariamente associado ao estabelecimento do equilíbrio entre os requerimentos que possuem os cultivos e as condições que o entorno edafoclimático pode oferecer-lhe (SALGADO, 2001). Os solos, como parte integral do meio produtivo, constituem-se no suporte das atividades do homem dirigidas ao aproveitamento de seu potencial produtivo e são uma fonte de nutrientes para a cobertura vegetal.

O valor agrícola do solo reside nas qualidades que possui para sua capacidade produtiva e é diretamente proporcional à produtividade dos cultivos, dependentes do clima, a fisiografia do sitio e os processos pedogenéticos (USDA/NRCS, 2010). A maneira sistemática de agrupar estas características é a classificação agrológica ou potencial de uso dos solos, cuja importância é valorizar o grau de aproveitamento agrícola, pecuária e florestal a que pode someter-se um terreno sem estragar sua capacidade produtiva. Ver Figura 2.4.

GRAUS DE EROSÃO	GRAUS DE DECLIVE					
	A 0-3%	B 3-8%	C 8-15%	D 15-25%	E 25-35%	F Mas de 35%
PRATICAMENTE SEM EROSÃO	Aconselhável para tudo cultivo I	II	III	V	VI	
MUITO SUAVE	Aconselhável para cultivos com praticas simples de conservação			Aconselhável para pastoreio sim restrição no uso	Aconselhávelpar a pastoreio ou florestas com moderada restrição no uso	
SUAVE	Aconselhável para cultivos com praticas intensivas de conservação					
MODERADA			IV			
SEVERA DE MENOR GRAVIDADE	Aconselhável para cultivos limitado com práticas intensivas de conservação			VII		
SEVERA COM ALGUMAS TRINCHEIRAS	Aconselhável para pastoreio o silvicultura com severa restrição no uso				VIII	
SEVERA, MUITO SEVERA COM TRINCHEIRAS O EROSÃO MANTIFORME MUITO AVANÇADA	Aconselhável para recreio e refúgio da fauna					

Figura 2.4. Potencial de uso dos solos
Fonte: Adaptado de FAO (1977)

A identificação do potencial teórico de geração de energia elétrica a partir de cultivos energéticos no Brasil, inicia-se com a identificação da oferta agroambiental que há em seu território.

2.4.1.4 Espécies vegetais

As espécies vegetais têm importância para a humanidade pelos múltiplos produtos que se podem obter delas, além de sua importância para o desenvolvimento econômica dos países e o equilíbrio ecológico para o planeta.

Em princípio, qualquer espécie vegetal pode ser usada como combustível em sistemas energéticos para a geração de energia, devido ao conteúdo de carbono que tem na sua estrutura. Mas, para seu uso como combustível, tem que se cumprir com os requisitos de sustentabilidade.

2.4.1.5 Produção Primária Bruta (PPB) e Produção Primária Líquida (PPL).

A PPL é a quantidade de carbono capturado por ano pelas plantas a través do processo fotossintético. É importante para os seres humanos porque a maior parte de nossos alimentos, materiais e combustível deriva-se dos vegetais (MELILLO; MCGUIRE; KICKLIGHTER, 1993). A PPL pode ser estimada mediante a Equação 2.2.

$$PPL = PPB - Ra \quad 2.2$$

A PPB é a taxa em que um sistema captura e armazena a energia química como biomassa no tempo; Ra é a taxa de respiração das plantas ou energia gasta pela planta.

Então a PPL se vê refletida no potencial de produção energética da biomassa madeireira e herbácea, PE, que é o resultado da combinação da quantidade de matéria seca produzida e de seu poder calorífico. Uma estimativa da quantidade de matéria seca é a multiplicação do volume de madeira colhido por sua densidade básica e o poder calorífico inferior. Ver equação 2.3.

$$PE = V \times D_b \times PCI \quad 2.3$$

PE: Potencial Energético (kJ ha^{-1}). V: volume de biomassa ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$). Db: Densidade básica (kg m^{-3}). PCI: Poder calorífico Inferior (kJ kg^{-1}).

O poder calorífico pode ser determinado utilizando uma bomba calorimétrica (Norma STM D-2015), que mede o calor liberado pela combustão do biocombustível na atmosfera. Esta técnica determina o poder calorífico superior (PCS) a volume constante, que pode ser convertido em poder calorífico inferior por métodos analíticos.

2.4.2 Potencial técnico da geração de eletricidade a partir de cultivos energéticos

O potencial técnico representa a geração de energia possível através de uma tecnologia determinada em função do desempenho do sistema, as limitações ambientais e restrições no uso da terra. LOPEZ *et al.*, (2012) afirmam que a principal vantagem de avaliar o potencial técnico é que o mesmo estabelece uma estimativa do limite superior de desenvolvimento de qualquer tecnologia, incluindo o combustível usado por estas tecnologias para a geração de energia elétrica.

Os cultivos energéticos madeireiros ou herbáceos fornecem biomassa que pode ser usada como combustível renovável na geração de energia elétrica. Segundo VAN SPRONSEN *et al*, (2011), estão compostos principalmente por celulose (35-50%), hemicelulose (20-35%) e lignina (5-30%). Além disso, encontram-se também sais de K, P, Cl, S entre outros. Estes compostos têm energia armazenada e precisam reagir com agentes oxidantes para gerar potência. Isto obriga a escolher a tecnologia mais viável.

Na escolha da tecnologia, devem-se estudar as diferentes rotas tecnológicas existentes para a geração de energia elétrica a partir de cultivos energéticos. No presente trabalho vamos nos concentrar nas rotas termoquímicas de combustão e gaseificação. A primeira, com o Ciclo Rankine Convencional (CRC) e o Ciclo Rankine Orgânico (ORC) operando com diferentes expansores. A segunda rota a estudar é a gaseificação acoplada a um motor de combustão interna e a uma turbina de queima externa.

2.4.2.1 Geração de energia elétrica mediante a combustão

A combustão é uma alternativa tecnológica de aproveitamento da energia química da biomassa para a geração de energia em pequena e média escala, consistente em queimar a biomassa com oxigênio suficiente para liberar calor (gases a alta temperatura). O calor é utilizado diretamente no aquecimento de água e/ou óleo térmico a fim de produzir vapor e acionar expansores (turbinas ou parafusos) e motores Stirling. Este vapor também pode ser usado como fluido de trabalho num sistema com turbina de queima externa. Uma vez é acionado qualquer expansor ou turbina de queima externa com o vapor, pode-se gerar eletricidade de maneira econômica com eficiência relativamente alta. A combustão demanda menos qualidade do combustível (até 60% de conteúdo de umidade, consistência heterogênea e tamanho de partículas) em relação à gaseificação.

Uma vez convertida a energia química da biomassa em energia térmica / calor (gases a altas temperaturas), a tecnologia mais comum na geração de energia a partir da biomassa é o Ciclo Rankine Convencional (CRC) ou ciclo a vapor de água, mas é pouco utilizado em pequena escala pela redução na eficiência e custo elevado em potências inferiores a 2 – 5 MWel. Porém, existem outras tecnologias disponíveis para a geração de energia na faixa de referência, tais como o ciclo Rankine orgânico (ORC) ou a turbina de queima externa (EFGT).

2.4.2.1.1 Ciclo Rankine Convencional (CRC)

O CRC é o ciclo geralmente utilizado nas usinas termoeletricas, utiliza vapor de água como fluido de trabalho e como expensor (turbinas axiais). Esse ciclo tem os seguintes componentes: caldeira a vapor, turbina, condensador e bomba de alimentação. Os processos principais do CRC são: adição de calor à pressão constante na caldeira, seguida de uma expansão isentrópica do vapor na turbina, uma rejeição de calor à pressão constante no condensador e, por último, uma compressão isentrópica na bomba. Ver Figura 2.5a.

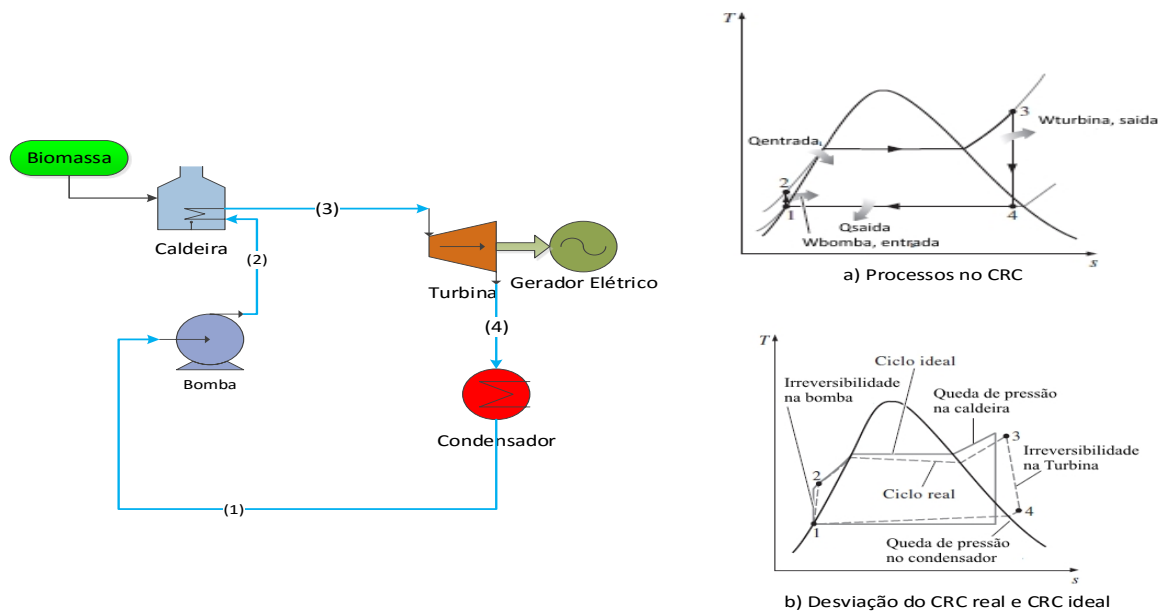


Figura 2.5. Ciclo Rankine Convencional

O CRC real difere do CRC ideal pelas irreversibilidades nos diferentes componentes, sendo as fontes mais comuns o atrito do fluido e as perdas de calor ao ambiente. As irreversibilidades especialmente importantes ocorrem no interior da bomba e da turbina. Assim uma bomba requer mais insumo e mais trabalho, porém uma turbina produz uma saída de trabalho menor como consequência das irreversibilidades. Ver figura 2.5b.

O CRC por sua natureza e parâmetros é relativamente pouco eficiente. Pode-se esperar eficiências entre 7 e 15% para uma pressão típica do vapor de 20 bar. Este valor de eficiência depende também da temperatura do vapor, a eficiência dos equipamentos que compõem o ciclo e do tipo de turbina utilizado, seja de contrapressão ou condensação (SILVA L; QUINTERO B.; ESCOBAR P., 2015).

2.4.2.1.2 Ciclo Rankine Orgânico (ORC)

O ORC é uma tecnologia com grande potencial para a geração elétrica e calor em pequena escala com qualquer tipo de biomassa como combustível, devido principalmente a sua disponibilidade comercial, relativa alta eficiência em aplicações de pequena escala e facilidade de operação.

QUOILIN *et al.* (2013), RUA OROZCO *et al.* (2012), (TCHANCHE *et al.*, 2011) mostram as vantagens e desvantagens de cada ciclo, segundo os parâmetros termodinâmicos do fluido do trabalho, temperatura e pressão de operação do sistema. Ver Tabela 2.1. O fluido de trabalho é um fluido orgânico que é vaporizado para acionar um expensor (turbina radial, turbina axial ou expensor de parafuso).

Tabela 2.1 Vantagens e desvantagens dos ciclos CRC e ORC

Vantagens e desvantagens do ORC	Vantagens e desvantagens do CRC
Não requer superaquecimento e o risco de erosão das pás das turbinas é evitado.	Maior eficiência.
Baixa temperatura na entrada da turbina.	Fluido de trabalho de baixo custo e elevada disponibilidade.
Sistema Compacto (maior densidade do fluido).	Fluido de trabalho amigável com o ambiente (zero Potencial de Aquecimento Global (GWP), zero Potencial Redução de Ozônio (ODP)).
Baixa pressão de evaporação do fluido de trabalho.	Fluido de trabalho não inflamável e não tóxico.
Elevada pressão de condensação do fluido de trabalho.	Elevado coeficiente de transferência de calor, pela viscosidade baixa da água.
Não requer sistema de tratamento de água.	Baixa perda de pressão no sistema.
A queda da entalpia na turbina diminui devido a uma menor diferença de temperatura entre a evaporação e a condensação, pelo que são usadas turbinas menos complexas, ou seja, turbinas de um estágio ou de dois estágios o que implica menor custo.	Fluido de trabalho de alta estabilidade química.
Não requer redutor no gerador elétrico pela sua baixa velocidade de rotação devido à queda menor de entalpia na turbina.	A relação de pressão e a queda de entalpia na turbina são muito elevadas, por conseguinte se requer turbinas de expansão com múltiplos estágios.
Pouca variação da eficiência elétrica do sistema quando operando em cargas parciais, na faixa de 50 a 100% dos valores nominais.	Precisa de superaquecimento para evitar a condensação durante a expansão e diminui o risco de erosão das pás das turbinas.
Alta eficiência da turbina, acima de 85%.	Excesso de pressão no evaporador.
Não requer sistema de tratamento de água.	Turbinas complexas e caras.
O uso de óleo térmico permite a operação da caldeira a baixas pressões.	É mais adequada para aplicações de alta temperatura e grandes instalações centralizadas.

Fonte: QUOILIN *et al.* (2013), (RUA OROZCO *et al.*, 2012), (TCHANCHE *et al.*, 2011), (SILVA *et al.*, 2012)

O ORC que utiliza biomassa como combustível trabalha com maiores níveis de temperatura, geralmente com uma temperatura máxima do fluido orgânico ao redor de 327 °C e temperatura de condensação, em torno de 97 °C, o que restringe a seleção do fluido (SILVA et al., 2012). Então, a escolha do fluido de trabalho e a temperatura de operação num ORC, acabam definindo a eficiência do ciclo (RAYEGAN; TAO, 2011), que a sua vez está fortemente relacionada com as propriedades termo físicas do fluido de trabalho (KUO et al., 2011).

Existem muitas substâncias com potenciais para uso em ORC. SHU et al. (2014) apresenta algumas delas: Hidrocarbonetos (HC), hidrofluorcarbonetos (HFC), hidroclorofluorcarbonos (HCFC), clorofluorcarbonetos (CFC), perfluorcarbonetos (PFC), Siloxanos, álcoois, aldeídos, éteres, Hydrofluoroethers (HFE), aminas, misturas de fluidos (zeotrópicas e azeotrópicas), fluidos inorgânicos, etc. Assim, concentra-se a discussão em qual destes grupos está o melhor fluido de trabalho para um ORC.

Agora, de acordo com os parâmetros de funcionamento do ORC (temperatura e pressão), é necessário ter em conta certo número de considerações para a escolha do fluido de trabalho. Portanto, TCHANCHE *et al.*, (2011) propõe considerar como principais características na seleção do fluido de trabalho a curva de saturação do vapor com zero ou inclinação positiva (ds/dt), calor latente de vaporização (elevado), densidade (elevado líquido /fase de vapor), calor específico (elevado), parâmetros críticos (temperatura, pressão), pressões de evaporação e condensação (aceitáveis), propriedades de transferência de calor (de baixa viscosidade, alta condutividade térmica), estabilidade química e térmica (estável à alta temperatura), compatibilidade com materiais (não-corrosivo), desempenho termodinâmico (alta eficiência energética / exergética), características de segurança (não-tóxico e não inflamável), impactos ambientais (baixo ODP, de baixo GWP), baixo custo e boa disponibilidade.

De acordo com a inclinação da curva de vapor saturado no diagrama de temperatura-entropia, como é mostrado na Figura 2.6, o fluido de trabalho de um ORC pode ser classificado em:

- (a) Fluido isentrópico: para este tipo de fluido a inclinação da curva de vapor de saturado é vertical;
- (b) Fluido seco: para este tipo de fluido a inclinação da curva de vapor saturado é positiva;

(c) Fluido úmido: para este tipo de fluido a inclinação da curva vapor de saturado é negativo.

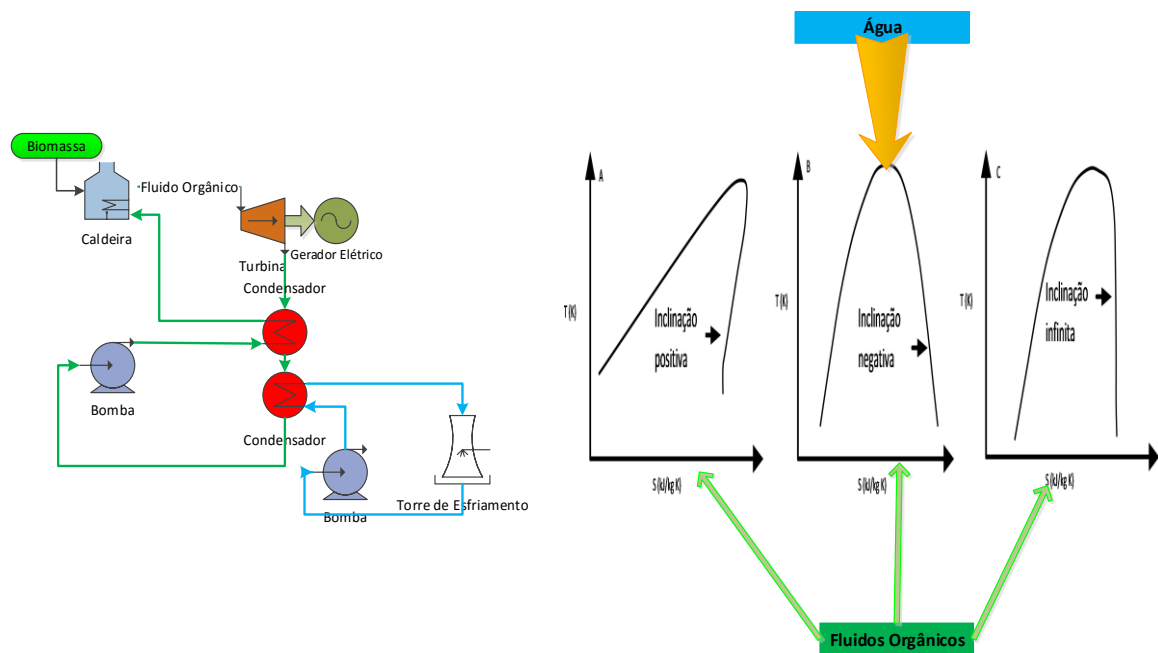


Figura 2.6. Gráfica dos diferentes tipos de fluidos para um ORC

Na Figura 2.6, é possível observar que o fluido úmido é normalmente inadequado para o sistema ORC devido a uma possível condensação do fluido, principalmente se a qualidade do vapor é menor que 85%, o que implica possíveis estragos nas pás da turbina. Tanto o fluido seco como o fluido isentrópico pode apresentar a desvantagem de aumentar os custos de instalação por possuir temperaturas muito elevadas, requerendo turbina multi-estágio (LIU; CHIEN; WANG, 2004).

Os fluidos "secos", têm alta densidade, elevado peso molecular e baixa temperatura de ebulição, pelo que é tecnicamente mais viável para pequenas capacidades do que a água, que é um fluido "úmido". Estas características permitem reduzir a temperatura de operação pelo fato de que não se requer superaquecimento do vapor atingindo, uma eficiência elétrica competitiva com baixas temperaturas e baixas emissões (VANKEIRSBILCK; VANSLAMBROUCK, 2011 & TENNIGKEIT; KALLWEIT; BUCHHOLZ, 2006).

A utilização de calor de baixa temperatura (menores de 250 °C), média temperatura (entre 250 – 500 °C) e alta temperatura (maiores a 500 °C) foi extensivamente estudada no passado. Alguns estudos recentes sobre a utilização de ORC demostram que podem alcançar elevadas eficiências com fontes de calor variadas. Em geral, fontes de calor de “baixa temperatura”

podem ser utilizadas em sistemas de geração de energia de ORC, no entanto, aplicações com fontes de “alta temperatura” têm atraído grande interesse nos últimos anos. Em contraste, há menos conhecimento sobre aplicações "de alta temperatura" do que em parâmetros e fluidos de trabalho de "baixa temperatura". (SHU *et al.*, 2014 & SIDDIQI; ATAKAN, 2012).

Hoje em dia, os fluidos de trabalho tipo alcanos têm sido empregados pelos fabricantes de ORC, a fim de alcançar um melhor desempenho do sistema em algumas aplicações à alta temperatura, além de terem propriedades termodinâmicas de fluido seco e amigável com o meio ambiente (SHU *et al.*, 2014). Mas, no entanto, ALGIERI; MORRONE (2012) avaliaram alcanos cíclicos e alcanos lineares como fluidos de trabalhos em sistemas térmicos com biomassa encontrando que a eficiência térmica do fluido depende das condições operacionais. Então, quanto maior foi a temperatura e trabalho, maior o desempenho do sistema. Por outro lado, SIDDIQI; ATAKAN (2012) encontraram que para os sistemas ORC que operam na temperatura de 773,15 K o tolueno e n-dodecane parecem ser os fluidos mais adequados. Para baixa temperatura (523.15 K) os hidrocarbonos n-hexano e n-pentano tiveram um bom desempenho. No caso em que a temperatura seja de 623,15 K, o tolueno, n-octano e a água são adequados.

Na Tabela 2.2, pode-se ver as características termodinâmicas de alguns fluidos de trabalho tipo alcanos, dis quais foi usado neste trabalho o pentano. Na Figura 2.7, os limites de pressão e temperatura para diferentes fluidos tipos alceno.

Tabela 2.2. Características termodinâmicas dos alcanos

Nome	n	T _{crit} (°C)	P _{crit} (kPa)	Z (J kg ⁻¹ K ⁻²)	Tipo	M (g mol ⁻¹)	ODP	GWP
Pentano	5	196,55	3370	1,7151	Seco	72,149	0	Muito baixo
Hexano	6	234,67	3034	1,9675	Seco	86,175	0	Muito baixo
Heptano	7	266,98	2736	2,1141	Seco	100,200	0	Muito baixo
Octano	8	296,17	2497	2,1943	Seco	114,230	0	Muito baixo
Nonano	9	321,40	2281	2,2500	Seco	128,26	0	Muito baixo
Decano	10	344,55	2103	2,2765	Seco	142,28	0	Muito baixo
Isopentano	5	187,20	3378	1,8098	Seco	72,1490	0	Muito baixo
Isohexano	6	224,55	3040	2,1227	Seco	86,175	0	Muito baixo
Ciclopentano	5	238,54	4515	0,1902	Isentrópico	70,133	0	Muito baixo
Ciclohexano	6	280,49	4075	0,7740	Isentrópico	84,161	0	Muito baixo

Fonte: SHU *et al.* (2014)

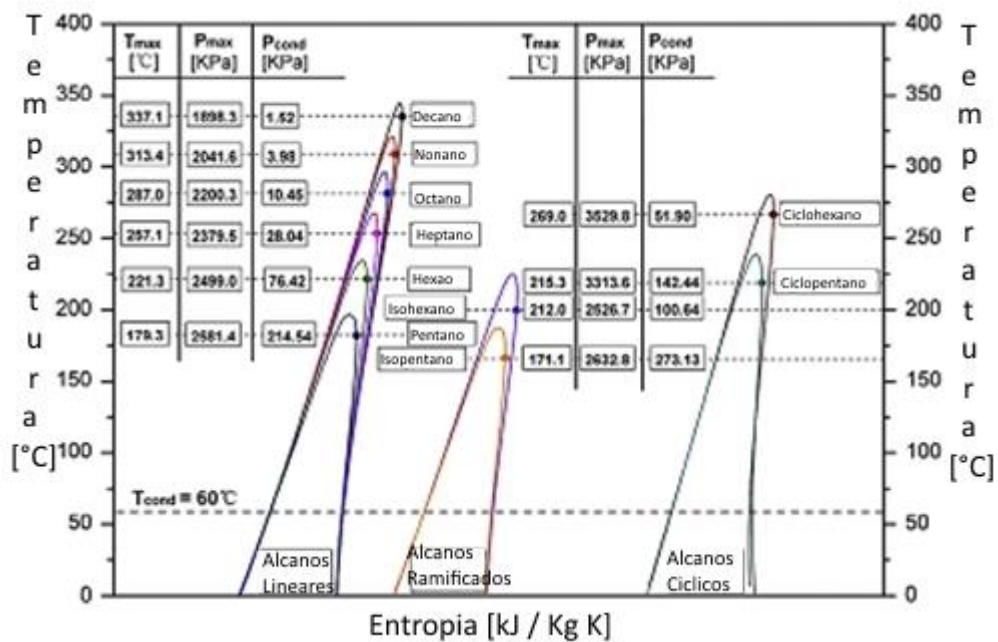


Figura 2.7 Condições limites para diferentes fluidos tipo alcanos

Fonte: SHU *et al.* (2014)

Se existisse um fluido de trabalho ideal para os ORC, HANDAYANI *et al.* (2012), WILSON (1986), WEST; PATTON; STARLING (1979), afirmaram em seus estudos, que um fluido de trabalho poderia ser razoavelmente bem caracterizado pelos seguintes requisitos:

- 1) A pressão do fluido de trabalho no ponto de condensação inicial no condensador deve ser tão baixa quanto possível para minimizar o custo do condensador por unidade de área de transferência de calor, porque esta é uma função do aumento da pressão, mas deve ser superior à pressão atmosférica para evitar fugas de ar no sistema.
- 2) A expansão do fluido de trabalho na linha de vapor saturado em um diagrama de temperatura-entropia deve ser quase vertical (fluidos secos) para evitar superaquecimento excessivo nos tocadores de calor e condensação na saída da turbina. O superaquecimento é indesejável porque os coeficientes de transferência de calor na região superaquecida são menores do que no ponto de ebulição e regiões de condensação. A condensação na turbina é indesejável para as de turbinas de fluxo axial, devido à perda de cerca de 1% na eficiência para cada ponto percentual de líquido que se formou (perda insignificante devido à condensação nas turbinas radiais de influxo). A

condensação na turbina é também indesejável devido aos problemas potenciais de manutenção criada pela erosão do líquido.

- 3) A variação de entalpia específica do fluido de trabalho na turbina deve ser grande para maximizar a eficiência do ciclo termodinâmico e minimizar seu fluxo mássico. No entanto, se a variação de entalpia específica se torna demasiado grande, menos eficiente e mais onerosa, será necessário utilizar turbinas multi-estágio. Assim, existe uma faixa ótima.
- 4) A pressão de entrada na turbina deve ser relativamente baixa para minimizar o calor residual do trocador de calor, ou seja, minimizar o custo por unidade de área de superfície de transferência de calor, que é uma função de aumento de pressão.
- 5) O fluido de trabalho deve ser termicamente estável até ao limite da temperatura mais elevada de funcionamento esperada.
- 6) Paralelamente, a curva de arrefecimento do calor sensível disponível na fonte de calor e o fluido de trabalho, devem ter um pequeno calor de vaporização e uma capacidade térmica correspondente. A razão para esta idealização é maximizar a recuperação da energia à mais elevada disponibilidade.
- 7) O volume específico do fluido de trabalho na saída da turbina deve ser pequeno para manter pequeno também o tamanho da turbina (o diâmetro da turbina é proporcional à raiz quadrada do caudal volumétrico do fluido de trabalho).
- 8) Coeficientes de condutividade térmica do fluido de trabalho em líquido ou vapor devem ser grandes, para minimizar a superfície de transferência de calor. Correlações de coeficientes de transferência de calor por convecção que mostram valores elevados de condutividade térmica e baixos valores de viscosidade são desejadas.
- 9) A viscosidade do fluido de trabalho na fase líquida e de vapor deve ser baixa para minimizar as quedas de pressão por atrito e maximizar os coeficientes de transferência de calor convectivos.
- 10) O fluido de trabalho deve ser estável, essencialmente não incrustante, não corrosivo, não tóxico e não inflamável. No mínimo, devem existir métodos de manuseio seguro.

Além da turbina, os trocadores de calor são dispositivos muito importante no funcionamento do ORC. Nestes o ponto pinch é fator determinante na eficiência do ciclo e é definido como o ponto em que a diferença de temperatura entre a fonte quente e o fluido frio é mínima (HATTIANGADI, 2013).

Embora um projeto detalhado de trocador de calor está fora do escopo deste trabalho, uma análise de ponto pinch dos trocadores de calor presentes no sistema foi feita.

2.4.2.1.3 Expansores para os CRC e ORC

Os fluidos orgânicos apresentam vantagens significativas em uma variedade de aplicações; A mais importante é a possibilidade de projetar ou selecionar turbinas econômicas e eficientes para faixas de temperatura em que uma turbina a vapor se torna desinteressante e ineficiente. Por isso, é necessário usar o tipo certo de expensor em um ORC.

Em relação ao desempenho de um ORC, o tipo de expensor é determinante, em conjunto com o tipo de fluido e a temperatura de trabalho. Segundo SILVA, E. *et al.* (2012), os expansores se encontram classificados em dois tipos: deslocamento positivo e turbinas. Num ORC, pode ser utilizada tanto turbinas axiais como radiais, sendo que as radiais garantem maiores eficiências isentrópicas em pequenas capacidades.

O tipo de expensor é determinado pela velocidade do eixo, a taxa de fluxo de massa e a potência nominal. Desenvolvimentos em sistemas ORC para aplicações em pequena escala (10 – 3000 kW) permitiram estabelecer uma metodologia de seleção do expensor, que abrange expensor de espiral, expensor de parafuso e turbina radial. A aplicação de expansores de espiral é limitada à geração de energia inferior a 30 kW, devido ao vazamento excessivo como aumento do diâmetro e altura de rolagem (QUOILIN; DECLAYE; LEMORT, 2010). Um expensor de parafuso foi adotado por ElectraTherm num ORC para 100 kW (QIU; LIU; RIFFAT, 2011). No entanto, o expensor de parafuso não é tão amplamente validado como o expensor de espiral e a turbina radial. As Turbinas radiais são preferíveis para uma ampla gama de sistemas de geração de energia que variam de 10 KW a alguns MW.

Existem algumas aplicações em escala industrial, com módulos ORC comercialmente disponíveis, no intervalo de 1 kW a 3 MW de potência e até 7 MW de potência para CRC (Tabela 2.3).

A quantidade de usinas instaladas com esta tecnologia está em crescimento rapidamente e a mesma está madurando e demonstrando ser rentável. Hoje existem más de 100 unidades ORC em operação no mundo. Na Tabela 2.4, apresentam-se alguns custos específicos do investimento de algumas rotas termoquímicas utilizados para o aproveitamento da biomassa florestal e do calor residual.

Tabela 2.3 Tecnologias ORC e CRC comercialmente disponíveis para geração de eletricidade com biomassa.

Sistema	Expansor	Potência	Desenvolvimento da Tecnologia	Referência
ORC	Expansor de parafuso	4 kW– 350 kW	Protótipo	(QIU; LIU; RIFFAT, 2011 & “Ormat Technologies Inc.,” 2012 & “WSK Kehl,” 2012 & “ElectraTherm,” 2012 & “Heliex Power,” 2012 & “Bosch KWK Systeme,” 2012)
	Turbina Radial de dois estágios	300 kW – 2 MW	Módulo Comercial	(“Turboden”, 2012)
	Turbina Axial	300kW – 2.4 MW	Módulo Comercial	(“GMK ORC,” 2012 & “Adoratec,” 2012)
	Turbina Radial	1 kW – 50 kW	Protótipo	(KANG, 2012 & WELCH; BOYLE, 2009 & “Infinity Turbine ®,” 2012 & “Green Energy Australasia,” 2012 & “Zuccato Energia,” 2012)
CRC	Expansor de parafuso	4 kW – 300 kW	Protótipo	(ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA, 2008)
	Turbina Axial	2 MW – 7 MW	Módulo Comercial	(“Turboden”, 2012)
	Turbina Radial	300 kW	Módulo Comercial	(WELCH; BOYLE, 2009 & “ergion gmb,” 2012)

Tabela 2.4 Custos específicos de investimentos para tecnologias de conversão termoquímica em sistemas Combustão-CRC e Combustão-ORC.

Rotas Termoquímicas	Potência (kWe)	Custos Específicos de Investimentos (USD\$ kWh ⁻¹)	Referência
Calor Residual – ORC	4 – 250	2900 - 1800	(QUOILIN <i>et al.</i> , 2011 & VANSLAMBROUCK; VANKEIRSBILCK, 2011 & “Calnetix,” 2012)
Combustão - CRC	500 – 3000	2800 - 1500*	(ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA, 2008)
Combustão – ORC	150 – 2000	3950 – 1300	(VANSLAMBROUCK; VANKEIRSBILCK, 2011)

*Custos atualizados até 2013 com uma taxa de inflação de 6%

2.4.2.1.4 Geração de energia elétrica mediante combustão em Turbina de Queima Externa (EFGT)

O ciclo EFGT é considerado como uma opção para usar a biomassa na geração de energia elétrica e calor de maneira combinada através da combustão ou gaseificação. É uma máquina térmica baseada no ciclo Brayton ideal. BARSALI et al. (2015), a partir de estudos teóricos diz que uma EFGT integrada com um Gasificador, tem a oportunidade de alcançar maior eficiência elétrica do que as outras opções tecnológicas, quando a relação de pressão encontra-se no intervalo 3-4 e a diferença de temperatura é extremamente fria no trocador de calor.

O fluido de trabalho da turbina de gás pode ser disposto em duas formas: em ciclo aberto ou em ciclo fechado. Na turbina de gás de ciclo fechado (Figura 2.8b), os gases de escape da turbina são reciclados para o compressor, após ter sido arrefecida. No ciclo fechado o calor é

fornecido por meio de um trocador de calor, em vez da combustão direta da biomassa. Enquanto que no ciclo aberto o escape da turbina é liberado para o ambiente (Figura 2.8a). No ciclo aberto o calor é fornecido pela combustão direta da biomassa e sua configuração é a mais comum.

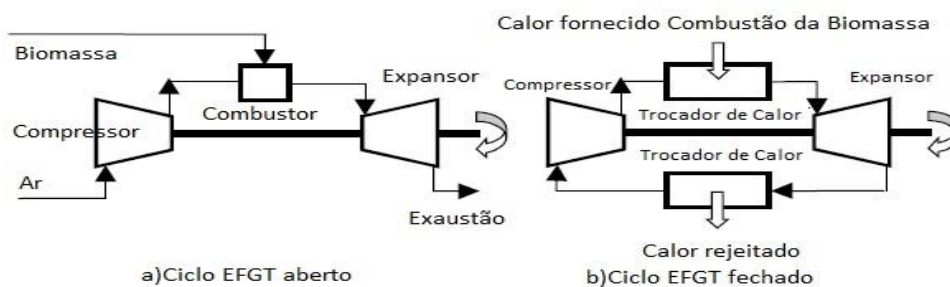


Figura 2.8 Ciclo EFGT com combustão

Em todo o mundo, existem apenas cerca de 20 turbinas a gás de ciclo fechado. A fábrica de turbinas a gás de ciclo fechado, talvez a mais conhecida, é a planta Oberhausen II construída na antiga República Federal da Alemanha em 1974 (ANHEDEN, 2000).

O ciclo EFGT tem quatro processos: dois isobáricos e dois isentrópicos. O fluido de trabalho (ar) é comprimido isentropicamente no compressor que transfere energia ao fluido. Após a sua compressão, o fluido recebe energia na câmara de combustão isobaricamente até atingir a temperatura necessária na entrada da turbina, onde o gás é expandido isentropicamente convertendo parte da energia em energia mecânica para a geração de eletricidade.

A faixa possível de capacidades para a geração de eletricidade é de 30 a 2000 kWel, adequada para a geração distribuída utilizando a biomassa como combustível e contribuindo para minimizar a emissão de CO₂. Geralmente a eficiência dos ciclos EFGT -combustor é ao redor de 13% (KAUTZ; HANSEN, 2007) enquanto que, para o ciclo EFGT –gaseificador, a eficiência é 29% com gaseificador de leito fluidizado e 23% para gaseificador de leito fixo (FERREIRA, 2002).

A principal vantagem da geração de energia elétrica com EFGT é que esse sistema pode partir e atinge a capacidade nominal, em apenas 10 a 20 minutos. Também sua fabricação pode ser mais rápida. As necessidades de água são muito menores que o CRC e o ORC. Estes sistemas EFGT têm desvantagens também, principalmente pelo consumo de combustível, devido à necessidade de maior quantidade de energia para acionar o compressor. Outra

desvantagem é que se requer uma temperatura de funcionamento maior do que em outros sistemas e isso pode encurtar o tempo de vida de alguns de seus componentes. Além disso, por causa de elevadas perdas da energia térmica, quando o escape é liberado, os níveis de eficiência das turbinas a gás são mais baixos do que os de outros tipos de centrais elétricas (KAUTZ; HANSEN, 2007 & BAINA et al., 2015 & PANTALEO; CAMPOREALE; SHAH, 2013).

2.4.2.2 Geração de Potência Mediante a Gaseificação

A gaseificação é uma combustão incompleta que acontece em duas etapas, onde o combustível sólido (biomassa florestal ou carvão) é convertido em um gás de baixo ou médio poder energético (MILNE; ELAM; EVANS, 2002) e é um processo complexo. Tipicamente segue as etapas mostradas na Figura 2.8.

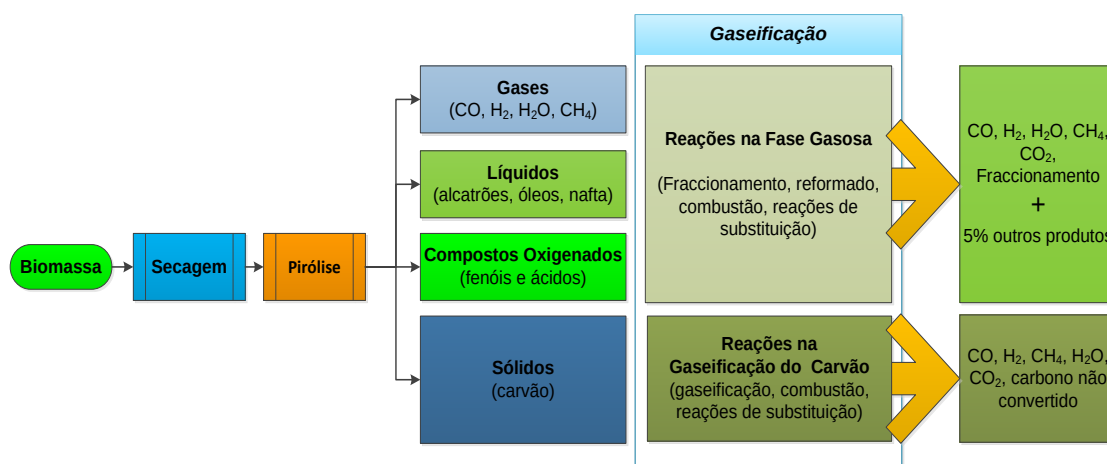


Figura 2.9 Etapas do processo da gaseificação
Fontes: adaptado de (BASU, 2010)

A gaseificação é uma tecnologia conhecida e pode se classificar segundo o agente oxidante usado: ar, vapor, oxigênio, vapor + oxigênio, ar enriquecido com oxigênio, etc. (GAO et al., 2008). Quando é usado oxigênio, gera um gás de síntese de mediano poder calorífico (10-15 MJ Nm⁻³), sendo que sua produção é mais cara. Quando o agente oxidante é o ar, o gás produzido é de baixo poder calorífico (4 - 6 MJ Nm⁻³). A composição é principalmente de 60% de N₂ e outros subprodutos (vapor de água, CO₂, hidrocarbonos leves, alcatrão, entre outros). E por último, quando o agente oxidante é vapor e/ou oxigênio, existe maior conversão dos hidrocarbonetos para gases estáveis (H₂, CO, CO₂, CH₄ e hidrocarbonetos leves), carvão e alcatrão. Este método tem alguns problemas como a corrosão e o envenenamento do

catalisador, embora se alcancem conteúdos de alcatrão baixos (SAXENA *et al.*, 2008 & KALINCI; HEPBASLI; DINCER, 2009).

A gaseificação da biomassa para a geração de energia elétrica tem quatro aspectos fundamentais: pré-tratamento da biomassa, tipo de gaseificador, limpeza do gás e, por último, o tipo de acionador primário ou expensor (BRIDGWATER, 1995). A seleção do tipo de gaseificador é baseada na qualidade do combustível disponível, a faixa da capacidade, e as condições da qualidade do gás a se obter (KLEIN, 2002). A Tabela 2.5 mostra as faixas de capacidade térmica para os principais tipos de gaseificador.

Tabela 2.5. Capacidade térmica de diferentes tipos de gaseificadores

Tipo de Gaseificador	Capacidade
Downdraft	1 kW – 1 MW
Updraft	1.1 MW – 12 MW
BFB	1 MW – 50 MW
CFB	10 MW – 200 MW

Fonte: KLEIN (2002)

Embora a gaseificação seja uma tecnologia promissória para a geração de energia elétrica a partir de biomassa, ainda há muitos problemas que superar para seu desenvolvimento e uso generalizado. Os autores HELD (2012), ABADIE; KUTXA (2009), KUMAR; JONES; HANNA (2009), GONZALEZ (2003), BRIDGWATER (1995), FAO (1993), em seus trabalhos, descrevem os gargalos da gaseificação que não permitem seu desenvolvimento. Assim:

- Todos os gaseificadores têm requisitos bastante rigorosos quanto ao tamanho, a umidade e ao teor de cinzas da biomassa, difíceis de atingir na prática.
- Variação no teor energético da biomassa pela variação em sua qualidade e teor de umidade.
- Variação das propriedades físicas e químicas do gás, tais como: o conteúdo de energia, composição e impurezas.
- Necessidade de adequação da biomassa, porque uma inadequada preparação desta é uma causa importante de problemas técnicos no gaseificador.

- Elevados custos no consumo energético.
- Necessidades de purificação do gás de síntese obtido para ser usado em acionadores primários e expansores.
- A presença de substâncias contaminantes que influenciam o desempenho e vida útil do acionador primário.
- Manuseio e tratamento das cinzas, condensados e alcatrão. Sua decomposição é demorada e o trabalho, sujo.
- Emissões de gases tóxicos se não é operado adequadamente.
- Modificações obrigatórias exigidas para se fazer os motores a gás de maior eficiência.
- Gaseificadores requerem, pelo menos, meia hora para iniciar o processo de geração de gás de síntese.
- Elevado volume da biomassa o que implica um reabastecimento, sendo necessário desenvolver sistemas de alimentação contínua de biomassa.
- Acesso limitado para o financiamento, desenvolvimento e promoção deste tipo de tecnologia de geração de energia a partir de biomassa.
- Falta de regulamentação no uso da biomassa e dos cultivos energéticos como combustível de maneira eficaz.
- Desenvolvimento de sistemas de transporte do gás de biomassa para uso nos MCIs, devido a que se requer atenção mais frequente do que um MCI operando com gasolina ou diesel.
- Obter um gás de biomassa com a qualidade adequada é uma tarefa desafiadora, por isso, a tecnologia de gaseificação de biomassa exige muito trabalho e tolerância.

2.4.2.2.1 Motor de combustão interna (MCI)

Os motores alternativos de combustão interna são uma tecnologia bem conhecida. Existem dois tipos básicos de MCI: os de ignição por centelha (SI) e os de ignição por compressão (CI). Os MCI-CI usam o diesel como combustível e, o MCI-SI, gasolina, porém pode ser usado gás de síntese, elevando a relação de compressão para aumentar a sua eficiência (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA, 2008). Nos MCI-SI, o gás pode substituir até 100% do combustível e a perda de potência com respeito ao gás natural é relacionada fundamentalmente à diminuição da densidade energética da mistura ar-gás em

relação ao gás natural. (G Sridhar, 2001). Segundo BROWN *et al.* (2009), o MCI pode ser mais eficiente e economicamente mais atrativo para gerar energia elétrica em pequena escala, até um ponto de equilíbrio de uns 5-6 MWe. O esquema usado na utilização do gás de síntese de biomassa é mostrado na Figura 2.9. Neste trabalho, vamos aprofundar em gaseificadores com capacidades de 1 kW a 3 MW.

A gaseificação de biomassa geralmente é utilizada em conjunto com MCI, sendo as potências e eficiências típicas globais no intervalo de 25 a 30% (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA, 2008). e, também, em sistema operando com turbinas a gás (TG) ou células de combustíveis.

A implementação desta tecnologia é utilizada para fornecer de eletricidade comunidades isoladas principalmente nos países em desenvolvimento como África do sul, Cuba, Índia, etc., (Ntshengedzeni S, et al 2009, Lesme et al, 2013, Buljit B et al, 2010).

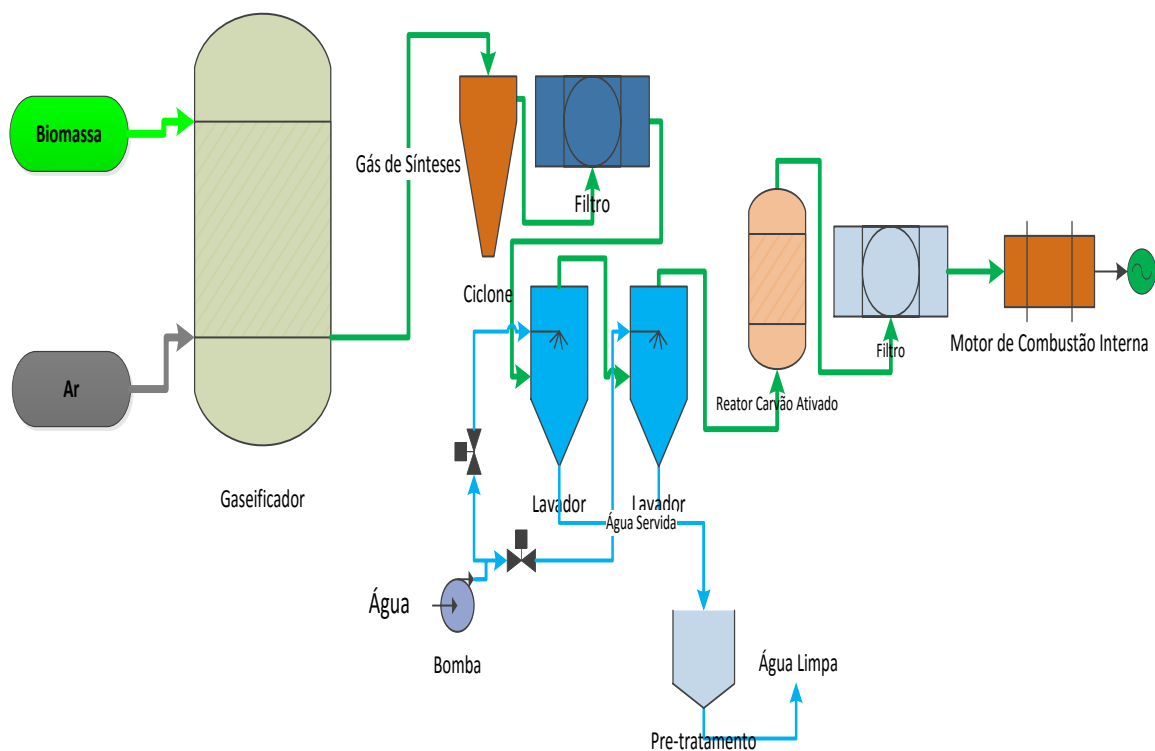


Figura 2.10 Sistema Gaseificação – MCI
Fonte: adaptado de GIRALDO R. (2013) e MARTÍNEZ, JD (2009)

2.4.2.2.1.1 Modificação dos MCIs para o uso de gás de biomassa

Para atingir elevadas eficiências na geração de energia elétrica com biomassa usando a tecnologia de gaseificação, é necessário garantir alguns parâmetros tanto na gaseificação como no funcionamento dos MCIs que incidem na eficiência global do sistema. Sobre gaseificador, pode-se mencionar: o tipo de biomassa, as relações entre o volume real do ar subministrado por kg de biomassa, o volume de ar que é necessário para a combustão estequiométrica da biomassa quando o agente de gaseificação é o ar (relação de ar) e, por último, o projeto do reator. No motor, é relevante a densidade energética da mistura syngas/ar e o volume de cilindrada do motor (MARTÍNEZ et al., 2012).

No MCI, a principal modificação que se deve fazer quando é usado gás de biomassa (elevado conteúdo de hidrogênio) consiste no atraso do tempo da ignição a fim alcançar os melhores desempenhos, dada a elevada velocidade da flama do hidrogênio (270 cm/s) com respeito a outros gases da mistura. (A S Ramadhas, 2008, C Serrano et al, 2008). Deve-se fazer também modificações no sistema da admissão.

Os motores diesel operam a relações de compressão maiores, entre 12 e 24(unidade), mas sua operação com o gás da biomassa deve ser dupla (substituição até de 85% do combustível diesel), a menos que se diminua seu índice de compressão. Nestes casos a diminuição de seu poder é proporcional à porcentagem do combustível substituído. A vantagem está em sua flexibilidade. Em caso de uma operação ruim do gaseificador ou da falta do combustível, uma mudança imediata é geralmente possível, operando-se totalmente com combustível diesel.

Quando é necessário usar um motor diesel com 100% de gás de biomassa, deve-se colocar um misturador, um sistema de ignição por centelha e modificar o ângulo de avanço da ignição (Hasler P ET al, 1999; V. Arkhangelsky, 1971, Shithar G ET al, 2005; N. R. Banapurmath ET al, 2009)

A maioria dos motores que trabalham com gás de biomassa são motores diesel convertidos em MCI-SI. Esses motores funcionam com misturas pobres e têm baixo consumo de combustíveis e baixas emissões de NO_x, mas são ideais para cogeração dada às altas temperaturas dos gases de escape atingindo eficiências elétricas de até 30% e térmicas até 55 %.

Entretanto, não são todos os motores diesel que podem funcionar com gás da biomassa. A relação da compressão dos motores diesel com pré-câmara e câmara da turbulência são altas e podem ocorrer detonações.

As investigações feitas na avaliação do desempenho dos motores de combustão interna trabalhando com gás de biomassa para gerar energia elétrica em pequena escala, mostram diversas possibilidades para motores com diferentes características (relação de compressão e tempo de ignição). A Tabela 2.7 mostra alguns resultados de estudos sobre a operação dos MCIs com gás de biomassa. Pode-se ver a eficiência térmica em uma taxa de 15 a 32% e uma eficiência global de 12 a 25% em seu ponto de operação.

A combustão de combustíveis gasosos em MCI ocorre mais completamente em comparação com os combustíveis líquidos. Também não formam resíduos e não se misturam com o óleo lubrificante. Além dessas razões técnicas, existe a necessidade de países em via de desenvolvimento encontrar novas tecnologias para superar a crise energética e diversificar sua matriz energética.

As quantidades máximas permitidas das impurezas em MCI e TG são relacionadas na Tabela 2.6, mostrando que é necessário fazer uma limpeza do gás obtido da gaseificação.

Tabela 2.6 Quantidades máximas permitidas de substâncias contaminantes em um gás de síntese para diferentes acionadores primários.

Contaminante	Unidade	MCI	TG
Alcatrão	Mg Nm ⁻³	<100	N/A
Granulometria	Mm	<10	<5
Material particulado	g Nm ⁻³	<50	<30
Metais Alcalinos	mg Nm ⁻³	N/A	0,24

Fonte: Adaptado de MILNE; ELAM; EVANS (2002) & STASSEN (1993)

A quantidade de partículas contidas no gás pode ser reduzida quando no projeto do gaseificador é incluída alterações na direção do fluxo que favorece a sua retenção, reduzindo a velocidade e, assim, a sua resistência.

Pode-se reter partículas com tamanho médio acima de 10 micrones (60 a 70% do teor total das partículas) com ciclones convencionais (MCKENDRY, 2002), além de ter a vantagem de trabalhar com temperaturas elevadas, até 540 ° C (ALBERTO; LONDOÑO, 2006). Gás com partículas menores a 10 micrones exigem outras formas de separação, tais como filtros de tecido, filtros de cerâmica ou filtros metálicos.

Tabela 2.7 Motores de combustão interna trabalhando com Syngas obtido da gaseificação de biomassa

Biomassa	Motor	rpm	RC	Gás (%)	MM	Pot (kW)	PI (APMS)	Ppot (%)	ηT (%)	ηG (%)	Ref.
Madeira	Diesel	1500	11.5:1	100	SIG	12-16(1)	35	nd	28-32	21-24(2)	Shashhikantha et al, 1993
Madeira	Diesel	1500	17:1	100	SIG	2.3(3)	10	20	19.05(4)	nd	Ramachandra A, 1993
Madeira	Diesel	nd	Nd	100	SIG	15-20(1)	nd	20	28(4)	25(2)	Henriksen et al, 2006
Casca de arroz	Otto	1800	12:1	100	MGN	40.7(4)	30	37.38	nd	nd	Muraro, 2006
Casca de coco	Diesel	1500	18.5:1	81	No	11.44(3)	nd	21	14.7(5)	11.69(2)	Bhattacharya et al, 2001
Madeira	Diesel	1500	17:1	100	SIG	17.5(1)	6	16.7(6)	nd	16.6(7)	G. Shridhar, 2001
Madeira	Diesel	1500	17.5:1	65	No	4(3)	27	20	27	nd	Ahrefeldt et al, 2000
				60	SIG				24	nd	
Madeira	Diesel	1800	12.5:1	100	SIG	5.3(1)	15	47	nd	nd	Rubenildo et al, 2011
Madeira	Diesel	1800	9:1	100	SIG	40	nd	40	25.7	14.7	René Lesme et al, 2013
Madeira	Gás	1500	12:1	100	No	75	28	14	20.7	-	P Raman et al, 2013
Madeira	Gás	1200-3400	10:1	100	No	3.55-3.68	-	6-9	23.2-26.2	-	Stefanos Tsiakmaks, et al, 2014

Tabela 2.6 Motores de combustão interna trabalhando com Syngas obtido da gaseificação de biomassa (Continuação)

Biomassa	Motor	rpm	RC	Gás (%)	MM	Pot (kW)	PI (APMS)	Ppot (%)	η_T (%)	η_G (%)	Ref.
Madeira	Diesel	1500	17.5:1	35-70	SIG	4.2	19-27	20	22.25 - 24.25	-	N.R. Banapurmath, et al, 2009
RPF	Gás	1800	-	100	No	20	-	34	22	-	Jeung Woo Lee, et al, 2013
Madeira	Gás	1500	11:1	100	No		25-35	-	34	-	R.G. Papagiannakis et al, 2007
Madeira	Diesel	1500	17.5:1	100	SIG	2.5	12-15	38.12	18-22	-	P. G. Tewari et al, 2001
Madeira	Gasolina	1800	9.7:1	100	No	9.60-13.10	-	54-67	20.3-29.5	16-25	Uisung Lee, et al, 2013
Madeira	Diesel	1500	17.5:1	10-72	SIG	5.2	23	-		16-18	Bibhuti B. Sahoo, et al, 2012
Resíduos da indústria de óleo de oliva.	Gás	1500	12:1	100	No	70	-	30	19.5	-	David Vera, et al, 2013

(1) Potência elétrica, nd. Não declarado, (2) biomassa-eletricidade, (3) Potência a freio, (4) No eixo, (5) Motor-gerador, (6) Potência mecânica, (7) Biomassa-saída no eixo, RC. Relação de Compressão, MM. Modificações no motor, SIG. Sistema da ignição, PI. Ponto da ignição, APMS. Antes do ponto morto superior, η_T . Eficiência Térmica, η_G . Eficiência Global. Ppot. Perda de potência. RDF. Misturas de materiais plásticos, textis e cerâmicos.

Os filtros de tecido demonstraram ter um melhor efeito nas aplicações de tamanho médio, mas com uma camada de pano de fibra de vidro ou outro material resistente a temperaturas acima de 100 ° C para evitar a condensação da umidade e, assim, impedir a rápida obstrução do filtro rápido. Atualmente, preferem-se filtros que permitam limpar o gás com temperaturas acima de 500 °C para evitar a condensação da umidade e do alcatrão (MCKENDRY, 2002).

Nos filtros de cerâmica ou de metal, o gás quente passa através dos poros pequenos do material do filtro à pressão e alcança reter assim as partículas, com uma eficiência muito perto de 100%, incluindo os metais alcalinos em suspensão que contém o gás. Esses filtros têm um custo elevado e exigem a operação com alta pressão do gás. Geralmente é usado em plantas de gaseificação em leito fluidizado com turbina a gás integrada (IGCC) devido aos filtros que funcionam com temperatura entre 450 ° C e 550 ° C e pressão entre 8 e 10 bares (KUMAR; JONES; HANNA, 2009). A desvantagem desses filtros é a necessidade de manutenção muito frequente por causa do selado permanente dos poros e seu custo mais elevado (GONZALEZ, 2003).

Como conclusão, o ciclone e o filtro de cerâmica não podem ser utilizados como única tecnologia para a limpeza completa do gás de biomassa, mas podem ser utilizados em combinação com outros métodos de remoção de contaminantes.

2.4.2.2.1.2 Projetos de geração de energia elétrica por meio da gaseificação e combustão

Na Tabela 2.8 são apresentados alguns projetos de geração de energia elétrica com sistema de gaseificação de biomassa e motor de combustão interna (GMCI), gaseificador e turbina a gás de queima externa (GEFGT) e Combustor e turbina a gás de queima externa (CEFGT).

A rota termoquímica GEFGT foi desenvolvido na Vrije Universiteit Brussel na Bélgica, cujo objetivo foi gerar eletricidade e calor a partir de resíduos de madeira. Figura 2.11. A capacidade da usina é 500 kW, com um custo de 2,5 milhões de Euro no ano 2009. O desenvolvimento deste ciclo, tem como foco reduzir os problemas de depuração do gás de síntese, principalmente a eliminação do alcatrão, o qual é queimado diretamente na câmara de combustão, pelo que não requer sistema de limpeza do gás produto da gaseificação da biomassa. (VUB, SEGHERS BETTER TECHNOLOGY, 1992).

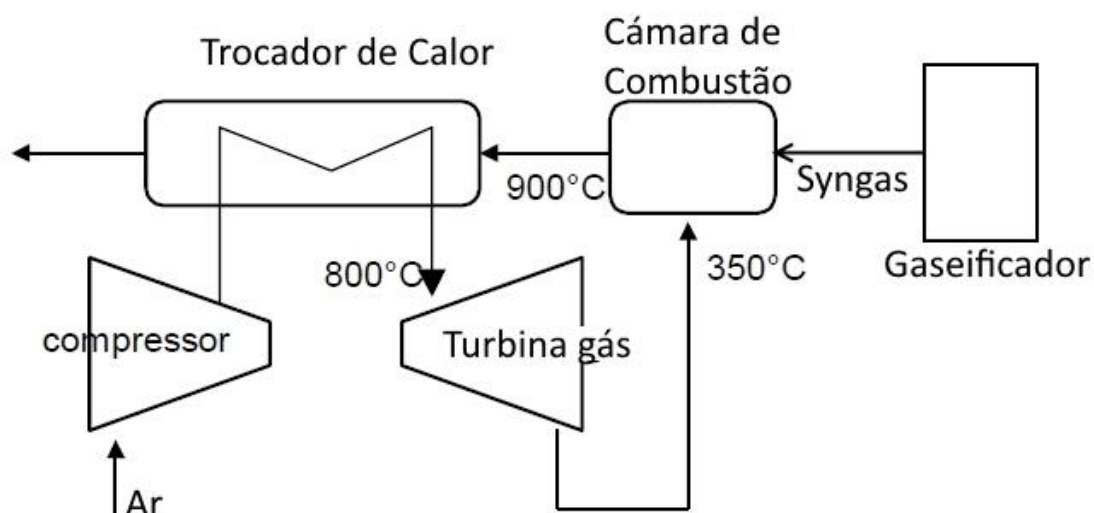


Figura 2.11. Ciclo termodinâmico GFTGT

Fonte: VUB, SEGHERS BETTER TECHNOLOGY (1992)

Tabela 2.8 Projetos de gaseificação e combustão de biomassa

Rota Termoquímica	Combustível	Potência (kW)	Eficiência Elétrica (%)	País	Referência
GMCI	Biomassa Florestal	150 – 1500	25	Bélgica	(SILVA L. <i>et al</i> , 2012)
	Madeira	750	21.4	Espanha	(DUTTA, 2011)
	Biomassa	2000	25	Áustria	(BOLHÀR-NORDENKAMPF; RAUCH, 2003)
	Madeira	12 - 16	21 - 24	Espanha	(MARTÍNEZ, JUAN DANIEL <i>et al</i> , 2012)
	Cavacos de madeira	15 - 20	25	Turquia	(MARTÍNEZ, JUAN DANIEL <i>et al</i> , 2012)
	Madeira	17.5	16.6	Índia	(MARTÍNEZ, JUAN DANIEL <i>et al</i> , 2012)
GEFTGT	Biomassa	500	12 - 22	Bélgica	(VUB, SEGHERS BETTER TECHNOLOGY, 1992)
CEFTGT	Biomassa	30	15	Inglaterra	(PRITCHARD, 2005)
	Cavacos de Madeira	70	17	Itália	(BARSALI; LUDOVICI, 2010)

2.4.2.3 Tecnologias de pré-tratamento da Biomassa

Uma vez alcançada a maturidade do cultivo energético, seja madeireiro ou herbáceo, deve-se coletar e adequar a biomassa para o processo de combustão ou gaseificação de maneira eficiente, barata e com menores emissões, dado que cada tipo de cultivo tem características físicas e mecânicas diferentes,

A colheita de produtos agrícolas e florestais está sempre associada com a manipulação, transporte e processamento de grandes volumes. Isto é particularmente verdadeiro para a colheita de cultivos energéticos usados como biocombustíveis sólidos.

2.4.2.4 Colheita, transporte e pré-tratamento da biomassa de cultivos madeireiros.

A colheita de cultivos madeireiros pode ser entendida como o conjunto de operações que se prestam a preparar e levar a madeira até o local para seu uso final, utilizando técnicas e padrões já estabelecidos.

Todas as atividades envolvidas na colheita da madeira e transporte em florestas plantadas são muito importantes para se definir os custos da –matéria-prima segundo seu uso final, atingindo entre 60 e 70% dos custos totais (MALINOVSKI; CAMARGO; MALINOVSKI, 2008).

Existem três sistemas de colheita florestal. O Sistema Manual que é pouco utilizado na atualidade. O Sistema semi-mecanizado (motosserra) que é considerado competitivo para pequenos e grandes volumes de madeira. Neste sistema a extração da madeira deve ser feita com tratores agrícolas e "forwarders". E o Sistema Mecanizado que difere do sistema semi-mecanizado em que as árvores são derrubadas com "feller-buncher" e concentradas em pilhas, facilitando o trabalho dos "forwarders" ou cavaqueadores segundo o caso (MACHADO, 2012). Cada sistema de colheita tem suas vantagens e desvantagens.

A colheita florestal é muito complexa pois envolve, ao mesmo tempo, o controle de variáveis técnicas, econômicas, ambientais e sociais, e isso só pode ser feito se existir um planejamento adequado, além do tempo da rotação florestal e extensão das áreas plantadas (MACHADO; LOPES, 2008). Por isso, a empresa geradora de eletricidade deve considerar suas próprias particularidades. É muito comum a terceirização desta atividade florestal.

Na Figura 2.12, são apresentadas as etapas do processo de colheita e pré-tratamento da madeira para a geração de eletricidade. Pode-se ver que no sistema mecanizado, o cavaqueamento, é feito no campo com o processo de carga diretamente no veículo para o transporte do cavaco, o que pode refletir em menor custo econômico e, conseqüentemente, menor quantidade de emissões e o mesmo uso de mão de obra.

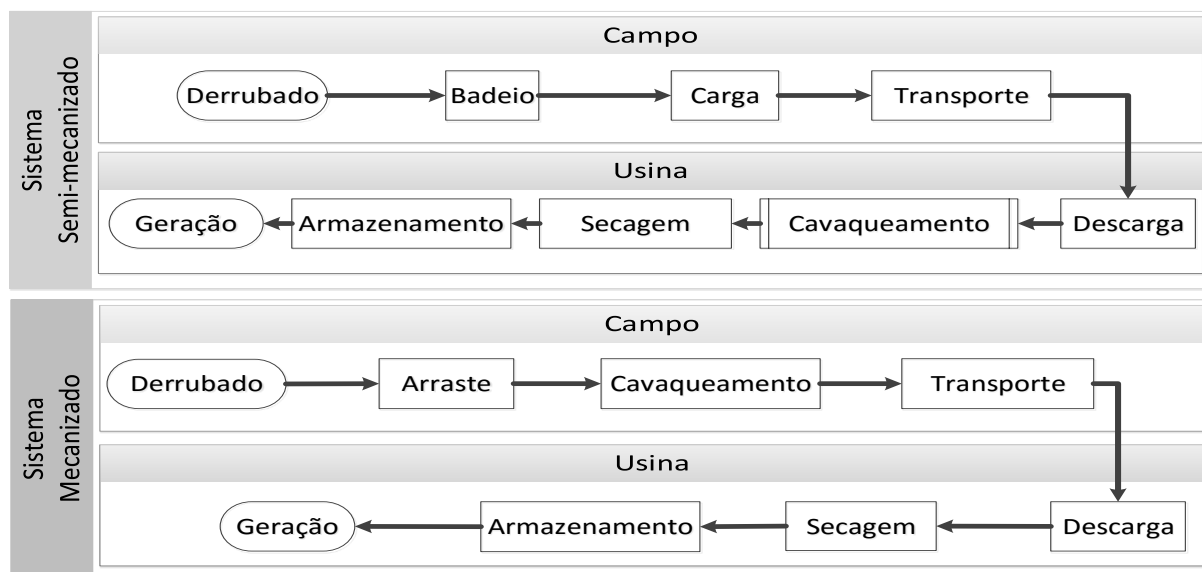


Figura 2.12 Etapas da colheita e pré-tratamento da madeira para geração de eletricidade

A biomassa madeireira após coletada geralmente tem umidade entre 50 – 55 %, por isso necessita se adequar para o processo de combustão, principalmente mediante a secagem. Então de acordo com o tipo de coleta segue uma sequência de processos diferente.

No caso do transporte, é importante a densidade aparente da biomassa, que pode oscilar entre 15 – 75 % com respeito à densidade da madeira sólida, como se mostra na Figura 2.13, onde se pode selecionar o tipo de transporte que corresponde à densidade. Para esta análise foi escolhido o transporte em cavacos devido ao transporte de madeira redonda que gera processos de carga e descarga da madeira na usina e seu consequente custo.

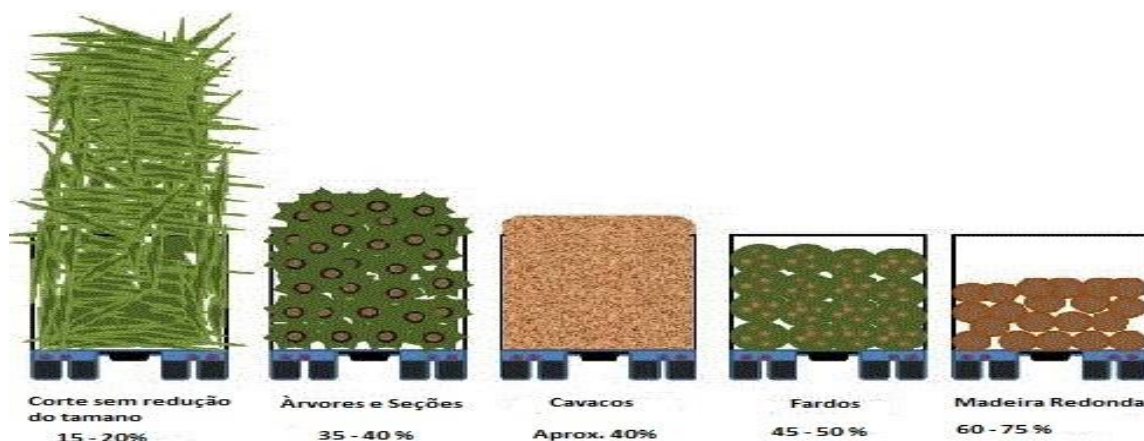


Figura 2.13 Sistemas de transporte e a densidade aparente da biomassa
Fonte: "Ligno-cellulose supply chains" (2012).

O teor de umidade na biomassa tem influência na eficiência da combustão. Dessa forma, existe a necessidade de se fazer um processo de secagem até atingir uma umidade inferior a 30%. O armazenamento da biomassa com o teor de umidade adequado evita perdas por degradação biológica devido ao ataque de fungos que pode ser de até 12%. Por razões tecnológicas, econômicas e ecológicas, em fornos pequenos o teor de umidade deve estar entre 10 – 30% (LOO; KOPPEJAN, 2008).

Os métodos usados na secagem da madeira podem ser por convecção natural e convecção forçada. A convecção natural consiste em fazer pilhas da madeira num pátio exterior durante a época seca e reduzir espontaneamente cerca de 30 a 50% da umidade. A convecção forçada consiste em movimentar o ar previamente esquentado pela radiação solar ou pelos gases da combustão. (Figura 2.14).

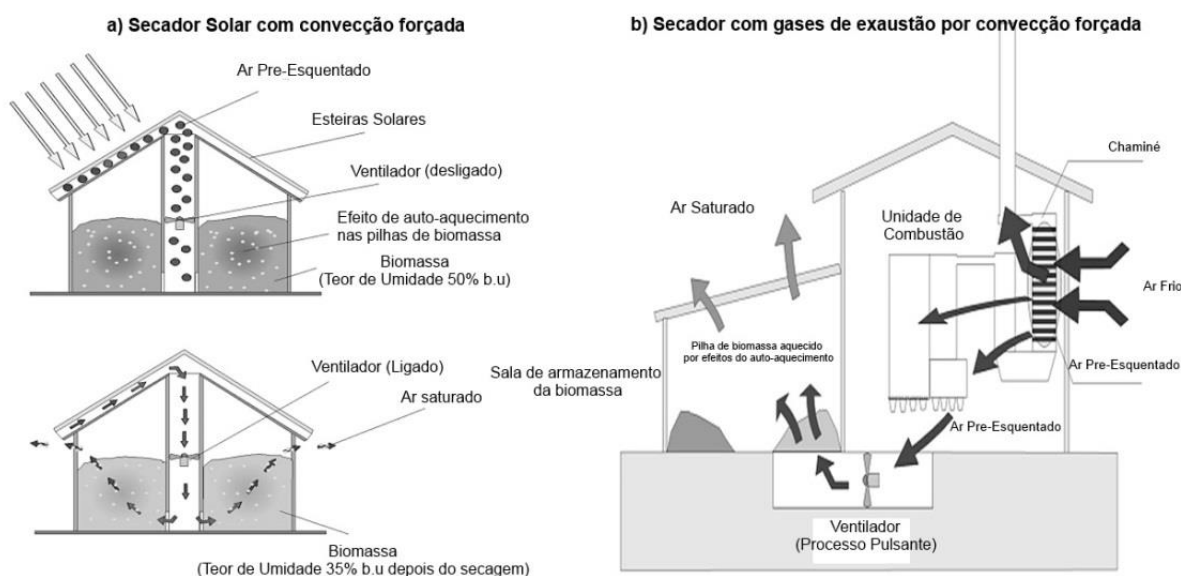


Figura 2.14 Secagem de madeira com radiação solar e gases de exaustão.

Fonte: Adaptado de LOO & KOPPEJAN (2008)

Existem secadores de biomassa, utilizados na indústria, divididos nos seguintes tipos: rotativos, secadores de esteira, secadores em cascata, secadores flash e secadores com vapor superaquecido.

Como se pode ver, existe uma serie de tipos de secadores, mas também critérios para sua seleção. Entre eles, estão:

- Investimento inicial da tecnologia vs. custo da terra;
- Custo de operação e manutenção;

- Vida útil;
- Pegada de carbono e água;
- Disponibilidade de mão de obra qualificada;
- Acessibilidade a zonas não interligadas;
- Respaldo técnico garantido.

2.4.2.5 Colheita, transporte e pré-tratamento de cultivos herbáceos.

A eficiência dos cultivos energéticos herbáceos depende do uso racional da energia na colheita, transporte e pré-tratamento, o que define a relação custo/benefício da biomassa. Em relação a esta última, a colheita pode representar uma fase crítica a respeito dos custos e técnicas utilizadas. De fato, existem muitos estudos realizados sobre técnicas de produção, porém estudos sobre o tipo de equipamento para a colheita de cultivos energéticos herbáceos são limitados (BENTINI; MARTELLI, 2013). Existem várias máquinas e sistemas de colheita recém-desenvolvidos e algumas modificações que estão sendo testadas (BASSAM, 2010), o que pode gerar uma oportunidade para a procura de tecnologias que ajudem a diminuir este gargalo tecnológico.

Então, igual que nos cultivos madeireiros, a colheita, o transporte e o pré-tratamento para uso como combustível, os cultivos herbáceos têm requerimentos específicos como a alimentação do combustível e o tipo de reator

Bassam (2010) apresenta uma classificação de sistemas de colheitas para cultivos herbáceos. Estes sistemas seguem dois procedimentos principais:

- Procedimento de multifaces (várias máquinas devem ser utilizadas):
 - Corte (roçada)
 - Coleta, compactação e enfardamento.
- Procedimento monofásico (uma máquina é usada):
 - Linha de corte
 - Linha de enfardamento
 - Linha de empacotamento
 - Linha de peletização.

Qualquer dos procedimentos mencionados acima leva ao adensamento energético do capim, com vantagens nos custos do transporte e armazenamento. Na Figura 2.15 é possível observar a sequência de etapas desde a colheita até o pré-tratamento dos cultivos herbáceos

como combustíveis. Cada uma dessas vias tem processos e operações diferentes que, por sua vez, incidem no custo do kWh gerado.

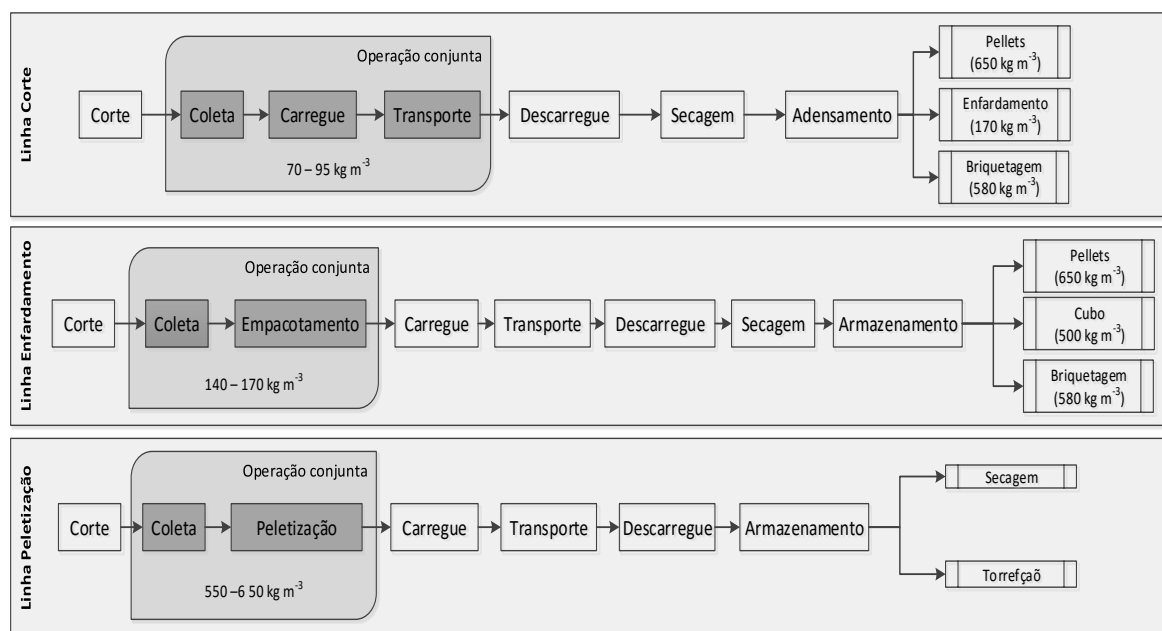


Figura 2.15 Ciclo de vida da colheita dos cultivos energéticos herbáceos.

Fonte: adaptado de BASSAM (2010) & “Lippel” (2013)

2.4.2.6 Adensamento energético da biomassa madeireira ou herbácea

A baixa densidade em energia (MJ m⁻³) e baixo rendimento por unidade de área (toneladas secas ha⁻¹) tem repercussões no custo da biomassa, o que aumenta o custo total de seu processamento. Isso afeta significativamente sua competitividade na geração de energia elétrica em grande escala com relação aos combustíveis fósseis. No caso, a biomassa herbácea é menos competitiva que a florestal, portanto existe a necessidade de adensar, principalmente em pellets, para melhorar suas características físicas e de combustão (OBERNBERGER; THEK, 2004 & KUMAR; CAMERON; FLYNN, 2003), devido à uniformidade das características em termos de tamanho (13-19 mm de comprimento e diâmetro 6,3-6,4 mm), forma (cilíndrica) e densidade (na faixa 1125-1190 kg m⁻³) (WRIGHT et al., 2010). Estas características acrescentam vantagens, mas, também, desvantagens em relação à biomassa sem peletizar. Ver Tabela 2.9.

Normalmente, a biomassa herbácea ou palha é transformada em pellets em forma de bala redonda ou retangular. O primeiro passo é cortar a palha para reduzir o seu comprimento em 2,5 a 10 cm. O teor de umidade médio da palha antes do processo de secagem é de 15%; após a secagem, é de 8 a 10% (JANNASCH; QUAN; SAMSON, 2001). O tamanho do secador

deve ser adequado, pois um sobre dimensionamento pode aumentar o custo de capital e de operação significativamente. Se a palha é entregue na planta com teor de humidade inferior a 12% pode não precisar de secagem(CAMPBELL, 2007).

Tabela 2.9. Vantagens e desvantagens da peletização de biomassa madeireira e herbácea

Vantagens	Desvantagens
Reduz as emissões de poeira no manuseio do combustível	Pouco desenvolvimento de caldeira para usar pellets de biomassa como combustível
Melhora as propriedades da biomassa madeireira ou herbácea, o que simplifica o transporte e armazenamento	Não existem caldeiras robustas para lidar com a composição química capim elefante, palha de trigo, cevada para a combustão e geração de energia
Aumenta a densidade a granel, o que facilita o armazenamento e transporte com a consequente redução dos custos	
Eleva sua densidade, pelo que exige menor área de armazenamento	O teor de partículas finas afeta extremamente a durabilidade mecânica, bem como a logística e o armazenamento; pode perturbar a regulação de sistemas de aquecimento altamente automatizados ou interromper a alimentação de combustível automatizado
Menor umidade residual para uma maior densidade energética superior	
Fornecer um melhor manejo e alimentação da biomassa	As partículas finas podem queimar mais rapidamente e estas temperaturas mais elevadas podem favorecer a fusão de cinzas
O produto uniforme e mais estável tem controle de combustão mais eficiente	

Fonte: ZAMORANO et al. (2011), CARROLL; FINNAN (2012), GARCÍA-MARAVÉ; POPOV; ZAMORANO (2011)

A qualidade dos pellets depende das propriedades da matéria-prima em termos de tipo de biomassa, teor de humidade e tamanho de partícula/fibra e, também, a gestão da qualidade do processo de fábrica, em termos de condições de operação, equipamento de peletizado e agentes de ligação (ZAMORANO et al., 2011).

O teor de lignina da madeira é alto e geralmente suficiente para atuar como aglomerante da madeira durante a fabricação do pellet, mas a palha requer condicionamento para conseguir o aglutinamento e fornecer pellets duráveis e minimizar o material fino. Por isso, é importante fazer um condicionamento usando vapor ou água quente para amolecer o material fibroso em palha depois de passar por um moinho de pelotas, e pode exigir a introdução de um material ligante (SULTANA; KUMAR; HARFIELD, 2010 & OBERNBERGER; THEK, 2004). Ver Tabela 2.10.

Pode-se observar na Tabela 2.10 que a variação do PCI da madeira em chip, cavaco e pellets depende do teor de umidade e da densidade, mostrando a importância do adensamento. No caso do capim é menos importante a variação.

Tabela 2.10. Características energéticas de algumas biomassas para diferentes densidades

Biomassa	Teor Umidade (%)	PCI (MJ kg ⁻¹)	Densidade (kg m ⁻³)	Ref.
Capim Elefante	10	15,84	130 - 150	(LINNEMANN N., 2014)
Madeira dura	SI	16,03	SI	(TELMO; LOUSADA, 2011)
Madeira Macia	SI	16,40	SI	(TELMO; LOUSADA, 2011)
Madeira dura tropical	SI	16,85	SI	(TELMO; LOUSADA, 2011)
Cavaco de madeira	40	10,40	235	(LINNEMANN N., 2014)
Cavaco de madeira seca	20	15,19	175	(LINNEMANN N., 2014)
Pellets de Madeira	6	17,64	660	(LINNEMANN N., 2014)
Pellets de Capim	8	15,98	600	(LINNEMANN N., 2014)

Observação: SI: sem informação

O custo de produção de pellets a partir de biomassa é altamente dependente do tamanho da usina. O tamanho ideal para uma usina de peletização é uma compensação entre o custo do transporte da biomassa, que aumenta à medida que aumenta a capacidade da planta e o custo de capital por unidade de produção. Este custo diminui à medida que a capacidade da usina aumenta (SULTANA; KUMAR; HARFIELD, 2010). Isto pode gerar incertezas para usinas de geração de energia elétrica de baixa potência.

DWIVEDI; KHANNA (2014) descobriram que uma redução no custo da energia elétrica gerada utilizando matérias-primas lenhosas e herbáceas variaram de forma decisiva, dependendo do combustível fóssil selecionado para atividades de produção, corte, moagem e peletizado.

2.4.3 Potencial econômico da geração de eletricidade mediante sistemas Agroenergéticos

Há pouca dúvida de que os cultivos energéticos podem dar emprego na produção, colheita ou processamento da biomassa aos muitos trabalhadores agrícolas e, também, a trabalhadores qualificados e não qualificados na usina de bioenergia, embora tenha que garantir um suprimento confiável e sustentável de biomassa criando oportunidades de empregos rurais atualmente necessários. A concepção e a construção das usinas também criam empregos.

Na Figura 2.16, se observa o potencial de geração de empregos que têm os cultivos energéticos, sendo maior que o potencial da geração com carvão e inclusive outras fontes renováveis, com o valor agregado de capturar carbono renovável de maneira espontânea.

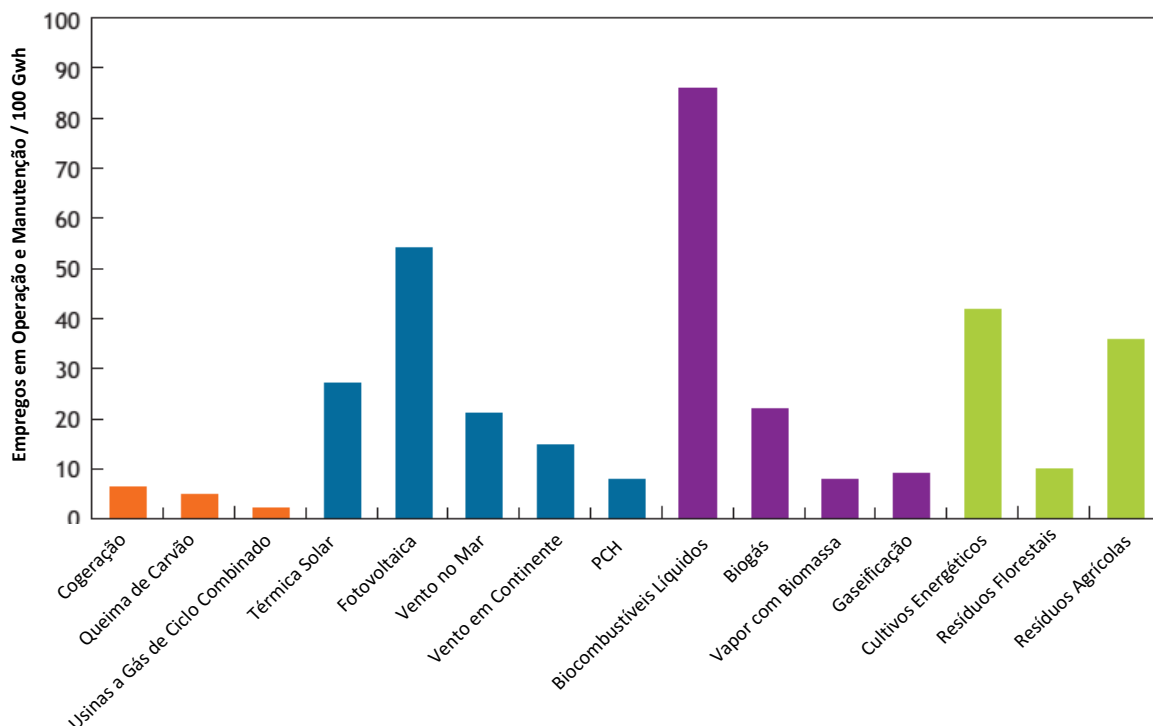


Figura 2.16 Empregos requeridos para projetos de bioenergia.
Fonte: (IEA, 2007)

Em 2011, estima-se que o setor florestal manteve 4,7 milhões de postos de empregos, incluindo empregos diretos (0,6 milhões), empregos indiretos (1,5 milhões) e empregos resultantes do efeito-renda (2,61 milhões), conforme mostra a Tabela 2.11.

Neste sentido, o setor florestal no Brasil pode ser uma atividade estratégica, tanto desde o ponto de vista agroindustrial quanto no energético, seja para suprimento do mercado interno ou para a exportação. Além de contribuir positivamente no ponto de vista ambiental a nível nacional e mundial nos seguintes aspectos: menores emissões líquidas de GEE, maior proteção de recursos hídricos e de solos, aproveitamento de solos degradados, menor pressão sobre florestas nativas que hoje são exploradas clandestinamente. Esses benefícios ambientais poderão ser considerados serviços ambientais remuneráveis pela comunidade internacional visando o bem-estar social.

O Brasil tem uma intensa insolação, quantidade de terras com potenciais florestais e abundância de recursos hídricos, pelo que se pode considerar uma vantagem para o plantio de

florestas e às quais serão agregados milhões de hectares nos próximos 20 anos e aumento da produtividade agropecuária. Com efeito, dos 851 milhões de ha do território nacional, 320 milhões estão antropizados (38%). Ou seja, mais de 3/5 das terras do País (62%) estão preservadas e assim podem permanecer. Da área total antrópica, 170 milhões de ha estão hoje ocupadas pela pecuária, predominantemente extensiva (SAE, 2011).

Tabela 2.11 Geração de empregos no setor florestal no Brasil.

Segmento Industrial	Setor de florestas plantadas			
	Diretos	Indiretos	Efeito-Renda	Total
Silvicultura	176.545	719.763	461.735	1.358.053
Siderurgia a Carvão Vegetal	48.282	263.620	966.606	1.278.508
Produtos de Madeira	188.910	141.683	259.752	590.345
Móveis	117.525	88.143	161.596	367.264
Celulose e Papel	113.945	262.074	763.433	1.139.452
Total	645.267	1.475.283	2.613.122	4.733.612

Fonte: ABRAF (2012)

A relevância da madeira na geração total de energia do país é indiscutível. Portanto — de acordo com o BEN-Balanco Energético Nacional (MME) referente a 2012 — representou 10,3% da oferta total de energia, colocando-se como a quarta fonte primária na matriz energética brasileira. Além do consumo domiciliar da lenha, a bioenergia da madeira é utilizada intensamente pelas indústrias de papel e celulose, cerâmica vermelha, gesso, ferro gusa, ferro-ligas, aços especiais e alimentícias.

Segundo a SAE (2011) o consumo de bioenergia da madeira poderá triplicar em menos de 20 anos, alcançando 70 milhões de tep até 2020 e 90 milhões de tep por volta de 2025 se for efetivada a política pública já vigente de intensificação da produção de aço verde e formulada uma política efetiva de introdução da queima de biomassa de madeira produzida de forma sustentável na geração de eletricidade, especialmente em sistemas isolados, substituindo o diesel e o óleo combustível, em particular na Amazônia, além de que a bioenergia da madeira permite a geração de vários subprodutos ao longo da cadeia produtiva que ensejariam o surgimento de outras cadeias produtivas.

As regulações do uso da biomassa para geração de energia elétrica no Brasil vêm sendo normatizadas por meio de Resoluções da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e por normas baixadas pelo Poder Concedente. Não tendo um tratamento diferenciado e

particularizado para cada tipo específico de biomassa e sendo tratados em conjunto: bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, lenha, resíduos madeireiros, carvão vegetal, capim elefante, entre outros biocombustíveis, o que coloca em desvantagens os sistemas Agroenergéticos com cultivos energéticos madeireiros e herbáceos.

Contudo, para que se tenha uma produção de produtos madeireiros e herbáceos para a geração de energia elétrica, serão necessários, dentre outras iniciativas, alguns ajustes das normas regulatórias vigentes de modo a permitir a competitividade desta biomassa. A não verificação de algumas singularidades ou especificidades na produção deste insumo para a geração de energia elétrica não permitirá uma inserção sólida deste na matriz elétrica brasileira.

Por último, para que o plantio de florestas no Brasil seja estratégico em captura de CO₂, preservação da biodiversidade, prestação de serviços ambientais remunerados (REDD, REDD+), através da preservação dos estoques de carbono fixo representados pelas florestas naturais existentes tem que ser também gerador de créditos de carbono, captador de recursos internacionais para financiamento de projetos (MDL), protetor dos mananciais e produtor de matéria-prima para um setor industrial ainda pouco desenvolvido, além de produzir um insumo energético “limpo”. Finalmente, o país deve ter um fator gerador de investimentos, emprego e renda e de ocupação racional do território. É necessário analisar aspectos técnicos, econômicos e ambientais mediante indicadores de desempenho e devem ser introduzidos na análise dos custos econômicos.

2.4.3.1 Critérios de viabilidade econômica da eletricidade da biomassa

Todos os projetos de investimento em energia, além de ser viável tecnicamente, têm que ser viável econômica e financeiramente o que implica estimar e analisar as perspectivas de desempenho financeiro do produto resultante do projeto.

O objetivo mais importante da análise econômica é avaliar os efeitos financeiros que terá o projeto sobre os produtores e usuários. Esta avaliação inicia desde a análise da situação financeira atual até o desenvolvimento do projeto em um tempo determinado, estimando o desempenho financeiro no futuro através de indicadores idôneos, o que torna necessário fazer projeções financeiras detalhadas para esta análise. Dentre estes índices pode-se destacar o valor presente líquido, a taxa interna de retorno e o tempo de retorno de capital. Para a

execução de tais análises, procura-se moldar o problema real em uma forma padrão, um fluxo de caixa, o que permite utilizar certas equações previamente concebidas e, assim, avaliar economicamente o projeto.

Neste trabalho, a análise vai ser baseada no valor presente líquido e a taxa interna de retorno em um tempo de 18 anos.

2.4.3.1.1 Valor Presente Líquido (VPL)

Objetiva calcular a soma algébrica de todos os valores existentes no Fluxo de Caixa, seja aqueles tanto com sinais positivos (entradas, receitas ou benefícios) quanto os negativos (saídas, despesas ou custos), incluindo o investimento inicial, todos já descontados, isto é, aplicando-se uma taxa de desconto. Ver Equação 2.4.

$$VPL = \sum_{j=0}^n R_j(1+i)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j(1+i)^{-j} \quad 2.1$$

Em que R_j : valor atual das receitas; C_j : valor atual dos custos; i : taxa de juros; j : período em que a receita ou o custo ocorrem e n : número máximo de períodos.

O VPL, em unidade monetária (\$), tem que ser positivo e, além disso, deve estar acima de uma grandeza razoável para que remunere o risco e o trabalho do investidor, ou seja, tem um piso mínimo, que pode ser estabelecido como um percentual do investimento inicial.

Se o VPL é negativo o investimento não é recomendável. Se o VPL é igual a zero, é indiferente fazer ou não o investimento.

2.4.3.1.2 Taxa Interna de retorno (TIR):

Objetiva definir a taxa de desconto com a qual o Valor Presente Líquido (vpl) é nulo, ou seja, a taxa de desconto faz com que a soma algébrica de todos os valores descontados sejam zero. Ver a Equação 2.5

$$\sum_{j=0}^n R_j(1+TIR)^{-j} = \sum_{j=0}^n C_j(1+TIR)^{-j} \quad 2.2$$

A TIR tem que ter uma grandeza maior do que a TMA (Taxa Mínima de Atratividade), que seria uma expectativa mínima, expressa não em (\$), como na VPL, mas sim em percentual.

2.4.3.1.3 Custo nivelado de geração

O custo nivelado de geração é usado na avaliação de investimentos em geração de energia, onde as saídas são quantificáveis (MWh gerados durante a vigência do investimento). O custo nivelado de geração é o único valor do custo de equilíbrio onde as receitas descontadas (preço x quantidade) são iguais às despesas líquidas descontadas (IPCC, 2012). Ver Equação 2.3.

$$C_{eq} = \frac{\sum_{j=0}^n \frac{despesas_j}{(1+i)^j}}{\sum_{j=0}^n \frac{quantidades_j}{(1+i)^j}} \quad 2.3$$

Em que C_{eq} é o custo de geração nivelado; n o tempo do projeto e i é a taxa de desconto.

Uma prática muito comum é a conversão de uma determinada soma de dinheiro no momento zero (0) do investimento, em um número n de quantidades anuais constantes ao longo dos próximos anos. Este fator é chamado de recuperação do custo de capital e é calculado pela Equação 2.4.

$$\delta = \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad 2.4$$

Agora adicionando os custos de operação e manutenção, a Equação 3.3 é simplificada, como se mostra na Equação 2.5.

$$C_{eq} = \frac{B \times \delta + O\&M}{Q} \quad 2.5$$

Em que B é o custo de investimento; Q é os kWh produzidos; $O\&M$ são os custos anuais de operação e manutenção.

2.4.3.1.4 Referência preço de venda do MWh no Brasil

É o preço do MWh que se deve vender para um lucro determinado. Ou seja, é o valor em que deve se vender o MWh quando se atinge a TIR desejada.

No Brasil, no ano de 2013, foi lançado o leilão de Energia A-5/2013 com o objetivo de suprir a demanda de eletricidade do país no ano de 2018. Destacou-se dois empreendimentos movidos a cavaco de madeira (residual) para ser acionados o ano todo, com um preço R\$136,69 o MWh.

2.4.3.1.5 Referência custo geração de energia elétrica de para a análise

Os preços atuais do petróleo e os custos decrescentes de tecnologias de geração de energia renovável fizeram com que as energias renováveis fossem uma opção padrão para gerar eletricidade no sistema não interligado (IRENA, 2012). Para efeitos de comparação e seleção da tecnologia com maiores vantagens em relação a custo/benefício, na Figura 2.17 apresenta os custos nivelados para diferentes tecnologias renováveis reportados por IRENA (2012) correspondente ao ano 2010.

Na Figura 2.15, pode se ver que não existe uma única e, "melhor" tecnologia renovável que integre o menor custo de geração e impacto ambiental. No entanto, os intervalos de custos são amplos, possivelmente devido às condições específicas do local de geração, tecnologias disponíveis, etc. É importante ressaltar que o custo nivelado de geração com biomassa está na faixa de 0.5 até 0.3 USD\$/ kWh⁻¹, competindo com a hidroeletricidade e sé menor que os custos da energia solar. Os valores típicos reportados por IRENA (2012) estão na faixa de 0.2 e 0.55 USD\$/kWh⁻¹.

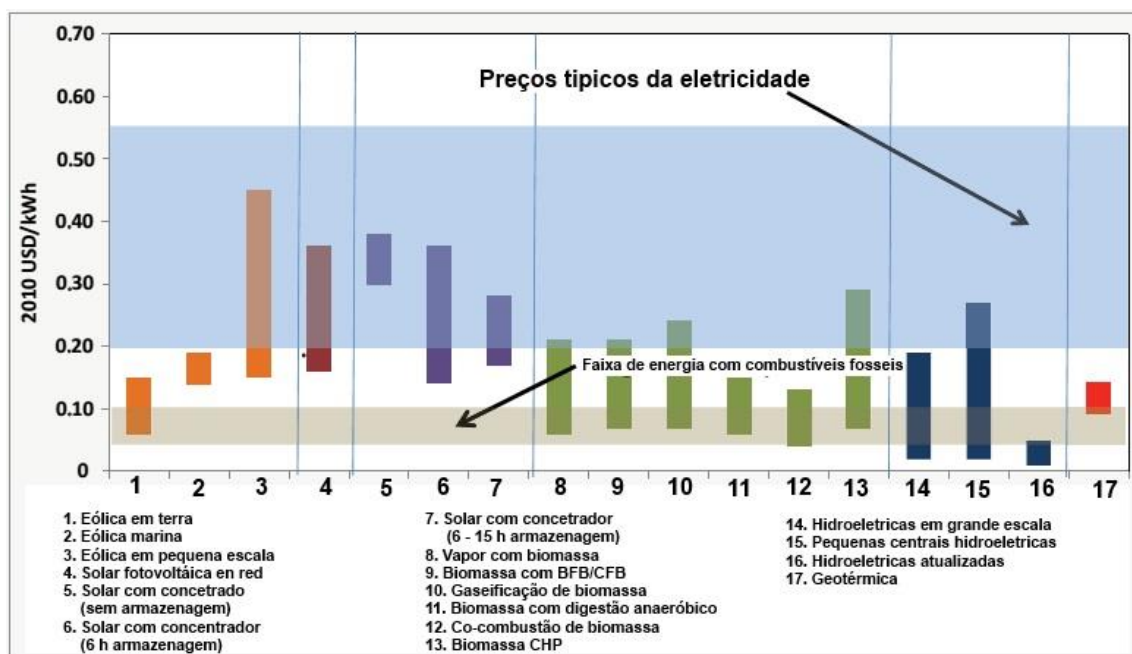


Figura 2.17 Custo nivelado de geração de eletricidade
Fonte: IRENA (2012)

2.4.3.2 Gestão do risco nos sistemas Agroenergéticos

As energias renováveis e sua posição no mercado ocupam uma faixa não muito ampla por um número significativo de razões. A situação é reforçada pelo poder significativo das regras do mercado energético que, em certa medida, não incluem os riscos envolvidos para este tipo de energia (TEMITOPE A, 2007).

O risco é definido como a possibilidade de ocorrência de uma situação que poderia prejudicar o desenvolvimento normal de um projeto de investimento, devido à variabilidade dos benefícios esperados para os investidores (BAZZANI C., 2007).

A gestão de risco do projeto é essencial para garantir o sucesso do mesmo. Ferramentas de gerenciamento de risco atualmente tem carência de capacidade de previsão para indicar os potenciais riscos antes do início de um projeto (YIM et al., 2015). O Risco pode aparecer em qualquer aspecto de um projeto em desenvolvimento. Pode provocar custos excessivos, atrasos na programação e até mesmo má qualidade, se não for tratada com eficácia no processo de gerenciamento de projetos (ZHANG; FAN, 2014).

Podem se identificar riscos em toda a cadeia de geração de eletricidade quando se utilizam estas fontes, podendo-se identificar: risco na fonte energética por ser considerada insustentável; risco nas tecnologias porque são consideradas ainda na etapa de pesquisa e desenvolvimento e risco no financiamento por ser consideradas muito caras ou quase não financiáveis.

Pode-se analisar o risco do investimento para algumas condições de desenvolvimento de projetos. Sabendo que a rentabilidade de um projeto de investimento, analisada através do VPL, é uma variável aleatória pois o desembolso inicial de capital, o fluxo de caixa, a taxa de desconto e o tempo de duração do projeto são variáveis aleatórias, gerando incerteza, faz-se necessário definir novos critérios de análise e seleção de investimentos que se adéquem a condições de incerteza.

A estratégia usada para a análise do risco em projetos de investimento é gerar cenários através de métodos repetitivos que permitam quantificar o efeito de mudanças dos fatores exógenos (renda, outros rendimentos, despesas, custos, nível de financiamento, nível de investimento, taxa de desconto apropriada pelo investidor, rotação de contas a receber, rotação de estoques, rotação de contas a pagar, taxa de lucro para determinar o preço do produto, serviço ou marketing, níveis mínimos de caixa para operar) e endógenos (taxa de juros, taxas de inflação, taxa de câmbio. PIB, níveis de poupança, níveis de investimento,

taxas de crescimento setorial, taxas de impostos, risco de investimento no setor, risco de investimento no país, risco de investimento na cidade) nas variáveis de saída (BAZZANI; CRUZ TREJOS, 2008).

A ferramenta usada para a análise destes cenários é a simulação de Monte Carlo e consiste na geração aleatória de uma distribuição de valores que representam os diferentes cenários de mudanças nos fatores de risco. Sob o nome "método de Monte Carlo" ou "simulação de Monte Carlo" são agrupadas séries de procedimentos que analisam distribuições de variáveis aleatórias utilizando simulação de números aleatórios.

2.4.4 Fundamentos teóricos das ferramentas a serem usadas para a seleção da biomassa

A seleção das espécies madeireiras e herbáceas como cultivo energético requer de uma análise multicritério que abarca aspectos políticos, econômicos, sociais, agroambientais, técnicos e tecnológicos. Neste estudo, somente se analisam os aspectos técnicos de algumas espécies nativas e introduzidas no Brasil. A análise de elegibilidade das espécies com maiores potenciais como cultivo energético está em função dos seguintes aspectos: domesticação da espécie, disponibilidade de germoplasma melhorado, produtividade, poder calorífico inferior, fusibilidade das cinzas e umidade de equilíbrio.

Para esta análise, foi adotada a metodologia de Análises da Envolvente de Dados (DEA) a qual tem sido aceita por pesquisadores e profissionais como instrumento de análise de desempenho e gerenciamento desde sua introdução em 1978 (ORAL, 2010). A relevância deste método é que ele pode ser aplicado usando variáveis qualitativas e quantitativas, obtido através da revisão da literatura científica

O DEA é uma metodologia de programação linear para medir a eficiência de Unidades de Decisão Múltiplas (UDM), baseada no conceito de “autoavaliação relativa” de cada DMU, construindo uma fronteira de dados a partir das entradas e saídas e fazendo a análise a partir da mesma, sem exigir pesos a priori sobre as entradas e saídas (LEE; FARZIPOOR SAEN, 2012).

As características principais do DEA foram exposta por LEE; FARZIPOOR SAEN (2012), listadas a seguir:

- O DEA é uma ferramenta eficaz para a avaliação da eficiência relativa das UDM estabelecidas na presença de várias medidas de desempenho.
- O DEA utiliza o conceito de fronteira eficiente como medida de avaliação de desempenho. A fronteira eficiente utilizada no DEA serve adequadamente como um padrão de excelência empírica.
- O DEA é capaz de lidar com a complexidade resultante da falta de uma escala comum de medição.
- Em DEA, não é preciso assumir a priori a existência de uma função de produção especial para a ponderação e agregação das entradas ou saídas.
- A objetividade decorrente das variáveis de ponderação do DEA durante o procedimento de otimização libera a análise das estimativas subjetivas.

A seguir serão apresentados os fundamentos matemáticos do DEA, para assim sustentar a objetividade do método.

2.4.4.1 Análise de envoltório de dados com um recurso e um produto

Pode-se explicar esse fundamento usando os conceitos de economia de um recurso (input) e um produto (output). Considera-se, inicialmente, um caso particular em que a fronteira de eficiência é uma reta que passa pela origem e de declividade representa a produtividade da DMU mais produtiva. Na Figura 2.18, ilustra-se o conceito, onde se pode ver que a UDM eficiente é representada pelo ponto de coordenada (X_{ef}, Y_{ef}) . A UDM O é uma UDM ineficiente. O ponto O'' é a projeção de O no eixo Y e o ponto O' é a projeção de O na fronteira eficiente (assumindo-se orientação a inputs).

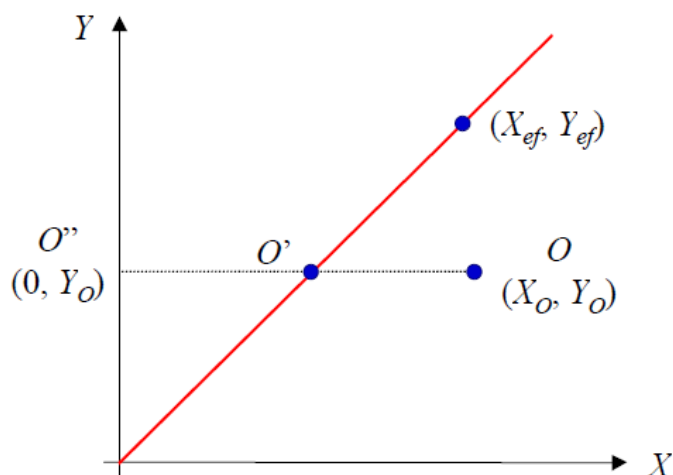


Figura 2.18. Gráfico de envolvente de dados com um recurso e um produto
Tomado de: (SOARES DE MELLO et al., 2005)

Agora, tem-se uma projeção horizontal, e o valor da ordenada não se altera. Assim, o ponto O'' tem por coordenadas $(0, Y_0)$, uma vez que está sobre o eixo. Para calcular as coordenadas do ponto O' , basta observarmos que ele resulta da intersecção da fronteira eficiente com a reta horizontal que passa por O .

$$\text{Assim, o sistema} \begin{cases} Y = Y_0 \\ Y = \frac{Y_{ef}}{X_{ef}} X \end{cases} \quad \text{fornece essas coordenadas, que são } X_0 = \frac{Y_0 X_{ef}}{Y_{ef}} \text{ e } Y_0 = Y_0$$

a produtividade da DMU eficiente é o coeficiente angular a da reta, dado por $a = \frac{Y_{ef}}{X_{ef}}$

Para calcular a eficiência de O , usamos as definições da seção anterior, considerando orientação a recursos. Assim, temos $Ef = \frac{\overline{O'Q''}}{O''O}$

O numerador da expressão acima é abscissa de O' e o denominador é a abscissa de O .

$$\text{Usando o valor de } O' X \text{ calculado acima, temos } Ef = \frac{\overline{O'Q''}}{O''O} = \frac{\frac{Y_0 X_{ef}}{Y_{ef}}}{X_0} = \frac{Y_0}{X_0} \frac{1}{\frac{Y_{ef}}{X_{ef}}} = \frac{P_0}{P_{ef}}$$

Este modelo é chamado de Modelo Envelope, por ser baseado em uma curva que limita a região onde as UDMs podem existir.

Agora, pode-se observar que a eficiência de uma UDM é a razão entre a produtividade (PO) e a produtividade da UDM mais eficiente (P_{ef}). Esta demonstração foi obtida com argumentos geométricos e com um único produto e um só recurso.

Se a eficiência é uma quantidade ligada ao quociente entre uma soma ponderada dos produtos e uma soma ponderada dos recursos, então para os pesos não serem arbitrários, e assim eliminarmos a subjetividade da análise, vamos permitir que cada UDM escolha os pesos mais apropriados, ou seja, aqueles que maximizem essa razão. Entretanto, isto não pode ser feito de forma totalmente livre, já que o resultado tem que ser uma eficiência, isto é, um número entre 0 e 1. Assim, impomos que os pesos que uma UDM O escolhe, quando aplicados a ela mesma e às outras (no total de k UDMs) não podem dar um quociente superior

à unidade. Estas considerações equivalem ao problema de programação matemática apresentado na Equação 2.4.

$$\text{Maximizar } \frac{uY_0}{vX_0}, \text{ sujeito a } \frac{uY_k}{vX_k} \leq 1, \text{ para todo } k \quad 2.4$$

Aplicando esta restrição tantas vezes quanto forem os números de UDMs, ou seja, é uma restrição para cada UDM. Além disso, é necessário impor a restrição de não negatividade dos pesos u e v (variáveis de decisão).

Observe-se que existe uma infinidade de valores das variáveis de decisão que conduzem a um mesmo resultado. Podemos contornar esse inconveniente se optarmos por não calcular o valor de cada variável, mas apenas o da sua razão. Essa razão deve ser a maior possível, sendo o seu valor limitado pela restrição mais forte, que é a restrição referente à UDM mais produtiva. Para esta DMU, o maior valor da razão entre as variáveis de decisão é dado pela expressão que *conduz* $Ef = \frac{P_0}{P_f}$, ou seja, o mesmo valor encontrado anteriormente.

O último modelo é chamado Modelo dos Multiplicadores, pois ele determina os coeficientes (pesos) dos produtos e dos recursos.

2.4.4.2 Modelos do DEA

- **Modelo CCR.** O modelo CCR, constrói uma superfície linear por partes, não paramétrica, envolvendo os dados. Trabalha com retornos constantes de escala, isto é, qualquer variação nas entradas (inputs) produz variação proporcional nas saídas (outputs). Esse modelo é igualmente conhecido como modelo CRS – Constant Returns to Scale.

Este modelo tem duas variantes, o modelo CCR orientado a *inputs* e o CCR orientado a *outputs*. O CCR orientado a *inputs*, determina a eficiência pela otimização da divisão entre a soma ponderada das saídas (output virtual) e a soma ponderada das entradas (input virtual) generalizando, permitindo que cada DMU escolha os pesos para cada variável (entrada ou saída) da forma que lhe for mais benevolente, desde que esses pesos aplicados às outras DMUs não gerem uma razão superior a 1. No caso do CCR orientado a *outputs*, maximiza as saídas mantendo inalteradas as entradas. Neste modelo, as variáveis de decisão são as mesmas do modelo orientado a *inputs*. Entretanto, o a inversa da eficiência,

denotada por h_o , representa por quanto todos os produtos devem ser multiplicados, mantendo-se constantes os recursos, para a DMU o atingir a fronteira eficiente.

- **Modelo BCC.** Considera retornos variáveis de escala, isto é, substitui o axioma da proporcionalidade entre inputs e outputs pelo axioma da convexidade. Por isso, esse modelo também é conhecido como VRS – Variable Returns to Scale. Ao obrigar que a fronteira seja convexa, o modelo BCC permite que DMUs que operam com baixos valores de inputs tenham retornos crescentes de escala e as que operam com altos valores tenham retornos decrescentes de escala.

A representação dos modelos CCR e BCC, pode-se ver na figura 2.19.

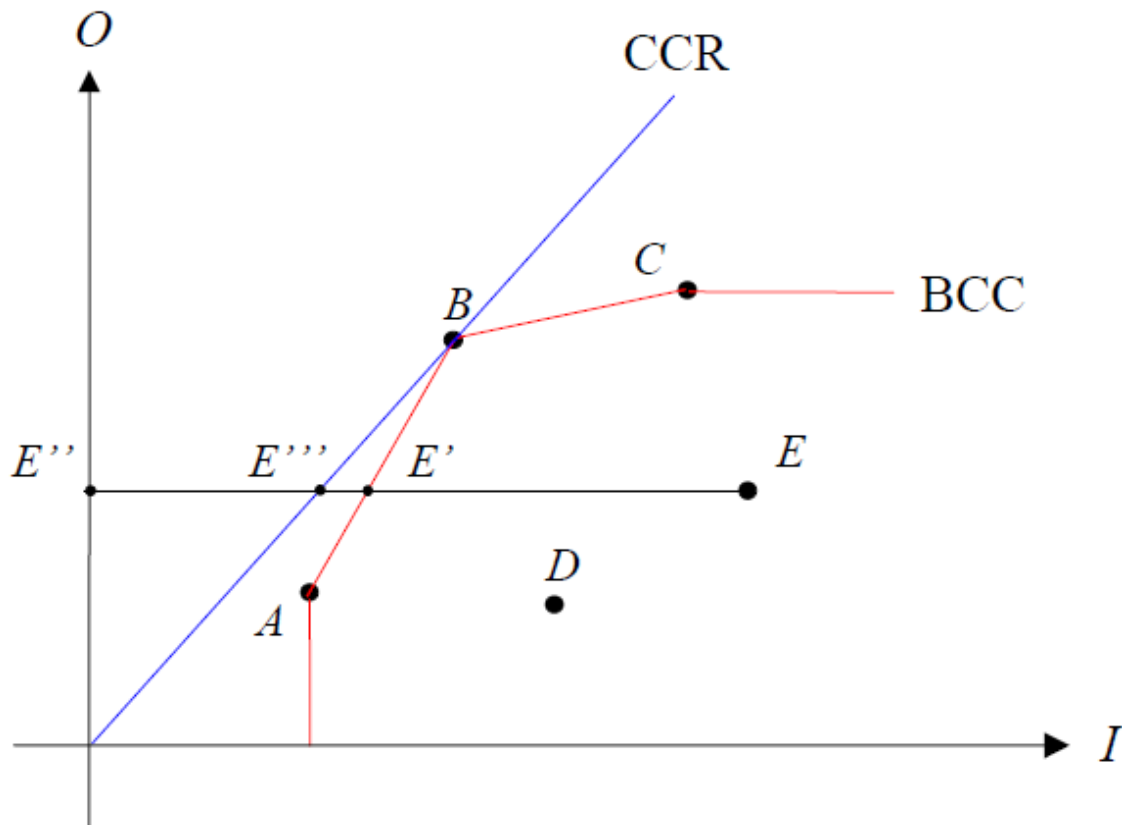


Figura 2.19. Representação gráfica dos modelos CCR e BCC

Fonte: SOARES DE MELLO et al. (2005)

Como resultado da análise do conceito de DEA, embora este modelo DEA tenham a vantagem de permitir fazer ordenações sem depender de opiniões de decisores, são extremamente benevolentes com as unidades avaliadas. Estas podem ser eficientes ao considerar apenas algumas das variáveis, aquelas que lhes são mais favoráveis. Essa

característica de benevolência dos modelos DEA faz com que ocorram empates para as unidades 100% eficientes, o que provoca uma baixa discriminação entre as DMUs.

A fronteira invertida é uma avaliação pessimista das DMUs. Para tanto, se faz uma troca dos inputs com os outputs do modelo original. Esta fronteira invertida é composta pelas DMUs com as piores qualidades (e podemos chamá-la de fronteira ineficiente). Podemos igualmente afirmar que as DMUs pertencentes à fronteira invertida têm as melhores práticas sob uma ótica oposta. A Figura 2.20 mostra as duas fronteiras, a clássica e a invertida, para o caso DEA BCC

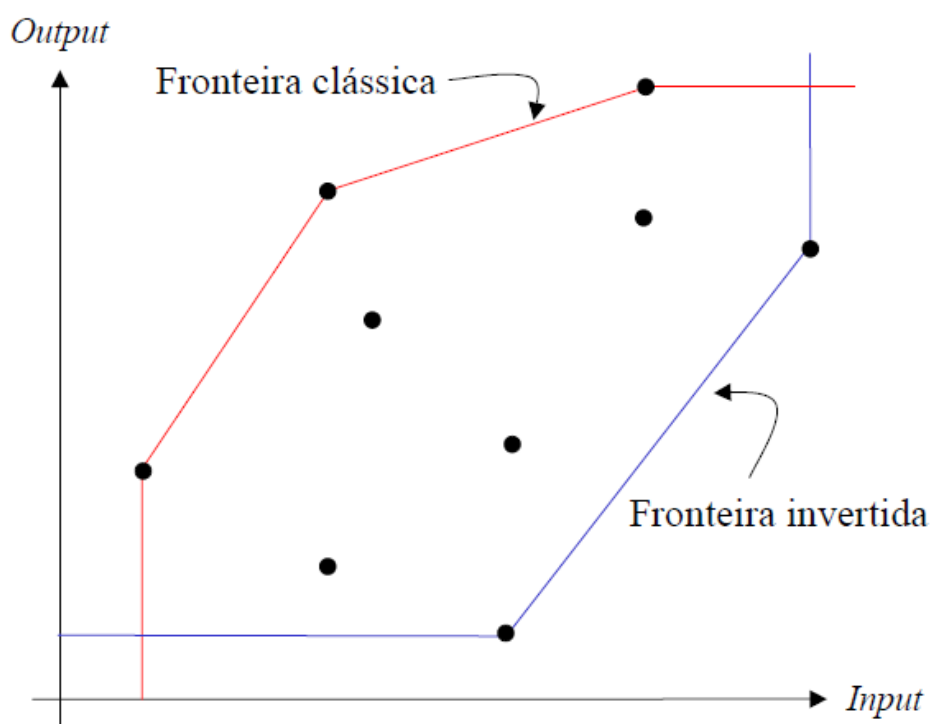


Figura 2.20. Fronteira BCC clássica e invertida

Fonte: SOARES DE MELLO et al. (2005)

2.4.4.3 Algumas aplicações do DEA na área energética

REN et al. (2014), usaram a Análise Envoltante de Dados (DEA) para avaliar o ciclo de vida da eficiência energética de seis biocombustíveis na China, analisando diferentes cenários eficientes e não eficientes, para identificar as perdas de energia na produção de bioetanol, especificamente: trigo, milho, mandioca e batata-doce como matérias-primas, usando o processo velho, o processo novo e os processos molhado e em seco. Usando como indicadores a energia incorporada nas sementes, máquinas, fertilizantes, diesel, produtos químicos e a

energia utilizada para a fabricação do etanol. Em quanto as saídas, foi avaliado o teor de energia do bioetanol e seus derivados. Os resultados obtidos indicam que o DEA é um método viável para encontrar cenários de produção de bioetanol eficientes e sugerem que a batata-doce pode ser a forma mais eficiente na produção de etanol para a China.

SCHUSCHNY (2007), utiliza o DEA para identificar aqueles países com maior desempenho para substituir os combustíveis fósseis por outros tipos de energia renovável, baseado em quatro indicadores que descrevem a atividade econômica, as emissões de CO₂ e o consumo de energia baseado no uso de fontes fósseis ou limpas e alternativas. Como conclusão deste trabalho pode-se mencionar a pertinência do método para a tomada de decisão em função de indicadores parciais da produtividade, desde um tratamento multidimensional.

PORTNOFF (2006), com o objetivo de avaliar o potencial de cultivos energéticas perenes para promover o aumento dos plantios em lugares com elevado declive e erosão intensiva em áreas de produção de alimentos, usando o DEA. Os indicadores utilizados no estudo foram: considerações do mercado (consumo de combustíveis fósseis), barreiras de infraestruturas de maior dimensão (requisitos para a produção de etanol e instalações são de 3 a 10 vezes maior do que para o biodiesel), apoio atual a estrutura de preço (custos dos alimentos Vs. Insumo para biocombustíveis). O resultado foi promover os cultivos de produção de óleo para biocombustíveis.

Existem muitas aplicações do DEA, mais foram consideradas estas neste trabalho pela similitude com o objetivo deste trabalho.

Capítulo 3 POTENCIAL TEORICO DOS SISTEMAS AGROENERGÉTICOS E POTENCIAIS DE GERAÇÃO NO BRASIL

3.1 SISTEMAS AGROENERGÉTICOS: Uma abordagem holística para o Brasil

O Brasil tem a necessidade de usar eficientemente os recursos naturais que possui, pelo que requer implantar sistemas Agroenergéticos sustentáveis. O ponto de partida são as entradas, que em sua maioria estão compostas pelos solos, condições agroambientais, tecnologias disponíveis, recurso humano e recurso econômico. Esse mesmo sistema tem que ter mecanismo para facilitar sua viabilidade, os quais são as políticas energéticas, agrícolas, florestal e ambiental. Neste mesmo sentido, o sistema Agroenergético requer um controle para garantir sua sustentabilidade mediante indicadores idôneos que permitam diagnosticar e regular seu funcionamento, em função das saídas: eficiências dos sistemas de geração, a potência elétrica gerada por superfície cultivada, os custos de geração, geração de empregos, emissões de gases efeito estufa, os serviços ambientais, o valor presente líquido, a taxa interna de retorno e o risco do investimento. Ver Figura 3.1. A seguir, será desenvolvido o conceito de cada componente do sistema Agroenergético para uma melhor compreensão.

3.1.1 Descrição geral do Brasil

O Brasil é um país com uma extensão de 8.514.876,599 km² e está dividido em 27 Unidades Federativas (26 estados e o Distrito Federal). Tem cinco regiões político-administrativas conformadas por estados: Norte (Acre, Amazonas, Roraima, Pará, Rondônia, Amapá e Tocantins); Nordeste (Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Bahia, Sergipe, Paraíba, Alagoas e Pernambuco), com uma extensão de 18,2% do território; Centro-Oeste (Distrito Federal, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul), ocupa 18,9% do território; Sudeste (Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo e São Paulo), com uma extensão do 10,8% do território e Sul (Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul), ocupa 6,8% do território do Brasil.

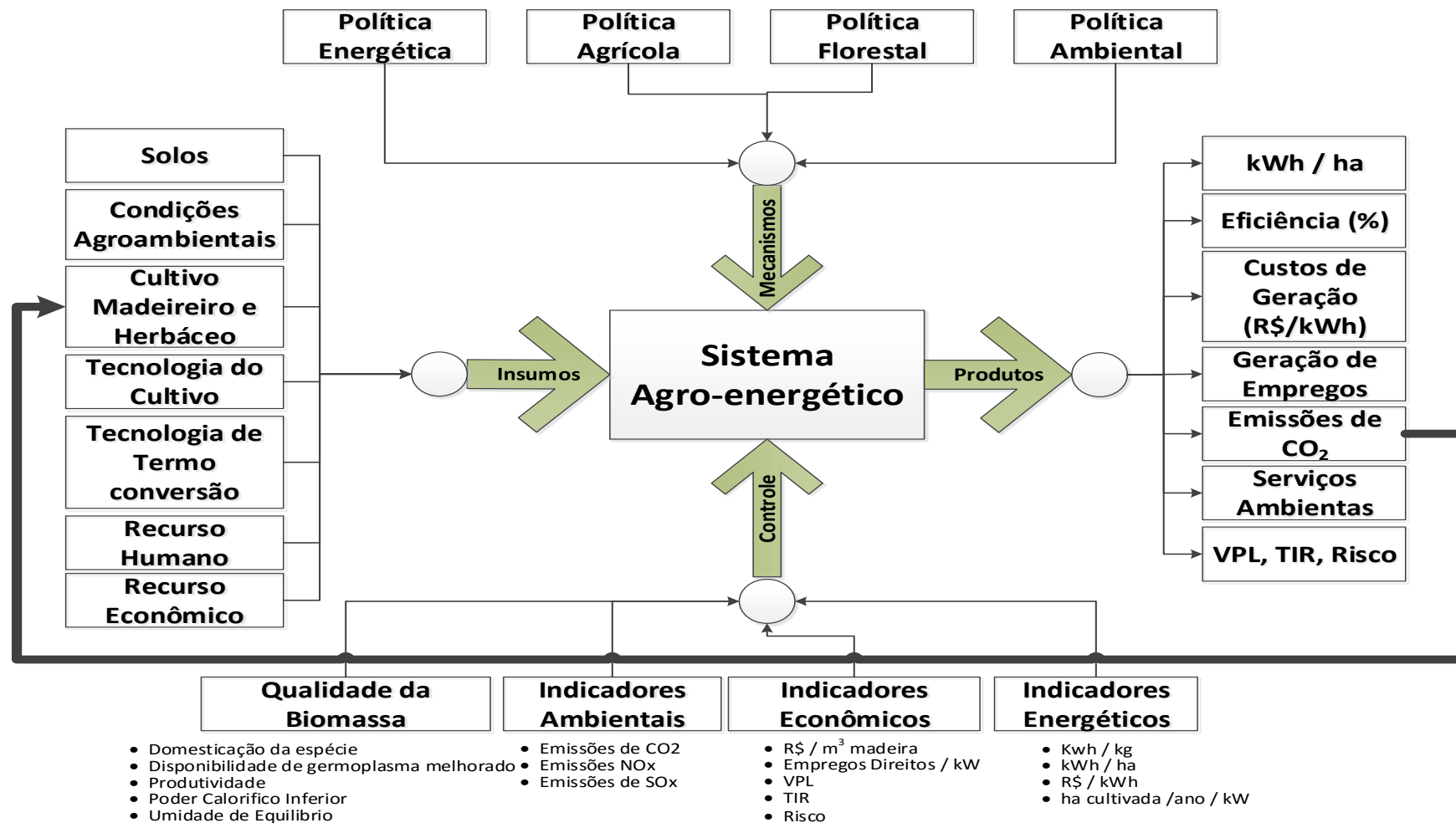


Figura 3.1. Componentes de um Sistema Agroenergético

3.1.2 Clima no Brasil

Segundo a ANA (2007), o território brasileiro está localizado em grande parte na zona intertropical. Relevo com baixas altitudes explicam a predominância de climas quentes, com médias de temperatura superiores a 20°C. Os tipos de clima presentes no Brasil são: equatorial, tropical, tropical de altitude, tropical atlântico, semiárido e subtropical, como é mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Tipos de clima no Brasil

Tipo de Clima	Características	Região de predominância
Clima equatorial	Temperatura média anual: 24°C - 26°C. Amplitude térmica: Não significativa durante o ano. Pluviosidade: superior aos 2.500 mm ano ⁻¹ .	Amazônica
Clima tropical	Temperatura média anual: 20°C - 28°C. Amplitude térmica: 7 °C no ano. Pluviosidade: 1.000 a 1.500mm ano ⁻¹ . O verão é quente e úmido, e o inverno, frio e seco.	Planalto central e as Regiões Nordeste e Sudeste
Clima tropical de altitude	Temperatura média anual: 18°C - 22°C. Amplitude térmica: entre 7°C e 9°C no ano. Pluviosidade: muito parecido ao clima tropical. As chuvas são mais intensas no verão devido às massas de ar tropical atlântica. No inverno, as frentes frias originárias da massa polar atlântica podem provocar geadas.	Partes altas do Planalto Atlântico do Sudeste estendendo-se pelo norte do Paraná e sul do Mato Grosso do Sul.
Clima tropical atlântico	Temperatura média anual: 18°C - 26°C. Amplitude térmica é crescente para o sul. Pluviosidade: 1.500mm ano ⁻¹ .	Faixa litorânea que vai do Rio Grande do Norte ao Paraná. Na região do litoral Nordeste as precipitações intensificam-se no outono e no inverno. Mais ao sul são mais fortes no verão.
Clima semiárido	É um tipo de clima tropical, portanto quente quando próximo ao árido (seco), com média anual de pluviosidade inferior a 1.000 mm. As chuvas concentram-se num curto período, geralmente três meses ao ano, o que leva às “secas do Nordeste”, os longos períodos de estiagem.	Sertão nordestino
Clima subtropical	Pluviosidade: superior a 1.500 mm. Chuvas bem distribuídas durante o ano. Observa-se a ocorrência de verão quente e inverno com baixas temperaturas, às vezes com nevascas ocasionais.	Parte de São Paulo, Paraná e Mato Grosso do Sul e os Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Fonte: (ANA, 2007)

3.1.3 Disponibilidade de água no Brasil para a produção de Biomassa

O Brasil tem posição privilegiada no mundo em relação à disponibilidade de recursos hídricos. A vazão média anual dos rios em território brasileiro é de cerca de 180 mil $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. Este valor corresponde a aproximadamente 12% da disponibilidade mundial de recursos hídricos, que é de 1,5 milhões de $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ e 28% da disponibilidade na América (ANA, 2007).

O território Brasileiro está dividido em 12 bacias hidrográficas com uma disponibilidade hídrica superficial com 95% de permanência de 46.486 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ disponibilidade hídrica específica superficial de 5,4 $\text{l s}^{-1} \text{km}^2^{-1}$ e 0,48 $\text{l s}^{-1} \text{km}^2^{-1}$ de disponibilidade hídrica subterrânea. Ver Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Parâmetros hidrológicos das regiões hidrográficas brasileiras

Regiões	Vazão média Q_{med} ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Vazão específica média ($\text{l s}^{-1} \text{km}^2$)	Disponibilidade Hídrica $Q_{95\%}$ ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Disponibilidade Hídrica Específica $Q_{95\%}$ ($\text{l s}^{-1} \text{km}^2$)	Reservas subterrâneas exploráveis ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Reservas subterrâneas exploráveis específicas ($\text{l s}^{-1} \text{km}^2$)
Amazônica	131.947	34,1	35.402	9,1	1.643	0,42
Tocantins - Araguaia	13.624	14,8	2.517	2,7	327	0,36
Atlântico Nordeste Ocidental	2.683	9,8	328	1,2	287	1,05
Paraíba	753	2,3	290	0,9	20	0,06
Atlântico Nordeste Oriental	779	2,7	32	0,1	12	0,04
S. Francisco	2.850	4,5	854	1,3	222	0,35
Atlântico Leste	1.492	3,8	253	0,7	48	0,12
Atlântico Sudeste	3.179	14,8	989	4,6	11	0,05
Atlântico Sul	4.174	22,3	624	3,3	173	0,92
Uruguai	4.121	23,6	391	2,2	323	1,85
Paraná	11.452	13,0	4.021	4,6	943	1,07
Paraguai	2.368	6,5	785	2,2	85	0,24
Brasil	179.422	21,0	46.486	5,4	4.093	0,48

Fonte: ANA (2007).

3.1.4 Solos Brasileiros

A grande diversidade de “tipos” de solos é condicionada pelas formas e tipos de relevo, clima, material de origem, vegetação e organismos do solo. Aproximadamente 58% da superfície do Brasil são das classes Latossolos e Argissolos e são solos profundos, altamente

intemperizados, ácidos, de baixa fertilidade natural e, em certos casos, saturados por alumínio. Também existem solos de média a alta fertilidade e são em geral pouco profundos em decorrência de seu baixo grau de intemperismo, caracterizados nas classes dos Neossolos, Argissolos, Luvisolos, Planossolos, Nitossolos, Chernossolos e Cambissolos (GONÇALVES DOS SANTOS et al., 2011). Ver Tabela 3.3.

Todas as classes de solos têm propriedades físicas, químicas e biológicas cujo conhecimento é básico para a planificação de uso baseado em suas potencialidades e construção do zoneamento agrícola, em favor de uma abordagem globalizante e integrativa para programar um melhor aproveitamento na percepção da dinâmica de sistemas e subsistemas ambientais, bem como de suas interrelações.

Tabela 3.3. Extensão e distribuição das classes de solos no Brasil.

Classes	Área Absoluta (km ²)	Área Relativa (%)
Argissolos	2.285.371,12	26,94
Cambissolos	446.544,52	5,26
Chernossolos	37.206,02	0,44
Espodossolos	167506,11	1,97
Gleissolos	397.641,02	4,69
Latossolos	2.681.566,30	31,61
Luvisolos	241.908,70	2,85
Neossolos	1.122.594,19	13,23
Nitossolos	96.532,46	1,14
Organossolos	2.231,22	0,03
Planossolos	226.559,96	2,67
Plintossolos	589.701,01	6,95
Vertissolos	17.630,86	0,21
Afloramentos de rochas	10.827,71	0,13
Dunas	4.301,43	0,05
Águas e outros	155.214,30	1,83
Total	8.483.337,00	100

Fonte: Gonçalves dos Santos et al. (2011).

No Brasil, existe uma classificação da capacidade de uso dos solos. É uma versão modificada da classificação Americana apresentada pela FAO (1977), com a inovação de incorporar a unidade ou grupo de manejo, que representa grupamentos de terras, recebendo as mesmas práticas, devido a respostas similares ao tratamento, adotando três níveis de manejo (primitivo, pouco desenvolvido e desenvolvido), seis grupos de aptidão e quatro classes de aptidão (boa, regular, restrita, inapta)(RAMALHO F.; CHARLET P., 1999). Ver Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Aptidão agrícola das terras do Brasil

Tipo de Utilização	Região	Superfície (km ²)	Aptidão Específica para Lavoura (km ²)					Parques e reservas equivalentes (km ²)
			Ciclo curto e longo	Ciclo curto	Ciclo longo	Dois cultivos por ano	Culturas especiais	
Lavoura	Norte	2.792.644	1.937.365	348.476				506.803
	Nordeste	793.159	445.268	334.038		84.663	309.118	13.853
	Sudeste	565.741	529.805	35.105		124.454		831
	Centro-Oeste	976.763	964.532	5.819		142.207		6.412
	Sul	369.786	276.584	88.858		270.422	93.085	4.344
Total		5.498.093	4.153.554	812.296		621.476	402.203	532.243
Pastagem plantada	Norte	288.139			5.553			49.091
	Nordeste	112.191			3.334		5.055	15.832
	Sudeste	140.425			71.095		8.555	446
	Centro-Oeste	361.518			25.498			90
	Sul	62.061			22.571		9.254	890
Total		964.334			128.051		22.864	66.349
Pastagem natural e/ou silvicultura	Norte	13.770						2.125
	Nordeste	462.967					103.704	3.539
	Sudeste	136.470						270
	Centro-Oeste	284.215						1.574
	Sul	43.874					2.913	297
Total		941.296					106.617	7.805
Sem aptidão para uso agrícola	Norte	457.770						95.227
	Nordeste	168.427					26.993	2.444
	Sudeste	80.174					4.933	1.831
	Centro-Oeste	257.443						1.154
	Sul	32.295						785
Total		996.109					31.926	101.441

Fonte: Ramalho Filho & Charlet Pereira (1999)

De acordo com os dados apresentados na Tabela 3.4, pode se ver que existem 96 milhões de hectares aptas para pastagem plantada (11,48%) e 94 milhões para pastagem natural e/ou silvicultura (11,21%). Além de existir 99,6 milhões de hectares sem aptidão agrícola, isto é, 11,85% das terras podem ser aptas para o recreio e refúgio da fauna. Do total das terras no Brasil, 65% são aptas para a produção de alimentos.

No que se refere à atividade pastagem plantada, verificou-se que a região Sul se destacou positivamente, apresentando um potencial de 56% (34.125 km²) com aptidão boa, seguidos de 28% (16.836 km²) com aptidão regular e apenas 17% (10.210 km²) com restrições mais fortes ao uso. As demais regiões apresentaram-se constituídas de terras cuja classe de aptidão agrícola foi, predominantemente, regular, seguida de restrita. Com relação às terras para silvicultura, também houve destaque para a região Sul, onde cerca de 48% de suas terras, equivalentes a 10.449 km², apresentaram aptidão variando de Boa a Regular (14% e 34%, respectivamente), ficando o restante, com um total de 11.238 km² ou 52%, com aptidão Restrita. A região Nordeste, apesar da alta percentagem de terras com aptidão Restrita (67% ou 71.854 km²), apresentou 141.564 km², o que corresponde a 31% de suas terras, com aptidão Regular, ficando 1.939 km² (ou 2%) com aptidão Boa para utilização com silvicultura (RAMALHO F.; CHARLET P., 1999).

No território Brasileiro, tem se identificado também Áreas Susceptíveis a Desertificação (ASD) com uma extensão de 1,34 milhões de km² aproximadamente, das quais 40,1 % estão fortemente antropizadas e 14,1% na zona de cerrado. Unidades de Conservação representam uma área de 4,97% onde a fauna e a flora são conservadas, assim como os processos ecológicos que regem os ecossistemas, garantindo a manutenção da biodiversidade. A delimitação é mostrada na Figura 3.2. As ASD foram determinadas seguindo os pressupostos norteadores da Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação (UNCCD), que propõem a adoção do índice de aridez (IA), base da classificação climática de Thornthwaite (1941). Este índice é calculado pela razão entre a precipitação pluviométrica e a evapotranspiração (MMA/UFP, 2007).

O relevo das ASD é caracterizado por planaltos e depressões, com uma alta variabilidade espacial dos índices médios de chuva (600 a 2.100 mm). A região central das ASD é a mais crítica para as secas. Em 30% das ASD predominam solos caracterizados por serem muito profundos, com textura variada, geralmente de origem sedimentar, relevo plano e fertilidade

baixa a média. São solos bem drenados e aptos à irrigação. Estão presentes em 15% das ASD solos que são geralmente profundos com horizontes superficiais variáveis e horizonte com elevado conteúdo de argila o B textural. Quando são sódicos, podem apresentar problemas de salinidade. Os solos mais aptos para agricultura estão distribuídos dispersamente nas ASD e cobrem apenas 5% do seu território. Eles são caracterizados por serem profundos, bem drenados, predominantemente de textura média ou argilosa, com fertilidade natural variando de alta a média. As áreas classificadas como desaconselháveis para o cultivo agrícola correspondem a 32% (0,43 milhões de km²) das ASD. Segundo o IBGE (1992), essas áreas possuem limitações muito fortes de solos e/ou topografia (MMA/UFP, 2007).

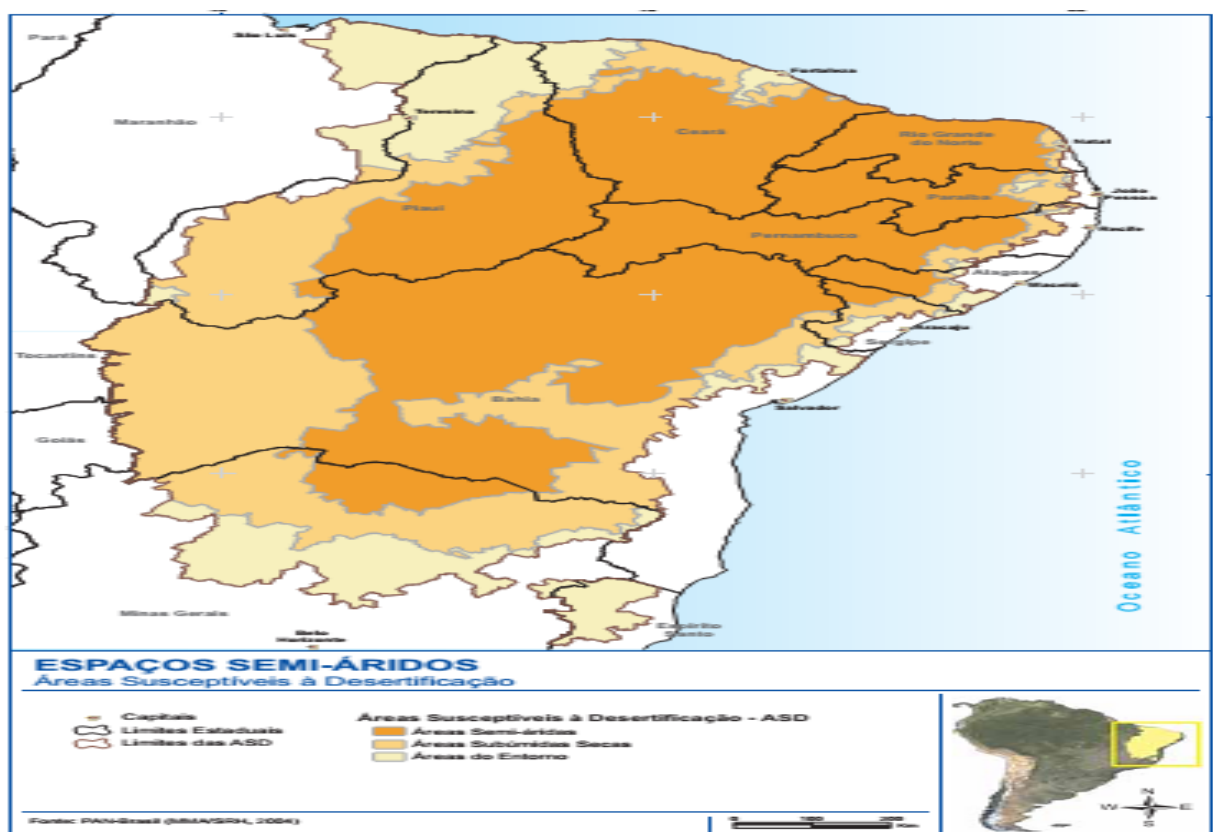


Figura 3.2 Áreas suscetíveis a desertificação
Fonte: MMA/UFP, (2007)

3.1.5 Disponibilidade de terras para produção de alimentos no Brasil

O Brasil por ser um país continental e possuir condições adequadas para o desenvolvimento agrícola (solos e clima) destaca-se atualmente como um dos principais produtores e exportadores de diversos produtos agrícolas (EMBRAPA, 2008). O setor de alimentos no Brasil participa em 9,5% do PIB, com uma venda total de US\$431, 9 bilhões no

ano de 2012, dos quais foram exportados US\$ 43,4 bilhões, o que equivale a 20% das vendas totais (ABNIA, 2012), usando 31% das terras com potencial para aproveitamento agrícola, embora tenha uma potencialidade de 4,96 milhões de km². Ver Figura 3.3.

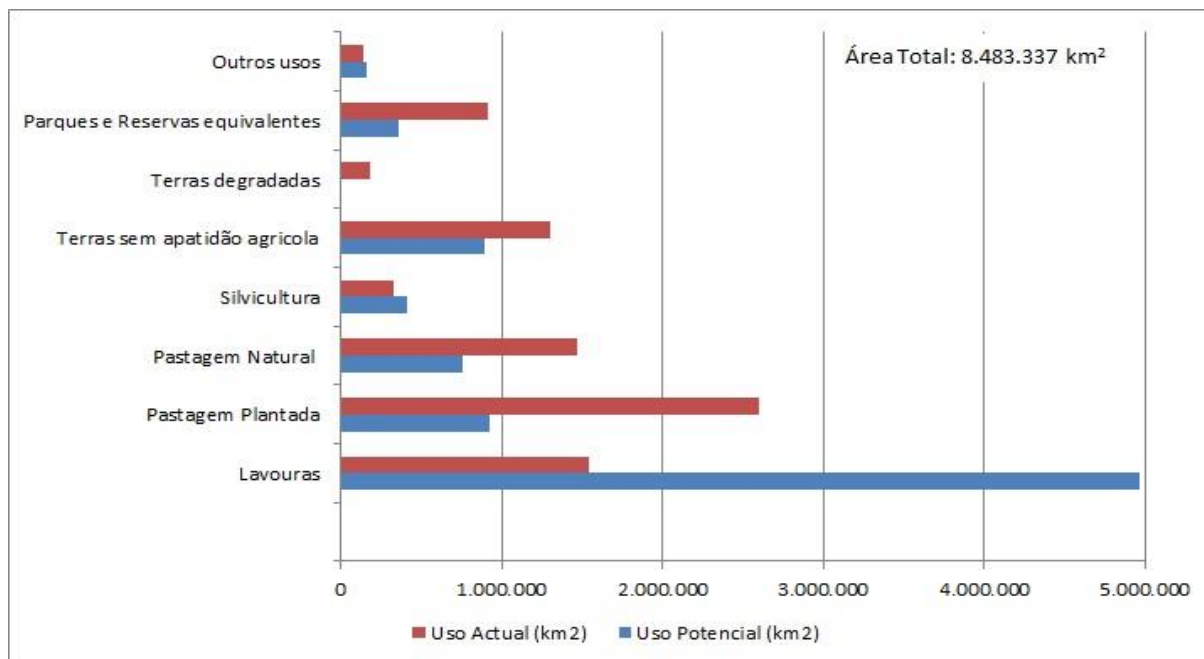


Figura 3.3. Aproveitamento dos solos no Brasil

Fonte: adaptado de RAMALHO F.; CHARLET P., (1999) e DIEESE (2011)

Com relação às terras com aptidão para pastagem natural e plantada, observa-se que as áreas em uso atual são maiores que as áreas potencialmente utilizáveis para esta atividade, evidenciando-se um conflito no uso dos solos. Pode ser que áreas aptas para lavouras estão sendo usadas para pastagem e a consequente criação de gado, o que põe em risco de degradação destes solos pela compactação, além de um uso inadequado e irracional. A área com possível conflito ascende a 2,4 milhões de km².

Também se observa que as áreas potencialmente não aptas para a agricultura e que são destinadas para a preservação da flora e fauna silvestre são, atualmente, maiores que 0,4 milhões de km². O mesmo ocorre com parques e reservas equivalentes, que são maiores que seu uso potencial em 0,55 milhões de km². Outro aspecto relevante é a existência de 0,18 milhões de km² de terras degradadas, reportada por DIEESE (2011), pelos usos inadequados dos solos e aspectos climáticos.

Desta análise pode se concluir que existe a necessidade de compatibilizar o uso das terras potencialmente utilizáveis para lavouras com a criação de gado com sistemas intensivos de produção de precisão, elevando com isto sua produtividade e favorecendo um aproveitamento adequado das terras aptas para pastagem, em possível implantação de sistemas agroenergéticos sem conflitos com a segurança alimentar e apoiando a segurança energética, sem agredir a biodiversidade.

3.1.6 Espécies vegetais no Brasil

Com mais de 56.000 espécies de plantas (excluindo fungos), o Brasil tem uma das floras mais ricas do mundo – quase 19% da flora mundial (GIULIETTI, 2005) - distribuídos em seis grandes Domínios Fitogeográficos: a Amazônia (que ocupa 49,29% do território), o Cerrado (23,92%), a Mata Atlântica (13,04%), a Caatinga (9,92%), o Pampa (2,07%) e o Pantanal (1,76%) (IBGE, 2010). Dentro de cada Domínio Fitogeográfico, há uma grande variedade de tipos de vegetação, fitofisionomias, habitats e microhabitats que são ocupados por uma ampla diversidade tanto de plantas e fungos como de animais. (JBBRJ/CNCFLORA, 2010). Isto gera uma complexidade inigualável para o aproveitamento sustentável desses recursos, dada a fragilidade dos ecossistemas e da quantidade importante de territórios definidos como reservas públicas e privadas.

No Brasil existem cerca de 7.880 espécies arbóreas reportadas com estimativa da existência de cerca de 11.120 espécies arbóreas somente na floresta Amazônica (SNIF, 2013). É considerado um país florestal com aproximadamente 516 milhões de hectares ocupadas por florestas, equivalentes a 60,7% do seu território, dos quais 59,9% são florestas naturais e 0,8% plantadas. As florestas plantadas ocupam um território de 6,8 milhões de hectares, principalmente com espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, que representam 93% do total (SFB, 2010).

As áreas de pastagem no Brasil são aproximadamente 180 milhões de hectares, entre naturais, nativas, artificiais ou cultivadas. A pastagem natural é uma pastagem onde a vegetação original (vegetação clímax) é composta principalmente de espécies herbáceas (gramíneas e não gramíneas) e arbustos. A Pastagem nativa é a vegetação nativa espontânea de algum valor forrageiro, que surge após a destruição parcial ou total da vegetação original, como savana, campo cerrado, agreste, caatinga, etc. Surge também em áreas de cultura

abandonada ou terras de pastagens artificiais ou cultivadas abandonadas. As Pastagens artificiais são pastagens estabelecidas com espécies exóticas ou nativas onde a vegetação original foi excluída. Atualmente existem aproximadamente 110 milhões de hectares em pastagens artificiais e cultivadas com diversas variedades de capins (PETERSEN et al, 2012).

Ao juntar as espécies madeireiras e herbáceas existentes no Brasil, as potencialidades das terras para seu aproveitamento agrícola e as tecnologias de produção com profissionais capazes de domesticar estas espécies evidencia-se possibilidades sustentáveis para a geração de energia mediante cultivos energéticos em sistemas agroenergéticos.

3.2 POTENCIAL TEÓRICO DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE CULTIVOS ENERGÉTICOS MADEIREIROS E HERBÁCEOS NO BRASIL

A produção de material vegetal energético alternativo representa hoje um dos grandes desafios para a ciência, pela necessidade de que esse vegetal seja economicamente competitivo, com tecnologias que garantam a produção de energia com balanços energéticos altamente positivos de maneira sustentável. Além disso, deve se produzir quantidades importantes de biomassa vegetal em terras pouco produtivas ou degradadas na procura de não atentar contra a segurança alimentar.

Tendo em conta que o potencial teórico sustentável dos solos não deve gerar conflito nenhum com os demais potenciais (econômico e técnico), sugere-se usar as terras segundo sua aptidão agrícola e assim obter melhores PPB e/ou PPL. Consequentemente, como estratégia para não causar conflito de uso do território se propõe selecionar as terras com grau de erosão severa e declive superior aos 15%, em solos classificados como IV, V, VI e VII. Ver Figura 3.4. É necessário escolher o melhor cultivo energético de acordo com a oferta edafoclimática existente no Brasil e os aspectos técnicos, econômicos e ambientais do cultivo.

No Brasil, já é utilizado uma quantidade considerável de sua superfície em cultivos energéticos para a geração de bioenergia. De cana-de-açúcar foram plantadas 9.601.316 hectares no ano de 2011 (IBGE, 2010), ou seja o 1.7% das terras aptas para as lavouras. No caso do Eucalipto, a área plantada existente no ano de 2011 foi de 7 milhões de hectares (SAE, 2011), ou seja o 7.44 % das terras com aptidão para a silvicultura.

GRAUS DE EROSÃO	GRAUS DE DECLIVE					
	A	B	C	D	E	F
	0-3%	3-8%	8-15%	15-25%	25-35%	Mas de 35%
PRATICAMENTE SIM EROSÃO	Áreas para produção de alimentos					
MUITO SUAVE						
SUAVE						
MODERADA						
SEVERA DE MENOR GRAVIDADE	Área disponível para cultivos energéticos madeireiros e herbáceos					
SEVERA COM ALGUMAS TRINCHEIRAS						
SEVERA, MUITO SEVERA COM TRINCHEIRAS O EROSÃO MANTIFORME MUITO AVANÇADA	Área disponível para recreio e refugio da fauna					

Figura 3.4. Área potencial para cultivos energéticos segundo sua capacidade de uso.

Em contraste com a aptidão agrícola dos solos de Brasil, REDEAGRO (2012) apresenta a distribuição porcentual de uso dos solos assim: mais de 65% das terras está coberta por vegetação nativa, áreas protegidas públicas e privadas e áreas não protegidas. Todas as culturas agrícolas (grãos, cana-de-açúcar, frutas e florestas plantadas) ocupam 60 milhões de hectares, isto é, 7% do território. O uso urbano corresponde a 4% e 23% em pastagens. Por outro lado, o IBGE (2010) mostra a espacialização da distribuição dos usos do solo em todo o território brasileiro no ano de 2006, não sendo muito diferente à apresentada por REDEAGRO (2012). Ver anexo C. Isto evidência a existência de potenciais áreas para a expansão de sistemas agroenergéticos.

Na Figura 3.3 foi evidenciada uma área de 2,3 milhões de km² em conflitos de uso entre solos com potencialidades para lavouras e solos usados em pastagem com a consequente criação de gado. Esta área é suscetível para desenvolver sistemas Agroenergéticos tipo agroflorestal ou agrosilvopastoril.

Também são suscetíveis de aproveitamento em sistemas energéticos 0,18 milhões de km² de terras degradadas existentes. Neste mesmo sentido, 0,55 milhões de km² de terras altamente antropizadas e 0,19 milhões de km² de terras do cerrado nas ASD, além de propender por sua recuperação melhorando suas qualidades produtivas.

É relevante a escolha de espécies vegetais com um elevado poder de adaptabilidade às condições brasileiras para um melhor aproveitamento das potencialidades do entorno edafoclimático.

3.2.1 Seleção dos Cultivos Energéticos Madeireiros e Herbáceos com maiores potenciais no Brasil

A seleção das espécies madeireiras e herbáceas como cultivo energético, requer de uma análise multicritério que abarca aspectos políticos, econômicos, sociais, agroambientais, técnicos e tecnológicos. Neste estudo, somente foram analisados os aspectos técnicos de algumas espécies nativas e introduzidas no Brasil (Tabela 3.5). A análise de elegibilidade das espécies com maiores potenciais como cultivo energético está em função dos seguintes aspectos: domesticação da espécie, disponibilidade de germoplasma melhorado, produtividade, poder calorífico inferior, fusibilidade das cinzas e umidade de equilíbrio.

A seleção foi feita utilizando o método de Análise de Envolvente de Dados - DEA, que é uma ferramenta matemática para medir a eficiência de unidades de produção. Em um primeiro passo está definida uma escala de 1 a 3 para classificar as variáveis "domesticação de espécies" e "disponibilidade melhorada de germoplasma", com valor de 1 para o nível mais baixo, 2 para o nível intermediário e o valor de 3 para o nível mais alto. As outras variáveis foram tomadas a partir da literatura científica. Ver Tabela 3.5. A melhor biomassa é a que tem o valor de um (1) o mais próximo de um (1), sendo os valores mais eficientes.

Através da aplicação do método DEA, usando o software " Sistema Integrado de Apoio à Decisão - Siad" foi quantificada a eficiência de acordo com o modelo BCC com orientação a inputs. Este modelo considera retornos variáveis de escala, isto é, substitui o axioma da proporcionalidade entre inputs e outputs pelo axioma da convexidade [65].

Foi necessário estabelecer 8 UDM: Acacia (*Acacia mearnsii*), Pino (*Pinus*), Eucalipto (*Eucalyptus*), Angico (*Anadenanthera macrocarpa*), Tamboril (*Enteroplobium contortosiliquum*), Miscantus (*Mischantus*), Capim elefante (*Pennisetum purpureum*) e Sorgo lignocelulosico (*Sorghum lignocellulosic*). Também foi necessário identificar qual variável deve ser mínima e qual deve máxima. Então, as variáveis DE, DGM, Pr, PCS e Db foram consideradas que devem ser máximas e tratadas como *outputs* e a variável CH foi considerada como mínima e tratada como inputs, cujo objeto foi calcular a eficiência de desempenho da

UDM. O resumo dos resultados são os mostrados na Tabela 3.6. A memória de cálculo encontra-se no anexo A.

Tabela 3.5. Análise das espécies madeireiras e herbáceas como combustíveis sólidos.

Espécies		Aspectos Técnicos						Referência
		DE	DGM	Pr	PCS	CH (bh)	DB	
		-	-	m ³ ha ⁻¹	MJ kg ⁻¹	%	kg m ⁻³	
		Máx	Máx	Máx	Máx	Min	Máx	
Madeireiros	<i>Acacia mearnsii</i>	2	2	17.5	19.0	20.0	618.0	(CERBINO CINTRA, 2009; COUTO, 2014; QUIRINO et al., 2004)
	<i>Pinus</i>	2	1	28.8	21.2	40.0	366.0	(QUIRINO et al., 2004), (CERBINO CINTRA, 2009)
	<i>Eucalyptus</i>	3	3	50.0	18.9	53.7	495.0	(CERBINO CINTRA, 2009; COUTO, 2014; QUIRINO et al., 2004)
	<i>Anadenanthera macrocarpa</i>	1	1	27.0	18.8	55.0	650.0	(CERBINO CINTRA, 2009; QUIRINO et al., 2004)
	<i>Enteroplobium contortosiliquum</i>	1	1	30.0	19.8	58.0	330.0	(QUIRINO et al., 2004), (CERBINO CINTRA, 2009)
Herbáceos	<i>Mischantus</i>	1	1	384.6	16.0	44.0	780.0	(TEAGASC; AFBI, 2011), (MAY et al., 2012)
	<i>Pennisetum purpureum</i>	3	3	333.3	17.0	75.0	600.0	(MAY et al., 2012), (MAZZARELLA, 2012b)
	<i>Sorghum lignocellulósic</i>	2	1	171.7	16.0	80.0	680.0	(MAY et al., 2012), (GOSSE, 1996)

Observação: 1 = baixo; 2 = meio; 3 = alto. DE: domesticação da espécie; DGM: disponibilidade de germoplasma melhorado; Pr: produtividade; PCS: poder calorífico superior; CH: conteúdo de umidade (base úmida).

Segundo os resultados mostrados na Tabela 3.6, é selecionado o Eucalipto e o Capim Elefante, por serem as espécies mais eficientes para se usar como cultivo energético para a produção de biomassa combustível no Brasil. Vale ressaltar a importância das variáveis de domesticação da espécie e disponibilidade de germoplasma melhorado, por ser o eixo principal de um sistema produtivo, o que implica que uma espécie não elegível hoje pode ser elegível nos próximos anos.

Tabela 3.6. Resultado da aplicação do método DEA na seleção da espécie madeireira e herbáceo como combustível sólido

Espécies	Fronteira padrão	Fronteira Invertida	Fronteira Composta	Eficiência Normalizada
<i>Acacia mearnsii</i>	1.00	1.00	0.50	0.99
<i>Pinus</i>	1.00	1.00	0.50	0.99
<i>Eucalyptus</i>	1.00	0.99	0.50	1.00
<i>Anadenanthera macrocarpa</i>	1.00	1.00	0.50	0.99
<i>Enterolobium contortolosquum</i>	0.48	1.00	0.24	0.48
<i>Mischantus giganteus</i>	1.00	1.00	0.50	0.99
<i>Pennisetum purpureum</i>	1.00	1.00	0.55	0.99
<i>Sorghum lignocelulosico</i>	0.67	1.00	0.33	0.67

3.2.1.1 Capim Elefante (*Pennisetum purpureum Schumacher*)

A espécie vegetal capim elefante tem entre 200 e 300 variedades diferentes. É uma gramínea parecida à cana-de-açúcar e principalmente utilizada na alimentação do gado. Tem alto teor de fibra (65%) razão pela qual pode ser usada como fonte de energia renovável (KAUTER; LEWANDOWSKI; CLAUPEIN, 2003). É uma espécie de porte ereto, hastes robustas com centro sólido que pode alcançar entre 2 e 8 m de altura e até 2.5 cm de diâmetro na base. Suas folhas medem entre 50 e 90cm de comprimento e entre 1 e 3 cm de largura, com alta taxa fotossintética (0,55 - 0,06 mol de CO₂ por quantum absorvido) e, devido ao mecanismo de fixação de CO₂ atmosférico denominado C4, requer menor quantidade de nitrogênio e água para seu desenvolvimento, é de rápido crescimento e sua colheita pode ser mecanizada. Por ser uma espécie cespitosa, não cobre totalmente o solo, o que permite seja utilizada em áreas acidentadas nas quais pode controlar razoavelmente a erosão. Pode crescer desde o nível do mar até 2.200 m, sendo mais bem adaptada aos 1.500 m numa ampla variedade de solos, apresentado rendimentos elevados em solos úmidos de textura média, ricos em minerais e pH entre 4,5 e 8,2. Requer uma precipitação entre 800 e 4000 mm com um valor ótimo de 1500 mm. A temperatura oscila entre 18 e 30 °C, sendo a ótima 24 °C. Tem pouca tolerância à seca, seu rendimento pode ser afetado pela falta de umidade. Pode crescer sombreada pero não totalmente (PIKETTY *et al.*, 2009; USDA, 2012; SAGE; MONSON, 1998), pelo que é adequada para associar com cultivos madeireiros em sistemas agrosilvicultural e agroflorestal.

Um parâmetro importante para a seleção da variedade de Capim elefante como fonte energética é a relação C:N em sua composição. Ela evidencia a eficiência na captação do nitrogênio e sua conversão em energia em forma de carbono renovável (QUESADA *et al.*,

2004). Na Tabela 3.7, pode se observar as variações na produção e na relação C:N, que podem ser atribuídas principalmente ao solo, às práticas de manejo e às características genéticas de cada variedade. No aspecto energético, o poder calorífico é maior quanto maior é o conteúdo de lignina e extrativos, porque esta contém menos oxigênio que os polissacarídeos presentes na celulose e hemicelulose (CUNHA et al., 1989).

Tabela 3.7. Algumas características produtivas e energéticas do Capim Elefante em solos acrisolos e planossolos com três cortes durante 22 meses - primeiro corte aos 9 meses – no Brasil.

Genotipo	Tipo de solo	Produção (Mg ha ⁻¹)	Relação C:N	Conteúdo de Fibra	Celulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)
CNPGL F 0-63	Acrissolo	59.4	98	43.6	28.4	12.0	1.9
Gramafante		53.4	118	42.8	27.3	11.8	2.4
Bag 02		66.4	96	51.4	33.9	13.5	2.2
Roxo		53.0	87	37.7	22.9	12.6	2.2
Cameroon		61.9	84	42.8	28.7	9.7	3.0
CNPGL F 0-63	Planossolo	58.2	107	40.3	27.4	12.5	3.0
Gramafante		53.1	121	41.9	28.0	13.7	2.8
Bag 02		55.6	82	41.0	29.6	12.6	2.5
Roxo		45.0	75	41.4	26.1	12.6	2.5
Cameroon		63.1	73	41.6	26.8	13.3	3.3

Fonte: MORAIS; SOUZA; LEITE (2009)

Enquanto o eucalipto no Brasil produz até 20 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹, o capim elefante atinge entre 30 e 40 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹, acumulando um total de 12,6 e 16,8 tC ha⁻¹ ano⁻¹ respectivamente. Estas produções elevadas do capim elefante são associadas a sua capacidade fixadora de nitrogênio (elemento essencial na produtividade vegetal) pela existência no interior da planta de bactérias diazotróficas (*Glucanacetobacter diazotrophicus* y *Herbaspirillum*) que contribuem significativamente na fixação biológica de nitrogênio, o que pode ser a explicação das altas produções de biomassa, embora os solos sejam pobres em nitrogênio disponível (MAZZARELLA, 2012 e MORAIS; SOUZA; LEITE, 2009). A haste é a parte mais importante para a produção de energia, devido ao elevado conteúdo de fibras que atinge 52% (QUESADA et al., 2004). Pelo elevado conteúdo de cinzas (10,9%) atribuído à presença de sais de K e pela aplicação indevida de N, seu uso em processos de gaseificação é limitado (FERNANDES CORTÊS, 2000). As cinzas podem causar problemas diversos por possível fusão e acumulação, modificando as seções do reator, entupindo e causando bloqueio das grelhas. (ALVES FLORES, 2009; RENDEIRO et al., 2008). O PCS é superior aos 17,00 MJ kg⁻¹ (ZANETTI, 2010).

3.2.1.2 Eucalipto (*Eucalyptus* sp)

O Eucalipto (do grego, eu + καλύπτω que significa “verdadeira cobertura”) é o nome vulgar de várias espécies do género *Eucalyptus*, pertencente à família das mirtáceas, que compreende outros 130 géneros. Existem mais de 700 espécies catalogadas de eucalipto (VITAL, 2007). Os requerimentos edafoclimáticos são variáveis de acordo com a sua genética. Na Tabela 3.8, são mostrados os requerimentos climáticos de algumas espécies de Eucalipto de importância econômica no mundo. Pode se observar que a faixa requerida de precipitações média anual varia entre 250 e 3500 mm para as diferentes espécies. A temperatura apresenta variações entre 25 e 28 °C. Tem resistência a temperaturas absolutas mínimas entre -14 e -3 °C. Esta variabilidade nas condições climáticas sugere a necessidade da escolha da melhor espécie de acordo com as condições do local de interesse e a finalidade dos produtos.

Tabela 3.8 Requerimentos climáticos de algumas espécies de Eucalipto

Variedade	Precipitação média Anual (mm)	Estação Seca (mês)	Temperatura máxima média no mês mais quente (°C)	Temperatura mínima média no mês mais frio (°C)	Temperatura média anual (°C)	Temperatura mínima (°C)
<i>E. calmadulensis</i> (Norte)	250 - 2500	2 - 8	28 - 40	6 - 22	18 - 28	n/a
<i>E. camadulensis</i> (Sur)	400 - 1200	0 - 7	21 - 40	3 - 14	13 - 22	>- 8
<i>E. citriodora</i>	650 - 2500	0 - 7	28 - 39	8 - 22	17 - 28	>-3
<i>E. cloeziana</i>	700 - 2000	0 - 5	27 - 36	6 - 17	16 - 27	>-3
<i>E. dalrympleana</i>	600 - 1500	0 - 5	18 - 29	0 - 7	8 - 17	>-12
<i>E. deglupta</i>	1200 - 5000	0 - 4	24 - 33	16 - 26	20 - 32	n/a
<i>E. delegatensis</i>	700 - 3500	0 - 6	18 - 25	-1 - 6	7 - 17	>-12
<i>E. diversicolor</i>	500 - 1500	0 - 6	23 - 29	5 - 9	12 - 18	>-4
<i>E. fastigata</i>	750 - 1900	0 - 5	22 - 29	-1 - 6	12 - 18	>-10
<i>E. globulus</i>	550 - 1500	0 - 7	19 - 30	2 - 12	9 - 18	>-8
<i>E. gaudis</i>	700 - 2500	0 - 7	25 - 34	3 - 16	14 - 25	>-8
<i>E. gunnii</i>	800 - 2400	0 - 2	15 - 26	-3 - 3	5 - 13	>-14
<i>E. maculata</i>	620 - 2000	0 - 5	24 - 32	0 - 13	12 - 23	>-8
<i>E. nitens</i>	750 - 1500	0 - 6	20 - 28	-1 - 7	9 - 18	>-12
<i>E. obliqua</i>	700 - 2000	0 - 5	22 - 32	-1 - 7	9 - 17	>-10
<i>E. pauciflora</i>	600 - 1600	0 - 4	16 - 30	-5 - 6	5 - 16	>-14
<i>E. pilularis</i>	750 - 1850	0 - 6	22 - 31	5 - 12	15 - 22	>-6
<i>E. regnans</i>	700 - 2000	0 - 5	18 - 29	0 - 10	10 - 20	>-7
<i>E. saligna</i>	700 - 1800	0 - 6	22 - 32	1 - 14	14 - 23	>-8
<i>E. tereticornis</i>	500 - 1500	4 - 8	22 - 42	6 - 19	17 - 27	>-6
<i>E. urophylla</i>	1100 - 2700	0 - 6	20 - 34	8 - 22	18 - 28	>-4
<i>E. viminalis</i>	500 - 2500	0 - 5	16 - 32	0 - 8	10 - 18	>-12

Fonte: BOOTH A.; PRYOR D. (1991)

Também existe complexidade na escolha da espécie segundo o tipo de solo. Segundo FLORES; ALBA; GARRASTAZU (2011), num estudo para o zoneamento edáfico para o eucalipto na região do Corede Sul, RS – Brasil, as condições favoráveis do solo para a produção do eucalipto encontram-se na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 Parâmetros das classes de aptidão edáfica para o *Eucalyptus (grandis, dunni e globulus)* na região do Corede Sul, no Estado do Rio Grande do Sul.

Parâmetros	Classes de aptidão edáfica			
	Preferencial	Recomendada	Pouco Recomendada	Não Recomendada
Drenagem	Fortemente, acentuadamente ou bem drenado	Moderadamente drenado	Imperfeitamente ou excessivamente drenado	Mal ou muito mal drenado
Profundidade efetiva	Muito profundo ou profundo	Pouco profundo	Raso	Muito raso
Grupamento textural	Média ou argilosa (1:1)	Muito argilosa (1:1)	Argilosa (2:1), arenosa ou siltosa	Orgânica
Relevo	Plano ou suave ondulado	Ondulado	Forte ondulado	Montanhoso ou escarpado
Fertilidade	Alta ou média	Baixa	Muito baixa	Presença de sais
Pedregosidade - rochividade	Ausente ou pouca	Moderada	Acentuada	Abundante

Fonte: FLORES; ALBA; GARRASTAZU (2011)

A experiência do cultivo de Eucalipto nas condições brasileiras demonstra que as espécies recomendadas para uso energético são: *E. grandis*, *Corimbya citriodora*, *E. cloeziana*, *E. camaldulensis*, *E. urophylla*, híbridos *urograndis* (*E. urophylla* x *E. grandis*) (SILVA DE CASTRO, 2008).

As condições agroclimáticas, o espaçamento selecionado e as práticas de manejo em conjunto com a genética de cada espécie se traduzem em conteúdo de carbono aproveitável, principalmente em forma de celulose, lignina e hemicelulose, que na sua vez determinam o poder calorífico. MAGATON *et al.* (2006) apresentam conteúdos de carbono para diferentes espécies de Eucalipto (Tabela 3.10). Observa-se que os conteúdos variam segundo a espécie, pelo que pode-se fazer uma seleção para determinada finalidade.

Tabela 3.10 Composição de algumas espécies de Eucalipto

Espécie	Celulose (%)	Lignina (%)	Hemicelulose (%)
<i>E. dunnis</i>	54.4	24.5	21.0
<i>E. globulus</i>	48.4	26.7	24.5
<i>E. nitens</i>	43.8	25.3	30.9
<i>E. grandis</i>	51.7	27.8	20.5
<i>E. urograndis</i>	47.5	28.0	24.5
<i>E. urophylla</i>	52.0	28.6	19.4

Fonte: Adaptado de Magaton (2006)

Com respeito ao PCS, o eucalipto tem reportado valores levemente inferiores aos 19,26 MJ kg⁻¹ obtidos para diferentes espaçamentos, sendo o maior encontrado se correspondente com o espaçamento 3m x 2m, cujo valor é de 19.05 MJ kg⁻¹ (ROGER Q. *et al*, 2011) que, por sua vez, é superior ao Capim elefante reportado por ALVES (2009). A densidade do plantio tem influência no rendimento em volume por hectare por ano e a PPB. Ver Tabela 3.11.

Tabela 3.11 Produções médias de Eucalipto por ano para diferentes densidades de plantio

Densidade (m x m)	Programa de Cortes	Produção em Volume (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Produção em Biomassa (t.cc há ⁻¹ ano ⁻¹)	Produção de Energia (Gj há ⁻¹ ano ⁻¹)
3.0 x 0.5	Cortes cada dois anos com reiniciação da plantação aos 6 anos	50.00	24.0	448.52
3.0 x 0.75		45.00	22.5	422.40
3.0 x 1.0		40.00	20.4	384.70
3.0 x 1.5	Um ciclo com três cortes de 6 anos com condução dos rebrotes	38.75	20.2	380.76
3.0 x 2.0		37.85	19.7	374.67
3.0 x 2.5		35.90	19.4	367.96
3.0 x 3.0		34.00	19.0	359.39

Fonte: ROGER Q. *et al*. (2011)

Em relação à extração de nutrientes do solo do eucalipto e do capim elefante, e menor que outras culturas produzidas no Brasil, com impactos menores ao ambiente. Ver Tabela 3.12.

Tabela 3.12 Requerimentos nutricionais de diferentes culturas no Brasil (kg há⁻¹ ano⁻¹)

Cultura	Idade	N	P	K	Ca	Mg
Eucalipto	2,5	11,2	94,9	50,0	13,1	8,1
Eucalipto	10	42,0	1,6	15,6	76,7	5,1
Eucalipto	27	16,1	0,9	11,7	36,0	6,0
Capim Elefante	-	332,0	70,0	554,0	105,0	69,0
Cana-de-açúcar	-	208,0	22,0	200,0	153,0	67,0

Fonte: Adaptado de SCOLFORO (2008) & LOPES (2004)

É válido esclarecer que os requerimentos nutricionais para o capim elefante correspondem à produção de forragem para alimentação animal, onde se precisa acumular maior quantidade de proteínas. No caso de Capim Elefante com fins energéticos, MORAIS (2008) encontrou que, para diferentes genótipos, o consumo de Nitrogênio oscilou entre 39,23 e 104,57 kg de N ha⁻¹ ano⁻¹ e 52,57 e 109,71 kg de N ha⁻¹ ano⁻¹ em solos classificados como Argissolos e no Planossolos respectivamente, atingindo teores de fibras, lignina e celulose elevados e semelhantes para todos os genótipos. Os teores de cinzas permaneceram abaixo dos níveis críticos aceitáveis.

Entre os aspectos benéficos mais importantes dos cultivos madeireiros e herbáceos em florestas ou em sistemas agroflorestais temos a redistribuição e circulação da água pela alteração de seu tempo de escoamento modificando o ciclo hidrológico (JIANG *et al.*, 2004). Isto ocorre pela influência do levantamento do dossel das florestas no ar, servindo como uma barreira contra a precipitação para não atingir diretamente o solo, aumentando o tempo de viagem da precipitação, originando sua redistribuição no solo e o tempo de concentração da precipitação na bacia (CHANG, 2003).

No balanço hídrico, a evapotranspiração é um parâmetro relevante para estudar a dinâmica da água nas culturas ou nas florestas. ZHANG; *et. al.*, (2001) desenvolveram um modelo para estimar a evapotranspiração média anual a longo prazo em escala de bacias em função da precipitação. A vegetação estudada foram pastagem e árvores, com parâmetros estabelecidos segundo o local. Encontrou-se que a evapotranspiração anual é geralmente maior para bacias com florestas que para bacias sem florestas. A diferença é maior nas zonas de alta pluviosidade e diminui em zonas com precipitações anuais inferiores a 500 mm. Então, pode-se concluir que o consumo de água nas florestas é independente da espécie estabelecida, e segundo DE PAULA LIMA (2004) é dependente do clima e da área total das folhas da floresta (o chamado índice de área foliar) e tem relação direta com a eficiência da fotossíntese (figura 3.5).

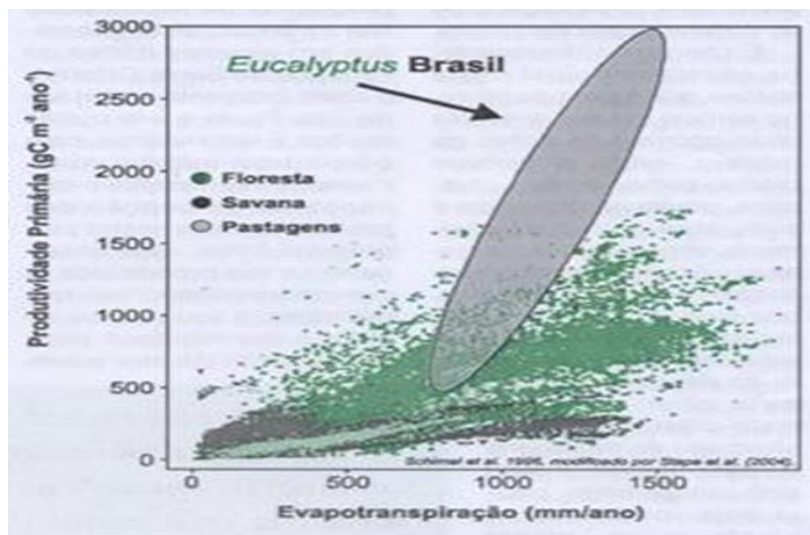


Figura 3.5. Comparação da evapotranspiração do eucalipto com outros ecossistemas naturais no mundo.

Fonte: DE PAULA LIMA (2004)

As evidências mostram que os possíveis impactos das florestas plantadas sobre a quantidade de água nas microbacias podem ser mais ou menos severos, dependendo das condições hidrológicas regionais prevalentes, assim como da disponibilidade natural de água, em termos de equilíbrio entre a precipitação média e a demanda evapotranspirativa. Torna-se, desta maneira, muito importante que este possível efeito das florestas plantadas seja devidamente analisado e levado em conta no plano de manejo, considerando as diferentes escalas da sustentabilidade hidrológica (DE PAULA LIMA, 2004b).

3.2.2 O poder calorífico do Eucalipto e o Capim Elefante.

Segundo a Equação 2.5 é evidente na que o PCI é diretamente proporcional ao teor de umidade da biomassa. SILVA (2012) apresenta a variação do PCI em relação ao teor de umidade das espécies Eucalipto e Capim Elefante. Ver Figura 3.6.

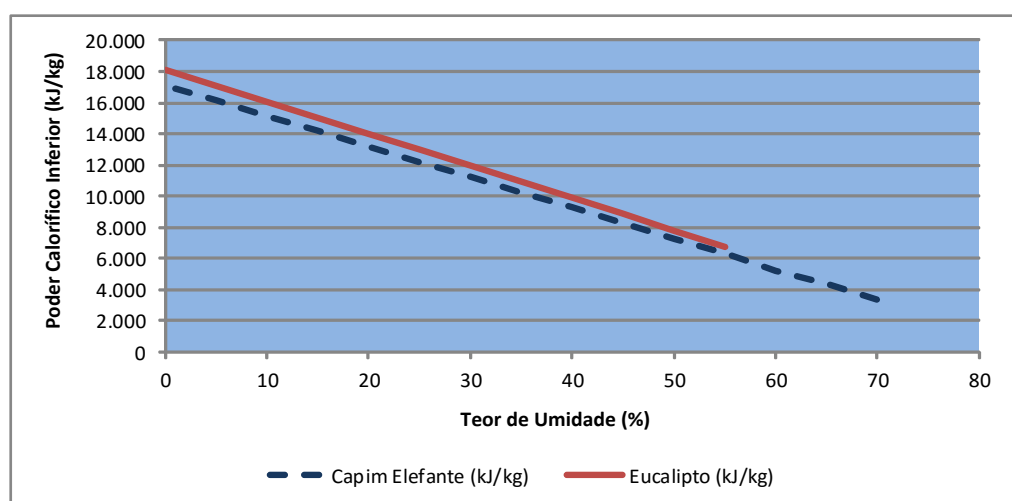


Figura 3.6 Variação do PCI em relação ao conteúdo de umidade

Fonte: adaptado de SILVA (2012)

3.2.3 Planejamento da produção de cultivos energéticos madeireiros e herbáceos com foco em sistemas Agroenergético no Brasil

A grande dependência de agroquímicos constitui um grande desafio para a produtividade em longo prazo e a sustentabilidade das monoculturas, principalmente pelas restrições ambientais. As operações nas etapas de produção, colheita e transformação implica um

aumento na degradação física dos solos, necessidade de controle intensivo de plantas indesejadas, lixiviação de nutrientes, perda da biodiversidade e aumento do uso de energias não renováveis (ZEGADA-LIZARAZU; MONTI, 2011). Embora, os cultivos madeireiros e herbáceos têm operações comuns às demais culturas, também têm menores requerimentos, com ganhos ambientais significativos. Neste mesmo sentido, estes cultivos, apesar de que pudessem ser mais produtivos em monocultura, podem se associar em sistemas agroflorestais, com benefícios econômicos e ambientais maiores ainda.

Os Sistemas agroflorestais (SAFs) são formas de uso da terra consistente em misturar cultivos madeireiros e herbáceos nos campos de produção agrícola. Tem como objetivo obter os benefícios das interações ecológicas positivas, minimizando a competição e visando à complementariedade das espécies envolvidas. Deseja-se que o sistema seja mais eficiente na utilização dos recursos disponíveis – água, luz e nutrientes – que os plantios em monocultura (NICODEMO, 2011).

A planificação dos usos dos solos com aptidão para cultivos florestais e pastagem no Brasil, em sistemas agroenergéticos, pode ser realizada na forma de culturas de espécies madeiras ou herbáceas separadamente, ou a mistura delas em uma proporção de 50% cada, como mostra a Figura 3.7.

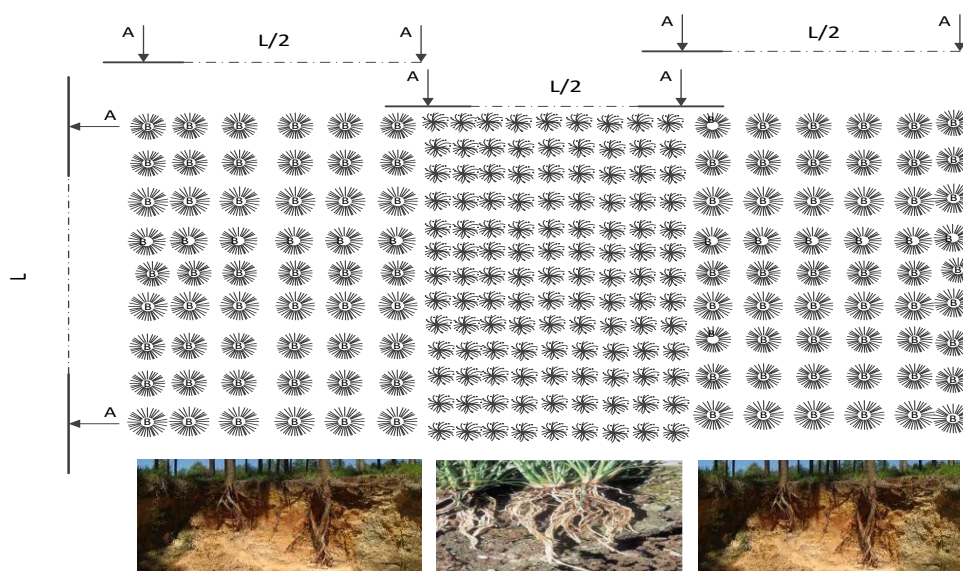


Figura 3.7 Sistemas agroflorestais e cultivos madeireiros e herbáceos

É possível notar que os sistemas radiculares são diferentes. Enquanto o sistema dos madeireiros é profundo na procura de água, os herbáceos são mais superficiais. Os tempos de

colheita das duas espécies também são diferentes. No caso dos madeireiros pode ser entre 2 e 21 anos e das herbáceas é de 0.5 ano. As raízes dos madeireiros são fixadoras de carbono no solo na forma de matéria orgânica, enquanto que as raízes das herbáceas fixam nitrogênio no solo, dependendo da espécie escolhida.

3.2.4 Potencial teórico da geração de energia elétrica a partir do Eucalipto e do Capim Elefante no Brasil

O potencial teórico de geração de energia elétrica a partir de Eucalipto e Capim Elefante no Brasil foi calculado aplicando a Equação 2.3, convertido a EJ ano^{-1} . As produções consideradas para o cálculo e demais parâmetros encontram-se na Tabela 3.13. Foram considerados três cenários:

- Cenário 1. A área total com Eucalipto
- Cenário 2. A área total com Capim Elefante
- Cenário 3. Um sistema agroflorestal com 50% da área com Eucalipto e 50% da área com Capim em percentagem.

Tabela 3.13 Parâmetros usados para o cálculo do potencial energético do Eucalipto e do Capim Elefante no Brasil.

Eucalipto		Capim Elefante	
Parâmetros	Valor	Parâmetros	Valor
PCI (MJ kg^{-1})	12,0	PCI (MJ kg^{-1})	15,15
Conteúdo de Umidade (%)	30	Conteúdo de Umidade (%)	10
Densidade (kg m^{-3})	500	Densidade (kg m^{-3})	não requer
Produtividade ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$)	50	Produtividade ($\text{ton. ms ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$)	40
Densidade de plantio (Árvores ha^{-1})	6.667	Densidade de plantio (Plantas ha^{-1})	25.000
Área potencial para pastos naturais y silvicultura (milhões de ha)	96,1	Área potencial para pastos plantados (milhões de ha)	96,4

Considera-se a área de produção potencial total no Brasil para cada cultivo. A hipótese foi variar a percentagem possível de utilização destas terras com as diferentes culturas (Figura 3.8).

Na Figura 3.8, pode-se observar que, usando 30% dos solos com aptidão para o Capim, pode-se produzir 17,3 EJ ano⁻¹ e com eucalipto pode-se produzir 8,47 EJ ano⁻¹ em terras com aptidão florestal. No caso de um sistema agroflorestal, na proporção de 50% para cada uma das espécies por hectare, se produzirá 13,0 EJ ano⁻¹. Este último, embora produzisse menos energia que com o Capim unicamente, tem maior vantagem ambiental devido ao fato que a terra não é usada em monocultura. Também o CO₂ é captado para uso imediato (6 meses) pelo Capim Elefante e se acumula a longo prazo (dois anos ou mais) pelo Eucalipto.

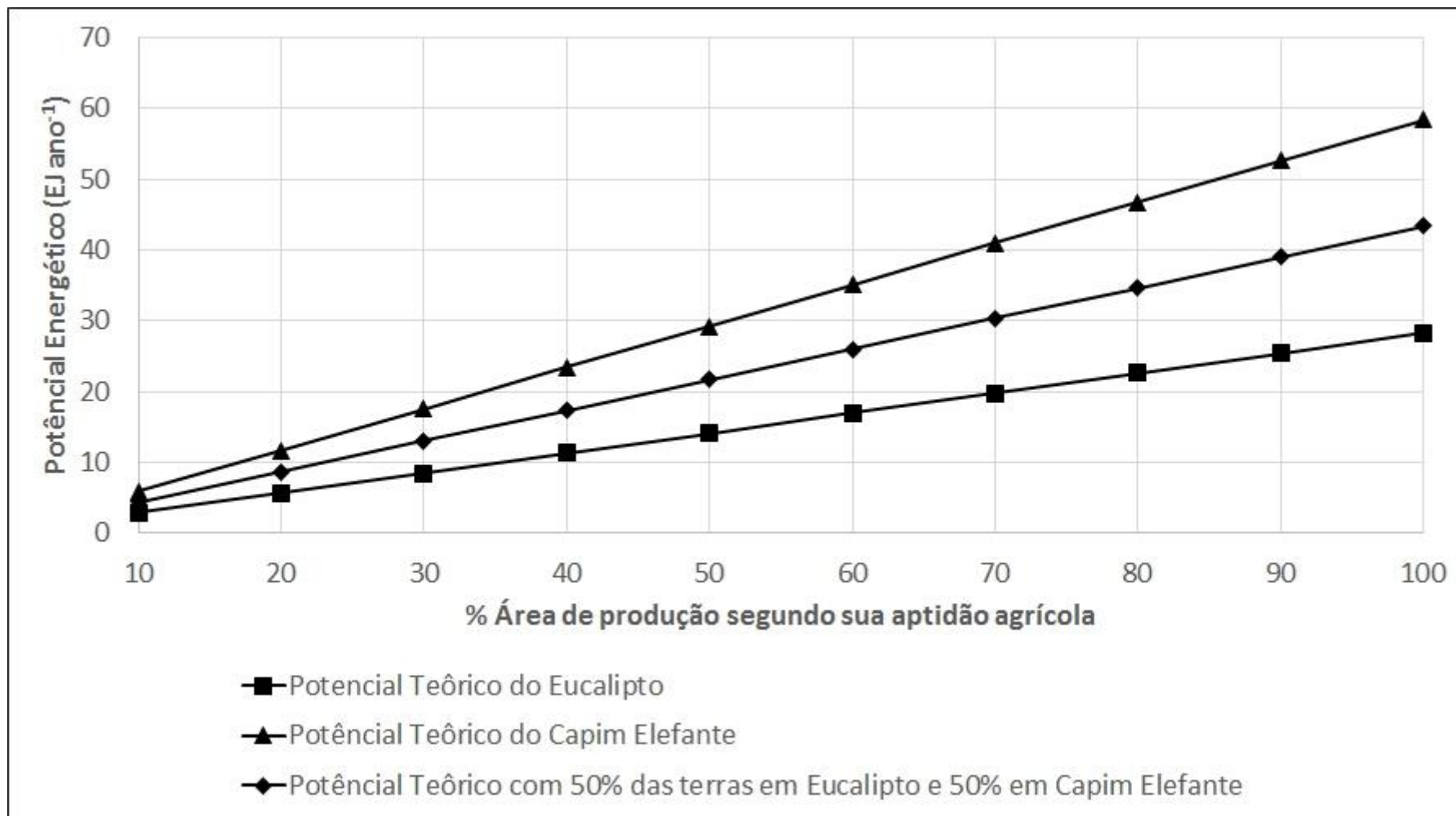


Figura 3.8. Potencial teórico do Eucalipto e do Capim Elefante no Brasil em EJ ano⁻¹.

Capítulo 4 POTENCIAL TÉCNICO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE CULTIVOS ENERGÉTICOS MADEIREIROS E HERBÁCEOS MEDIANTE SISTEMAS AGROENERGÉTICOS NO BRASIL

O potencial técnico representa a geração de energia elétrica possível a partir de cultivos madeireiros e herbáceos de uma determinada tecnologia com um determinado desempenho determinado, limitações topográficas, ambientais e limitações de uso da terra (LOPEZ et al., 2012b).

Para a análise do potencial técnico da conversão de energia primária, foi necessário fazer simulações. No caso de dos sistemas ORC y CRC, foram usados os softwares Cycle Tempo para a análise do CRC e o software Hysys para ORC, com combustão para diferentes expansores: turbina radial (TR), turbina axial (TA) e expensor de parafuso (ES) para as potências nominais atualmente produzido. Para o análise do sistema Combustor com Turbina de Queima Externa (C-EFGT), foi utilizado o software Gate Cycle. As configurações usadas na análise podem-ver na figura 4.1.

No caso da tecnologia de gaseificação, foram selecionados os sistemas GMCI e GEFGT. Para o análise destas tecnologias, foi usada a literatura científica, nas de onde foram extraídas as eficiências com diferentes biomassas, apresentadas na tabela 4.1, realizando uma regressão linear e estimadas as diferentes eficiências para diferentes potências.

4.1 CICLO RANKINE CONVENCIONAL

O ciclo Rankine convencional foi simulado com o software Cycle Tempo. Este software é um programa de modelagem termodinâmica e otimização de sistemas para a geração de eletricidade, calor e frio.

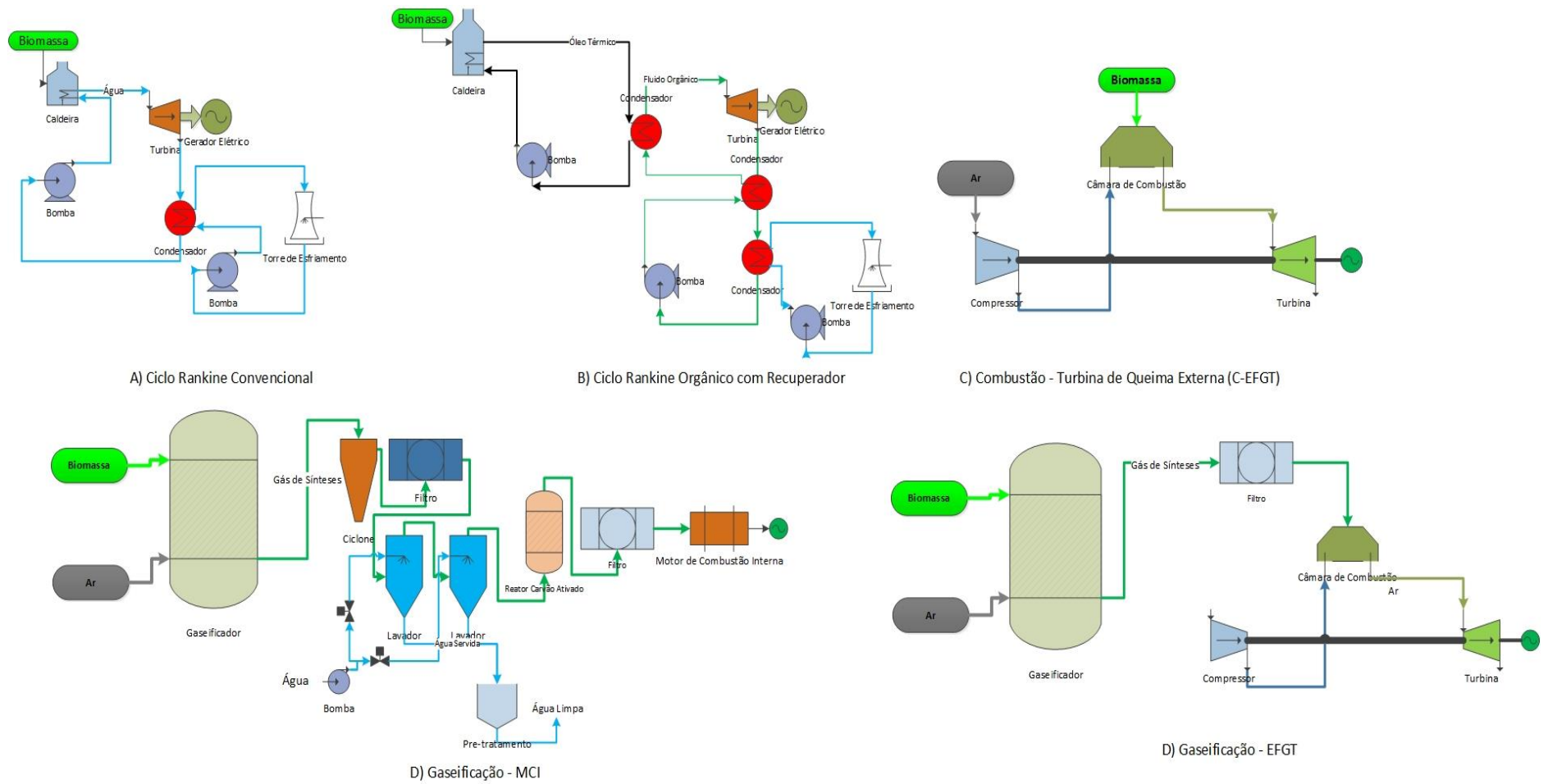


Figura 4.1. Ciclos termodinâmicos analisados

O principal objetivo do Cycle Tempo é calcular as propriedades termodinâmica, composições de gases e vazões de massa e fluxo de energia. Ele estima balanço de massa, balanço molar, balanço de energia e relações termodinâmicas estabelecendo equações independentes em cada aparelho contabilizando as entradas e saídas. Tem uma vantagem diferenciada em quanto à flexibilidade de ingresso de dados e configuração dos sistemas a analisar.

Na figura 4.2 pode-ver um exemplo do esquema usado no Cycle Tempo para simular o CRC-TA para uma potência de 500 kW. Logo foi aplicado para todas as tecnologias analisadas mudando as eficiências dos equipamentos (Tabela 4.1) e parâmetros termodinâmicos de operação idôneos para cada ciclo.

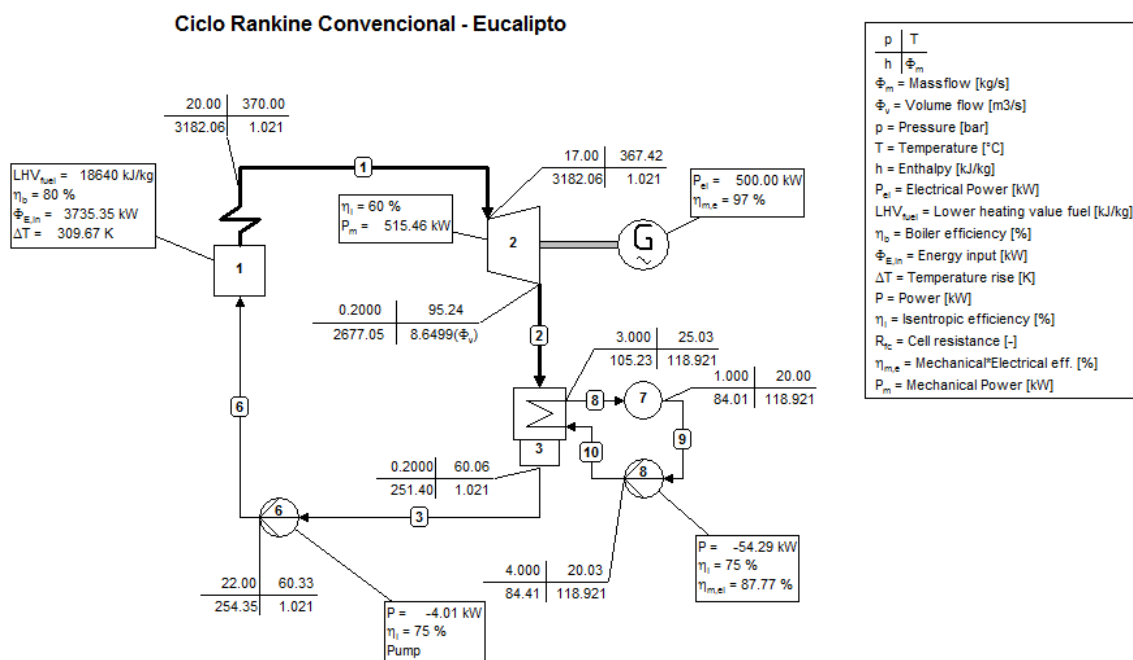


Figura 4.2. Esquema do ORC simulado em Cycle Tempo

4.2 CICLO RANKINE ORGÂNICO (ORC)

O ciclo Rankine Orgânico foi simulado com o software Aspen Hysys. Este software é um programa de modelagem termodinâmica. Aspen HYSYS é uma ferramenta de modelagem de processos abrangente utilizado pelos principais produtores mundiais de petróleo e gás, refinarias e empresas de engenharia para a simulação de processos e otimização de processos em design e operações.

Na figura 4.3 pode-ver um exemplo do esquema usado no Hysys para simular o ORC-TR para uma potência de 30 kW. Foi aplicado para todas as tecnologias analisadas mudando as eficiências dos equipamentos para cada potência analisada (tabela 4.3) e parâmetros termodinâmicos de operação. Ver tabela 4.1.

Tabela 4.1 Parâmetros termodinâmicos usados no cálculo do ORC

<i>Parâmetros</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>
<i>Fluido de Trabalho</i>	n-pentano	
<i>Óleo Térmico</i>	Dyphenyl C2	
<i>Temperatura crítica n-pentano</i>	469,70	K
<i>Temperatura vapor do n-pentano</i>	395,05	K
<i>Temperatura crítica de trabalho do óleo</i>	643,15	K
<i>Temperatura Ambiente</i>	293,15	K
<i>Pressão do Óleo</i>	580,00	kPa
<i>Ponto Pinch</i>	278,15	K
<i>Pressão da Caldeira</i>	2.500,00	kPa
<i>Pressão de expansão</i>	75	kPa
<i>PCI (Eucalipto)</i>	12,00	MJ kg ⁻¹
<i>PCI (Capim Elefante)</i>	15,15	MJ kg ⁻¹
<i>Eficiência da turbina</i>	Ver tabela 4.3	
<i>Temperatura da água fria</i>	288,15	K
<i>Potencia</i>	10 – 3000	kW

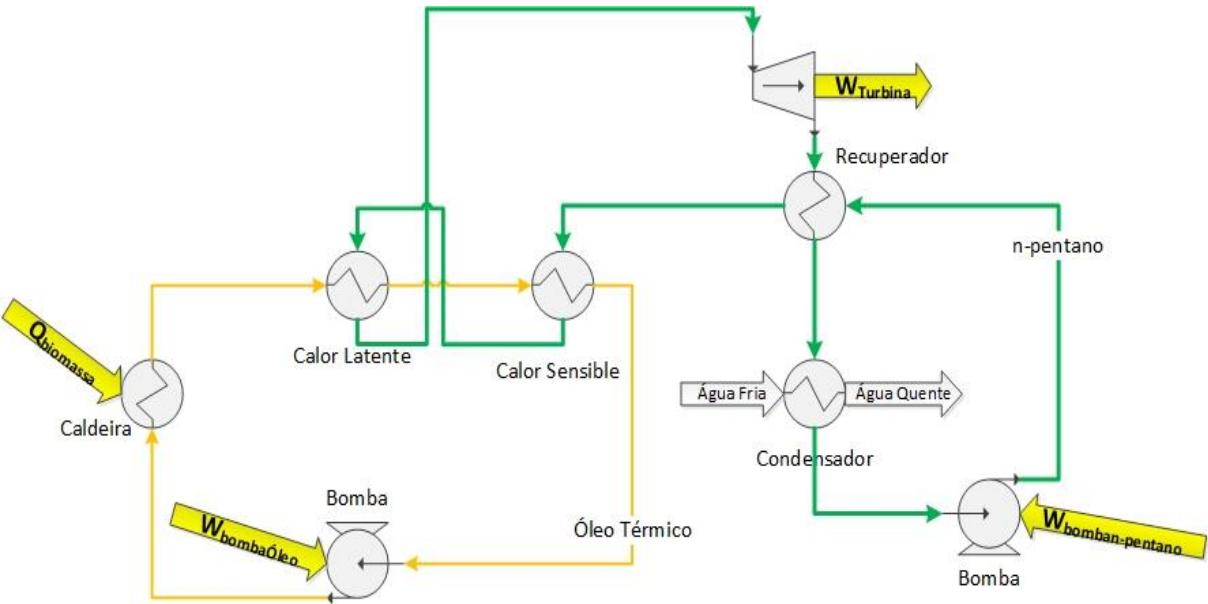


Figura 4.3. Esquema do ORC simulado em Hysys

4.3 CICLO COMBUSTÃO COM TURBINA DE QUEIMA EXTERNA (C-EFGT)

O ciclo C-EFGT foi simulado com o software Gate Cycle. Este software é um programa de modelagem termodinâmica. É utilizado para a avaliação do projeto e desempenho dos sistemas de usina térmica em design e off-design pontos. A aplicação GateCycle combina uma interface de usuário gráfica intuitiva com modelos analíticos detalhados para a termodinâmica, calor e transferência de processos de fluidos mecânica dentro de usinas de energia.

Na figura 4.4 pode-ver um exemplo do esquema usado no Gate Cycle para simular o C-EFGT. Os parâmetros termodinâmicos de operação do ciclo C-EFGT podem-se ver na tabela 4.2. Logo foi aplicado para todas as tecnologias analisadas mudando as eficiências dos equipamentos (tabela 4.3).

Tabela 4.2 Parâmetros termodinâmicos usados no cálculo do C-EFGT

Parâmetros	Valor	Unidades
Fluido de Trabalho	Ar	
Temperatura ambiente	298,15	K
Temperatura do combustor	1173,15	K
Fluxo do Ar Comprimido	5 - 25	kg seg ⁻¹
Fluxo do Ar no combustor	5 - 25	kg seg ⁻¹
PCI (Eucalipto)	12,00	MJ kg ⁻¹
PCI (Capim Elefante)	15,15	MJ kg ⁻¹
Eficiência da turbina	Ver tabela 4.3	
Temperatura da água fria	288,15	K
Potencia	50 – 3000	kW

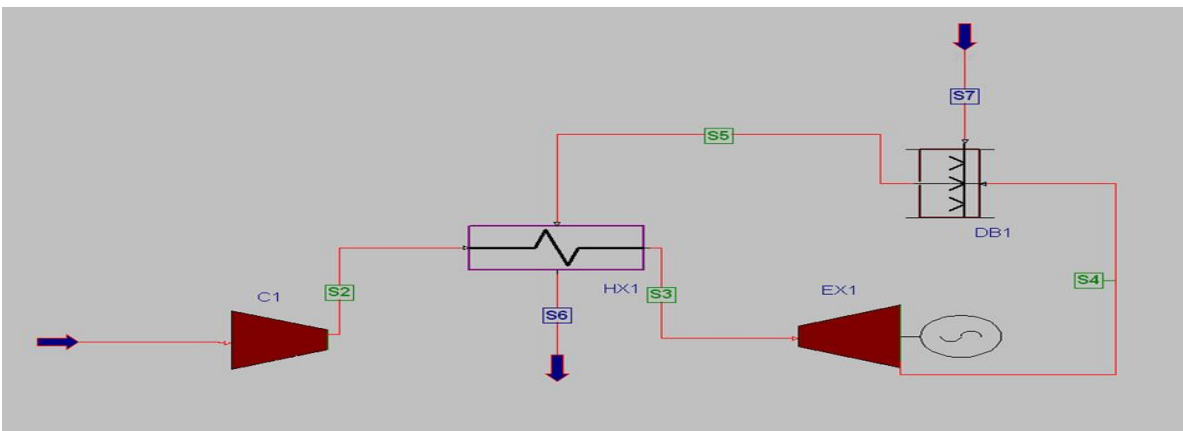


Figura 4.4. Esquema do ORC simulado em Gate Cycle

Os dados da operação das diferentes usinas analisadas foram obtidos de experimentos e simulação relatados na literatura e são apresentados na tabela 4.3.

As curvas resultantes da aplicação dos modelos analisados são apresentadas na figura 4.5 e 4.6. Na figura 4.5, podem se observar as diferentes eficiências para diferentes potências na faixa de potência de 10 – 350 kW. Na figura 4.6, podem se observar as diferentes eficiências para diferentes potências na faixa de 500 – 3000 kW.

Tabela 4.3 Dados de referência para a modelagem dos ciclos termodinâmicos

Ciclo Termodinâmico	Potência (kW)	Acionador Primário	Eficiência Isentrópica Acionador (%)	Referência
ORC	10-350	EP	40 -85	(QIU; LIU; RIFFAT, 2011 & LI; ZHU; ZHANG, 2012)
	500 - 3000	TA	60 – 80	(DIXON; HALL, 2010)
		TR	65 – 90	(KANG, 2012)
CRC	30 - 200	TR	79 – 85	(KANG, 2012)
	10 - 300	EP	40 – 85	(QIU; LIU; RIFFAT, 2011 & LI; ZHU; ZHANG, 2012)
	500 - 3000	TA	60 – 80	(DIXON; HALL, 2010)
GMCI	10 - 20	MCI	35	(BARATIERI et al., 2009)
	750 - 2000	MCI	35	(BARATIERI et al., 2009)
GEFGT	500	EFGT	82	(KAUTZ; HANSEN, 2007)
CEFGT	30 - 70	EFGT	82	(KAUTZ; HANSEN, 2007)

No caso das simulações dos sistemas ORC e CRC para os diferentes expansores. Para ORC foram tidos em conta dois fluido de trabalho: benzeno e n-pentano, para uma condição de operação e um ponto pinch de 5 °C. As curvas de eficiências para as diferentes potências analisadas, são mostradas nas figuras 4.5 e 4.6.

Na figura 4.5, pode se ver que o sistema ORC com Benzeno tem as maiores eficiências (10 - 16 %) na faixa de 10 - 150 kW e o sistema com menor eficiência na mesma faixa é CRC com EP. A partir da potência de 150 kW até 350 kW o ORC com fluido de trabalho benzeno, é o de melhor desempenho (16 – 22%). O benzeno tem dificuldades para ser usado por ter um ODP e um GWP elevado, ocasionando impactos às mudanças climáticas. O sistema com o menor desempenho foi CRC com EP.

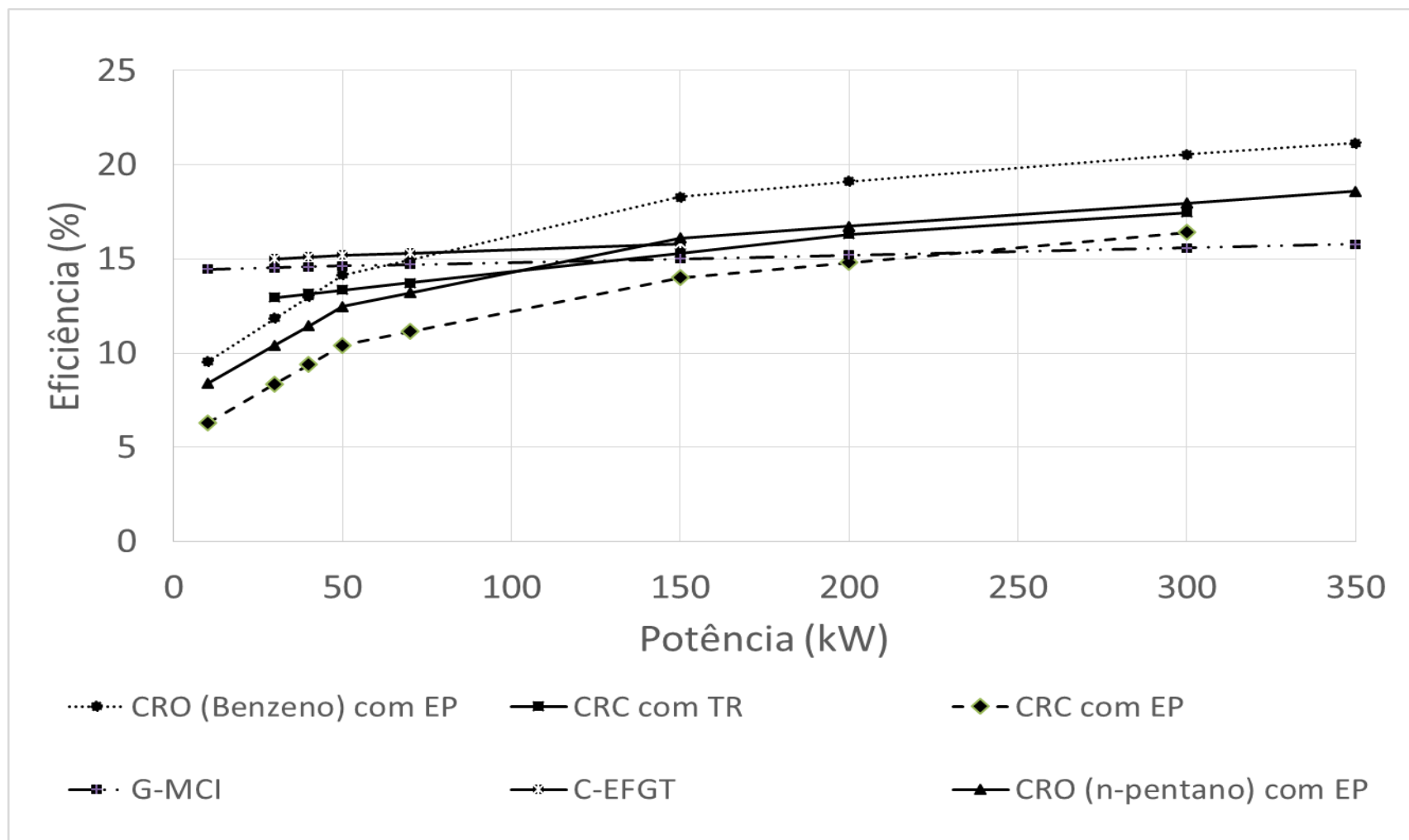


Figura 4.5. Eficiências globais dos sistemas CRC, ORC, GMCI e CEFGT para diferentes expansores na faixa de 10 - 350 kW.

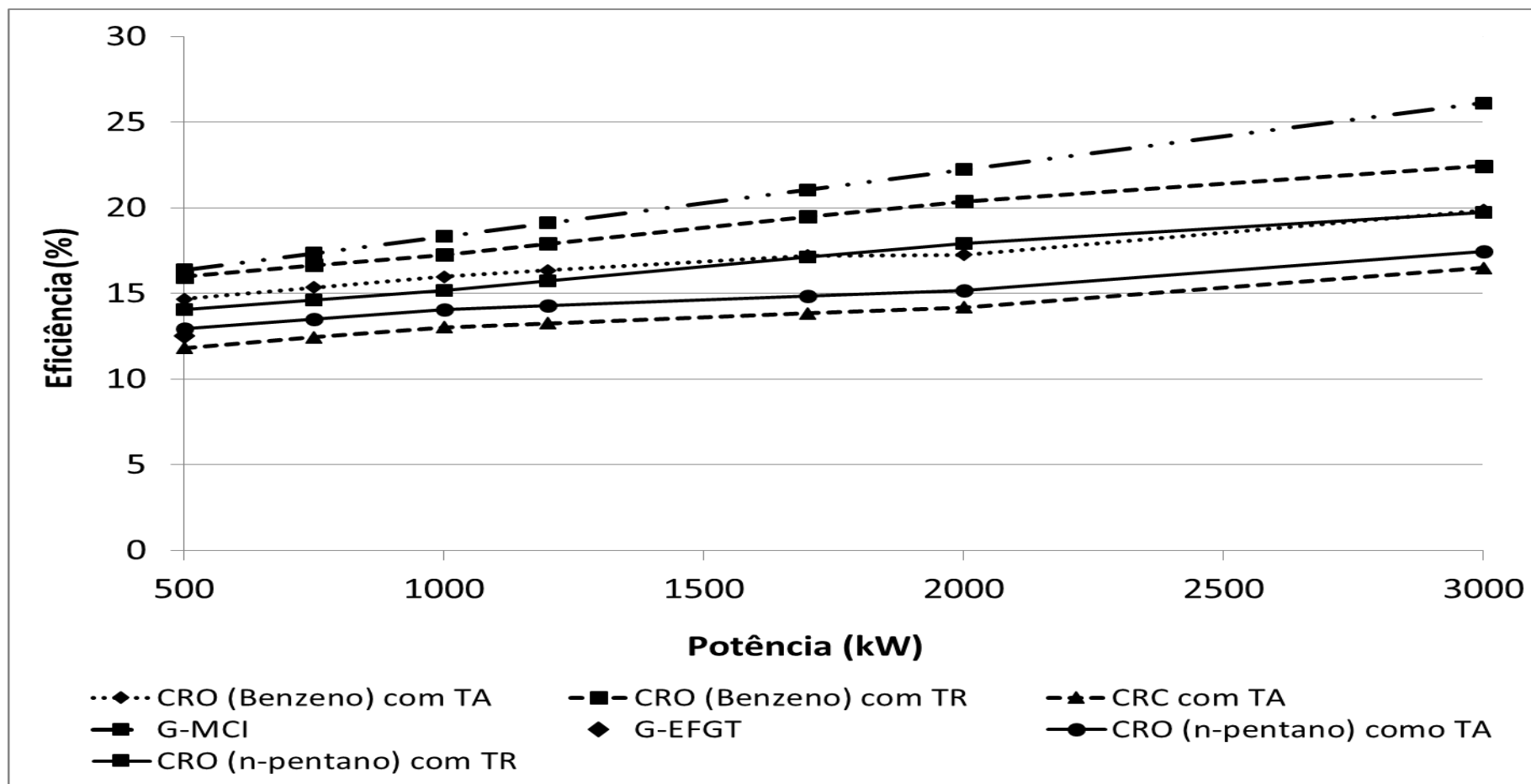


Figura 4.6. Eficiências globais dos sistemas CRC, ORC, GMCI e CEFGT para diferentes expansores na faixa de 500-3000 kW.

Para as potências entre 500 – 3000 kW, o sistema com maior eficiência (15 – 26%) foi o GMCI na faixa de 500 – 3000 kW. Segue o ORC com TA com eficiências (16 – 23%) na mesma faixa. A partir de 1000 kW, foi o ORC com fluido de trabalho benzeno (17 – 22%). O ORC com fluido de trabalho n-pentano, alcançou a maior eficiência (17,5 – 20%) na faixa de 2000 – 3000 kW. O sistema CRC com TA foi o de menor desempenho com eficiências que flutuam entre 12 a 16%. Figura 4.6.

O sistema GMCI é o mais eficiente na faixa 500 - 3000 kW na geração de energia elétrica com biomassa. Mas esta eficiência pode se afetar ao considerar a energia requerida para o secado da biomassa antes da gaseificação, podendo variar com a tecnologia de secado usada e a sua fonte de energia.

Conjugando o potencial de energia primária dos cultivos energéticos variando a percentagem de solos potencialmente usados e as eficiências globais dos sistemas analisados, obtém-se o potencial de geração de energia elétrica no Brasil. Pode se observar na figura 4.7, 4.8 e 4.9, que é possível superar a capacidade de geração elétrica atualmente instalada no Brasil com Eucalipto e Capim Elefante utilizando tecnologias de combustão e gaseificação em diferentes sistemas com diversos acionadores primários.

No caso do sistema GMCI, é possível alcançar a capacidade elétrica instalada no Brasil utilizando o 50% das terras com potencial para Eucalipto, 23% das terras com potencial para o Capim Elefante e 33% das terras com 50% em Eucalipto e 50% em Capim Elefante.

Se a escolha é o sistema ORC, estas percentagens são maiores que as utilizadas com GMCI. No caso de utilizar o Eucalipto como combustível, precisa-se semear o 62% das terras com aptitudes para este cultivo e utilizar para a geração o ORC com Benzeno e 65% das terras usando ORC com n-pentano. Agora usando Capim Elefante é necessário semear o 30% das terras com potencial para o Capim Elefante e utilizar para a geração o ORC benzeno como fluido de trabalho e 35% das terras com ORC e n-pentano como fluido de trabalho. Agora é necessário semear o 40% das terras usando ORC com benzeno como fluido de trabalho com 50% em Eucalipto e 50% em Capim elefante e o 43% das terras usando ORC com n-pentano.

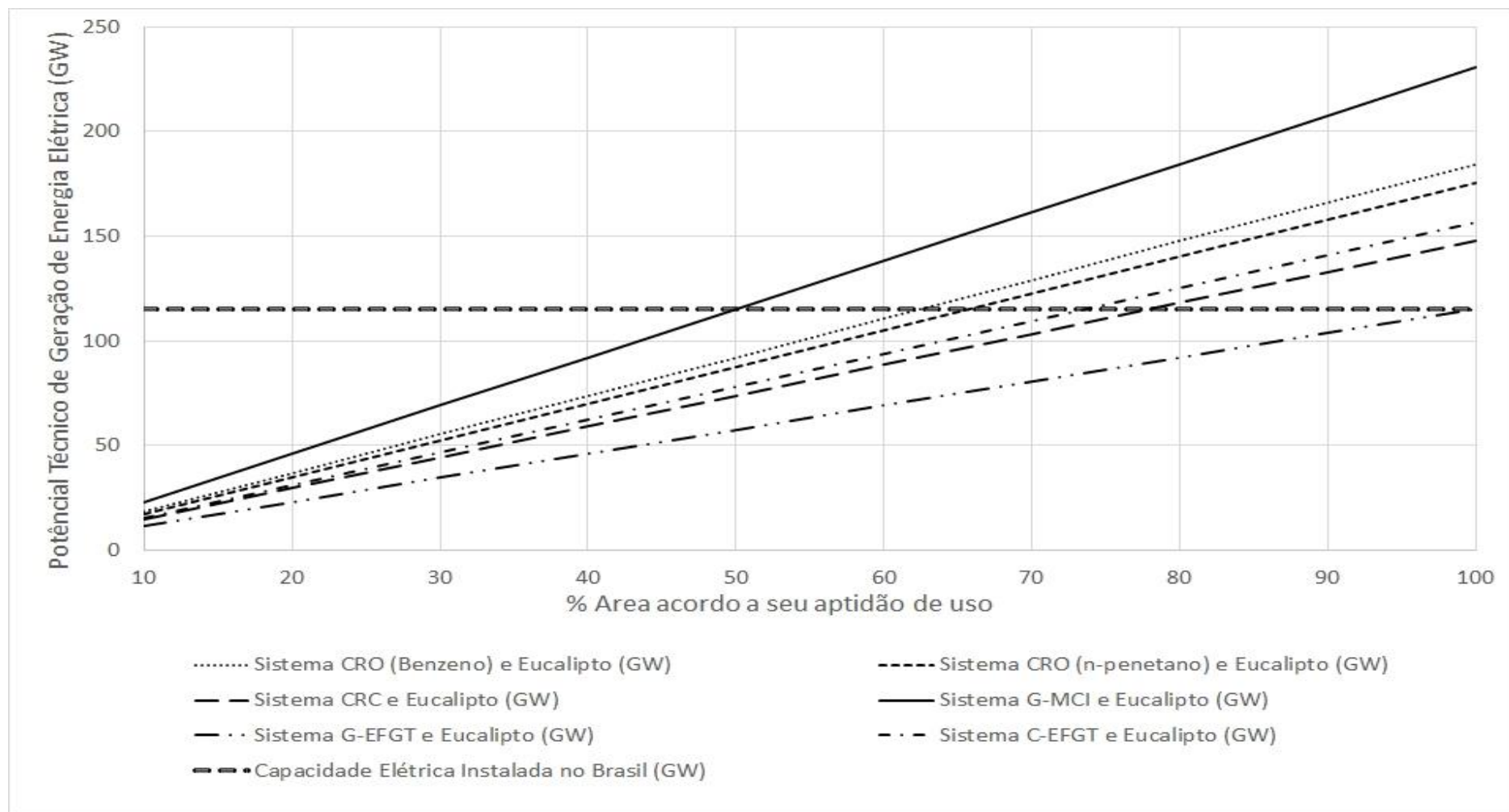


Figura 4.7. Potencial Técnico de Geração de Energia Elétrica com Eucalipto e diferentes Tecnologias

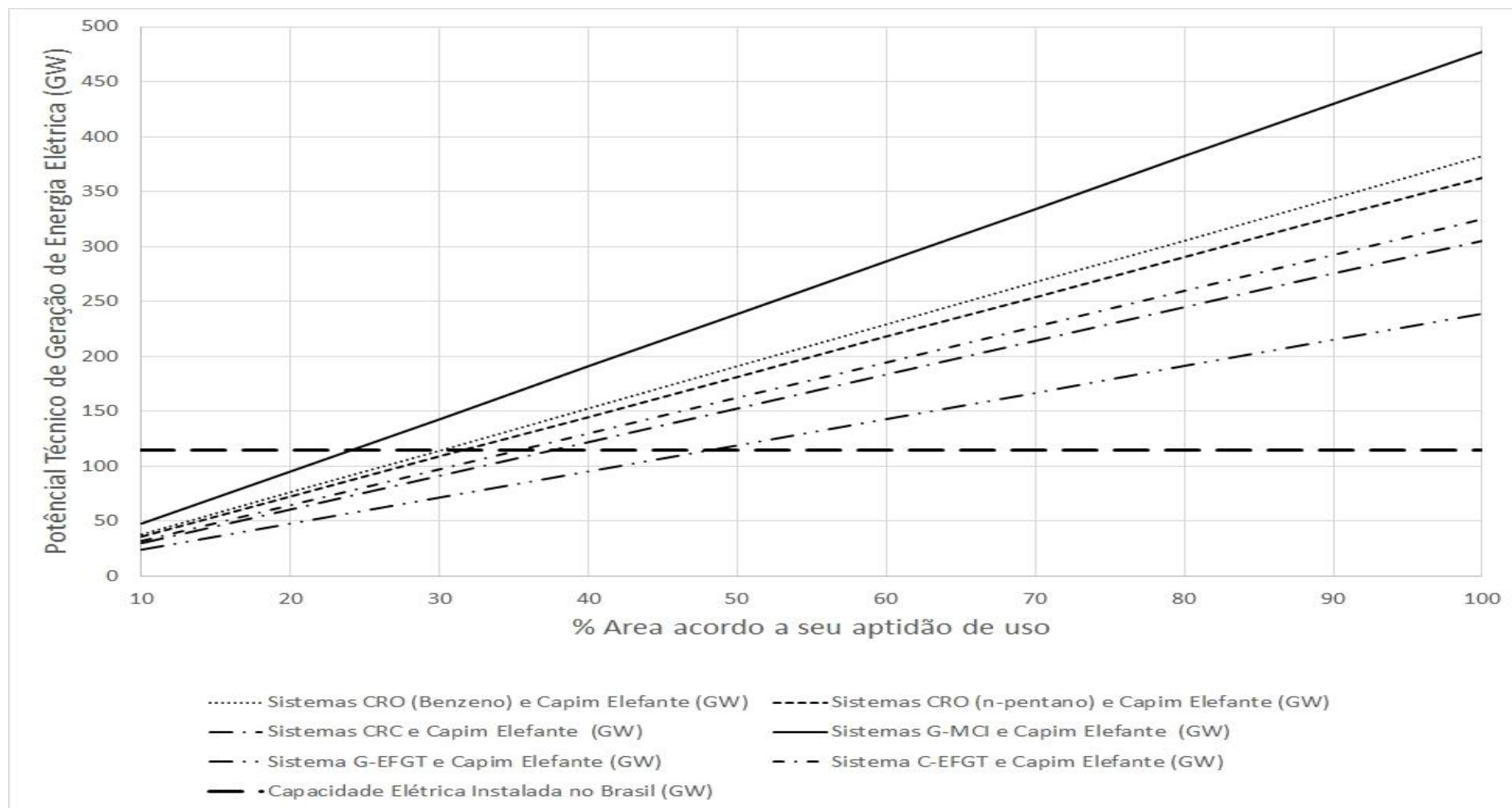


Figura 4.8. Potencial Técnico de Geração de Energia Elétrica com Capim Elefante e diferentes Tecnologias

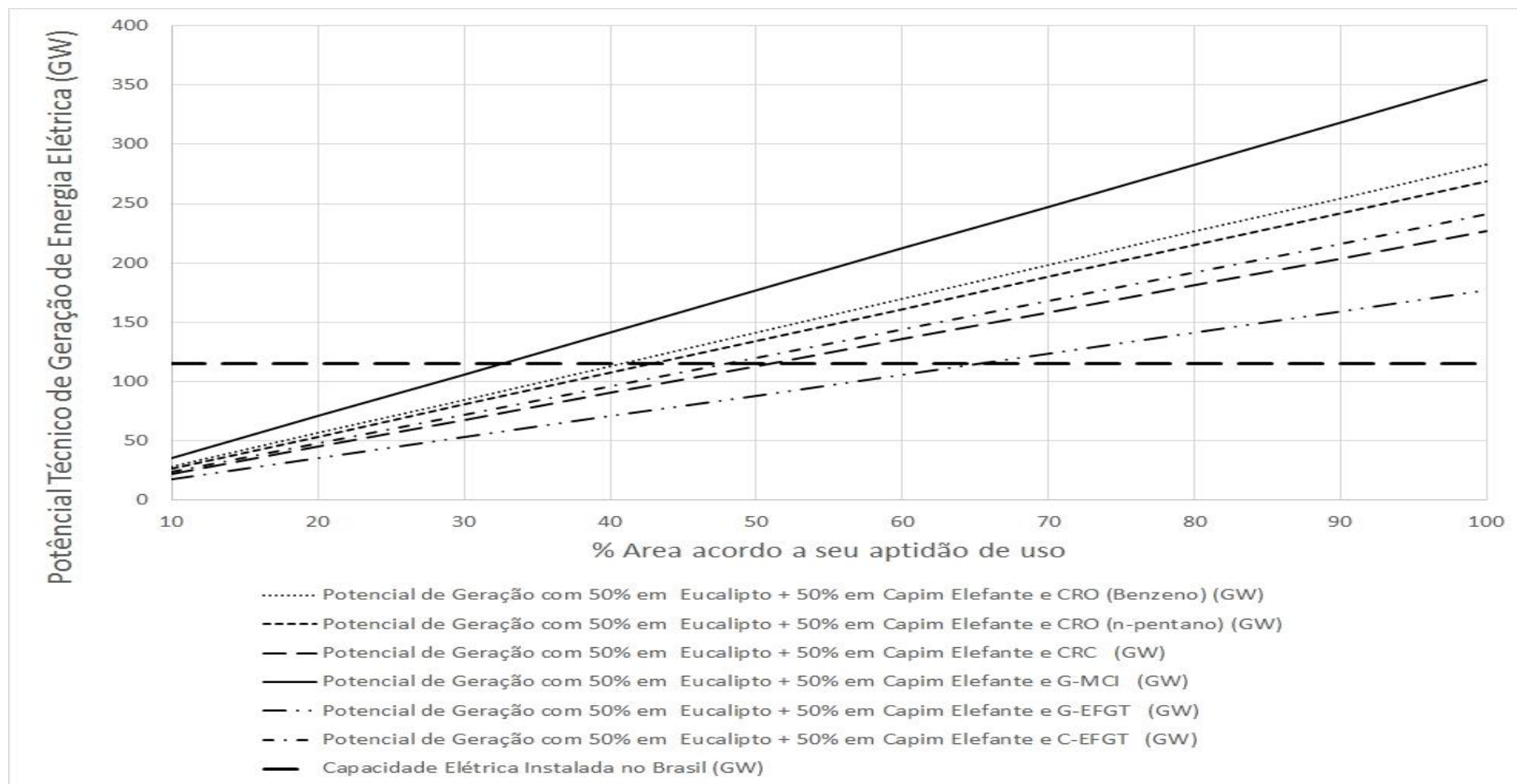


Figura 4.9. Potencial Técnico de Geração de Energia Elétrica com 50% em Eucalipto e 50% em Capim Elefante e diferentes Tecnologias

Com o sistema CRC é necessário utilizar o 75% das terras com atitudes para o Eucalipto, 38% das terras com potencial para o Capim Elefante e 60% com 50% em Eucalipto e 50% em Capim Elefante.

No caso que deseja se um programa onde precisa se fomentar os dois cultivos com diferentes tecnologias em diferentes regiões precisa se: 25% das terras com potencial para o Eucalipto com ORC e n-pentano como fluido de trabalho e 20% das terras com potencial para o Capim Elefante, atingindo 120 GW. As misturas de tecnologia podem ser diversas, assim como quantidade de área com potencial para cada cultivo energético. Nesta análise no foi considerado o consumo energético na adequação da biomassa para as diferentes tecnologias estudadas

Capítulo 5 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE EUCALIPTO E CAPIM ELEFANTE

As tecnologias de aproveitamento da biomassa em sistemas Agroenergéticos para a geração de energia elétrica podem ajudar o Brasil a atingir suas metas em política de segurança energética (energia segura, confiável e acessível), estender o acesso de eletricidade às comunidades isoladas, promover o desenvolvimento da população rural e reduzir a volatilidade dos preços da energia, além de minimizar o conflito com a segurança alimentar. No entanto, torna-se muito difícil para o governo avaliar com precisão qual das tecnologias existentes são as mais adequadas, sem informações confiáveis sobre os custos, benefícios e riscos do investimento.

A análise econômica ajuda à sociedade a fazer escolha e tomar decisões de investimento, para que os recursos disponíveis, que sempre são escassos, possam contribuir da melhor forma para satisfazer as necessidades individuais e coletivas (LÓPES DA S.; GONÇALVES J.; VALVERDE, 2005). No campo da engenharia tem que fazer previamente a análise do desempenho termodinâmica considerando as tecnologias disponíveis.

É importante ressaltar que numa análise econômica estima-se o lucro de um projeto mediante indicadores de desempenho econômico, mais às normas ambientais podem controverter a decisão de execução. Também pode ser que um projeto não seja viável economicamente, mas ambientalmente é necessário, como estratégia para mitigar problemas ambientais.

No capítulo anterior foi demonstrado que o Eucalipto e o Capim Elefante com tecnologias de conversão termoquímica existentes podem ser uma alternativa interessante para a geração de eletricidade. Neste capítulo, vai se apresentar a análise econômica e custos de geração da eletricidade.

5.1 CRITERIOS DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA ELETRICIDADE DA BIOMASSA

Todos os projetos de investimento em energia, além de ser viáveis tecnicamente, têm que ser viáveis econômica e financeiramente o que implica estimar e analisar as perspectivas de desempenho financeiro do produto resultante do projeto.

O objetivo mais importante da análise econômica é avaliar os efeitos financeiros que terá o projeto sobre os produtores e usuários. Esta avaliação inicia se desde a análise da situação financeira atual até o desenvolvimento do projeto em um tempo determinado, estimando o desempenho financeiro no futuro a través de indicadores idôneos, pelo que é necessário fazer projeções financeiras detalhadas para esta análise. Dentre estes índices pode-se destacar o valor presente líquido, o valor anual uniforme, a taxa interna de retorno e o tempo de retorno de capital. Para a execução de tais análises procura-se moldar o problema real em uma forma padrão, um fluxo de caixa, o que permite utilizar certas equações previamente concebidas e, assim, avaliar economicamente o projeto.

Neste trabalho a análise vai ser baseada no valor presente líquido e a taxa interna de retorno em um horizonte de 18 anos. Não foi contemplado o custo de interconexão, em se tratando-se de sistemas isolados, eles precisariam apenas de um micro rede específica para cada caso.

5.2 ESCOPO DA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE EUCALIPTO E CAPIM ELEFANTE

Atualmente o Sistema Interligado Nacional interliga as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Com uma capacidade instalada de 115 mil megawatts (MW). Esse sistema é uma interconexão dos sistemas elétricos regionais e uma integração dos recursos de geração e transmissão para atender ao mercado energético brasileiro. Segundo o IBGE (2013), em 2010 havia 1,3% de domicílios sem energia elétrica, com maior incidência nas áreas rurais do País (7,4%). A situação extrema era a da região Norte, onde 24,1% dos domicílios rurais não possuíam energia elétrica, seguida das áreas rurais do Nordeste (7,4%) e do Centro-Oeste (6,8%).

A população rural, muitas vezes, não encontra soluções para os problemas socioeconômicos com os quais convivem, alguns são: falta de condições para estabelecimento de um mercado de trabalho, fonte de renda, produção e conservação de alimentos, purificação da água e manutenção de postos de saúde e núcleos de ensino de razoável qualidade. Um dos fatores que colabora fortemente para essa situação é o desigual acesso à energia, principalmente a energia elétrica (CECELSKI, 2000).

Então o atendimento às comunidades rurais isoladas figura como um dos maiores desafios a serem vencidos para alcançar a universalização do acesso à eletricidade. As soluções de atendimento de energia nessas comunidades, dificilmente devem seguir o modelo convencional, mais ainda quando temos muitas incertezas da dinâmica climática que geram um risco maior na segurança energética, pela dependência, majoritariamente da hidroeletricidade. Uma das possíveis soluções é a eletrificação descentralizada com biomassa proveniente de cultivos energéticos do Eucalipto e o Capim Elefante.

5.2.1 Características da implantação da biomassa

Uma vez selecionadas as espécies Eucalipto e Capim Elefante como os cultivos energéticos para a análise, foram definidas as densidades da plantação, sistemas produtivos, produções esperadas.

5.2.1.1 Sistema produtivo do Eucalipto

Para o caso do Eucalipto utiliza-se o software “SisEucalipto” na estimativa da produção esperada, para diferentes densidades de plantação e diferentes condições agroambientais.

O SisEucalipto é um software desenvolvido pela Embrapa como resultado de três décadas de pesquisa científica, cujo objetivo é orientar ao produtor rural no manejo e planejamento florestal em procura de uma maior renda desta atividade. Este software faz uma estimativa do CO₂ capturado no tempo estabelecido.

O SisEucalipto auxilia as tomadas de decisão sobre: quando, quanto e como desbastar, quando fazer o corte final. Também pode indicar o crescimento e produção da floresta, a produção por classes de diâmetro e o volume de madeira por tipo de utilização industrial. Figura 5.1.

O SisEucalipto foi concebido com base em distribuições probabilísticas, em vez dos modelos de regressão convencionais. O SisEucalipto trabalha com a projeção ano a ano da estrutura de cada floresta, envolvendo vários parâmetros simultaneamente, obtidos de parcelas de inventários contínuos por meio de parcerias com produtores florestais, o que possibilitou a obtenção das estimativas dos parâmetros da distribuição probabilística para cada espécie, nas diferentes condições de solos, idade e espaçamento entre árvores (OLIVEIRA, 2010a).

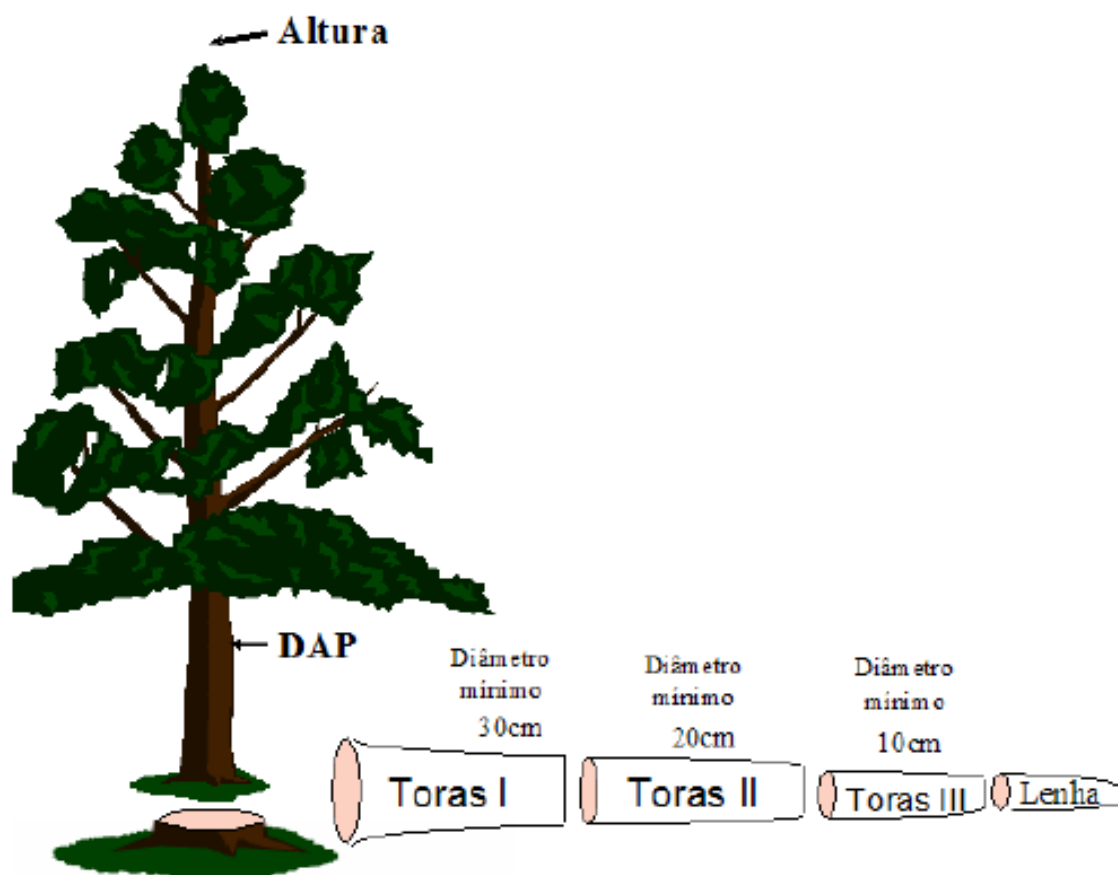


Figura 5.1. Tronco com sortimento em função de tipos de toras.

Fonte: (OLIVEIRA, 2010a)

As distribuições probabilísticas utilizadas foram a SB e SB bivariada (SBB). A distribuição SB descreve a distribuição marginal da variável diâmetro ou altura de árvores de um povoamento em diferentes idades e a SBB descreve a distribuição conjunta destas variáveis, associadas através de funções ao número de árvores por hectare (S) e à altura dominante (HD) ou idade do povoamento (OLIVEIRA, 2010a).

5.2.1.1.1 Estimativa da produção esperada.

Para fazer a estimativa da produção esperada o SisEucalipto precisa de uns parâmetros que são determinados assim:

- **Altura dominante e Índice de Sitio (S).** É a medida potencial da produtividade do sítio, ou seja, a capacidade de uma área em possibilitar o crescimento de determinada espécie. A qualidade do sítio pode ser avaliada usando o crescimento em altura das árvores dominantes (Altura Dominante) (OLIVEIRA, 2010b). Então maior seja S maior é a capacidade de produção daquele local. A equação 5.1 corresponde à altura dominante (H_{dom}) para o Eucalipto grandis no Brasil. Esta variedade foi a selecionada para usar nas simulações das produções esperadas. Nesta análise foram escolhidos os índices de sitio 30 e 40.

$$H_{dom} = S \times \left[e^{-2,72 \times (Idade)^{-0,57} - 7^{-0,51}} \right] \quad 5.1$$

- **Volume da produção (V).** A estimativa do volume de árvores ou de plantações florestais é feita com base no diâmetro a 1,3 m do solo, ou DAP - diâmetro à altura do peito (D), na altura da árvore (H) e no fator de forma (f), que é obtido pela divisão do volume real da árvore pelo volume de um cilindro de diâmetro D e comprimento H. Assim, o modelo de uma equação de volume (v) é:

$$V = 0,7854 \times f \times D^2 \times H \quad 5.2$$

O valor de f pode variar segundo a forma do tronco. Quanto mais cilíndrico é o tronco, mais próximo de 1,0 é o fator de forma. A forma do tronco varia com a idade.

O SisEucalipto permite simular possíveis desbastes (sistemáticos, seletivos ou mistos) segundo o manejo do cultivo. Nesta análise não são considerados desbastes.

- **Densidade da plantação.** Foi estabelecida uma implantação adensada com 6667, 4444 e 3333 Árvores/hectare. Os cortes foram programados cada 2 e 6 anos. Os resultados da estimativa da produção e captura de CO₂ são mostrados na tabela 5.1 e 5.2.

Pode se ver que a variabilidade da produtividade do Eucalipto aos 2 anos para uma mesma densidade para os Índice de Sitio (S) selecionados neste análise, tem um valor médio de 25%.

Em quanto para o Eucalipto aos 6 anos tem uma variabilidade de 35%. Ou seja, que a maior tempo de corte a produtividade vai ser melhor. Neste caso mesmo, a densidade de plantação com maior produtividade é 4444 Árvores/hectare para os dois tempos de corte contemplado neste estudo, pelo que foi selecionada para fazer a análise neste trabalho.

Tabela 5.1 Produção esperada para o Eucalipto aos 2 anos de idade (S=30 e S=40)

Distancia de Sembr (m)	Árvores por Hectáre	Índice de Sitio	Altura Media (m)		Diâmetro (m)		Produção (m³/há)		Captura CO ₂ (tCO ₂ /há)	
			1 ano	2 anos	1 ano	2 anos	1 ano	2 anos	1 ano	2 anos
3 X 0.50	6667	30	6.3	14.2	3.0	6.3	8.4	74.7	7.9	70.3
3 X 0.75	4444		6.3	14.2	3.5	7.4	8.0	77.3	7.6	72.7
3 X 1.00	3333		6.3	14.2	3.8	8.2	7.4	74.6	6.9	70.2
3 X 0.50	6667	40	7.2	16.2	3.5	7.1	12.3	97.2	11.6	91.5
3 X 0.75	4444		7.2	16.2	4.1	8.3	12.0	103.0	11.3	97.2
3 X 1.00	3333		7.2	16.2	4.5	9.2	11.1	101.1	10.5	95.2

Fonte: Estimções usando SisEucalipto

Tabela 5.2 Produção esperada para o Eucalipto aos 6 anos de idade (S=30 e S=40)

Distancia de Plantio (m)	Árvores por Hectáre	Índice de Sitio	Altura Media (m)		Diâmetro (m)		Produção (m³/há)		Captura CO ₂ (tCO ₂ /há)	
			1 ano	6 anos	1 ano	6 anos	1 ano	6 anos	1 ano	6 anos
3 X 0.50	6667	30	4.1	21.0	2.6	9.7	5.2	235.4	4.9	221.6
3 X 0.75	4444		4.3	22.0	3.0	11.5	4.8	277.0	4.5	261.6
3 X 1.00	3333		4.4	22.5	3.2	12.8	4.9	291.9	4.1	274.8
3 X 0.50	6667	40	5.4	28.0	3.5	11.0	12.3	345.1	11.6	324.9
3 X 0.75	4444		5.7	29.5	4.1	13.1	12.0	428.0	11.3	403.0
3 X 1.00	3333		5.9	30.2	4.5	14.6	11.1	467.7	10.5	440.1

Fonte: Estimções usando SisEucalipto

Considera se importante ressaltar, que esta produção de madeira de Eucalipto estimada para esta densidade no têm considerado a biomassa da copa (folhas, galhos e ramos), que segundo MÜLLER (2005) atinge o 22% da produção total. Então teve-se que fazer uma correção a o valor de biomassa produzido acrescentando este 22%.

5.2.1.2 Sistema produtivo do Capim Elefante

A produção do capim elefante para produção de energia é distinto ao utilizado na nutrição animal. Os intervalos de cortes são maiores (duas colheitas no ano), para que o teor de fibra e seus componentes sejam os maiores possíveis.

O espaçamento do plantio nesta análise vai ser o recomendado por GOMIDE (1997) de 0,8 m entre sulcos e 0,5 entre covas na fileira. Segundo MAZZARELLA (2012) pode se atingir a uma produção de 40 MMg há⁻¹ ano⁻¹ de matéria seca.

5.2.2 Configurações dos sistemas Agroenergéticos

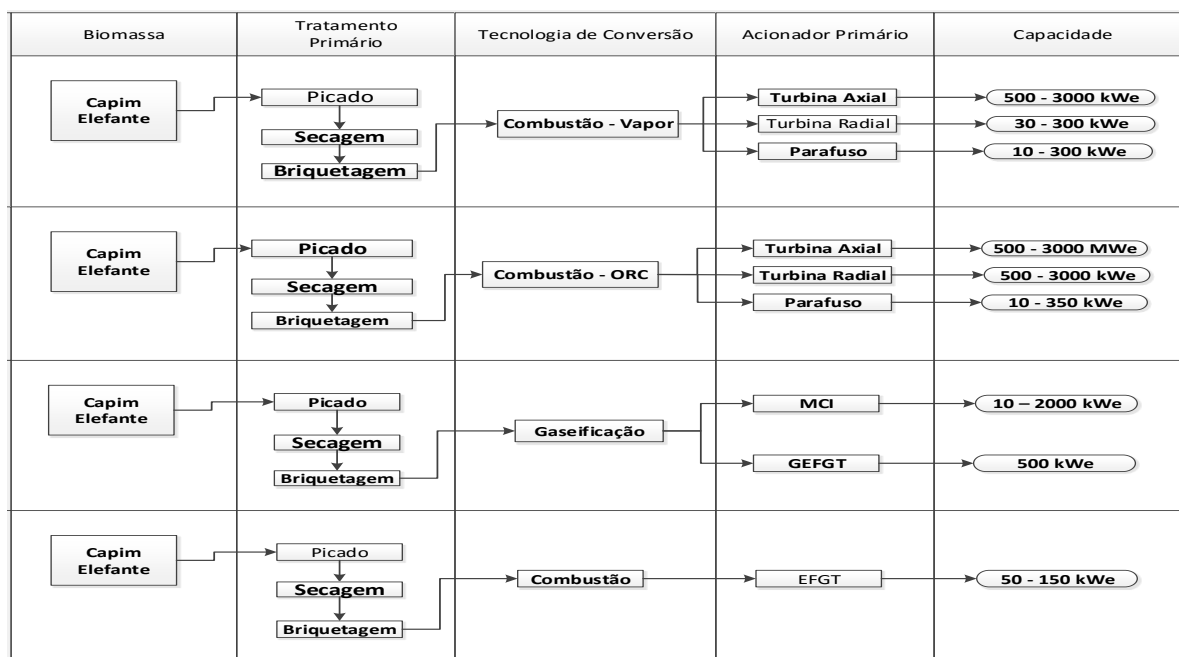
Na procura de satisfazer as necessidades energéticas de pequenas comunidades, principalmente em zonas não interconectadas e de agroindústrias que quisessem gerar sua energia com biocombustível sólido, neste trabalho apresenta se uma análise de sistema Agroenergéticos com capacidade entre 50 – 3000 kW com várias tecnologias com diferentes configurações utilizando como combustível biomassa de Eucalipto e Capim Elefante obtidos de plantações energéticas como biocombustível. Ver tabela 5.3 e tabela 5.4.

As configurações escolhidas têm em conta as capacidades de geração dos acionadores primários disponíveis no mercado. Os tratamentos primários podem ser diferentes de acordo com a região e disponibilidade de maquinaria.

Tabela 5.3. Configurações dos sistemas Agroenergéticos com biomassa de Eucalipto

Biomassa	Tratamento Primário	Tecnologia de Conversão	Acionador Primário	Capacidade
Eucalipto	Picado ↓ Secagem	Combustão - Vapor	Turbina Axial	500 - 3000 kWe
			Turbina Radial	30 - 300 kWe
			Parafuso	10 - 300 kWe
Eucalipto	Picado ↓ Secagem	Combustão - ORC	Turbina Axial	500 - 3000 MWe
			Turbina Radial	500 - 3000 kWe
			Parafuso	10 - 350 kWe
Eucalipto	Picado ↓ Secagem	Gaseificação	MCI	10 – 2000 kWe
			EFGT	500 kWe
Eucalipto	Picado ↓ Secagem	Combustão	EFGT	50 - 150 kWe

Tabela 5.4 Configurações dos sistemas Agroenergéticos com biomassa de Capim Elefante



5.3 ESTIMATIVA DOS CUSTOS

Os projetos têm pacotes de trabalhos que devem ser estimados de forma detalhada. Estas estimativas destes pacotes são relevantes para o cálculo dos custos diretos, indiretos e as despesas administrativas dos projetos e sua consequente avaliação real.

Os custos diretos são claramente creditáveis a um pacote de trabalho específico. Constituem todos aqueles elementos de custo individualizáveis com respeito ao produto ou serviço. Faz parte dos custos diretos: mão de obra, materiais, equipamentos e as despesas diretas. Os custos indiretos são os que não se pode apropriar diretamente a cada tipo de bem ou função de custo no momento de sua ocorrência (GRAY; LARSON, 2009).

Para o cálculo dos custos dos projetos, vai se considerar os custos da biomassa por separado, dos custos de geração. Mais se considera que existe apenas um gerente geral do projeto.

5.3.1 Custos da biomassa

A estimativa do preço da biomassa tem uma serie fatores que podem condiciona-lo no momento de seu cálculo. Mesmo que alguns dos fatores são incontroláveis pelo homem, como são os fatores ambientais. Na sua vez, estes são influenciados pelas mudanças climáticas que incidem nos aspectos de qualidade e quantidade de biomassa produzida. Daqui

a importância de abordar o critério de potencial teórico para fazer uma boa escolha da área para o cultivo em função das potencialidades agroambientais.

Na figura 5.2, mostra-se uma descrição geral dos fatores que incidem na estimativa do preço da biomassa. É importante ressaltar que o preço economicamente sustentável da biomassa, esta influenciado pela sua qualidade, quantidade, benefícios sociais e benefícios ambientais. A dúvida hoje é, qual deve ser preço real do biocombustível. Quem deve assumir o preço pelos serviços ambientais? Se fossem os combustíveis fósseis, isto permitiria equilibrar a balança custo/benefício dos biocombustíveis.

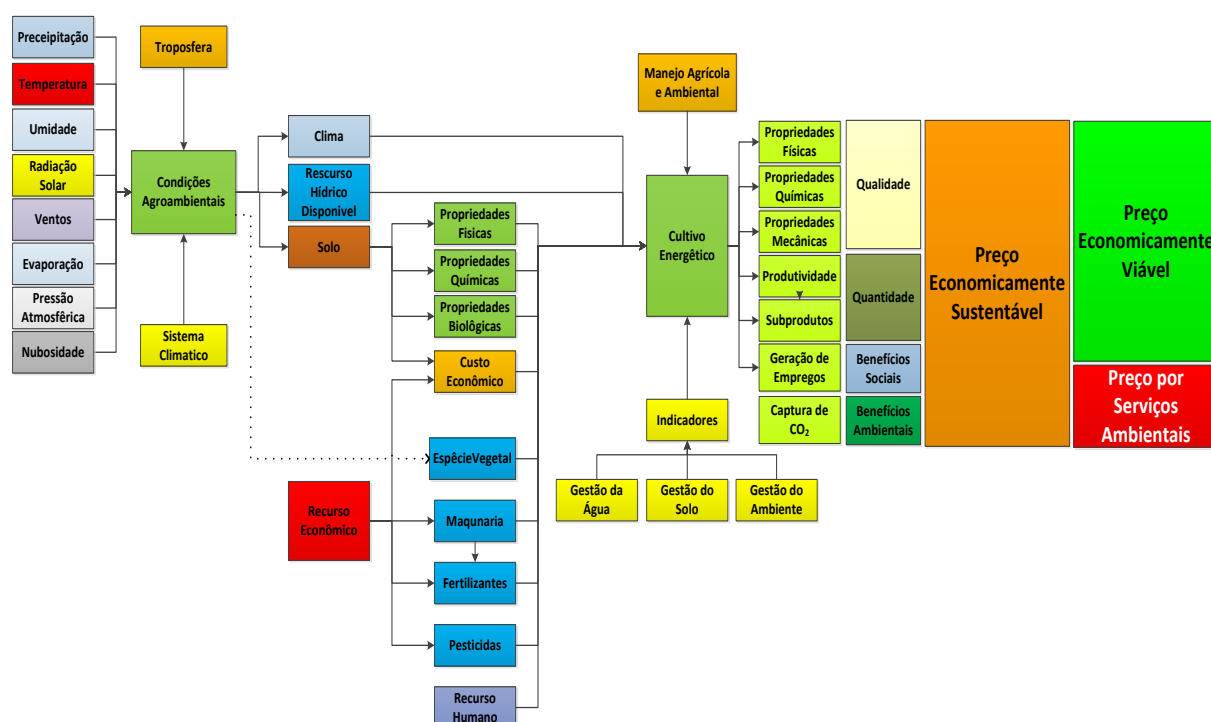


Figura 5.2 Descrição dos processos e sequencia para a estimativa do preço da biomassa

O alcance deste trabalho é a estimativa do preço economicamente viável da biomassa contabilizando os custos diretos e indiretos de todo seu processo produtivo. Os Custos dos serviços ambientais não serão tidos em conta.

5.3.1.1 Custos do Eucalipto

As atividades florestais têm características especiais que devem ser avaliadas com instrumentos económicos específicos para a estimativa do seu custo. As atividades que envolvem o manejo sustentável das florestas são: implantação, crescimento, manutenção e colheita. Assumindo que a comercialização é a través da usina geradora de eletricidade.

5.3.1.1.1 Custos de salários

São os provenientes do pagamento da mão de obra nas diversas atividades do plantio. Podem ser pagos de forma mensal o por tarefa realizada. Os salários nesta análise têm como base o salário mínimo mensal vigente e o salário médio por profissão no ano 2012.

Algumas atividades que geram pago de salários são: desmatamento, destoca, encoivramento e queima; locação de talhões, estradas e aceiros; construção de cercas; construção de estradas e aceiros; construção de obras de arte; preparo do solo; combate a formigas; combate a cupins; produção de mudas; plantio; replantio; manutenção de estradas e plantação.

5.3.1.1.2 Encargos sociais

Estão diretamente ligados aos custos de salários e destinam se a promover segurança e bem-estar social. Os encargos sociais nesta análise são: 13º salário (8.33%), previdenciário (40.8%), férias (11.11%) e previdenciário pelo 13º salário e férias (17.68%).

5.3.1.1.3 Custo de depreciação

São aqueles provenientes do uso de bens que não são consumidos em um ano: bens de capital ou chamados custos fixos. Existem três tipos de depreciação: taxa constante, com taxa decrescente e com taxa crescente. Nesta análise é adotado a depreciação constante. Ver equação 5.3

$$D = \frac{V-R}{n} \quad 5.3$$

Em que: V: valor de aquisição; R: valor do resto e n: vida útil (anos).

5.3.1.1.4 Juros

Correspondem ao pagamento pelo uso do capital, próprio ou terceiros. Este valor depende das taxas do mercado financeiro. Ver equação 5.4.

$$J = \frac{V}{2} \times i \quad 5.4$$

Em que: V: calor de aquisição; i: taxa de juros.

5.3.1.1.5 Custos de terceiros

Representa os custos das firmas que prestam serviço de terceirização. Os serviços terceirizados podem ser: corte da madeira, transporte, construção de cerca, vigilância, alimentação, combate de formigas, etc.

5.3.1.1.6 Custos de risco

Referem se a alguns danos que podem ocorrer dentro de uma produção florestal, por influencias externas que interrompem os processos planejados.

5.3.1.1.7 Custos dos impostos

. São os diferentes impostos cobrados ao produtor florestal. Nesta análise é contemplado imposto de renda, IPTU.

5.3.1.1.8 Custo das máquinas

Para o custo do valor da hora de máquina, precisa se fazer uma estimativa de acordo com os preços nesse momento (2012). Ver tabela 5.5. Desta mesma maneira foram estimados para outras atividades. Ver tabela 5.6.

No caso da colheita, se faz uma análise para decidir a compra da maquinaria ou a terceirização desta atividade. Consideram se os custos por número de horas efetivas trabalhadas no ano de cada máquina Vs. o custo da terceirização desta atividade. Ver tabela 5.7 e figura 5.3.

Diferentes percentagens de lucro têm como objetivo fazer uma análise de sensibilidade da produção, além de estabelecer um arranjo de possíveis pagamentos no caso de terceirização dos trabalhos.

Pode se ver na figura 5.3, que estes gráficos são funcionais para decidir se é viável comprar a máquina o terceirizar a atividade de colheita, segundo o número de horas efetivas necessária no ano para fornecer à madeira requerida para a geração de eletricidade.

No caso do harvester, para recuperar o investimento são necessárias 2300 horas efetivas trabalhadas no ano. Para o Trator – Auto carregável e Trator - Chipper são 2900 e 3600 horas efetivas trabalhadas no ano respetivamente. Se o número de horas efetivas necessárias no ano for menor, é recomendável terceirizar a colheita.

Tabela 5.5 Custo da hora de trator - subsolador

Custo Operacional do Trator - Subsolador			
Custos Fixos do Trator		Custos Variáveis do Trator	
Depreciação (D)		Combustíveis (C)	
Valor de aquisição (Vi, R\$)	= 185.000	Custo do diesel (R\$/L)	= 2,30
Valor de venda (Vf, R\$)	= 18.500	Potência do motor (CV)	= 170
Vida útil (Vu, anos)	= 10	C (R\$/hora)	= R\$ 59,04
horas trabalhadas/ano	= 1.000		
D (R\$/hora)	= R\$ 16,65	Óleo lubrificante (L)	
		Custo do óleo (R\$/L)	= 12,00
Juros sobre o capital (J)		L (R\$/hora)	= R\$ 0,09
Taxa de juros a.a. (%)	= 6,00%		
J (R\$/hora)	= R\$ 6,11	Graxa (X)	
		Custo da graxa (R\$/L)	= 18,00
Garagem (G)		X (R\$/hora)	= R\$ 0,90
Índice anual (%)	= 1,00%		
G (R\$/hora)	= R\$ 1,85	Manutenção (M)	
		Taxa de manutenção (% na vida útil)	= 100,0%
Seguros (S)		M (R\$/hora)	= R\$ 18,50
Índice anual (%)	= 2,00%		
S (R\$/hora)	= R\$ 3,70	Mão de obra (MO)	
		Salário mensal do operador (R\$/mes)	= 1.100,00
Impostos (I)		Taxa encargos sociais (% do salário)	= 93,0%
Taxa (%)	= 0,00%	Horas trabalhadas/ano (h)	= 1.000
I (R\$/hora)	= R\$ 0,00	MO (R\$/hora)	= R\$ 25,48
Custos Fixos (R\$/hora)	= R\$ 28,31	Custos Variáveis (R\$/hora)	= R\$ 104,01
Custo Operacional do Subsolador			
Custos Fixos do Implemento		Custos Variáveis do Implemento	
Depreciação (D)		Graxa (X)	
Valor de aquisição (Vi, R\$)	= 35.000	Custo da graxa (R\$/L)	= 9,00
Valor de venda (Vf, R\$)	= 5.000	X (R\$/hora)	= R\$ 0,45
Vida útil (Vu, anos)	= 7		
Horas trabalhadas/ano	= 200	Manutenção (M)	
D (R\$/hora)	= R\$ 21,43	Taxa de manutenção (% na vida útil)	= 5,0%
		M (R\$/hora)	= R\$ 1,25
Juros sobre o capital (J)		Custos Variáveis (R\$/hora)	= R\$ 1,70
taxa de juros a.a. (%)	= 6,00%		
J (R\$/hora)	= R\$ 6,00	CUSTO OPERACIONAL TOTAL	
		(trator + implemento)	
Garagem (G)		Trator	
índice anual (%)	= 1,00%	Custos fixos	= R\$ 28,31
G (R\$/hora)	= R\$ 1,75	Custos variáveis	= R\$ 104,01
		Custo-hora do trator	= R\$ 132,32
Seguros (S)		Implemento	
índice anual (%)	= 0,50%	Custos fixos	= R\$ 30,05
S (R\$/hora)	= R\$ 0,88	Custos variáveis	= R\$ 1,70
		Custo-hora do implemento	= R\$ 31,75
Impostos (I)		CUSTO-HORA (Sem Lucro)	= R\$ 164,07
taxa (%)	= 0,00%	CUSTO-HORA (Lucro 30%)	= R\$ 213,29
I (R\$/hora)	= R\$ 0,00	CUSTO-HORA (Lucro 50%)	= R\$ 246,11
Custos Fixos (R\$/hora)	= R\$ 30,05		

Tabela 5.6 Custos da hora de máquinas usadas no projeto

Descrição	Custos sem Lucro	Custo com Lucro (30%)	Custo com Lucro (50%)
Trator - Subsolador (R\$ h ⁻¹)	164,1	213,3	246,1
Trator - Pulverizador (R\$ h ⁻¹)	143,3	186,2	214,9
Trator - Grade (R\$ h ⁻¹)	152,9	198,8	229,3
Trator - Roçadora (R\$ h ⁻¹)	138,1	179,6	207,2
Harvester (R\$ m ⁻³)	4,8	6,3	7,3
Trator Autcargável (R\$ m ⁻³)	3,3	4,3	4,9
Trator - Chipper (R\$ m ⁻³)	6,5	8,4	9,7

Tabela 5.7 Custos da hora das máquinas para colheita do Eucalipto

Harvester				Trator Auto Cargável				Trator Chipper			
Valor Adquisição (R\$):	1.014.277,0			Valor Adquisição Trator (R\$):	187.420,8			Valor Adquisição Trator (R\$):	187.420,8		
Valor Revenda (R\$):	253.569,3			Valor Adquisição Autorrecargável (R\$):	176.396,0			Valor Adquisição Woody Chipper (R\$):	354.014,7		
Vida Útil (h):	20.000,0			Valor Revenda Conjunto (R\$):	145.526,7			Valor Revenda Conjunto (R\$):	216.574,2		
Vida Útil (anos):	4,0			Vida Útil (h):	20.000,0			Vida Útil (h):	10.000,0		
Horas Efetivas de Trabalho no Ano:	4.800,0			Vida Útil (anos):	4,0			Vida Útil (anos):	7,0		
Consumo Diesel (L/h)	20,0			Horas Efetivas de Trabalho no Ano:	4.800,0			Horas Efetivas de Trabalho no Ano:	1.500,0		
Custo Diesel (R\$/L)	2,3			Consumo Diesel (L/h)	13,0			Consumo Diesel (L/h)	30,0		
Produtividade (m³/h)	40,0			Custo Diesel (R\$/L)	2,3			Custo Diesel (R\$/L)	2,3		
Eficiência (%)	80,0			Custo de Pneus Conjunto (R\$)	22.000,0			Custo de Pneus Conjunto (R\$)	22.000,0		
Salario Operador (R\$)	1.600,0			Vida Útil de Pneus (h)	5.500,0			Vida Útil de Pneus (h)	5.500,0		
Número de Operários:	2,0			Produtividade (m³/h)	30,0			Produtividade (m³/h)	40,0		
Encargos Sociais (%)	93,0			Salario Operador (R\$)	1.100,0			Salario Operador (R\$)	1.100,0		
Taxa de Oportunidade ao Capital (%)	6,0			Número de Operários:	2,0			Número de Operários:	2,0		
Taxa Anual de Seguro (%)	4,0			Encargos Sociais (%)	93,0			Encargos Sociais (%)	93,0		
Número de Harvester:	1,0			Taxa de Oportunidade ao Capital (%)	6,0			Taxa de Oportunidade ao Capital (%)	6,0		
				Taxa Anual de Seguro (%)	4,0			Taxa Anual de Seguro (%)	4,0		
				Número de Trator Autorrecargável:	2,0			Número de Trator Autorrecargável:	2,0		
Custos Fixos				Custos Fixos				Custos Fixos			
Depreciação	39,62	54,75	20,47	Depreciação	11,37	39,73	11,50	Depreciação	30,94	108,12	31,28
Juros e Seguros	15,19	20,99	7,85	Juros e Seguros	5,87	20,53	5,94	Juros e Seguros	26,81	93,70	27,11
Salarios	15,44	21,34	7,98	Salarios	10,62	37,09	10,73	Salarios	33,97	118,70	34,35
Garagem	2,11	2,92	1,09	Garagem	0,76	2,65	0,77	Garagem	3,61	12,61	3,65
Total	72,36	100,00	37,38	Total	28,62	100,00	28,93	Total	95,33	333,13	96,39
Custos Variáveis				Custos Variáveis				Custos Variáveis			
Combustível	46,00	44,39	23,76	Combustível	29,90	48,78	30,23	Combustível	69,00	112,57	69,77
Lubrificantes e Graxas	6,90	6,66	3,56	Lubrificantes e Graxas	4,49	7,32	4,53	Lubrificantes e Graxas	10,35	16,89	10,47
Óleo Hidráulico	23,00	22,19	11,88	Óleo Hidráulico	14,95	24,39	15,12	Óleo Hidráulico	34,50	56,29	34,88
Custo Pneus	0,00	0,00	0,00	Custo Pneus	4,00	6,53	4,04	Custo Pneus	4,00	6,53	4,04
Manutenção	27,73	26,76	14,33	Manutenção	7,96	12,98	8,05	Manutenção	21,66	35,33	21,90
Total	103,63	100,00	53,53	Total	61,29	100,00	61,97	Total	139,51	227,61	141,06
Custos Operacional				Custos Operacional				Custos Operacional			
Custo Fixo	72,36	37,38	37,38	Custo Fixo	28,62	28,93	28,93	Custo Fixo	95,33	96,39	96,39
Custo Variável	103,63	53,53	53,53	Custo Variável	61,29	61,97	61,97	Custo Variável	139,51	141,06	141,06
Custo Administrativo	17,60	9,09	9,09	Custo Administrativo	8,99	9,09	9,09	Custo Administrativo	23,48	23,74	23,74
Total	193,59	100,00	100,00	Total	98,90	100,00	100,00	Total	258,32	261,19	261,19
Custo de Produção (R\$/m³):	4,84			Custo de Produção (R\$/m³):	3,30			Custo de Produção (R\$/m³):	6,46		
Custo de Produção com lucro 30% (R\$/m³):	6,29			Custo de Produção com lucro 30% (R\$/m³):	4,29			Custo de Produção com lucro 30% (R\$/m³):	8,40		
Custo de Produção com lucro 50% (R\$/m³):	7,26			Custo de Produção com lucro 50% (R\$/m³):	4,95			Custo de Produção com lucro 50% (R\$/m³):	9,69		

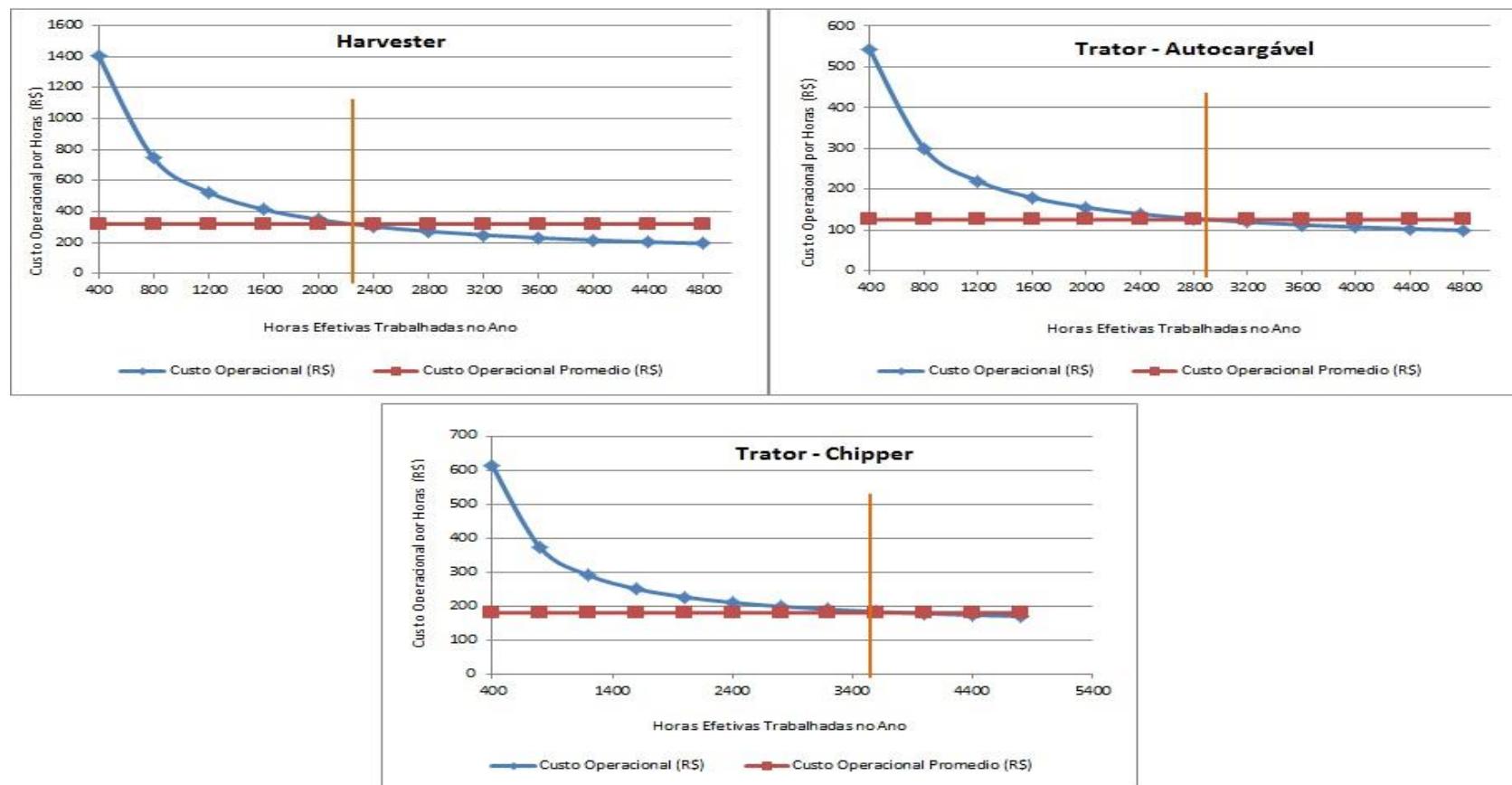


Figura 5.3 Custos operacionais das máquinas para colheita Vs. No. Horas efetivas trabalhadas

5.3.1.1.9 Determinação do custo de produção

Para o cálculo dos custos de produção do m³ de Eucalipto, foi necessário considerar a variação do custo de capital no horizonte de cada projeto segundo o adensamento. O custo de produção é o custo onde a taxa interna de retorno (TIR) é igual a zero.

Foi necessário decidir a melhor opção entre compra o aluguel da maquinaria. Considerando uma capacidade mínima de corte de madeira de 88,000 m³ ano⁻¹, e comparando-a com as necessidades de cada usina segundo a potência a produzir e tecnologia utilizada. Para uma potência de 3000 kW operando com um ciclo ORC- TA, ORC-TR e CRC – TA é necessário comprar a maquinaria. Nos demais casos é mais rentável terceirizar as atividades. Os custos utilizados para estas estimativas foram os calculados para cada máquina como apresentado anteriormente com um lucro de 30%.

Uma vez feitos os cálculos dos custos por atividade na produção do Eucalipto considerando os custos da terra alugada pelo tempo de execução do projeto e terra comprada. Os resultados são amostrados na tabela 5.8.

Tabela 5.8 Custos resumidos da produção de Eucalipto para diferentes densidades de plantação e Índice Sitio.

Produção Adensado - Corte aos 2 Anos por 20 Anos									
Distancia de Sembra (m)			Arvores por hectáre	Idade de corte	Anos do projeto	Produtividade promeio		Custo	
						IS30	IS40	IS30	IS40
								Terra Alugada	Terra Alugada
m X m			Unid.	anos	Unid	m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹		R\$ m ⁻³	R\$ m ⁻³
3,00	X	0,50	6.667	2	20	45,57	59,29	154,50	121,80
3,00	X	0,75	4.444	2	20	47,15	62,83	129,00	100,50
3,00	X	1,00	3.333	2	20	45,51	61,67	122,00	94,00
Produção Adensado - Corte aos 6 Anos por 18 Anos									
Distancia de Sembra (m)			Arvores por hectáre	Idade de corte	Anos do projeto	Produtividade promeio		Custo	
						IS30	IS40	IS30	IS40
								Terra Alugada	Terra Alugada
m X m			Unid.	anos	Unid	m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹		R\$ m ⁻³	R\$ m ⁻³
3,00	X	0,50	6.667	6	18	47,86	70,17	83,50	62,50
3,00	X	0,75	4.444	6	18	56,32	87,03	69,40	51,40
3,00	X	1,00	3.333	6	18	59,35	95,10	64,70	47,30

Na tabela 5.8 pode se ver que a variabilidade dos custos para cada densidade é de aproximadamente 5% e entre terra alugada e terra comprada em 4%. De acordo com estes resultados, pode se recomendar um adensamento de 4444 Árvores por hectare com corte a

os 6 anos na produção de Eucalipto para uso energético, com custos de 69,4 R\$ m⁻³ e 51,4 R\$ m⁻³ para IS30 e IS40 respectivamente.

5.3.1.2 Custos do Capim Elefante

O capim elefante vem sendo usado como alimento para gado, mais para o seu uso energético são poucos os estudos de aspectos econômicos. Nesta análise se faz uma aproximação dos custos do Capim Elefante baseados em custos reportados com aproximações feitas a partir de seus custos para forragem. Neste estudo foi considerado um preço só para todo o território Brasileiro. Ver tabela 5.9.

Tabela 5.9. Custo do estabelecimento do cultivo de Capim Elefante

I - Custo de formação e estabelecimento de 1,0 ha de Capim Elefante

SERVIÇOS E INSUMOS	UNID.	QTDE	PREÇO (R\$)	R\$/ha	%
1- Preparo e correção do solo				667,62	11,28
1.1- Calagem					
* transporte do calcário	htr	0,50	53,30	26,65	0,45
* distribuição do calcário com jumil	htr	1,00	53,30	53,30	0,90
* auxiliar de tratorista	dh	0,30	40,00	12,00	0,20
* calcário dolomítico	Kg	2500	0,10	250,00	4,22
1.2- Preparo do Solo					
* aração com arado de 3 discos reversíveis	htr	2,58	106,60	275,03	4,65
* gradagem com grade niveladora	htr	0,80	63,30	50,64	0,86
2- Mudas				3566,55	60,27
* corte, preparo e carga	dh	9,50	40,00	380,00	6,42
* transporte	htr	3,50	53,30	186,55	3,15
* mudas	t	6,00	500,00	3000,00	50,69
3- Plantio				1007,14	17,02
* abertura sulcos e cobert. das mudas c/ arado 2 disc	htr	4,50	53,30	239,85	4,05
* distribuição do adubo e mudas nos sulcos	dh	9,75	40,00	390,00	6,59
* gradagem para acertamento do solo	htr	0,80	63,30	50,64	0,86
* transporte de adubo	htr	0,50	53,30	26,65	0,45
* superfosfato simples/plantio	Kg	500	0,60	300,00	5,07
4- Tratos culturais				546,65	9,24
4.1- Controle de invasoras					
* capina manual com enxada	dh	8,00	40,00	320,00	5,41
4.2- Adubação de cobertura					
* distribuição manual do adubo	dh	0,50	40,00	20,00	0,34
* transporte do adubo	htr	0,50	53,30	26,65	0,45
* adubo/cobertura (20-00-20)	kg	300	0,60	180,00	3,04
5- Outros custos				130,00	2,20
* assistência técnica	sm	0,20	650,00	130,00	2,20
6- Custo total				5917,96	100,00
7- Produção de Capim Elefante					
	R\$/ha	t/ha		29,59	

II - Custo anual de manutenção/ha do Capim Elefante

SERVIÇOS E INSUMOS	UNID.	QTDE	PREÇO (R\$)	R\$/ha	%
1- Tratos culturais				633,96	20,46
1.1- Adubação de cobertura - 3 vezes/ano					
* distribuição manual do adubo	dh	2,00	40,00	80,00	2,58
* transporte do adubo (até 10 ha)	htr	1,20	53,30	63,96	2,06
* adubo 20-05-20 (250 kg x 3 vezes)	kg	750	0,60	450,00	14,52
1.2- Controle de invasoras					
* Roçada Manual	dh	1	40,00	40,00	1,29
2- Outros custos				2465,00	79,54
* remuneração do uso da terra	mês	12	200,00	2400,00	77,45
* Assistência técnica	sm	0,10	650,00	65,00	2,10
3- Custo total de manutenção				3098,96	100,00
	R\$/ha				

III - Custo Total Produção do Capim Elefante

Custos	R\$/ ton	%
1 - Custo Fixo		
* Estabelecimento do Capim	29,59	62,2
* Depreciação do capital de formação e estabelecimentoda	2,50	5,3
2 - Custos Variáveis		
* Manutenção anual da lavoura	15,49	32,6
3 - Custo Total		
* Por tonelada	47,58	100,0
* Por tonelada do Capim Elefante		

O preço do capim elefante em massa foi estimado na estrutura do preço estabelecida por VILELA (2009). Os cálculos dos custos reportam que 47,58 R\$ ton⁻¹ para o ano 2013, com uma produção de 200 toneladas de material verde por hectare. Na tabela 5.10 amostram-se os custos em matéria seca do Capim Elefante, com uma produção de 40 ton. MS ha⁻¹, com um custo de 238 R\$ ton⁻¹.

Tabela 5.10 Custo do Capim Elefante em Matéria Seca por hectare

Custos	R\$/ ton	%
1 - Custo Fixo		
* Estabelecimento do Capim	147,95	62,2
* Depreciação do capital de formação e estabelecimentoda	12,50	5,3
2 - Custos Variáveis		
* Manutenção anual da lavoura	77,47	32,6
3 - Custo Total		
* Por tonelada	237,92	100,0
* Por tonelada do Capim Elefante		

5.3.1.3 Custo do enfardado e transporte até a usina de briquetagem

Os custos do enfardado do capim elefante e transporte até a usina para iniciar o processo de briquetagem são estimados em R\$99,2 ton⁻¹. A maquinaria envolvida no enfardado do Capim Elefante, um conjunto trator-cefeira, um conjunto trator-ancinho, um conjunto trator-enfardadora e dois conjunto trator-gaiola para o transporte dos fardos à usina. O resumo dos custos pode ser visto na tabela 5.11.

Tabela 5.11. Custo do enfardado e transporte até a Usina do Capim Elefante (30 km)

Custo do Enfardado	Qtde.	Custo (R\$ ton ⁻¹)	Custo Total (R\$ ton ⁻¹)
Trator - Cefeira	1	22,0	22,0
Trator - Ancinho	1	30,2	30,2
Trator - Enfardadora	1	18,6	18,6
Trator - Gaiola	2	14,2	28,4
Total			99,2

Os custos detalhados das atividades envolvidas no enfardado do Capim Elefante podem ser vistos na tabela 5.12, 5.13, 5.14, 5.15.

Tabela 5.12. Custo operacional do Conjunto Trator - Ancinho

Custos Fixos do Trator			Custos Variáveis do Trator		
Depreciação (D)			Combustíveis (C)		
Valor de aquisição (Vi, R\$)	=	185.000,0	Custo do diesel (R\$/L)	=	2,3
Valor de venda (Vf, R\$)	=	18.500,0	Potência do motor (CV)	=	170,0
Vida útil (Vu, anos)	=	10,0	C (R\$/hora)	=	59,0
horas trabalhadas/ano	=	1.000,0			
D (R\$/hora)	=	16,7	Óleo lubrificante (L)		
			Custo do óleo (R\$/L)	=	12,0
			L (R\$/hora)	=	0,1
Juros sobre o capital (J)			Graxa (X)		
Taxa de juros a.a. (%)	=	0,1	Custo da graxa (R\$/L)	=	18,0
J (R\$/hora)	=	6,1	X (R\$/hora)	=	0,9
Garagem (G)			Manutenção (M)		
Índice anual (%)	=	0,0	Taxa de manutenção (% na vida útil)	=	1,0
G (R\$/hora)	=	1,9	M (R\$/hora)	=	18,5
Seguros (S)			Mão de obra (MO)		
Índice anual (%)	=	0,0	Salário mensal do operador (R\$/mes)	=	1.100,0
S (R\$/hora)	=	3,7	Taxa encargos sociais (% do salário)	=	0,9
Impostos (I)			Horas trabalhadas/ano (h)	=	1.000,0
Taxa (%)	=	0,0	MO (R\$/hora)	=	25,5
I (R\$/hora)	=	0,0	Custos Variáveis (R\$/hora)	=	104,0
Custos Fixos (R\$/hora)	=	28,3			

Custo Operacional do Ancinho

Custos Fixos do Implemento			Custos Variáveis do Implemento		
Depreciação (D)			Graxa (X)		
Valor de aquisição (Vi, R\$)	=	42.000,0	Custo da graxa (R\$/L)	=	9,0
Valor de venda (Vf, R\$)	=	8.400,0	X (R\$/hora)	=	0,5
Vida útil (Vu, anos)	=	5,0			
Horas trabalhadas/ano	=	1.400,0	Manutenção (M)		
D (R\$/hora)	=	4,8	Taxa de manutenção (% na vida útil)	=	0,1
			M (R\$/hora)	=	0,3
Juros sobre o capital (J)			Custos Variáveis (R\$/hora)	=	0,8
taxa de juros a.a. (%)	=	0,1			
J (R\$/hora)	=	1,1	CUSTO OPERACIONAL TOTAL		
Garagem (G)			(trator + implemento)		
Índice anual (%)	=	0,0	Trator		
G (R\$/hora)	=	0,3	Custos fixos	=	28,3
Seguros (S)			Custos variáveis	=	104,0
Índice anual (%)	=	0,0	Custo-hora do trator	=	132,3
S (R\$/hora)	=	0,2	Implemento		
Impostos (I)			Custos fixos	=	6,3
taxa (%)	=	0,0	Custos variáveis	=	0,8
I (R\$/hora)	=	0,0	Custo-hora do implemento	=	7,1
Custos Fixos (R\$/hora)	=	6,33	CUSTO-hora (Sem Lucro)	=	139,4
			CUSTO-ton (Lucro 30%)	=	30,2
			CUSTO-ton (Lucro 50%)	=	34,8

Tabela 5.13Custo operacional do Conjunto Trator - Enfardadora

Custo Operacional do Trator - Enfardadora			
Custos Fixos do Trator		Custos Variáveis do Trator	
Depreciação (D)		Combustíveis (C)	
Valor de aquisição (Vi, R\$)	= 185.000,0	Custo do diesel (R\$/L)	= 2,3
Valor de venda (Vf, R\$)	= 18.500,0	Potência do motor (CV)	= 170,0
Vida útil (Vu, anos)	= 10,0	C (R\$/hora)	= 59,0
horas trabalhadas/ano	= 1.000,0		
D (R\$/hora)	= 16,7	Óleo lubrificante (L)	
		Custo do óleo (R\$/L)	= 12,0
Juros sobre o capital (J)		L (R\$/hora)	= 0,1
Taxa de juros a.a. (%)	= 0,1		
J (R\$/hora)	= 6,1	Graxa (X)	
		Custo da graxa (R\$/L)	= 18,0
Garagem (G)		X (R\$/hora)	= 0,9
Índice anual (%)	= 0,0		
G (R\$/hora)	= 1,9	Manutenção (M)	
Seguros (S)		Taxa de manutenção (% na vida útil)	= 1,0
Índice anual (%)	= 0,0	M (R\$/hora)	= 18,5
S (R\$/hora)	= 3,7	Mão de obra (MO)	
Impostos (I)		Salário mensal do operador (R\$/mes)	= 1.100,0
Taxa (%)	= 0,0	Taxa encargos sociais (% do salário)	= 0,9
I (R\$/hora)	= 0,0	Horas trabalhadas/ano (h)	= 1.000,0
Custos Fixos (R\$/hora)	= 28,3	MO (R\$/hora)	= 25,5
		Custos Variáveis (R\$/hora)	= 104,0
Custo Operacional do Implemento			
Custos Fixos do Implemento		Custos Variáveis do Implemento	
Depreciação (D)		Graxa (X)	
Valor de aquisição (Vi, R\$)	= 750.000,0	Custo da graxa (R\$/L)	= 9,0
Valor de venda (Vf, R\$)	= 150.000,0	X (R\$/hora)	= 0,5
Vida útil (Vu, anos)	= 5,0		
Horas trabalhadas/ano	= 128,0	Manutenção (M)	
D (R\$/hora)	= 937,5	Taxa de manutenção (% na vida útil)	= 0,1
Juros sobre o capital (J)		M (R\$/hora)	= 58,6
taxa de juros a.a. (%)	= 0,1	Custos Variáveis (R\$/hora)	= 59,0
J (R\$/hora)	= 210,9		
Garagem (G)		CUSTO OPERACIONAL TOTAL	
Índice anual (%)	= 0,0	(trator + implemento)	
G (R\$/hora)	= 58,6	Trator	
Seguros (S)		Custos fixos	= 28,3
Índice anual (%)	= 0,0	Custos variáveis	= 104,0
S (R\$/hora)	= 29,3	Custo-hora do trator	= 132,3
Impostos (I)		Implemento	
taxa (%)	= 0,0	Custos fixos	= 1.236,3
I (R\$/hora)	= 0,0	Custos variáveis	= 59,0
Custos Fixos (R\$/hora)	= 1.236,3	Custo-hora do implemento	= 1.295,4
		CUSTO-HORA (Sem Lucro)	= 1.427,7
		CUSTO-ton (Lucro 30%)	= 18,6
		CUSTO-ton (Lucro 50%)	= 21,4

Tabela 5.14. Custo operacional do Conjunto Trator - Gaiolas

Custo Operacional do Trator - Gaiolas Canaveiras			
Custos Fixos do Trator		Custos Variáveis do Trator	
Depreciação (D)		Combustíveis (C)	
Valor de aquisição (Vi, R\$)	= 195.000,0	Custo do diesel (R\$/L)	= 2,3
Valor de venda (Vf, R\$)	= 19.500,0	Potência do motor (CV)	= 170,0
Vida útil (Vu, anos)	= 10,0	C (R\$/hora)	= 59,0
horas trabalhadas/ano	= 1.000,0		
D (R\$/hora)	= 17,6	Óleo lubrificante (L)	
		Custo do óleo (R\$/L)	= 12,0
		L (R\$/hora)	= 0,1
Juros sobre o capital (J)		Graxa (X)	
Taxa de juros a.a. (%)	= 0,1	Custo da graxa (R\$/L)	= 18,0
J (R\$/hora)	= 6,4	X (R\$/hora)	= 0,9
Garagem (G)		Manutenção (M)	
Índice anual (%)	= 0,0	Taxa de manutenção (% na vida útil)	= 1,0
G (R\$/hora)	= 2,0	M (R\$/hora)	= 19,5
Seguros (S)		Mão de obra (MO)	
Índice anual (%)	= 0,0	Salário mensal do operador (R\$/mes)	= 1.100,0
S (R\$/hora)	= 3,9	Taxa encargos sociais (% do salário)	= 0,9
Impostos (I)		Horas trabalhadas/ano (h)	= 1.000,0
Taxa (%)	= 0,0	MO (R\$/hora)	= 25,5
I (R\$/hora)	= 0,0	Custos Variáveis (R\$/hora)	= 105,0
Custos Fixos (R\$/hora)	= 29,8		

Custo Operacional do Implemento			
Custos Fixos do Implemento		Custos Variáveis do Implemento	
Depreciação (D)		Graxa (X)	
Valor de aquisição (Vi, R\$)	= 48.000,0	Custo da graxa (R\$/L)	= 9,0
Valor de venda (Vf, R\$)	= 9.600,0	X (R\$/hora)	= 0,5
Vida útil (Vu, anos)	= 5,0		
Horas trabalhadas/ano	= 128,0	Manutenção (M)	
D (R\$/hora)	= 60,0	Taxa de manutenção (% na vida útil)	= 0,1
		M (R\$/hora)	= 3,8
Juros sobre o capital (J)		Custos Variáveis (R\$/hora)	= 4,2
taxa de juros a.a. (%)	= 0,1		
J (R\$/hora)	= 13,5	CUSTO OPERACIONAL TOTAL	
Garagem (G)		(trator + implemento)	
índice anual (%)	= 0,0	Trator	
G (R\$/hora)	= 3,8	Custos fixos	= 29,8
Seguros (S)		Custos variáveis	= 105,0
índice anual (%)	= 0,0	Custo-hora do trator	= 134,8
S (R\$/hora)	= 1,9	Implemento	
Impostos (I)		Custos fixos	= 79,1
taxa (%)	= 0,0	Custos variáveis	= 4,2
I (R\$/hora)	= 0,0	Custo-hora do implemento	= 83,3
Custos Fixos (R\$/hora)	= 79,1	CUSTO-HORA (Sem Lucro)	= 218,2
		CUSTO-ton (Lucro 30%)	= 14,2
		CUSTO-ton (Lucro 50%)	= 16,4

Tabela 5.15. Custo operacional do Conjunto Trator – Cefeira

Custo Operacional do Trator - Cefeira			
Custos Fixos do Trator		Custos Variáveis do Trator	
Depreciação (D)		Combustíveis (C)	
Valor de aquisição (Vi, R\$)	= 205.000,0	Custo do diesel (R\$/L)	= 2,3
Valor de venda (Vf, R\$)	= 20.500,0	Potência do motor (CV)	= 170,0
Vida útil (Vu, anos)	= 10,0	C (R\$/hora)	= 59,0
horas trabalhadas/ano	= 1.000,0		
D (R\$/hora)	= 18,5	Óleo lubrificante (L)	
		Custo do óleo (R\$/L)	= 12,0
Juros sobre o capital (J)		L (R\$/hora)	= 0,1
Taxa de juros a.a. (%)	= 0,1		
J (R\$/hora)	= 6,8	Graxa (X)	
		Custo da graxa (R\$/L)	= 18,0
Garagem (G)		X (R\$/hora)	= 0,9
Índice anual (%)	= 0,0		
G (R\$/hora)	= 2,1	Manutenção (M)	
		Taxa de manutenção (% na vida útil)	= 1,0
Seguros (S)		M (R\$/hora)	= 20,5
Índice anual (%)	= 0,0		
S (R\$/hora)	= 4,1	Mão de obra (MO)	
		Salário mensal do operador (R\$/mes)	= 1.100,0
Impostos (I)		Taxa encargos sociais (% do salário)	= 0,9
Taxa (%)	= 0,0	Horas trabalhadas/ano (h)	= 1.000,0
I (R\$/hora)	= 0,0	MO (R\$/hora)	= 25,5
Custos Fixos (R\$/hora)	= 31,4	Custos Variáveis (R\$/hora)	= 106,0

Custo Operacional do Implemento			
Custos Fixos do Implemento		Custos Variáveis do Implemento	
Depreciação (D)		Graxa (X)	
Valor de aquisição (Vi, R\$)	= 180.000,0	Custo da graxa (R\$/L)	= 9,0
Valor de venda (Vf, R\$)	= 18.000,0	X (R\$/hora)	= 0,5
Vida útil (Vu, anos)	= 10,0		
Horas trabalhadas/ano	= 128,0	Manutenção (M)	
D (R\$/hora)	= 126,6	Taxa de manutenção (% na vida útil)	= 0,1
		M (R\$/hora)	= 7,0
Juros sobre o capital (J)		Custos Variáveis (R\$/hora)	= 7,5
taxa de juros a.a. (%)	= 0,1		
J (R\$/hora)	= 46,4		
		CUSTO OPERACIONAL TOTAL	
Garagem (G)		(trator + implemento)	
índice anual (%)	= 0,0	Trator	
G (R\$/hora)	= 14,1	Custos fixos	= 31,4
		Custos variáveis	= 106,0
Seguros (S)		Custo-hora do trator	= 137,4
índice anual (%)	= 0,0	Implemento	
S (R\$/hora)	= 7,0	Custos fixos	= 194,1
		Custos variáveis	= 7,5
Impostos (I)		Custo-hora do implemento	= 201,5
taxa (%)	= 0,0	CUSTO-HORA (Sem Lucro)	= 338,9
I (R\$/hora)	= 0,0	CUSTO-ton (Lucro 30%)	= 22,0
Custos Fixos (R\$/hora)	= 194,063	CUSTO-ton (Lucro 50%)	= 25,4

5.3.1.4 Custo da briquete de alta densidade (BAD) do capim elefante

O processo de briquetagem, também chamado adensamento consiste no adensamento da biomassa a elevadas pressões (200MPa) o que provoca a elevação da temperatura na ordem de 100°C, originando a “plastificação” da lignina, substância presente nas biomassas, que atua como aglomerante natural das partículas do capim, o que justifica a ausência do uso de aglomerantes (resinas e ceras) (OLIVEIRA, 2013).

Para garantir uma boa briquetagem de capim, é necessário que a umidade varie entre 8 a 15% e que o tamanho da partícula esteja entre 5 a 10mm, sendo que o diâmetro ideal para a queima em caldeiras é de 70 a 100mm com comprimento entre 250 a 400mm (CENBIO; INFOENER, 1999). Uma densidade igual a 1300 kg m⁻³ (CENBIO; INFOENER, 1999) e um poder calorífico com valor de 19500 kJ kg⁻¹ (VILELA, 2009).

Para o cálculo da fábrica de briquetes de alta densidade (BAD), é necessário conhecer os equipamentos que a compõem, sendo principalmente os seguintes: um picador de biomassa, um silo secador, um exaustor, um sistema de transporte pneumático e uma prensa extrusora de parafuso sem-fim, com capacidade para produzir 500 kg/h e potência nominal de 103,13 kW. O investimento requerido é de R\$ 297.520,00 em equipamentos. A tabela 5.16 mostra o investimento em ativos fixos.

Tabela 5.16. Investimento Fixo para uma fábrica de Briquete de Alta Densidade

Ativos	Investimento (R\$)	Depreciação Anual (10%)	Depreciação Industrial (\$R ano⁻¹)
Equipamentos do Briquetagem	263.200,0	10,0	26.320,0
Instalação Industrial	26.320,0	10,0	2.632,0
Equipamentos Auxiliares	8.000,0	10,0	800,0
Total	297.520,0	10,0	29.752,0

Notar na tabela 5.16, que o custo de instalação está na ordem de 10% do custo dos equipamentos. A vida útil destes equipamentos é de 10 anos, portanto, pode ser estimada uma depreciação linear de 10% ao ano (FELFLI; LUENGO; ROCHA, 2004). Considerando uma produção anual de 1200 toneladas de briquetes, operando 8 horas durante 300 dias ao ano, são necessários 4 operários incluindo os encargos sociais e demais benefícios.

Na tabela 5.17, pode-se ver a estrutura dos principais custos envolvidos na implantação desenvolvidos por FELFLI; LUENGO; ROCHA, (2004) de uma fábrica de BAD. Sendo necessário alugar um galpão industrial de 700 m², cujo custo de mercado está em torno de 1248 R\$ mês⁻¹. Os gastos efetuados na fase de pré-investimento (estudo de viabilidade, assessoria técnica, entre outros) sendo estimados em R\$ 8.000,00 e entram na planilha de custos sob a rubrica de “amortização do diferido” como 10% do total de tais gastos. São consideradas as despesas em manutenção como 2% do custo dos equipamentos.

O custo total de uma tonelada de briquete, incluindo o custo da matéria prima, colheita em fardos e fabricação, podem-se ver na tabela 5.18. Pode-se observar que o maior componente dos custos é o capim elefante, pelo que é importante fazer um manejo ótimo na procura de diminuir os custos de produção e alcançar um valor mais competitivo.

Tabela 5.17. Custo de fabricação do briquete

Custos	R\$ ano⁻¹
Custos Fixos	36.502,4
Depreciação Industrial	29.752,0
Amortização do diferido	800,0
Manutenção de equipamentos industriais	5.950,4
Custos Variáveis	65.454,4
Mão de Obra Industrial	44.628,0
Energia Elétrica	20.826,4
Custo Total	101.956,8
Custo da Fabricação do Briquete (R\$ ton⁻¹)	85,0

Tabela 5.18. Custo total do briquete de Capim Elefante

Componente do Custo	Valor (R\$ ton⁻¹)
Produção do Capim Eleante (materia seca)	237,9
Colheita e transporte dos fardos de Capim Elefante	99,2
Fabricação dos birquettes de alta densidade (BAD)	85,0
Custo total	422,1

5.3.2 Custos de geração

Os custos de geração de eletricidade, além de estar influenciados pelos custos da biomassa e sua adequação, também são impactadas pela tecnologia de conversão e capacidade da usina.

Por isso foi preciso fazer tive se que fazer um dimensionamento das usinas com suas características específicas para estimar o custo de geração. Os ciclos analisados no trabalho final foram detalhados no capítulo 4.

5.3.2.1 Arranjo da planta física da usina

Uma usina típica tem na sua distribuição física as seguintes seções: área de recepção da biomassa, área de secagem, área de armazenagem, área de geração, área de transformação, área administrativa e uma área de circulação. Essas áreas foram estimadas considerando a secagem solar e aplicando as seguintes equações:

$$Biom_{dia} = \frac{FMB}{\rho} \times HGD \quad 5.5$$

$$VS = Biom_{dia} \times NDS \quad 5.6$$

$$AR = \frac{Biom_{dia}}{H} \quad 5.7$$

$$AS = N_p \times D_p^2 \quad 5.8$$

$$D_p = \sqrt[3]{\frac{12 \times Biom_{dia}}{N_p \times \pi}} \quad 5.9$$

$$H_p = \frac{D_p}{2} \times \tan \varphi \quad 5.10$$

$$A_G = \frac{AS}{3 \times N_{gp}} \quad 5.11$$

$$A_T = A_G \quad 5.12$$

$$A_{arm} = \left(\frac{\pi}{4}\right) \times D_s^2 \times N_s \quad 5.13$$

$$A_{circ} = 2(AR + AS + A_{arm} + A_G + A_T) \quad 5.14$$

Em que $Biom_{dia}$: volume de biomassa requerido por dia de geração; FMB : fluxo de mássico de biomassa ($kg\ h^{-1}$); ρ : densidade da madeira ($kg\ m^{-3}$); HGD : horas de geração por dia (h); AR : área de recepção (m^2); AS : área de secagem (m^2); N_p : número de pilhas de biomassa; D_p : diâmetro da pilha (m); H_p : altura da pilha (m); φ : ângulo de repouso do material (cavacos de madeira = 45°); A_G : área de geração (m^2); N_{gp} : Número de galpões (critério do projetista); A_T : área de transformação (m^2); A_{arm} : área de armazenagem (m^2); D_s : diâmetro do silo (m); N_s : número de silos (critério do projetista); A_{circ} : área de circulação (m^2).

A área administrativa é calculada segundo os requerimentos arquitetônicos do tipo de projeto. Por isso é a critério do projetista. As áreas têm forma retangular com a relação 2:1 com respeito ao comprimento.

São aplicadas as equações 5.5 até 5.14 para o cálculo das áreas para o funcionamento de cada projeto segundo a tecnologia usada e a capacidade de geração. Com configurações típicas de acordo com a tecnologia de secagem (solar ou por convecção forçada). Ver figura 5.5, figura 3.6, figura 5.7 e figura 5.8. Estas configurações podem variar de acordo com o projetista, mais neste trabalho vai ser considerada como padrão. As dimensões para as configurações das usinas são mostradas nas tabelas 5.19 até 5.28.

Como parâmetros de importância para o cálculo das áreas temos o tempo de secagem e o tempo de armazenamento. No caso da secagem solar para o Eucalipto o tempo de residência nas estufas para a secagem é considerado 115 dias em pilhas de forma cônica e para o Capim Elefante 5 dias em fardos. Para o armazenamento são considerados 35 dias com umidade de 30% em silos metálicos com alimentação continua para o Eucalipto e para o Capim Elefante em galpões bem ventilados. O tempo estimado de 35 dias é devido à necessidade de garantir geração continua de energia por um tempo prudente no caso que apresentasse um evento não planejado ou não esperado (acidentes na planta, no campo, danos na maquinaria, chuvas, etc.). Os volumes de biomassa por dia são estimados para cada usina com o fluxo mássico calculado para cada tecnologia.

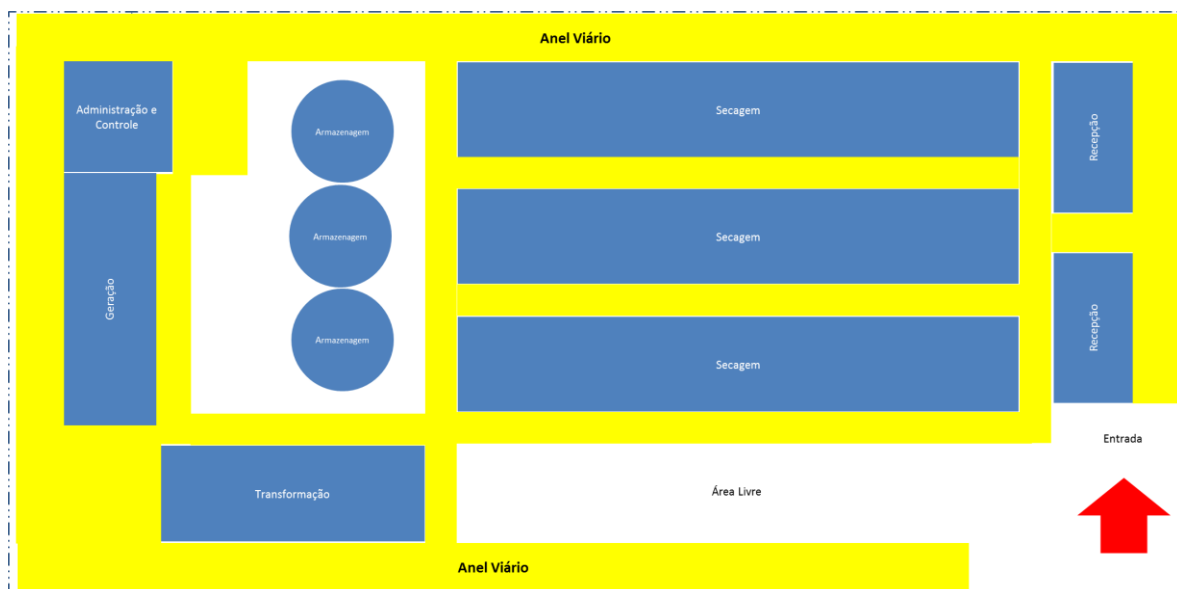


Figura 5.4. Planta física típica para usina térmica com Eucalipto e secagem solar da madeira.

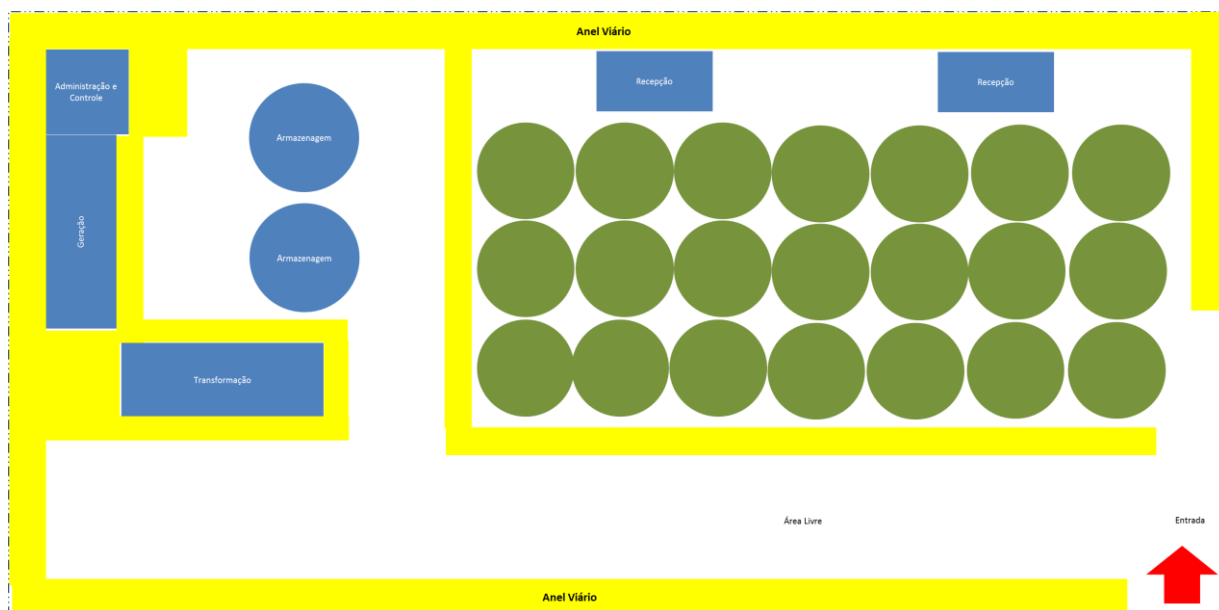


Figura 5.5 Planta física típica para usina térmica com Eucalipto e secagem por convecção forçada da madeira.

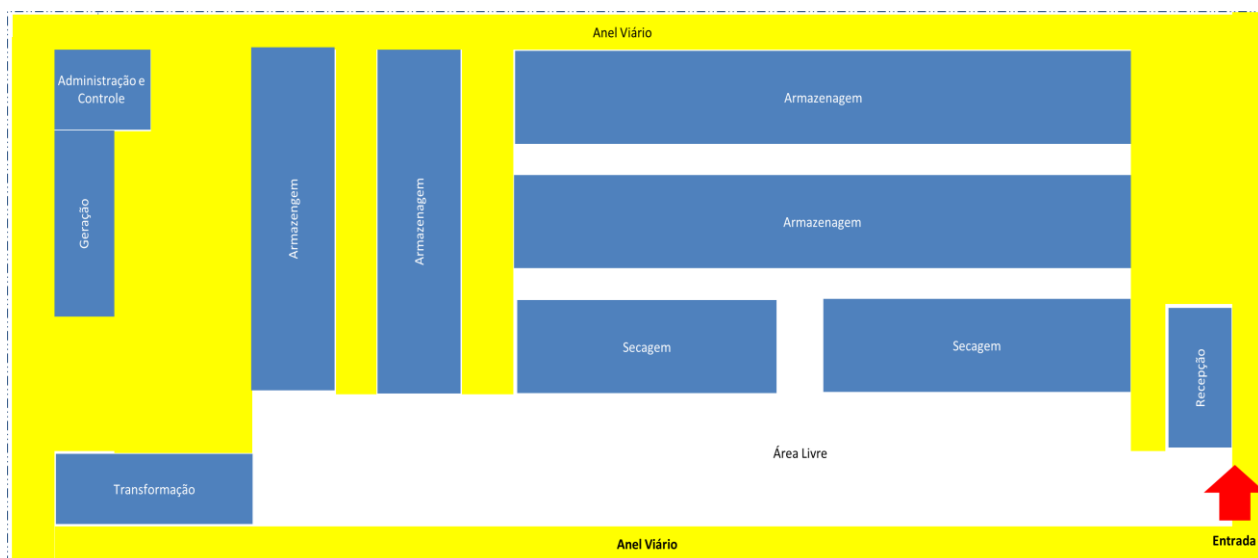


Figura 5.6 Planta física típica para usina térmica com Capim Elefante e secagem solar

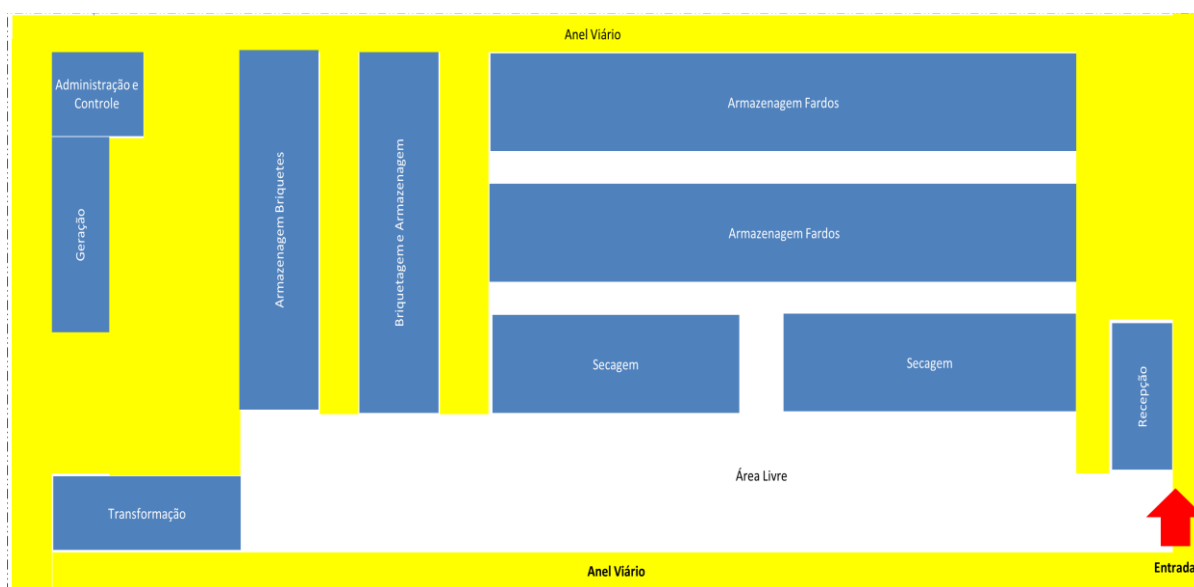


Figura 5.7. Planta física típica para usina térmica com briquete de Capim Elefante e secagem solar

A área de secagem para o Eucalipto foi estimada para pilhas cónicas e distribuição linear, mais uma vez calculada a área pode se fazer um arranjo das filas que fossem necessários.

Tabela 5.19 Dimensionamento de uma usina termoeletrica CRC operando com Eucalipto

CRC com Eucalipto (Secagem Solar)	Potência	Expansor	Eficiência	Vazão Mássica		Áreas							
	kW			Troça	Cavaco	Recep.	Secagem	Circulação	Armazenagem	Geração	Transf.	Admin.	Total
				(30% Um.)	(30% Um.)								
	500	Turbina	%	m³/h	m³/h	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²
	1.000	Axial	11,83	1,95	3,59	203	3.410	8.380	339	171	171	200	12.873
2.000		13,03	3,59	6,63	375	6.360	15.130	462	167	167	250	22.911	
3.000		14,20	6,67	12,31	696	11.780	27.860	763	168	168	300	41.736	
		16,48	8,75	16,16	913	15.350	35.460	942	171	171	350	53.357	

CRC com Eucalipto (Secagem Solar)	Potência	Expansor	Eficiência	Vazão Mássica		Áreas							
				Troça	Cavaco								
				(30% Um.)	(30% Um.)	Recep.	Secagem	Circulação	Armazen	Geração	Transf.	Admin.	Total
	kW		%	m³/h	m³/h	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²
	10	Turbina Radial	12,54	0,04	0,08	200	3.410	8.380	25	170	170	200	12.555
50	15,14		0,18	0,34	370	6.360	15.130	75	170	170	250	22.525	
150	15,73		0,53	0,98	700	11.780	27.860	190	170	170	300	41.170	
300	16,41		1.03	1.89	910	15.350	35.460	325	170	170	350	52.735	

CRC com Eucalipto (Secagem Solar)	Potência	Expansor	Eficiência	Vazão Mássica		Áreas							
				Troça	Cavaco								
				(30% Um.)	(30% Um.)	Recep.	Secagem	Circulação	Armazen	Geração	Transf.	Admin.	Total
	kW	%	m³/h	m³/h	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	
	10	Expansor de Parafuso	6,29	0,06	0,11	5	360	1.090	46	60	60	50	1.671
50	10,43		0,21	0,39	17	1.040	2.730	52	90	90	60	4.079	
150	14,03		0,50	0,92	39	2.110	5.230	105	120	120	80	7.804	
300	16.41		0.87	1.61	68	3.370	8.000	168	140	140	100	11.986	

Tabela 5.20 Dimensionamento de uma usina termoeletrica ORC operando com Eucalipto

CRO com Eucalipto (Secagem Solar)	Potência	Expansor	Eficiência	Vazão Mássica		Áreas							
	kW			Troça	Cavaco	Recep.	Secagem	Circulação	Armazen	Geração	Transf.	Admin.	Total
				(30% Um.)	(30% Um.)								
	500	Turbina	0,13	1,89	3,50	200	3.410	8.380	236	170	170	200	12.766
	1.000	Axial	0,14	3,56	6,57	370	6.360	15.130	339	170	170	250	22.789
2.000		0,16	6,37	11,75	700	11.780	27.860	603	170	170	300	41.583	
3.000		0,17	8,67	15,99	910	15.350	35.460	763	170	170	350	53.173	

CRO com Eucalipto (Secagem Solar)	Potência	Expansor	Eficiência	Vazão Mássica		Áreas							
				Troça	Cavaco								
				(30% Um.)	(30% Um.)	Recep.	Secagem	Circulação	Armazen	Geração	Transf.	Admin.	Total
	kW		%	m³/h	m³/h	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²
	500	Turbina Radial	12,54	1,74	3,21	200	3.410	8.380	340	170	170	200	12.870
1.000	15,14		3,22	5,95	370	6.360	15.130	460	170	170	250	22.910	
2.000	15,73		5,65	10,43	700	11.780	27.860	760	170	170	300	41.740	
3.000	16,41		7,53	13,90	910	15.350	35.460	940	170	170	350	53.350	

CRO com Eucalipto (Secagem Solar)	Potência	Expansor	Eficiência	Vazão Mássica		Áreas							
				Troça	Cavaco								
				(30% Um.)	(30% Um.)	Recep.	Secagem	Circulação	Armazen	Geração	Transf.	Admin.	Total
	kW		%	m³/h	m³/h	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²
	10	Expansor de Parafuso	6,29	0,05	0,08	5	360	1.090	30	60	60	50	1.655
50	10,43		0,21	0,39	22	1.040	2.730	110	90	90	60	4.142	
150	14,03		0,52	0,96	55	2.110	5.230	210	120	120	80	7.925	
300	16,41		0,82	1,51	85	3.370	8.000	320	140	140	100	12.155	

Tabela 5.21 Dimensionamento de uma usina termoeletrica C-EFGT operando com Eucalipto

C-EFGT com Eucalipto (Secagem Solar)	Potência	Expansor	Eficiência	Vazão Mássica		Áreas							
	kW			Troça	Cavaco	Recep.	Secagem	Circulação	Armazen	Geração	Transf.	Admin.	Total
				(30% Um.)	(30% Um.)								
		%	m³/h	m³/h	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	
	50	EFGT	16,51	0,15	0,27	16	163	622	24	54	54	200	1.133
150		16,50	0,45	0,83	47	427	1.318	43	71	71	200	2.177	

Tabela 5.22. Dimensionamento de uma usina termoeletrica G-MCI operando com Eucalipto

G-MCI com Eucalipto (Secagem Solar)	Potência	Expansor	Eficiência	Vazão Mássica		Áreas							
	kW			Troça	Cavaco	Recep.	Secagem	Circulação	Armazen	Geração	Transf.	Admin.	Total
				(30% Um.)	(30% Um.)								
		%	m³/h	m³/h	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	
	10	G-MCI	14,50	0,04	0,07	4	55	205	6	18	18	150	457
	50		14,60	0,20	0,37	18	177	689	31	59	59	200	1.234
	150		15,00	0,58	1,07	52	457	1.426	53	76	76	200	2.339
	300		15,60	1,12	2,07	99	808	2.349	87	90	90	250	3.773
	500		16,40	1,78	3,28	157	1.209	3.447	155	101	101	250	5.420
	1.000		18,30	3,18	5,87	282	1.922	5.645	362	128	128	300	8.767
2.000	22,20		5,25	9,68	465	2.851	8.727	731	158	158	300	13.391	
3.000	26,10		6,70	12,36	593	3.531	10.726	903	168	168	350	16.439	

Tabela 5.23. Dimensionamento de uma usina termoeletrica G-EFGT operando com Eucalipto

G-EFGT com Eucalipto (Secagem Solar)	Potência	Expansor	Eficiência	Vazão Mássica		Áreas								
				Troça	Cavaco									
				(30% Um.)	(30% Um.)	Recep.	Secagem	Circulação	Armazen	Geração	Transf.	Admin.	Total	
	kW	%	m³/h	m³/h	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	
	500	G-TQE	12,50	1,98	3,65	206	1.449	4.329	267	121	121	250	6.743	

Tabela 5.24 Dimensionamento de uma usina termoelétrica CRC operando com Capim Elefante

CRC com Capim Elefante (Secagem Solar)	Potência	Expansor	Eficiência	Fluxo Mássico		Áreas								
	kW			Solto	Fardo	Recep.	Secagem	Circulação	Armazenagem	Geração	Transf.	Admin.	Total	
				(10% Um.)	(10% Um.)									
	kW	%	kg / h	fardo / h	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	
	500	11.83	933.97	3.58	72	200	3,810	1,397	119	119	200	5,917		
1,000	13.03	1724.25	6.60	132	370	7,040	2,579	220	220	250	10,812			
2,000	14.20	3202.19	12.26	245	680	13,070	4,790	409	409	300	19,903			
3,000	16.48	4202.87	16.10	322	900	17,160	6,287	537	537	350	26,092			

CRC com Capim Elefante (Secagem Solar)	Potência	Expansor	Eficiência	Fluxo Mássico		Áreas								
	kW			Solto	Fardo	Recep.	Secagem	Circulação	Armazen	Geração	Transf.	Admin.	Total	
				(10% Um.)	(10% Um.)									
	10	Turbina Radial	%	kg / h	fardo / h	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	
	50		12.54	16.92	0.06	70	200	3,810	25	120	120	200	4,545	
150	15.14		74.05	0.28	130	370	7,040	111	220	220	250	8,341		
300	15.73		216.72	0.83	250	680	13,070	324	410	410	300	15,444		
				16.41	418.15	1.60	320	900	17,160	626	540	540	350	20,436

CRC com Capim Elefante (Secagem Solar)	Potência	Expansor	Eficiência	Fluxo Mássico		Áreas							
	kW			Solto	Fardo	Recep.	Secagem	Circulação	Armazen	Geração	Transf.	Admin.	Total
				(10% Um.)	(10% Um.)								
	kW	%	kg / h	fardo / h	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²
	10	6.29	29.62	0.11	11	10	149	44	10	10	200	435	
50	10.43	102.13	0.39	39	20	510	153	20	20	250	1,012		
150	14.03	240.15	0.92	92	50	1,210	359	50	50	300	2,111		
300	16.41	418.15	1.60	160	90	2.110	626	90	90	350	3,516		

Tabela 5.25 Dimensionamento de uma usina termoelétrica ORC operando com Capim Elefante

ORC com Capim Elefante (Secagem Solar)	Potência	Expansor	Eficiência	Fluxo Mássico		Áreas							
	kW			Solto	Fardo	Recep.	Secagem	Circulação	Armazen	Geração	Transf.	Admin.	Total
				(10% Um.)	(10% Um.)								
	kW	%	kg / h	fardo / h	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²
	500	0.13	909.63	3.48	70	200	3,810	1,361	120	120	200	5,881	
1,000	0.14	1709.25	6.55	130	370	7,040	2,557	220	220	250	10,787		
2,000	0.16	3056.44	11.71	250	680	13,070	4,572	410	410	300	19,692		
3,000	0.17	4160.10	15.93	320	900	17,160	6,223	540	540	350	26,033		

ORC com Capim Elefante (Secagem Solar)	Potência	Expansor	Eficiência	Fluxo Mássico		Áreas							
	kW			Solto	Fardo	Recep.	Secagem	Circulação	Armazen	Geração	Transf.	Admin.	Total
				(10% Um.)	(10% Um.)								
	500	Turbina Radial	%	kg / h	fardo / h	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²
	1,000		12.54	836.37	3.20	70	200	3,810	1,285	120	120	200	5,805
2,000	15.14		1547.97	5.93	130	370	7,040	2,379	220	220	250	10,609	
3,000	15.73		2713.64	10.39	250	680	13,070	4,171	410	410	300	19,291	
			16.41	3615.02	13.84	320	900	17,160	5,556	540	540	350	25,366

ORC com Capim Elefante (Secagem Solar)	Potência	Expansor	Eficiência	Fluxo Mássico		Áreas								
	kW			Solto	Fardo	Recep.	Secagem	Circulação	Armazen	Geração	Transf.	Admin.	Total	
				(10% Um.)	(10% Um.)									
	10	50	150	300	%	kg / h	fardo / h	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²
		Expansor de Parafuso	6.29	21.75	0.08	8	10	150	33	10	10	200	421	
			10.43	101.76	0.39	39	20	510	152	20	20	250	1,011	
			14.03	250.79	0.96	96	50	1,210	375	50	50	300	2,131	
			16.41	391.81	1.50	150	90	2,110	586	90	90	350	3,466	

Tabela 5.26 Dimensionamento de uma usina termoeletrica C-EFGT operando com Capim Elefante

C-EFGT com Capim Elefante (Secagem Solar)	Potência	Expansor	Eficiência	Fluxo Mássico		Áreas							
	Solto			Fardo									
	(10% Um.)	(10% Um.)	Recep.	Secagem	Circulação	Armazen	Geração	Transf.	Admin.	Total			
	kW	%	kg / h	fardo / h	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	
50	EFGT	16,96	70,03	0,27	15	21	390	145	7	7	150	735	
150		16,96	210,08	0,80	33	62	1.147	436	21	21	200	1.921	

Tabela 5.27. Dimensionamento de uma usina termoeletrica G-MCI operando com Capim Elefante

G-MCI com Capim Elefante (Secagem Solar)	Potência	Expansor	Eficiência	Fluxo Mássico		Áreas							
	kW			Solto	Fardo	Recep.	Secagem	Circulação	Armazen	Geração	Transf.	Admin.	Total
				(10% Um.)	(10% Um.)								
	kg / h	fardo / h	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²		
	%												
10	MCI	14,50	16,38	0,06	3	5	91	34	2	2	150	287	
50		14,60	81,35	0,31	13	24	444	169	8	8	200	866	
150		15,00	237,53	0,91	25	70	1.272	493	23	23	220	2.128	
300		15,60	456,80	1,75	49	135	2.446	948	45	45	250	3.918	
500		16,40	724,19	2,77	77	215	3.877	1.504	72	72	300	6.116	
1.000		18,30	1298,00	4,97	138	385	6.949	2.695	128	128	350	10.774	
2.000		22,20	2139,95	8,20	227	635	11.457	4.443	212	212	400	17.585	
3.000		26,10	2730,28	10,46	290	810	14.617	5.669	270	270	400	22.326	

Tabela 5.28. Dimensionamento de uma usina termoeletrica G-EFGT operando com Capim Elefante

G-EFGT com Capim Elefante (Secagem Solar)	Potência	Expansor	Eficiência	Fluxo Mássico		Áreas							
	kW			Solto	Fardo	Recep.	Secagem	Circulação	Armazen	Geração	Transf.	Admin.	Total
				(10% Um.)	(10% Um.)								
		%	kg / h	fardo / h	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	m²	
	500	EFGT	12,50	950,14	3,64	101	282	5.087	1.973	94	94	300	7.930

Das tabelas 5.19 até 5.28 pode se concluir que existe uma relação direta entre o consumo específico de Eucalipto e do Capim Elefante com respeito à área específica por kWh gerado que é inversamente proporcional à potência gerada. Ou seja, quanto maior é a potência menor é a área necessária de terreno para a usina, assim como também o consumo específico de madeira por kWh gerado. A variabilidade na quantidade necessária de terreno para as duas tecnologias CRC e ORC não é significativa entre o Eucalipto e o Capim Elefante.

Em quanto às áreas de secagem para a biomassa, embora o tempo de secagem para o Capim Elefante seja menor que para o Eucalipto, às áreas específicas resultam ser maiores para o Capim, devido à altura máxima considerada para armazenagem.

Com respeito ao consumo específico de Eucalipto, na figura 5.8 a pode se ver que existe uma relação inversa com a potência gerada. A tecnologia com um consumo específico menor de Eucalipto foi a G-MCI na faixa dos 1000 – 3000 kW com quantidades entre 3,6 - 2,4 kg kWh⁻¹. Para potências entre 10 – 300 KW o menor consumo correspondeu à tecnologia ORC-EP com um consumo de 5,09 – 3,08 kg kWh⁻¹. O maior consumo de eucalipto foi para o CRC-EP na potência de 10 kWh⁻¹.

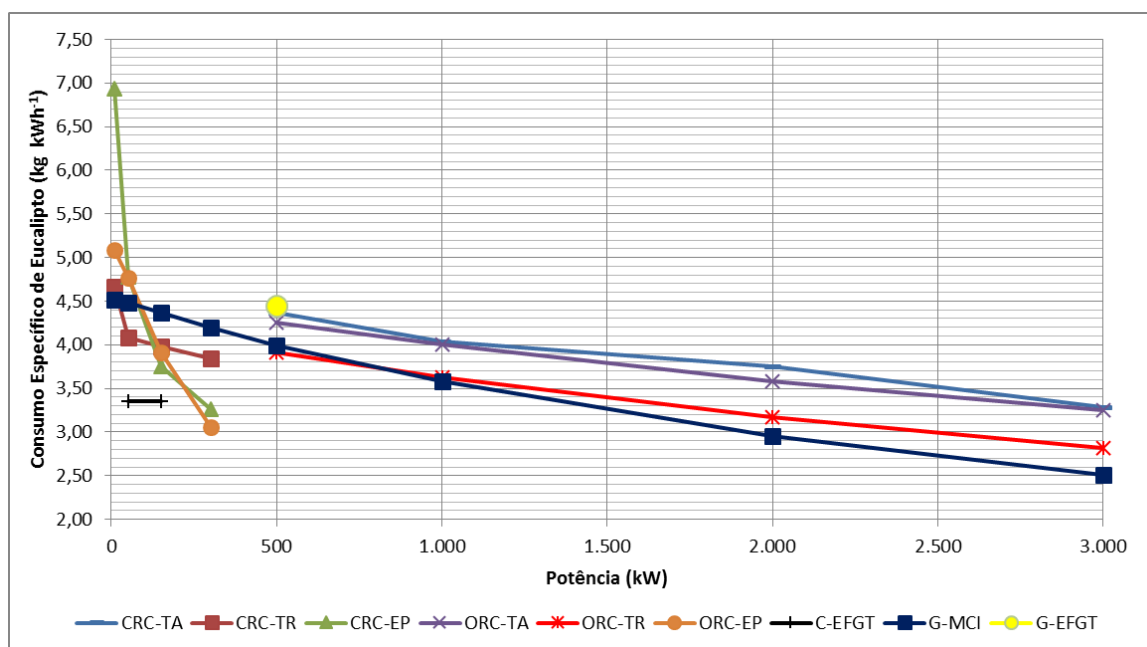


Figura 5.8 Consumo específico de madeira (U=30%) para as tecnologias CRC, ORC, C-EFGT, G-MCI e G-EFGT.

Na figura 5.9 evidencia-se que a potência gerada e o consumo de Capim Elefante tem uma relação inversa semelhante à do Eucalipto. Também o menor consumo específico de Capim Elefante na faixa dos 1000 – 3000 kW foi para a tecnologia G-MCI com valores de 1,3 – 0,9 kg kWh⁻¹. Em potências entre 50 – 300 KW o menor consumo foi à tecnologia ORC-EP com valores na faixa de 1,4 a 2,2 kg kWh⁻¹. Os maior consumo corresponde à tecnologia CRC-EP com um valor de 3,0 kWh⁻¹ na potência de 10 kW.

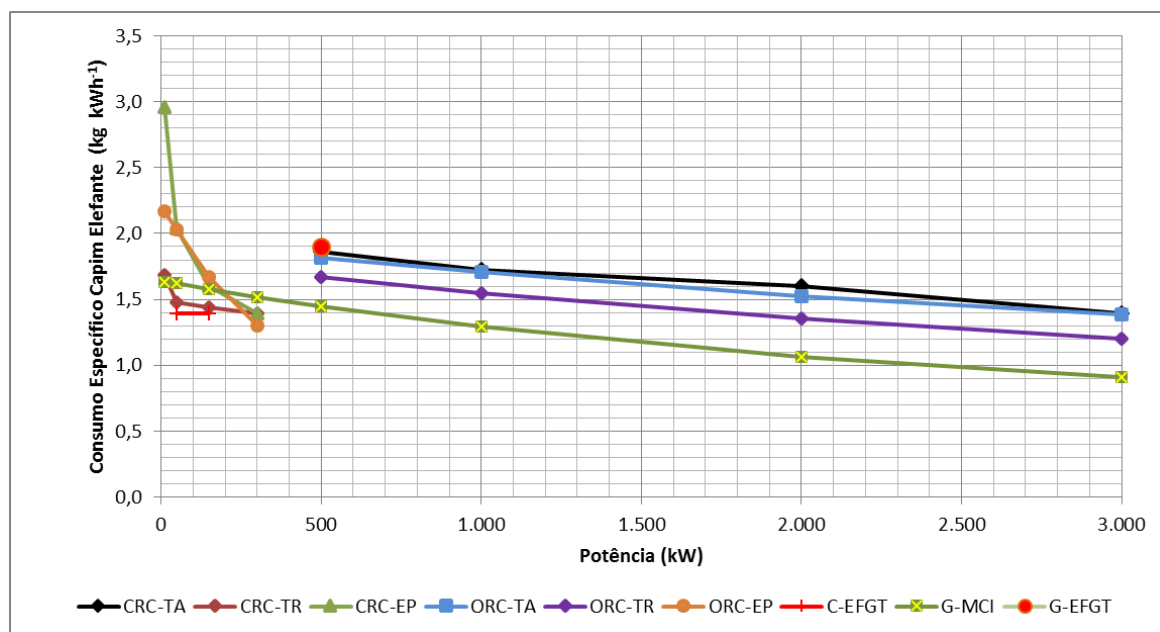


Figura 5.9 Consumo específico de Capim Elefante (U=10%) para as tecnologias CRC, ORC, C-EFGT, G-MCI e G-EFGT.

Outro aspecto importante que ressaltar das figuras 5.8 e 5.9 é o fato do consumo específico de Eucalipto e Capim Elefante ser menores para as tecnologias com sistemas ORC comparadas com os CRC, atribuível às maiores eficiências dos sistemas ORC, devido ao comportamento físico do fluido de trabalho.

Estes consumos específicos por tecnologia na faixa de potências analisadas têm incidência direta sobre a quantidade de terra que precisa cada sistema Agroenergético. Nas figuras 5.10 e 5.11, mostra-se a área de terra requerida por ano para o eucalipto e cada tecnologia analisada. Seguidamente mostram-se nas figuras 5.12 e 5.13 as quantidades de terra necessária para projetos de geração termoeletrica com capim elefante como combustível;

Nas figuras 5.10 e 5.13 é evidente que se requer o dobro da quantidade de terras para sistemas Agroenergéticos com Eucalipto que com Capim Elefante devido aos menores consumos específicos de biomassa para as mesmas potências. A tecnologia com requerimentos menores de terras com capim elefante é a CRC-TR para potências entre 50 – 150 kW com extensões de 2 até 40 ha ano⁻¹ e com Eucalipto foi a tecnologia C-EFGT com quantidades de 20 até 70 ha ano⁻¹. A tecnologia G-MCI na faixa de 500 - 3000 Kw tem o requerimento menor de terras com Eucalipto e CRC-TR com Capim Elefante.

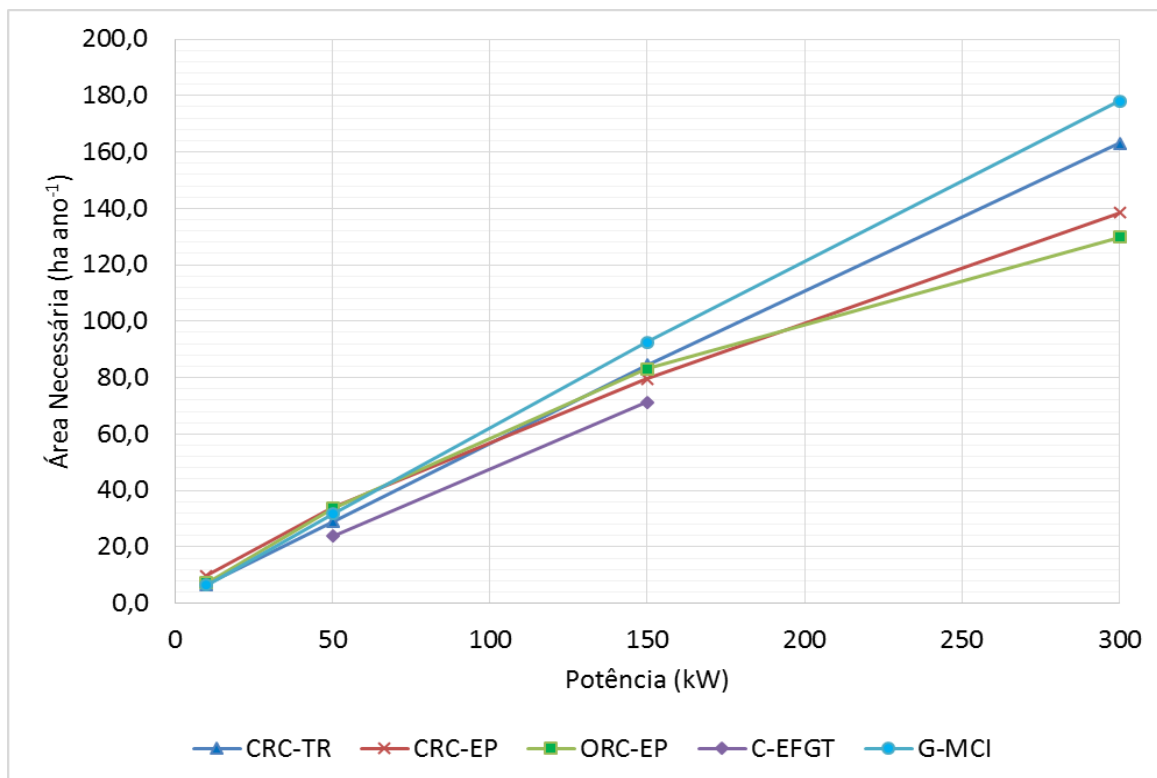


Figura 5.10 Área de terra requerida para projetos Agroenergéticos com Eucalipto na faixa de 10 – 300 kW.

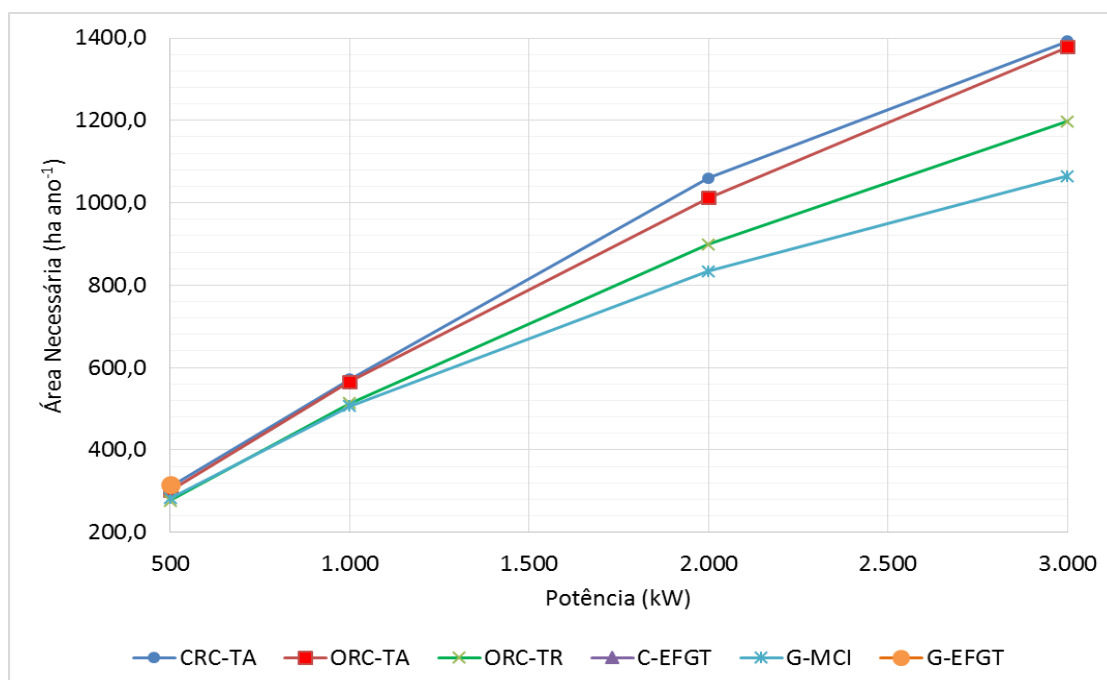


Figura 5.11 Área de terra requerida para projetos Agroenergéticos com Eucalipto na faixa de 500 – 3000 kW.

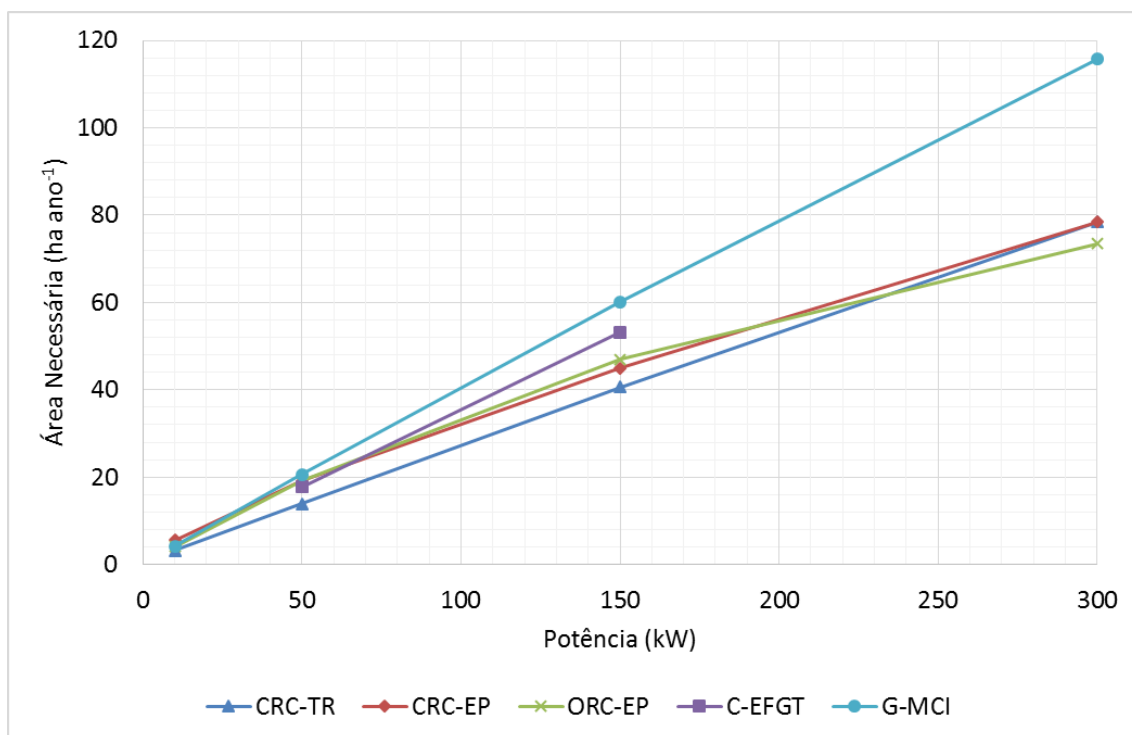


Figura 5.12 Área de terra requerida para projetos Agroenergéticos com Capim Elefante na faixa de 10 – 300 kW.

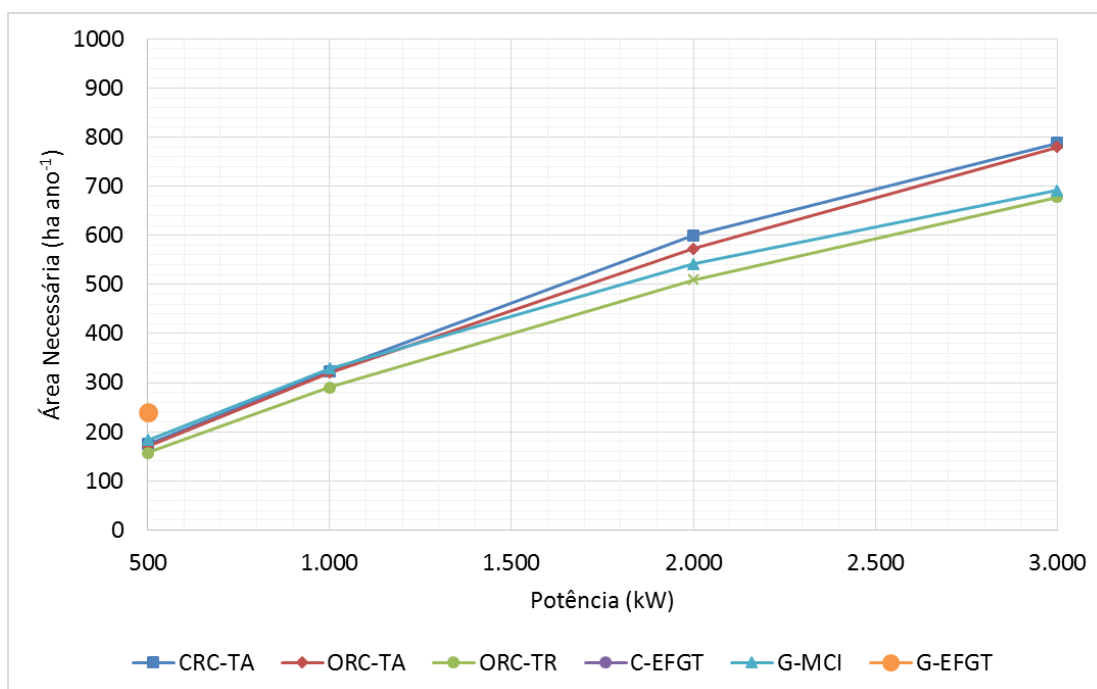


Figura 5.13 Área de terra requerida para projetos Agroenergéticos com Capim Elefante na faixa de 500 – 3000 kW.

Nas figuras 5.14 e 5.17 pode-se ver a quantidade de kWh ha⁻¹ ano⁻¹ para cada tecnologia nas diferentes potências. É evidente que é gerado o dobro de energia elétrica por hectare por ano nos sistemas Agroenergéticos com Eucalipto que com Capim Elefante devido aos menores consumos específicos de biomassa para as mesmas potências. A tecnologia com maior geração de energia elétrica por hectare foi a G-MCI utilizando Capim Elefante como combustível para potências entre 500 – 3000 kW e com Eucalipto na faixa de 1000 – 3000 kW atingindo entre 31 até 43 MWh ha⁻¹ ano⁻¹ e 18 até 21 MWh ha⁻¹ ano⁻¹ respectivamente. A tecnologia com sistema G-MCI tem a menor geração de energia elétrica na faixa de potência de 100 – 300 kW com Eucalipto e Capim Elefante. A tecnologia como menor geração de energia elétrica foi a CRC-TA na faixa de 500 - 3000 kW tanto para o Eucalipto como para o Capim Elefante.

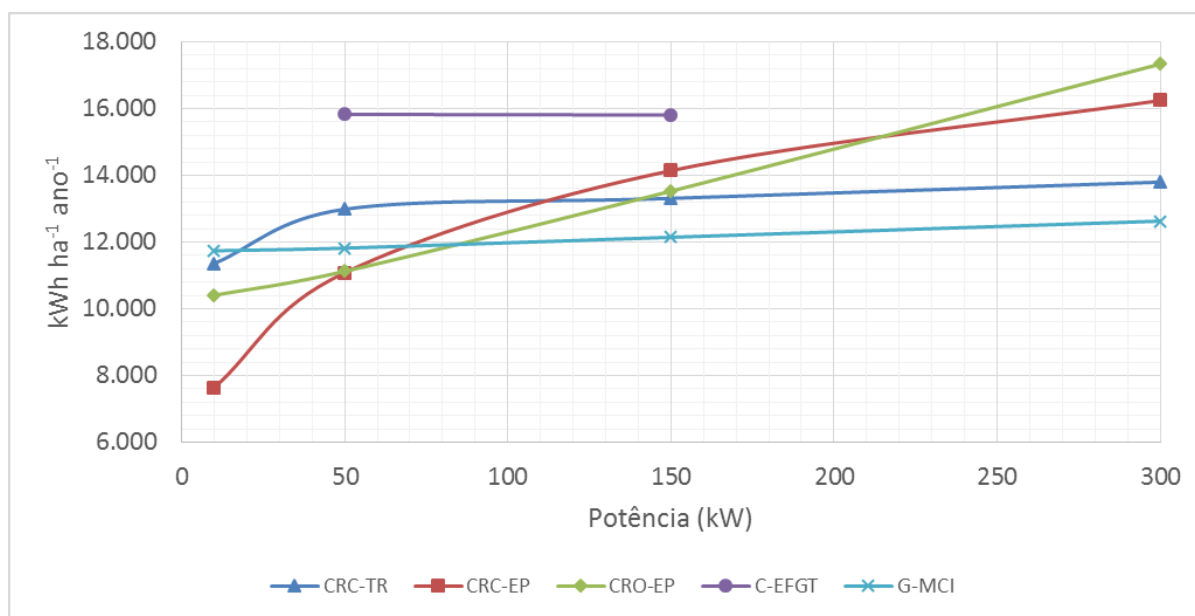


Figura 5.14. Geração de energia elétrica por hectare por ano para projetos Agroenergéticos com Eucalipto na faixa de 10 – 300 kW.

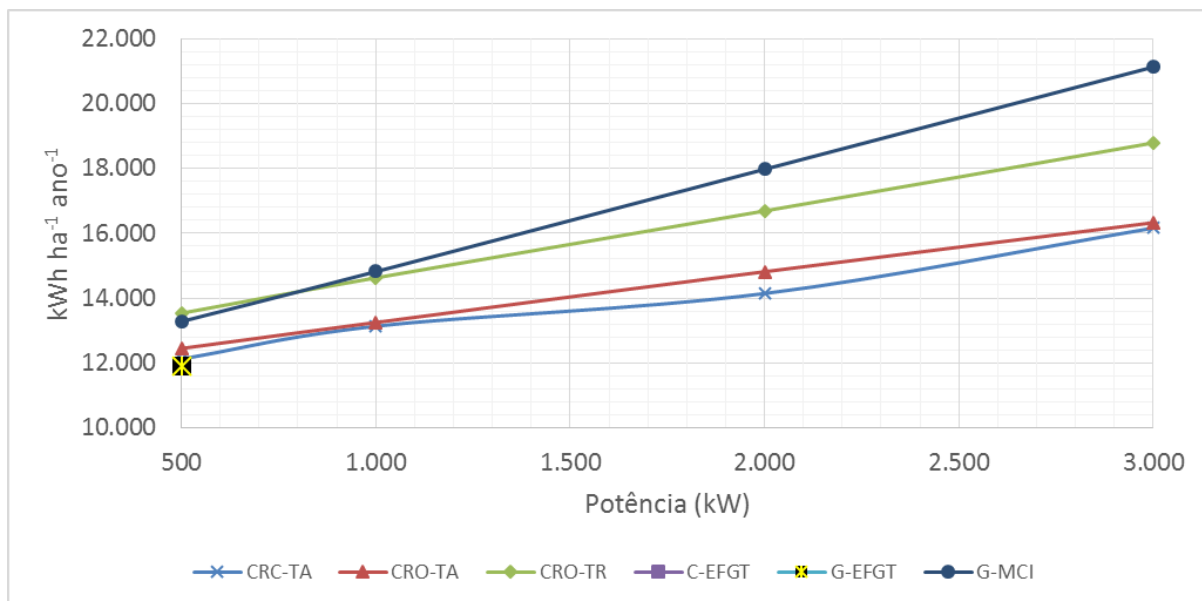


Figura 5.15. Geração de energia elétrica por hectare por ano para projetos Agroenergéticos com Eucalipto na faixa de 500 – 3000 kW.

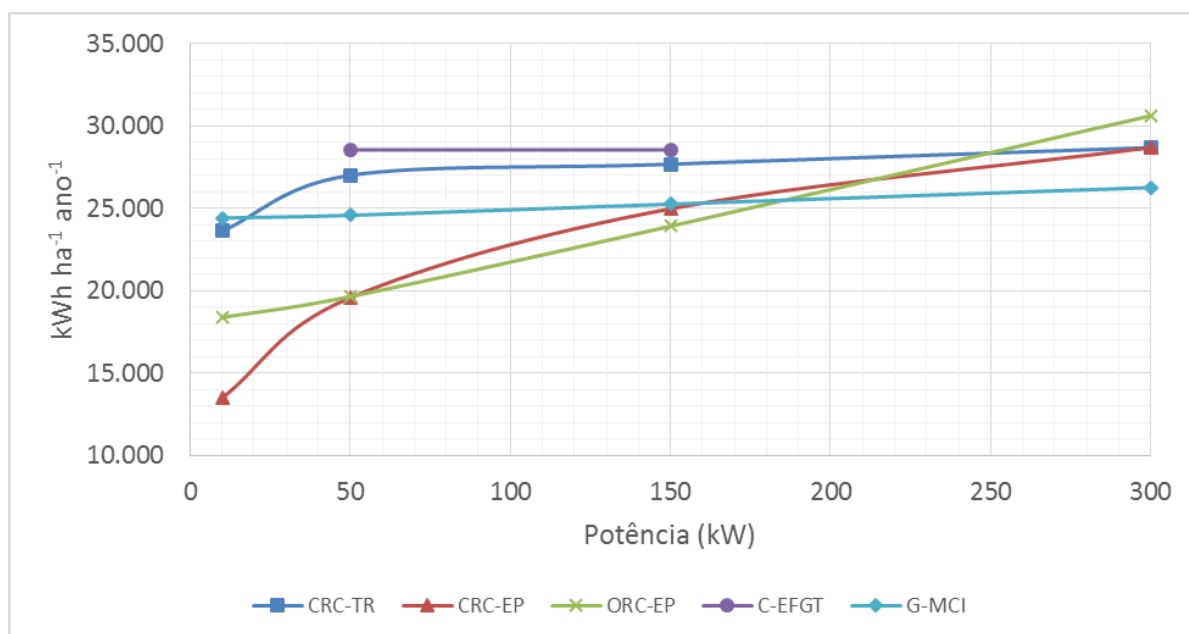


Figura 5.16. Geração de energia elétrica por hectare por ano para projetos Agroenergéticos com Capim Elefante na faixa de 10 – 300 kW.

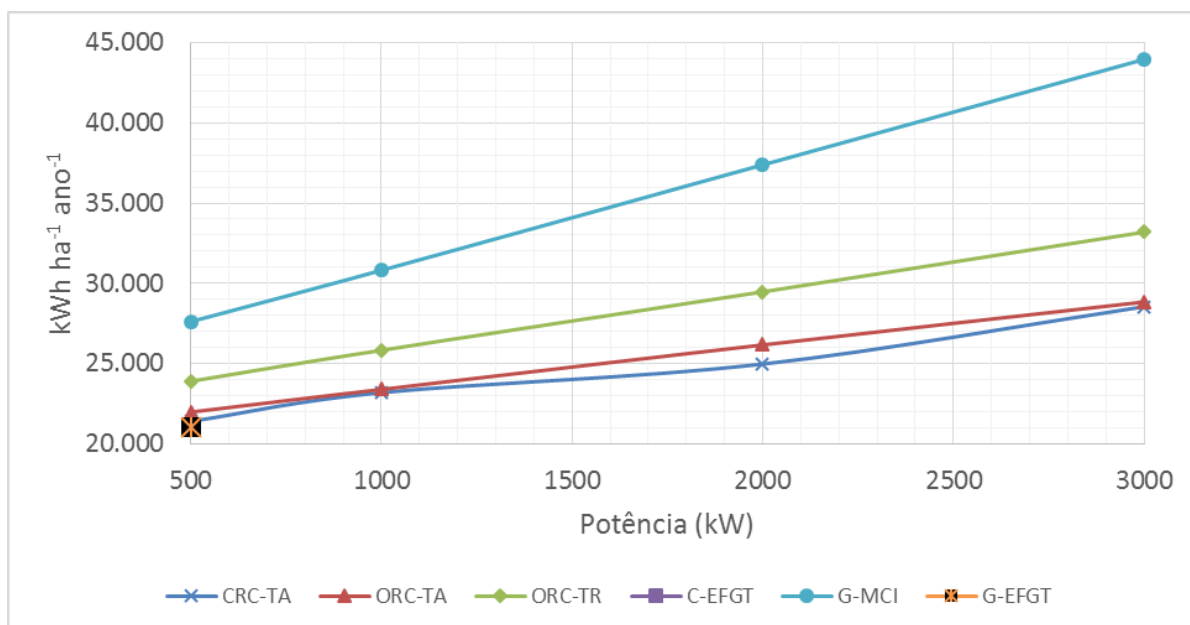


Figura 5.17. Geração de energia elétrica por hectare por ano para projetos Agroenergéticos com Capim Elefante na faixa de 500 – 3000 kW.

5.3.2.2 Custos de pessoal técnico e administrativo

As necessidades do pessoal técnico e administrativo foram estabelecidas mediante a análise dos requerimentos de acordo com a grandeza em potência elétrica de cada usina, a localização e grau de responsabilidade como mostra se na tabela 5.29. Estes são empregos diretos com a garantia de aposentadoria como é estabelecido na normatividade de emprego vigente no Brasil. O valor do salário por cargo foi estimado com base na categoria socioeconômica das possíveis regiões tendo em conta a capacidade de geração da planta.

O número de empregados foi estimado por intervalos de potência, evidenciando que nas usinas pode se aperfeiçoar este recurso. No caso da contabilidade considera se contratar um contador por honorários.

O salário mínimo utilizado neste cálculo foi o vigente no ano 2012, com valor de USD\$328. A taxa de troca considerada foi de R\$2,2. O subsidio do transporte foi USD\$28,4. O fator multiplicador do salário foi de 77,92%, discriminado assim: Salario 13 (8,33%), férias (11,11%), Previdenciários (40,80%) e previdenciários ao salário 13 e férias (17,68%).

Tabela 5.29 Pessoal técnico e administrativo nos projetos de geração termelétrica

	Cargo	Quantidade	No. Salário Mínimo	Funções
Usinas 10 - 300 kW.	Direção			
	Engenheiro Gerente	1	2,5	Gerente e direção de técnicos
	Administração			
	Secretaria	0	2	Auxiliar administrativo
	Serviços Gerais	1	1	Limpeza
	Produção			
	Técnico em termoeletrônica	3	1,5	Processos de produção e transformação
	Honorários			
	Contador público	1	1	Processos administrativos e Contábeis
Usinas 500 - 3000 kW	Direção			
	Engenheiro Gerente	1	4	Gerente e direção de técnicos
	Administração			
	Secretaria	1	2	Auxiliar administrativo
	Serviços Gerais	1	1	Limpeza
	Produção			
	Técnico em termoeletrônica	3	3	Processos de produção e transformação
	Honorários			
	Contador público	1	1	Processos administrativos e contábeis

5.3.2.3 Custos dos insumos para a geração de eletricidade com Eucalipto

Os custos mensais dos insumos necessários para a geração da eletricidade foram calculados com base nas seguintes equações:

$$Custo\ Eucalipto = Q_{Eucalipto} \times Preço_{Eucalipto} \quad 5.15$$

Em que $Q_{Eucalipto}$ é quantidade de Eucalipto em $m^3\ kWh^{-1}$ e tem como referência a figura 3.5. $Preço_{Eucalipto}$, é o preço do Eucalipto estimado em $USD\$ m^{-3}$ e tem como referência a tabela 5.8. Este preço no inclui os custos de transporte até a usina, pelo que estes custos são estimados assim:

$$Custo\ Transporte = Eletricidade_{gerada} \times Q_{Eucalipto} \times Custo\ transporte_{rádio} \quad 5.16$$

Em que $Eletricidade_{gerada}$ é a eletricidade gerada em um tempo determinado e neste caso é um mês ($kWh\ mês^{-1}$). $Custo\ transporte_{rádio}$, é preço do transporte segundo a distância percorrida até a usina. Para esta análise estabeleceram-se rádios de transporte segundo a potência gerada (tabela 5.30), assim:

Tabela 5.30. Rádios de transporte do Eucalipto para as diferentes potências.

Potência (kW)	Rádio (km)	Custo (USD\$ m ⁻³)
10	10	1,0
50	10	1,0
150	20	2,0
300	20	2,0
500	20	2,0
1000	30	3,0
2000	40	4,0
3000	50	5,0

Nestes custos foram contabilizados também os serviços de água e telefone, gastos de cafeteria, papelaria e vigilância. Também o custo do trabalho de uma pessoa para ofícios vários, não incluídos na nomina.

5.3.2.4 Custos administrativos

Estes custos incluem: nómina de administração, honorários administrativos, comunicações, consumível, depreciações de ativos, imposto predial e amortizações dos diferidos.

5.3.2.5 Custo de produção

Estes custos incluem: o custo da biomassa, nómina de produção, transporte da biomassa, serviços gerais e outros custos de geração (trabalhador adicional no incluído na nómina).

5.3.2.6 Investimento inicial

Estes custos incluem: custos dos equipamentos de geração, construções da usina e administração, terrenos, equipamentos em geral e registro da empresa. Foi contabilizado um capital de trabalho para três meses, tempo no qual espera-se que a usina entre em geração contínua e estável.

5.3.2.6.1 Custo específico da tecnologia C-EFGT

CARRARA (2010) reporta que os custos de investimento para sistemas EFGT oscilam entre 1100 – 1400 Euros kW⁻¹ para potências entre 250 – 350 kW. Nesse mesmo sentido, GALLMETZER e DOBMEIER (2006) para a faixa de potência de 30 – 90 kW, reportam um custo de investimento no intervalo de 800 – 1200 Euros kW⁻¹.

Para a estimativa deste custo, foi necessário fazer uma regressão com os preços atualizados até 2012 e uma cotação cambial para conversão de Euros para dólares de 1,3522, resultando a equação 5.17.

$$\text{Custo } C - EFGT = -207,4 \times \ln(P) + 2714,3 \dots R^2 = 0,9903 \quad 5.17$$

Em que Custo C-EFGT é o custo em dólares por kW da tecnologia EFGT; P é a potência em kW. Na tabela 5.31 é mostrado o custo específico da tecnologia C-EFGT para as diferentes potências.

Tabela 5.31 Custo específico da tecnologia C-EFGT

Potência	Custo Específico
50	USD\$1.950,0
150	USD\$1.650,0

5.3.2.6.2 Custo específico da tecnologia ORC

Foi considerado o mesmo preço para todos expansores. A regressão para este custo foi feita segundo os dados mostrados na tabela 3.8. A equação 5.18 define a dinâmica para estes custos segundo a potência.

$$\text{Custo } CRO = 0,0003P^2 - 2,1148P + 4354,1 \dots R^2 = 0,998 \quad 5.18$$

Na tabela 5.32 é mostrado o custo específico da tecnologia ORC para diferentes potências. Para potências menores 150 kW o custo específico é considerado constante.

Tabela 5.32 Custo específico da tecnologia ORC

Potência	Custo Específico
150	USD\$ 3.950,0
300	USD\$ 3.735,1
500	USD\$ 3.448,6
1000	USD\$ 2.732,4
2000	USD\$ 1.300,0
3000	USD\$ 1.100,0

5.3.2.6.3 Custo da tecnologia CRC

Igual que para a tecnologia ORC, foi considerado o mesmo preço para todos expansores. A regressão para este custo foi feita segundo os dados mostrados na tabela 3.8. A equação 5.19 define a dinâmica para estes custos segundo a potência.

$$\text{Custo } CRC = -0,85P + 3060 \dots R^2 = 1 \quad 5.19$$

Na tabela 5.33 é mostrado o custo específico da tecnologia CRC para diferentes potências. Para potências menores 500 kW o custo específico é considerado constante.

Tabela 5.33 Custo específico da tecnologia CRC

Potência	Custo Específico
500	USD\$ 2.800,0
1000	USD \$ 2.540,0
2000	USD \$ 2.020,0
3000	USD \$ 1.500,0

5.3.2.6.4 Custo da tecnologia G-MCI

Na estimativa dos custos específico da tecnologia G-MCI foi consultada a literatura científica disponível, sendo mostrada na tabela 5.34. Para as potências de até 1000 kW os custos apresentados foram do gasificador Downdraft e para potência maiores foi para gasificador de leito fluidizado. Os custos foram atualizados mediante a equação 5.20, com uma taxa de juros de 5%.

$$VF = C(1 + i)^n \quad \text{Equação 5.20}$$

Onde VF: valor futuro do capital; C: capital; i: índice do preço ao consumidor e n: a número de anos a atualizar.

Tabela 5.34. Custos da tecnologia G-MCI reportada na literatura científica

Potência (kW)	Custo Específico (USD kW ⁻¹)	Referência
100	1359	(WU et al., 2002)
100	1133	(MANISH; PILLAI; BANERJEE, 2006)
1000	2305	(MOLINO et al., 2013)
1000	2724	(GIMÉNEZ, 2007)
2500	4299	(MCKENDRY, 2002)
5000	4302	(IDAE, 2017)
10000	3350	(IDAE, 2017)

Para a estimativa dos custos das potências em análise, foi necessário fazer uma regressão com os preços atualizados até 2012 e uma cotação cambial para conversão de Euros e Rupias para dólares de 1,3522. Foram estabelecidas duas faixas de potência: 10 – 1000 kW e 1001 – 10.000 kW, resultando as equações 5.21 e 5.22.

$$\text{Custo } G - MCI = 1,4098 \times P + 1104,9 \dots R^2 = 0,9341 \quad (10 - 1000 \text{ kW}) \quad 5.21$$

$$\text{Custo } G - \text{MCI} = -0,1357 \times P + 4775,1 \dots R^2 = 0,8915 \quad (1001 - 10000 \text{ kW}) \quad 5.22$$

Em que Custo G-MCI é o custo em dólares por kW da tecnologia G-MCI; P é a potência em kW. Na tabela 5.35 é mostrado o custo específico da tecnologia G-MCI para as diferentes potências.

Tabela 5.35 Custo específico da tecnologia G-MCI

Potência	Custos Específicos
10	USD\$ 1.119,00
50	USD\$ 1.175,39
150	USD\$ 1.316,37
300	USD\$ 1.527,84
500	US\$ 1.809,80
1000	US\$ 2.514,70
2000	US\$ 4.503,60
3000	US\$ 4.368,00

5.3.2.6.5 Custo da tecnologia G-EFGT

Segundo VUB, SEGHERS BETTER TECHNOLOGY (1992) não há experiência operacional suficiente para dar uma figura razoável da viabilidade econômica deste sistema. O custo de investimento específico estimado é de 5.350 USD\$ kW⁻¹. Existe a necessidade de diminuir significativamente o custo.

5.3.2.6.6 Outros custos

Os demais custos no investimento inicial foram produto de cotações a preços do momento de sua solicitação. Não foram considerados os custos de transmissão elétrica, pelo que está fora do foco deste trabalho.

Nas tabelas 5.36 e 5.37 apresentam se os custos de investimento para os sistemas Agroenergéticos com Eucalipto e Capim Elefante. Estes custos representam o capital inicial para iniciar o empreendimento, incluindo o custo de insumos e mão de obra pelos três primeiros meses de funcionamento, além dos custos de registro.

Tabela 5.36 Custos de investimento para Sistemas Agroenergéticos com Eucalipto.

Potencia	ORC-EP	CRC-EP	CRC-TR	ORC-TR	ORC-TA	CRC-TA	C-EFGT	G-EFGT	G-MCI
kW	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$
10	\$382.357	\$369.132	\$370.179						\$363.009
50	\$611.800	\$535.187	\$543.553				\$483.123		\$404.349
150	\$1.159.088	\$950.678	\$963.380				\$723.008		\$659.249
300	\$1.985.496	\$1.560.542	\$1.579.848						\$1.059.468
500				\$2.784.953	\$2.787.676	\$2.374.410		\$3.971.935	\$1.716.208
1000				\$4.310.322	\$4.338.076	\$4.067.610			\$3.954.828
2000				\$4.550.884	\$4.656.834	\$6.445.383			\$12.612.178
3000				\$5.849.326	\$5.840.544	\$7.387.876			\$18.123.190

Tabela 5.37 Custos de investimento para Sistemas Agroenergéticos com Capim Elefante

Potencia	ORC-EP	CRC-EP	CRC-TR	ORC-TR	ORC-TA	CRC-TA	C-EFGT	G-EFGT	G-MCI
kW	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$
10	\$371.083	\$360.999	\$358.985						\$346.132
50	\$588.013	\$515.759	\$511.906				\$456.227		\$404.349
150	\$1.088.139	\$893.058	\$894.346				\$665.803		\$602.030
300	\$1.781.230	\$1.450.006	\$1.475.446						\$958.497
500				\$2.594.467	\$2.630.251	\$2.218.987		\$3.773.908	\$1.486.343
1000				\$3.978.730	\$3.987.006	\$3.742.798			\$3.646.789
2000				\$3.928.683	\$3.929.479	\$5.771.982			\$11.981.348
3000				\$4.926.326	\$4.950.921	\$6.482.394			\$17.297.737

Pode se ver nas tabelas 5.36 e 5.47 que não existe variabilidade significativa nos custos de investimento entre as tecnologias ORC e CRC na faixa de 2000 – 3000 kW com exceção do CRC-TA, cuja variação nos custos é atribuível a os custos de insumos e mão de obra pela baixa eficiência global dos sistemas. Nesta faixa mesma, pode-se ver que o custo da tecnologia G-MCI é maior, principalmente pelos custos de investimento maiores. Para a faixa de potência de 10 – 300 kW as tecnologias CRC-TR e CRC – EP requerem menor custo de investimento.

5.3.3 Custo nivelado de geração

O custo nivelado de geração foi estimado com base nos custos de investimento, de operação e manutenção. Os custos da manutenção anual foram estabelecidos como o 5% do custo dos equipamentos. Uma vez feito à computação dos custos e aplicando a equação 3.5, estimam se os custos nivelados de geração da eletricidade para as diferentes tecnologias usando o Eucalipto e o Capim Elefante como combustível. Ver figuras 5.18 e 5.19.

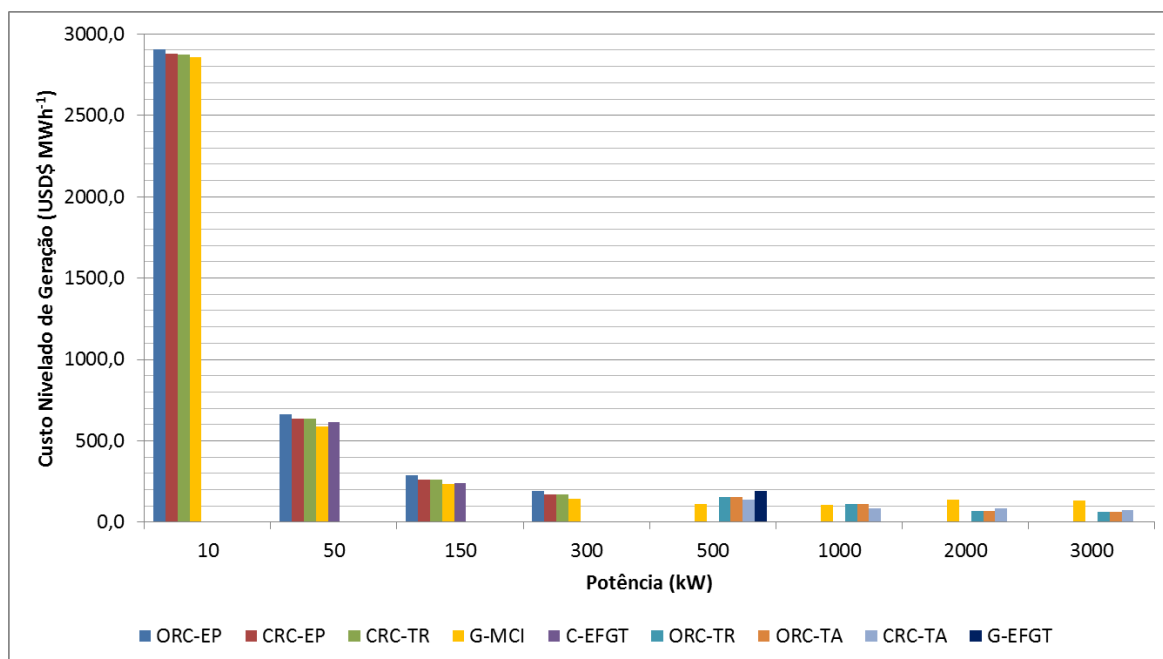


Figura 5.18 Custo nivelado de geração de eletricidade com Eucalipto para diferentes tecnologias

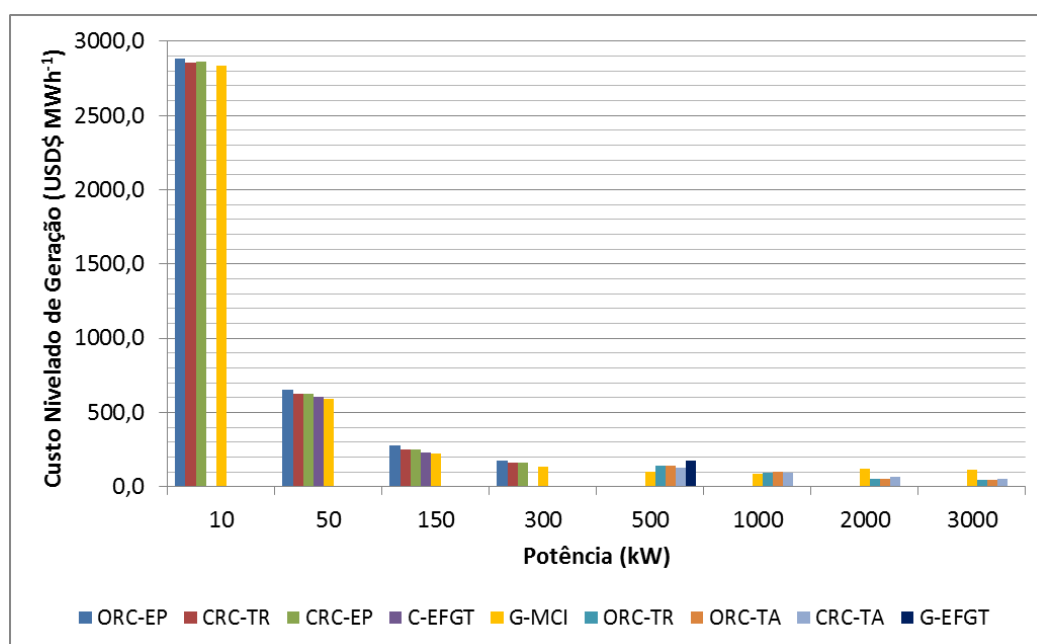


Figura 5.19 Custo nivelado de geração de eletricidade com Capim Elefante para diferentes tecnologias

Nas figuras 5.18 e 5.19 observa-se uma diferença significativa nos custos nivelados para a faixa de potência de 10 - 50 kW atribuível à baixa eficiência dos expansores, alto custo das tecnologias nesta faixa de potência e ao custo do pessoal técnico e administrativo. Com o

aumento da potência o custo nivelado diminuiu notavelmente pelas maiores eficiências dos expansores, diminuição dos custos da tecnologia e melhor aproveitamento do pessoal técnico administrativo.

O custo nivelado de geração para o Eucalipto está na faixa de 10 – 3000 kW varia entre 2857,3 – 63,4 USD\$ MWh⁻¹. No caso do Capim Elefante na mesma faixa de potência oscila entre 2838,0 – 41,7 USD\$ MWh⁻¹. Ao parecer o Capim apresenta vantagens nos custos de geração e maior lucro na venda de eletricidade, tem um uso intensivo de maquinaria no corte, adensamento e transporte até a usina o que pode ser negativo desde o ponto de vista ambiental pelas emissões de CO₂.

Para as potências de 150 – 3000 kW o custo nivelado de geração estão na faixa dos custos reportados por IRENA (2012). Para potências menores a 150 kW o custo é muito elevado, pelo que precisa que esses projetos sejam planejados de forma diferente (automação de processos, equipamentos mais idôneos para baixas potências diferentes aos analisados, usos especiais, entre outros) e com menor uso de mão de obra.

5.3.4 Tarifa de Comercialização da eletricidade

Foi necessário construir um fluxo de caixa do investimento para cada sistema Agro energético analisado com o Eucalipto e Capim Elefante. No caso do Eucalipto estima se o preço de venda para IS30 e IS40, o que não teve diferencia significativa, principalmente pelo consumo específico e preço baixo do Eucalipto com respeito ao transporte do terreno até a usina e o custo da tecnologia. No caso do Capim Elefante o fluxo de caixa foi construído para o preço de produção referenciado anteriormente.

A taxa de troca do dólar para reais foi estabelecida em 2.2. A usina vai funcionar 7.500 horas no ano.

Também foram considerados três cenários em função da taxa de desconto, assim:

- Taxa de desconto pessimista: 12%
- Taxa de desconto neutro: 10%
- Taxa de desconto otimista: 8%

Com cada uma destas taxas foi estimado o VPL variando o preço de venda até atingir uma TIR de 16,8% para todos os sistemas Agroenergéticos analisados. Para esta TIR os VPL

correspondem uma percentagem maior que 20% do valor do investimento para a taxa de desconto otimista, 11% para a taxa de desconto neutro e 2% para a taxa de desconto pessimista. Estas diferenças significativas da variação nas VPL mostra a sensibilidade do custo de dinheiro na viabilidade deste tipo de projeto.

Pode se observar nas figuras 5.20 e 5.21 que a tarifa de comercialização que viabiliza a geração para uma TIR de 16,8% para as diferentes tecnologias analisadas com Eucalipto e Capim Elefante, supera o preço de referência do Leilão A-5/2013. Todas as tecnologias mostram um melhor desempenho econômico com o Capim Elefante que com o Eucalipto.

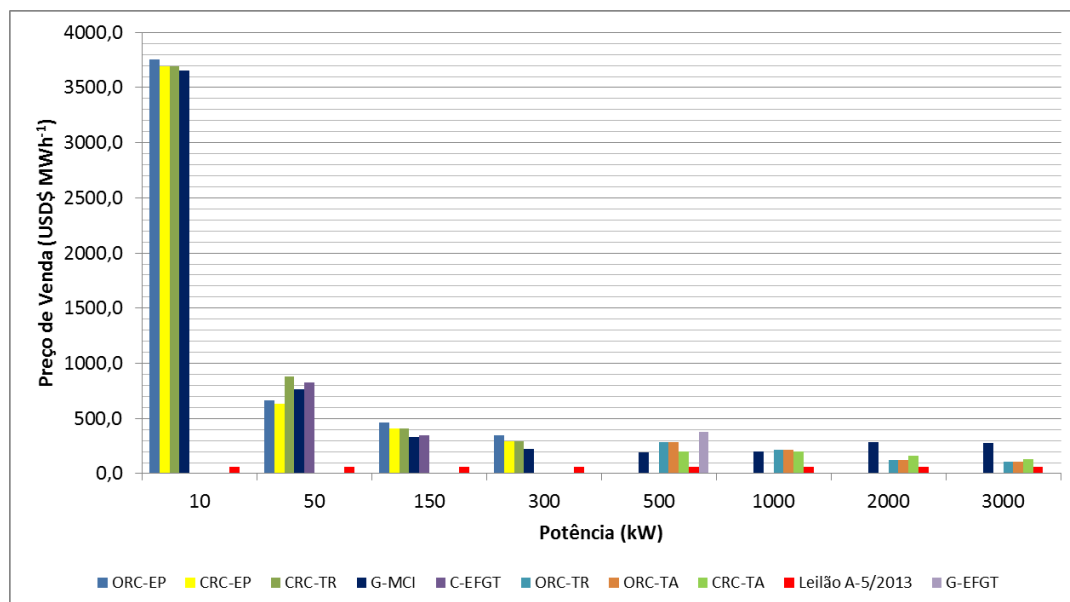


Figura 5.20 Tarifa de comercialização que viabiliza a geração da eletricidade apartir de Eucalipto

(TIR=16,8%; USD\$=2.2R\$)

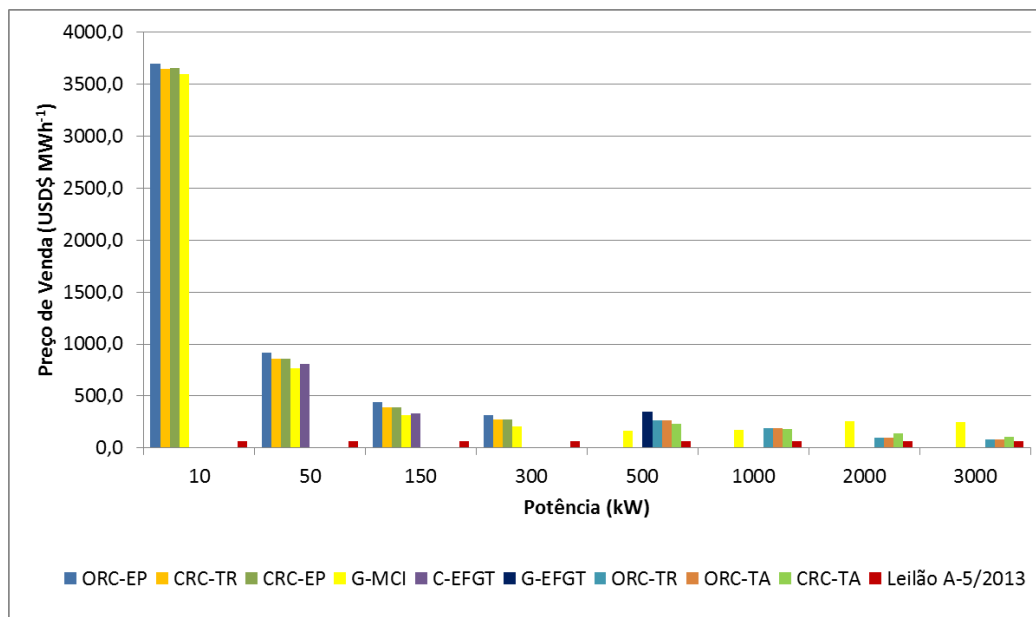


Figura 5.21 Tarifa de comercialização que viabiliza a geração da eletricidade a partir de Capim Elefante
(TIR=16,8%; USD\$=2.2R\$)

5.4 Risco do investimento na geração de energia elétrica a partir de Eucalipto e Capim Elefante.

A análise do risco do investimento foi realizada com o software Crystal Ball. Este software é uma aplicação de planilha universal líder do setor para a modelagem de previsões, simulações e otimizações. Fornece uma visão incomparável para os fatores críticos que afetam riscos, usando o método de Monte Carlo (“Oracle Crystal Ball”, 2016).

O método de Monte Carlo é uma técnica numérica para calcular probabilidades e outras quantidades relacionadas, usando sequências de números aleatórios. É apropriado para resolver problemas de dimensão alta e/ou parâmetros estocástico e, muitas vezes, é usada para calcular o valor esperado de uma variável que é função de várias variáveis estocásticas e que não pode ser tratada analiticamente.

Para a aplicação do Crystall Ball, as seguintes condições foram tidas em conta:

- **Taxa de desconto:** assume-se uma distribuição triangular com o valor menos provável de 8% (taxa ótima). O valor mais frequente de 10% (taxa neutra) e o valor menos provável de 12% (taxa pessimista).
- **Custo específico da tecnologia:** assume-se uma distribuição triangular com o valor menos provável equivalente a 75% do custo atual. O valor mais frequente é igual ao custo atual e o valor menos provável de 25% mais caro que o custo atual.
- **Custo da biomassa:** assume-se uma distribuição triangular com o valor menos provável equivalente a 10% mais barato do custo atual. O valor mais frequente é igual ao custo atual e o valor menos provável de 25% mais caro que o custo atual.
- **Tarifa de comercialização da eletricidade:** assume-se uma distribuição triangular com o valor menos provável equivalente a 50% mais barato do custo atual. O valor mais frequente é igual ao custo atual e o valor menos provável de 10% mais caro que o custo atual.

Foi estimada a probabilidade de alcançar a viabilidade econômica com um VPL do projeto maior que zero para todas as configurações de sistemas Agroenergéticos analisados neste trabalho.

Nas figuras 5.22 e 5.23 evidencia-se que os sistemas de maior potência têm menor risco do investimento que os sistemas de menor potência. Na maioria de casos, a variável de maior peso na incerteza é a tarifa de comercialização. O custo da tecnologia influi negativamente em todos os casos, mostrando que o VPL muito sensível a esta variável. É menos importante para esta análise a taxa de desconto e o custo da biomassa.

Pode-se ver na figura 5.22, que 16 sistemas tem uma certeza na faixa de 20-30%, 8 sistemas na faixa de 31 – 40%, 5 sistemas na faixa de 41 – 50%, 2 sistemas na faixa de 51 – 60%, 1 sistema na faixa de 61 – 70% e 1 na faixa de 80 - 90%. É de ressaltar que o sistema GMCI com potência 3000 kW, é o sistema com menor risco do investimento, para as condições do análise. Segue GMCI com potência de 150 kW.

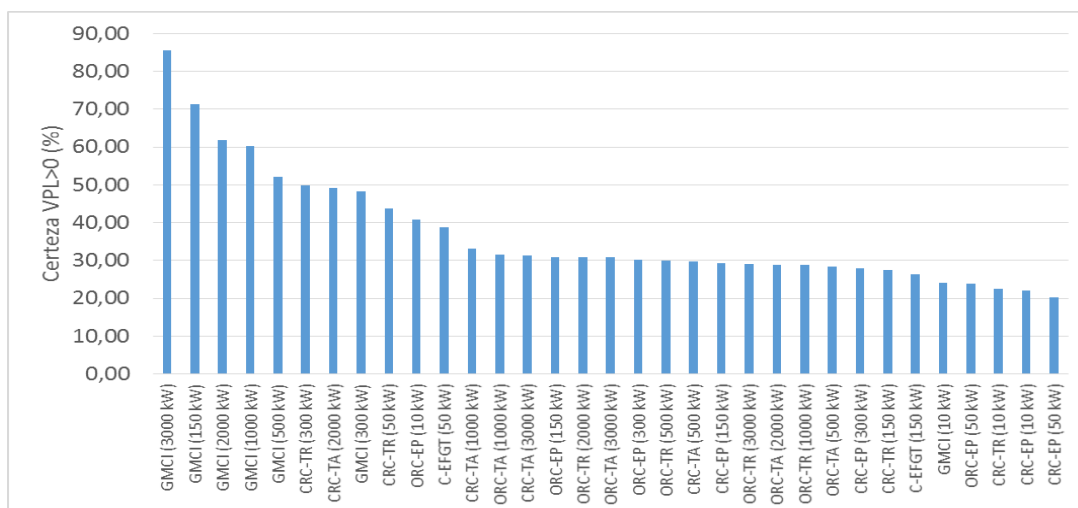


Figura 5.22. Probabilidade de alcançar a viabilidade econômica para os diferentes sistemas Agroenergéticos com Eucalipto

Pode-se ver na figura 5.23, que 10 sistemas tem uma certeza no intervalo de 20-30%, 15 sistemas no intervalo de 31 – 40%, 3 sistemas no intervalo de 41 – 50%, 3 sistemas no intervalo de 51 – 60% e 2 no intervalo de 61 – 70%. É de ressaltar que o sistema ORC-TR com potência 1000 kW, é o sistema com menor risco do investimento, para as condições do análise. Segue G-MCI com potência de 300 kW.

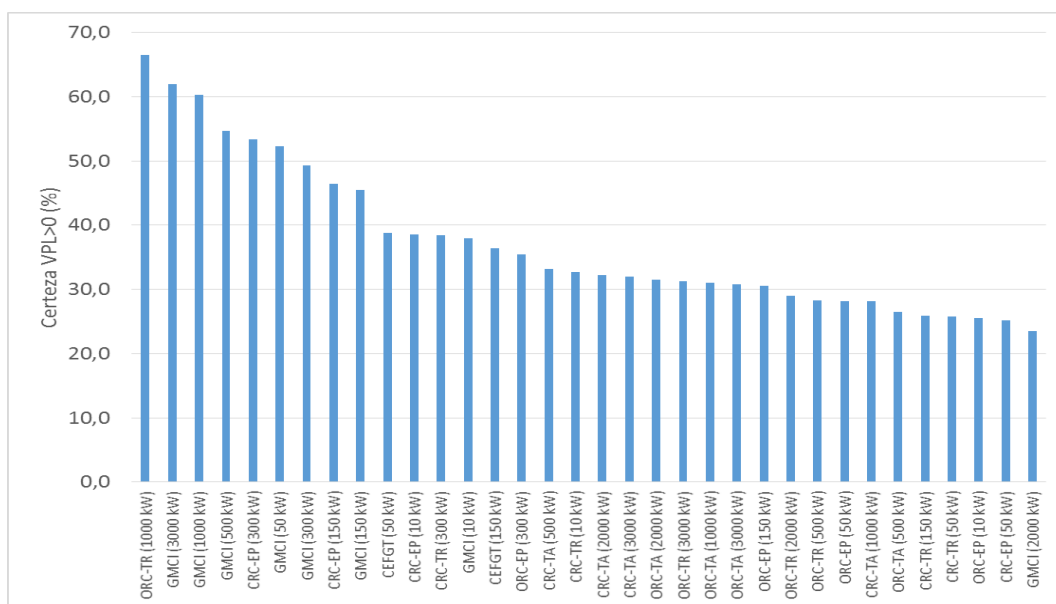


Figura 5.23. Probabilidade de alcançar a viabilidade econômica para os diferentes sistemas Agroenergéticos com Capim Elefante

A variabilidade da probabilidade em diferentes sistemas com diferentes biomassas é devido às peculiaridades de cada projeto. É de ressaltar que é analisado um só cenário com condições específicas 4 variáveis selecionada, por sua importância no desenvolvimento dos projetos.

Conclusões

- Depois de uma análise multicritério como com o DEA de 5 espécies madeiras (Acácia, Pino, Eucalipto, Angico e Tamboril) e 3 espécies herbáceas (Miscantus, Capim elefante e Sorgo lignocelulosico), as espécies com maior potencial para a geração de energia elétrica no Brasil, são: o Eucalipto e o Capim Elefante respectivamente, por ter a maior grau domesticação e disponibilidade de germoplasma melhorado, além das características físico-químicas.
- No Brasil existem 94,1 milhões de hectares com atitude florestal e um potencial teórico de geração de $28,24 \text{ EJ ano}^{-1}$ equivalente ao 5,6% do potencial global estimado por o IPCC (2010). Também tem 96,4 milhões de hectares com atitude para pastagem natural e artificial e um potencial teórico de geração de $58,44 \text{ EJ ano}^{-1}$ equivalente ao 11,7% do potencial global estimado por o IPCC (2010). No caso de fazer sistema agroflorestal com 50% da área em Eucalipto e 50% da área em Capim Elefante, o potencial teórico de geração é de $43,34 \text{ EJ ano}^{-1}$ sendo equivalente ao 8,7% do potencial global.
- Os sistemas Agroenergéticos com G-MCI apresentam maior eficiência na faixa de 10 – 3000 kW com sua consequente menor consumo de biomassa e menor área em produção. Para potências menores a 500 kW os sistemas Agroenergéticos mais eficiente incluem a tecnologia ORC-EP.
- Segundo com análise de o potencial técnico de geração de energia elétrica em sistemas Agroenergéticos, é possível superar a capacidade de geração elétrica atualmente instalada no Brasil com Eucalipto e Capim Elefante utilizando tecnologias de combustão e gaseificação em diferentes sistemas com diversos acionadores primários. No caso do sistema GMCI, é possível alcançar a capacidade elétrica instalada no Brasil utilizando o 50% das terras com potencial para Eucalipto, 23% das terras com potencial para o Capim Elefante e 33% das terras com 50% em Eucalipto e 50% em Capim Elefante.
- Os custos nivelados têm diferenças significativas na faixa 10 – 50 kW com respeito à faixa 150 – 3000 kW para todas as tecnologias analisadas. Os custos nivelados na faixa de 150 – 3000 kW encontram-se na faixa reportada por IRENA (2012), mais para potências menores a 150 kW o custo é muito elevado, pelo que é

necessário fazer um planejamento adequado (automação de processos, equipamentos mais eficientes para baixas potências diferentes aos analisados, usos especiais, entre outros) e com menor uso de mão de obra.

- Dos sistemas analisados para as condições estabelecidas neste estudo, os projetos com maiores potências nominais têm menor o risco do investimento, sendo a tarifa de comercialização a variável com maior peso na incerteza, influenciando negativamente o custo da tecnologia o que gera muita sensibilidade ao VPL. A variável com menor influência na incerteza são a taxa de desconto e o custo da biomassa. Das tecnologias analisadas a como menor risco de investimento usando Eucalipto como combustível foi GMCI (3000 kW) e para o Capim Elefante foi ORC-TR (1000 kW).
- Existem diferenças significativas nos custos nivelado e o custo de comercialização pelo que se requer de políticas adequadas para o financiamento destes sistemas Agroenergéticos, e sejam viáveis economicamente no Brasil.

Recomendações

- É necessário fazer um estudo que permita estabelecer política de produção dos cultivos energéticos, tecnologias disponíveis e sistemas de distribuição da energia, para garantir uns custos de comercialização adequado para este tipo de projetos que diminuam os riscos de investimento, e assim garantir a sustentabilidade dos sistemas agroenergéticos no Brasil.
- Para uma análise mais objetivo, é necessário fazer a análise de ciclo de vida para os diferentes sistemas agroenergéticos propostos para o Brasil neste estudo, utilizando cultivos energéticos madeireiros e herbáceos com as diferentes tecnologias analisadas neste estudo.

Anexos

Anexo A.

Dados originais do arquivo:

Resultados utilizando o modelo BCC, orientação input

Eficiências

DMU	Padrão	Invertida	Composta	Composta*
Acacia	1.000000	1.000000	0.500000	0.998424
Pino	1.000000	1.000000	0.500000	0.998424
Eucalipto	1.000000	0.998422	0.500789	1.000000
Angico	1.000000	1.000000	0.500000	0.998424
Tamboril	0.489612	1.000000	0.244806	0.488840
Mischantus	1.000000	1.000000	0.500000	0.998424
CapimElefante	1.000000	1.000000	0.500000	0.998424
SorgoLignocelulosico	0.675174	1.000000	0.337587	0.674110

*Eficiência normalizada

Pesos das Variáveis

DMU	Peso CH	Peso DE	Peso DGM	Peso Pr	Peso PCS	Peso DB	u0
Acacia	0.05000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00161812	0.00000000
Pino	0.02500000	0.00000000	0.00000000	0.00335108	0.21006037	0.00000000	-3.54979090
Eucalipto	0.01862197	0.58205730	0.00000000	0.00140010	0.00000000	0.00000000	-0.81617686
Angico	0.01818182	0.00000000	0.00000000	0.00000000	1.40137220	0.02864494	-43.96500900
Tamboril	0.01724138	0.00000000	0.00000000	0.00231109	0.14486922	0.00000000	-2.44813160
Mischantus	0.02272727	0.00000000	0.00000000	0.00117596	0.00000000	0.00070221	0.00000000
CapimElefante	0.01333333	0.24623029	0.00000000	0.00154244	0.00000000	0.00000000	-0.25278665
SorgoLignocelul.	0.01250000	0.81093750	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00685764	-5.60989580

Alvos

Acacia (eficiência:1.000000)

Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
CH	20.000000	20.000000	0.000000	20.000000
DE	2.000000	2.000000	0.000000	2.000000
DGM	2.000000	2.000000	0.000000	2.000000
Pr	17.500000	17.500000	0.000000	17.500000
PCS	19.000000	19.000000	0.000000	19.000000
DB	618.000000	618.000000	0.000000	618.000000

Pino (eficiência:1.000000)

Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
CH	40.000000	40.000000	0.000000	40.000000
DE	2.000000	2.000000	0.000000	2.000000
DGM	1.000000	1.000000	0.000000	1.000000
Pr	28.800000	28.800000	0.000000	28.800000
PCS	21.200000	21.200000	0.000000	21.200000
DB	366.000000	366.000000	0.000000	366.000000

Eucalipto (eficiência:1.000000)

Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
CH	53.700000	53.700000	0.000000	53.700000
DE	3.000000	3.000000	0.000000	3.000000
DGM	3.000000	3.000000	0.000000	3.000000
Pr	50.000000	50.000000	0.000000	50.000000
PCS	18.900000	18.900000	0.000000	18.900000
DB	495.000000	495.000000	0.000000	495.000000

Angico (eficiência:1.000000)

Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
CH	55.000000	55.000000	0.000000	55.000000
DE	1.000000	1.000000	0.000000	1.000000
DGM	1.000000	1.000000	0.000000	1.000000
Pr	27.000000	27.000000	0.000000	27.000000
PCS	18.800000	18.800000	0.000000	18.800000
DB	650.000000	650.000000	0.000000	650.000000

Tamboril (eficiência:0.489612)

Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
CH	58.000000	28.397471	0.000000	28.397471
DE	1.000000	1.000000	0.978064	1.978064
DGM	1.000000	1.000000	0.584514	1.584514
Pr	30.000000	30.000000	0.000000	30.000000
PCS	19.800000	19.800000	0.000000	19.800000
DB	330.000000	330.000000	192.379171	522.379171

Mischantus (eficiência:1.000000)

Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
CH	44.000000	44.000000	0.000000	44.000000
DE	1.000000	1.000000	0.000000	1.000000
DGM	1.000000	1.000000	0.000000	1.000000
Pr	384.600000	384.600000	0.000000	384.600000
PCS	16.000000	16.000000	0.000000	16.000000
DB	780.000000	780.000000	0.000000	780.000000

CapimElefante (eficiência:1.000000)

Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
CH	75.000000	75.000000	0.000000	75.000000
DE	3.000000	3.000000	0.000000	3.000000
DGM	3.000000	3.000000	0.000000	3.000000
Pr	333.300000	333.300000	0.000000	333.300000
PCS	17.000000	17.000000	0.000000	17.000000
DB	600.000000	600.000000	0.000000	600.000000

SorgoLignocelulosico (eficiência:0.675174)

Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
CH	80.000000	54.013889	0.000000	54.013889
DE	2.000000	2.000000	0.000000	2.000000
DGM	1.000000	1.000000	1.000000	2.000000
Pr	171.700000	171.700000	139.826389	311.526389
PCS	16.000000	16.000000	0.847222	16.847222
DB	680.000000	680.000000	0.000000	680.000000

Benchmarks

DMU	Acacia	Pino	Eucalipto	Angico	Mischantus	CapimElefante
Acacia	1.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
Pino	0.00000000	1.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
Eucalipto	0.00000000	0.00000000	1.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
Angico	0.00000000	0.00000000	0.00000000	1.00000000	0.00000000	0.00000000
Tamboril	0.58451374	0.39354977	0.00000000	0.00000000	0.02193650	0.00000000
Mischantus	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	1.00000000	0.00000000
CapimElefante		0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	1.00000000
SorgoLignocelulosico		0.13888889	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.43055556

BIBLIOGRAFIA

ABADIE, L. M.; KUTXA, B. B. The Economics of Gasification: A Market-Based Approach. **Energies**, v. 2, p. 662–694, 2009.

ABNIA. **A Força do Setor de Alimentos** Brasília ABNIA, , 2012. Disponível em: <<http://abia.org.br/vst/AForcadoSetordeAlimentos.pdf>>

ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2012 ano base 2011**. Brasília: [s.n.].

Adoratec. Disponível em: <<http://www.adoratec.com/companyprofilnav.html>>. Acesso em: 10 dez. 2012.

ALBERTO, C.; LONDOÑO, E. Diseño óptimo de ciclones. **Revista Ingenierías Universidad de Medellín**, v. 5, n. 9, p. 123–139, 2006.

ALGIERI, A.; MORRONE, P. Comparative energetic analysis of high-temperature subcritical and transcritical Organic Rankine Cycle (ORC). A biomass application in the Sibari district. **Applied Thermal Engineering**, v. 36, n. 1, p. 236–244, 2012.

ALVES FLORES, R. **Produção de Capim Elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) para Fins Energéticos no Cerrado: Resposta a Adubação Nitrogenada e Idade de Corte**. [s.l.] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2009.

ANA. **GEO Brasil: Recursos Hídricos. Componente da Série de Relatórios sobre o Estado e Perspectivas do Meio Ambiente no Brasil**. Brasília: [s.n.].

ANHEDEN, M. **Analysis of gas turbine systems for sustainable energy conversion**. [s.l.] Royal Institute of Technology, 2000.

BACH, W. Fossil fuel resources and their impacts on environment and climate. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 6, n. September 1979, p. 185–201, 1981.

BAI, Z. et al. **Global assessment of land degradation and improvement. 1. Identification by remote sensing... Soil Reference and Information** Wageningen: [s.n.]. Disponível em: <http://www.isric.nl/ISRIC/webdocs/docs/report_2008_01_glada_international_rev_aug_2008.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2013.

BAINA, F. et al. Effect of the fuel type on the performance of an externally fired micro gas turbine cycle. **Applied Thermal Engineering**, v. 87, p. 150–160, 2015.

BARATIERI, M. et al. The use of biomass syngas in IC engines and CCGT plants: A comparative analysis. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 16, p. 3309–3318, nov. 2009.

BARSALI, S. et al. Dynamic modelling of biomass power plant using micro gas turbine. **Renewable Energy**, v. 80, p. 806–818, 2015.

BARSALI, S.; LUDOVICI, G. Externally fired micro gas turbine (75kWe) for combined heat and power generation from solid biomass: Concept, efficiency, cost, and experiences from pilot. **Proc. Holzenergiesymposium**, n. September, 2010.

BASSAM, N. EL. **Handbook of Bioenergy Crops: A complete reference to species**,

development and applications. London: Earthscan, 2010.

BASU, P. **Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory.** USA: Elsevier, 2010.

BAZZANI C., C. L. **Modelo Metodológico para Evaluar Riesgo en Proyecto de Inversión.** [s.l.] Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.

BAZZANI, C. L.-; CRUZ TREJOS, E. A. Análisis de Riesgos en proyectos de inversión. Un caso de estudio. **Scientia et technica**, v. XIV, n. 38, p. 309–314, 2008.

BENTINI, M.; MARTELLI, R. Prototype for the harvesting of cultivated herbaceous energy crops, an economic and technical evaluation. **Biomass and Bioenergy**, p. 1–9, jul. 2013.

BERG, A. et al. Projections of climate change impacts on potential C4 crop productivity over tropical regions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 170, p. 89–102, mar. 2013.

BOLHÀR-NORDENKAMPF, M.; RAUCH, R. Biomass CHP plant Güssing-Using gasification for power generation. **K. Kirtikara: 2nd ...**, v. 3, 2003.

BOOTH A., T. H.; PRYOR D., L. Climatic requirements of some commercially important eucalypt species. In: **Forest Ecology and Management.** Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1991. p. 47–60.

Bosch KWK Systeme. Disponível em: <<http://www.bosch-kwk.de/>>. Acesso em: 10 dez. 2012.

BP. **BP Energy Outlook 2030.** London: [s.n.]. Disponível em: <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/statistical-review/BP_World_Energy_Outlook_booklet_2013.pdf>.

BP STATISTICS. **BP Statistical Review of World Energy.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/statistical-review/statistical_review_of_world_energy_2013.pdf>.

BRIDGWATER, A. V. The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. **Fuel**, v. 74, n. 5, p. 631–653, 1995.

BROWN, D. et al. Thermo-economic analysis for the optimal conceptual design of biomass gasification energy conversion systems. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 11-12, p. 2137–2152, ago. 2009.

BUCHHOLZ, T.; LUZADIS, V. A.; VOLK, T. A. Sustainability criteria for bioenergy systems: results from an expert survey. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, p. S86–S98, nov. 2009.

Calnetix. Disponível em: <<http://www.calnetix.com/>>. Acesso em: 10 dez. 2012.

CAMPBELL, K. A feasibility study guide for an agricultural biomass pellet company. **Agricultural Utilization Research Institute, USA**, n. November, 2007.

CARPIO, L. G. T.; PEREIRA, A. O. Economical efficiency of coordinating the generation by subsystems with the capacity of transmission in the Brazilian market of electricity. **Energy Economics**, v. 29, n. 3, p. 454–466, maio 2007.

CARRARA, S. **Small-scale biomass power generation**. [s.l.] UNIVERSITY OF BERGAMO, 2010.

CARROLL, J. P.; FINNAN, J. Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws. **Biosystems Engineering**, v. 112, n. 2, p. 151–159, 2012.

CECELSKI, E. Enabling equitable access to rural electrification: current thinking and major activities in energy, poverty and gender. **World Development Report**, p. 20–22, 2000.

CENBIO; INFOENER. **Briquetes no Brasil**. Disponível em: <http://infoener.iee.usp.br/scripts/biomassa/br_briquete.asp>. Acesso em: 11 out. 2015.

CERBINO CINTRA, T. **Avaliações energéticas de espécies florestais nativas plantadas na região do Médio Paranapanema, SP**. [s.l.] São Paulo, 2009.

CHANG, M. **Forest hydrology: an introduction to water and forests**. United State of America: CRC Press LLC., 2003.

COUTO, C. M. **Estimativa do poder calorífico de madeiras de acácia-negra e eucalipto do Município de Pelotas - RS**. [s.l.] Universidade Federal de Pelotas, 2014.

CUNHA, M. P. S. C. et al. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. **3º encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira: Anais**, v. 2, p. 93–121, 1989.

DE PAULA LIMA, W. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais IPEF**. Disponível em: <<http://www.ipef.br/hidrologia/eucaliptosecaosolo.asp>>. Acesso em: 4 ago. 2013a.

DE PAULA LIMA, W. **IMPACTO AMBIENTAL DAS FLORESTAS PLANTADAS** ~~Scamn~~ **embrapa**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[http://www.cpamn.embrapa.br/agrobioenergia/palestras/IMPACTO AMBIENTAL DAS FLORESTAS PLANTADAS .PDF](http://www.cpamn.embrapa.br/agrobioenergia/palestras/IMPACTO_AMBIENTAL_DAS_FLORESTAS_PLANTADAS.PDF)>.

DIEESE. **Estatísticas do meio rural 2010 - 2011**. 4 Ed. ed. Brasília: DIEESE; NEAD; MDA, 2011.

DIVISION ENERGY STATISTIC. **Energy Statistics Manual**. Paris: OECD Publishing, 2004.

DIXON, S. L.; HALL, C. A. Axial-Flow Turbines: Mean-Line Analysis and Design. In: **Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery**. sixth ed. [s.l: s.n.]. p. 97–141.

DUTTA, A. **TORREFACTION AND GASIFICATION TECHNOLOGIES FOR BIOMASS**, 2011. Disponível em: <http://www.biomassinnovation.ca/pdf/HarnessingBiomassII/SE_Dutta.pdf>

DWIVEDI, P.; KHANNA, M. Abatement cost of GHG emissions for wood-based electricity and ethanol at production and consumption levels. **PLoS ONE**, v. 9, n. 6, 2014.

EHLERINGER, J.; BJORKMAN, O. Quantum Yields for CO₂ Uptake in C₃ and C₄ Plants. n. 577, p. 86–90, 1977.

EIA. **Countries Analysis Brief: Brazil**. Wasing: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.eia.gov/countries/analysisbriefs/cabs/Brazil/pdf.pdf>>.

ElectraTherm. Disponível em: <<http://electratherm.com/>>. Acesso em: 10 dez. 2012.

EMBRAPA. **ZONEAMENTO AGRÍCOLA DE RISCO CLIMÁTICO: INSTRUMENTO DE GESTÃO DE RISCO UTILIZADO PELO SEGURO AGRÍCOLA DO BRASIL.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Zoneamento_agricola_000fl7v6vox02wyiv80ispcrruh04mek.pdf>.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. Technology Characterization: Steam Turbines. In: **Catalog CHP Technology.** EPA - CHP ed. [s.l.: s.n.].

EPA. **Sustainability Information Research.** Disponível em: <<http://www.epa.gov/sustainability/basicinfo.htm>>. Acesso em: 2 jul. 2013.

ergion gmb. Disponível em: <http://www.ergion.de/Start_I19899.whtml>. Acesso em: 10 dez. 2012.

FAO. **FAO.** Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/t0512s/t0512s00.htm>>. Acesso em: 20 jul. 2015.

FAO. **El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura: Cómo gestionar los sistemas en peligro.** Roma: organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura, 2012. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/015/i1688s/i1688s00.pdf>>.

FELFLI, F. E. F.; LUENGO, C. A.; ROCHA, J. D. Briquetes Torrificados: Viabilidade Técnico-Econômica E Perspectivas No Mercado Brasileiro. **5th Encontro de Energia no Meio Rural**, n. 100, 2004.

FERNANDES CORTÊS, M. **Avaliação Tecno-econômica da Gaseificação do Capim Elefante para Eletrificação Rural.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2000.

FERREIRA, S. B. **Thermoeconomic Analysis and Optimisation of Biomass Fuel Gas Turbines.** [s.l.] Cranfield University, 2002.

FLORES, C.; ALBA, J.; GARRASTAZU, M. Zoneamento edáfico para o eucalipto na região do Corede Sul. p. 5, 2011.

FUENTES Y., J. L. **Iniciación a la Meteorología y la Climatología.** España: Mundi-Prensa, 2000.

GALLMETZER, G.; DOBMEIER, B. **Konzepte zur Realisierung indirekt mit Biomasse befeuerter Heißluftturbinen.** Freising: [s.n.].

GAO, N. et al. Hydrogen-rich gas production from biomass steam gasification in an updraft fixed-bed gasifier combined with a porous ceramic reformer. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, n. 20, p. 5430–5438, out. 2008.

GARCÍA-MARAVER, A.; POPOV, V.; ZAMORANO, M. A review of European standards for pellet quality. **Renewable Energy**, v. 36, n. 12, p. 3537–3540, 2011.

GIMÉNEZ, J. L. **CONFERENCIA TECNICA SOBRE ENERGIAS RENOVABLES** MadridMinisrerio de Industria, Comercio y Turismo de Espanha, , 2007.

GIRALDO R., S. Y. **Avalacao de um Sistema De Limpeza Integrado a um Conjunto de Gaseificador de Biomassa/Celula SOFC.** [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2013.

GMK ORC. Disponível em:

<http://www.gmk.info/waste_heat_geothermal_ORC.23.html?>. Acesso em: 10 dez. 2012.

GOMIDE, J. A. Formação e Utilização de Capineira de Capim Elefante. In: MESQUITA C., M. et al. (Eds.). . **CAPIM ELEFANTE: produção e utilização**. 2a. Edição ed. Brasília: Embrapa, 1997. p. 79–112.

GONÇALVES DOS SANTOS, H. et al. **O Novo Mapa do Solos do Brasil Legenda Atualizada**. Rio de Janeiro: [s.n.].

GONZALEZ, N. F. **Estado del Arte del Uso del Gas de Gasificación Termoquímica de Biomasa (GG), en Motores de Combustão Interna Alternativos**. [s.l.] Universidad Politécnica de Madrid, 2003.

GOSSE, G. **Lignocellulosic energy crops in different agricultural scenarios**. Luxemburg: EUROPEAN COMMISSION, 1996.

GRAY, C. F.; LARSON, E. W. **Gerenciamento de projetos**. 4a. Edição ed. São Paulo, Brasil.: McGraw Hill, 2009.

Green Energy Australasia. Disponível em: <<http://www.geaust.com.au/>>. Acesso em: 10 dez. 2012.

HANDAYANI, T. et al. Selection of the optimum working fluids in organic Rankine Cycles using TOPSIS. **Chemical Engineering Transactions**, v. 29, p. 139–144, 2012.

HATTIANGADI, A. **Working Fluid Design for Organic Rankine Cycle (ORC) Systems Akshay Hattiangadi**. [s.l.] Delft University of Technology, 2013.

HELD, J. **Gasification - Status and technology**. Austria: [s.n.].

Heliex Power. Disponível em: <http://www.heliexpower.com/#About_Heliex>. Acesso em: 10 dez. 2012.

HOOD, E. E.; NELSON, P.; POWELL, R. Chapter 1 The Bioeconomy: A New Era of Products Derived from Renewable Plant-Based Feedstocks. In: HOOD, E. E.; NELSON, P.; POWELL, R. (Eds.). . **Plant Biomass Conversion**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

IBGE. **Atlas Nacional do Brasil**. Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 26 jul. 2013.

IBGE. **Atlas do Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013.

IDAE. **Biomasa: Gasificación**. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2017.

IEA. **Bioenergy Project Development & Biomass Supply**. Paris: [s.n.].

IEA. **Key World Energy STATISTICS 2012**. Paris: [s.n.]. Disponível em: <www.iea.org>.

IEA STATISTIC. **CO2 emissions from fuel combustion—highlights** IEA, Paris [http://www. iea. org/co2highlights/](http://www.iea.org/co2highlights/) Luxemburg: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf>>. Acesso em: 1 jun. 2013.

Infinity Turbine ®. Disponível em:

<http://www.infinityturbine.com/ORC/ORC_Waste_Heat_Turbine.html>. Acesso em: 10 dez. 2012.

IPCC. **Renewable energy sources and climate change mitigation: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** (O. Edenhofer, R. Pichs Madruga, Y. Sokona, Eds.) **Choice Reviews Online**. New York: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.cro3.org/cgi/doi/10.5860/CHOICE.49-6309>>.

IRENA. **Renewable Power Generation Costs**. Abu Dhabi: [s.n.]. Disponível em: <www.irena.org>.

JANNASCH, R.; QUAN, Y.; SAMSON, R. A Process and Energy Analysis of Pelletizing Switchgrass. p. 16, 2001.

JIANG, H. et al. The influence of vegetation type on the hydrological process at the landscape scale. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 5, p. 743–763, out. 2004.

KALINCI, Y.; HEPBASLI, A.; DINCER, I. Biomass-based hydrogen production: A review and analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, n. 21, p. 8799–8817, nov. 2009.

KANG, S. H. Design and experimental study of ORC (organic Rankine cycle) and radial turbine using R245fa working fluid. **Energy**, v. 41, n. 1, p. 514–524, maio 2012a.

KANG, S. H. Design and experimental study of ORC (organic Rankine cycle) and radial turbine using R245fa working fluid. **Energy**, v. 41, n. 1, p. 514–524, maio 2012b.

KAUTER, D.; LEWANDOWSKI, I.; CLAUPEIN, W. Quantity and quality of harvestable biomass from Populus short rotation coppice for solid fuel use—a review of the physiological basis and management influences. **Biomass and Bioenergy**, v. 24, n. 6, p. 411–427, 2003.

KAUTZ, M.; HANSEN, U. The externally-fired gas-turbine (EFGT-Cycle) for decentralized use of biomass. **Applied Energy**, v. 84, n. 7-8, p. 795–805, jul. 2007.

KLEIN, A. **Gasification: an alternative process for energy recovery and disposal of municipal solid wastes**. [s.l.] Columbia University, 2002.

KUMAR, A.; CAMERON, J. B.; FLYNN, P. C. Biomass power cost and optimum plant size in western Canada. **Biomass and Bioenergy**, v. 24, n. 6, p. 445–464, 2003.

KUMAR, A.; JONES, D. D.; HANNA, M. A. Thermochemical Biomass Gasification: A Review of the Current Status of the Technology. **Energies**, v. 2, p. 556–581, 2009.

LEE, K.-H.; FARZIPOOR SAEN, R. **Measuring corporate sustainability management: A data envelopment analysis approach** **International Journal of Production Economics** Elsevier, , 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.08.024>>

LI, T.; ZHU, J.; ZHANG, W. Cascade utilization of low temperature geothermal water in oilfield combined power generation, gathering heat tracing and oil recovery. **Applied Thermal Engineering**, v. 40, p. 27–35, jul. 2012.

Ligno-cellulose supply chains. Disponível em: <<http://bisypplan.bioenarea.eu/html-files-en/03-01.html>>. Acesso em: 19 ago. 2013.

LIMA V., E. et al. **Manual de Fisiologia Vegetal**. São Luis de Maranhão, Brasil.: EDUFMA, 2010.

LINNEMANN N., N. **REKA: Homepage**. Disponível em: <<http://www.reka.com/en/tools/heatingvalues/>>. Acesso em: 8 ago. 2015.

Lippel. Disponível em: <<http://www.lippel.com.br/br/#.UhOdQtKTgk0>>. Acesso em: 20 ago. 2013.

LIU, B. T.; CHIEN, K. H.; WANG, C. C. Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery. **Energy**, v. 29, n. 8, p. 1207–1217, 2004.

LOO, S. VAN; KOPPEJAN, J. **The handbook of biomass combustion and co-firing**. London: Earthscan, 2008.

LOPES, B. **O Capim-elefante**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA, 2004.

LÓPES DA S., M.; GONÇALVES J., L. A.; VALVERDE, S. R. **Economia Florestal**. 2a. Edição ed. Viçosa: Editora UFV, 2005.

LOPEZ, A. et al. **U . S . Renewable Energy Technical Potentials : A GIS-Based Analysis U . S . Renewable Energy Technical Potentials : A GIS- Based Analysis**. Colorado: [s.n.].

LOPEZ, A. et al. **U . S . Renewable Energy Technical Potentials : A GIS- Based Analysis**. n. July, p. 40, 2012b.

MACHADO, C. . **Sistemas de colheita florestal** Viçosa, 2012. Disponível em: <[http://www.portal.ufra.edu.br/attachments/1026_SISTEMAS_DE_COLHEITA_FLORESTAL\(EXPLORA%C3%87%C3%83O\)FP.pdf](http://www.portal.ufra.edu.br/attachments/1026_SISTEMAS_DE_COLHEITA_FLORESTAL(EXPLORA%C3%87%C3%83O)FP.pdf)>

MACHADO, C. .; LOPES, E. . Planejamento. In: MACHADO, C. . (Ed.). . **Colheita Florestal**. 2a. Edição ed. Viçosa: UFV, 2008. p. 185–230.

MAGATON, A. S. et al. **Composição Química da Madeira de Espécies de Eucalipto: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química**. [s.l: s.n.].

MALINOVSKI, J. R.; CAMARGO, C. M. .; MALINOVSKI, R. . Sistemas. In: MACHADO, C. . (Ed.). . **Colheita Florestal**. 2a. Edição ed. Viçosa: UFV, 2008. p. 164–184.

MANISH, S.; PILLAI, I. R.; BANERJEE, R. Sustainability analysis of renewables for climate change mitigation. **Energy for Sustainable Development**, v. 10, n. 4, p. 25–36, 2006.

MARTÍNEZ, J. **Estudo Experimental do Conjunto Gaseificador de Biomassa em Reator Co-corrente com Duplo Estágio de Fornecimento de Ar e Motor de Combustão**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2009.

MARTÍNEZ, J. D. et al. Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines. **Renewable Energy**, v. 38, n. 1, p. 1–9, fev. 2012.

MAY, A. et al. **Influência do arranjo de plantas no desempenho produtivo de sorgo sacarino (Sorghum bicolor (L.) Moench), em Sete Lagoas-MGXXIX CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO**. Anais...Águas de Lindóia: 2012

MAZZARELLA, V. **Capim elefante a energia renovável moderna**. Disponível em: <<https://sites.google.com/a/capimelefante.org/www/home>>. Acesso em: 17 jan. 2013a.

MAZZARELLA, V. N. G. **CAPIM-ELEFANTE COMO FONTE DE ENERGIA NO BRASIL: REALIDADE ATUAL E EXPECTATIVAS** Rio de Janeiro IPT, , 2012b.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass (part 3): Gasification technologies** Bioresource Technology, 2002.

MELILLO, J.; MCGUIRE, A.; KICKLIGHTER, D. Global climate change and terrestrial net primary production. **Nature**, v. 363, p. 234–240, 1993.

MILNE, T. A.; ELAM, C. C.; EVANS, R. J. **Hydrogen from Biomass State of the Art Research Challenges**. Golden, CO USA: [s.n.]. Disponível em: <http://ieahia.org/pdfs/hydrogen_biomass.pdf>.

MMA/UFP. **Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil**. Brasília: Ministerio de Medio Ambiente do Brasil, 2007.

MME; EPE. **Balanço Energético Nacional** Ministério de Minas e Energia, Brasília. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2013.

MOLINO, A. et al. Electricity production by biomass steam gasification using a high efficiency technology and low environmental impact. **Fuel**, v. 103, p. 179–192, 2013.

MORAIS, R. **Potencial produtivo e eficiência da fixação biológica de nitrogênio de cinco genótipos de capim-elefante (Pennisetum purpureum Schum.), para uso como**. [s.l.] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2008.

MORAIS, R.; SOUZA, B.; LEITE, J. Elephant grass genotypes for bioenergy production by direct biomass combustion. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, n. 1, p. 133–140, 2009.

MÜLLER, M. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba, MG**. [s.l.] Universidade de Viçosa, 2005.

NICODEMO, M. Dinâmica da água em sistemas agroflorestais. **Embrapa Pecuária Sudeste**. ..., v. 102, p. 36, 2011.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, n. 6, p. 653–669, 2004.

OLIVEIRA, E. B. DE. **Softwares para manejo e análise econômica de plantações florestais** Embrapa Documentos 216 Colombo, PREmbrapa, , 2010a. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/39886/1/Doc216.pdf>>

OLIVEIRA, E. B. DE. **Softwares para manejo e análise econômica de plantações florestais** Embrapa, , 2010b.

Oracle Crystal Ball. Disponível em: <<http://www.oracle.com/br/products/applications/crystalball/overview/index.html>>. Acesso em: 16 fev. 2016.

ORAL, M. E-DEA: Enhanced data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 207, n. 2, p. 916–926, 2010.

Ormat Technologies Inc. Disponível em: <<http://www.ormat.com/>>. Acesso em: 10 dez.

2013.

PANTALEO, A. M.; CAMPOREALE, S. M.; SHAH, N. Thermo-economic assessment of externally fired micro-gas turbine fired by natural gas and biomass: Applications in Italy. **Energy Conversion and Management**, v. 75, p. 202–213, 2013.

PIKETTY, M.-G. et al. Assessing land availability to produce biomass for energy: The case of Brazilian charcoal for steel making. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 2, p. 180–190, fev. 2009.

PORTA CASANELLAS, J. **Introducción a la edafología: uso y protección del suelo**. España: Mundi-Prensa, 2008.

PORTNOFF, M. A. **Can Energy Crops Grown on Slopes Replace Erosion Intensive Food Crops ?** (Woodrow Wilson International Center for Scholars, Ed.) Environmental Vulnerability in Haiti. **Anais...** Wasington D.C.: USAID, 2006

PRITCHARD, D. Biomass fuelled indirect fired micro turbine. **DTI URN**, 2005.

QIU, G.; LIU, H.; RIFFAT, S. Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 16, p. 3301–3307, nov. 2011.

QUESADA, D. et al. **Parâmetros Qualitativos de Genótipos de Capim Elefante (Pennisetum purpureum Schum.) estudados para a produção de energia através da Biomassa**. Circular T ed. Seopédica: Embrapa, 2004.

QUIRINO, W. F. et al. Calorific Value of Wood and Wood Residues. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 173–182, 2004.

QUOILIN, S. et al. Thermo-economic optimization of waste heat recovery Organic Rankine Cycles. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 14-15, p. 2885–2893, out. 2011.

QUOILIN, S. et al. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 168–186, jun. 2013.

QUOILIN, S.; DECLAYE, S.; LEMORT, V. **Expansion Machine and Fluid Selection for the Organic Rankine Cycle**. Hefat 2010. **Anais...** Antalya, Turkey: 2010

RAMALHO F., A.; CHARLET P., L. **Aptidão Agrícola das Terras do Brasil**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes/pdfs/documentos_1_1999_aptidao_brasil.pdf>.

REDEAGRO. **Uso da Terra no Brasil** Redeagro, , 2012. Disponível em: <http://www.redeagro.org.br/images/stories/uso_da_terra_no_brasil.pdf>

REICHARDT, K. **Processos de Transferência no SISTEMA SOLO-PLANTA-ATMOSFERA**. 4a. ed. Piracicaba, Brasil: Fundação Cargill, 1985.

REN, J. et al. Determining the life cycle energy efficiency of six biofuel systems in China: A Data Envelopment Analysis. **Bioresource Technology**, v. 162, p. 1–7, 2014.

RENDEIRO, G. et al. Combustão e gasificação de biomassa sólida. In: BARRETO, E. J. (Ed.). **... de Minas e Energia** Brasília: Ministério de Minas e Energia do Brasil, 2008.

RIVA, G.; FOPPAPEDRETTI, E.; DE CAROLIS, C. Biomass Energy. In: **Handbook on Renewable Energy Sources**. Bulgaria: ENERSUPPLY, 2012. p. 12–38.

ROGER Q., L. et al. PRODUCTION COST OF BIOMASSES FROM EUCALYPTUS AND ELEFANT GRASS FOR ENERGY. **Cerne**, v. 17, n. 3, p. 417–426, 2011.

RUA OROZCO, D. J. et al. **ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DO CICLO RANKINE ORGÂNICO PARA A GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE BIOMASSA UTILIZANDO O METODO DE MONTE-CARLO** VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica São Luis de Maranhão, Brasil., 2012.

SAE. **Diretrizes para a Estruturação de uma Política Nacional de Florestas Plantadas**. Brasília: [s.n.].

SAGE, R.; MONSON, R. **C4 plant biology**. USA: Academic Press, 1998.

SALGADO, E. Capitulo 1. Agua en el Suelo. In: **Realación Suelo Agua Planta**. Valparaíso: Ediciones Universitarias de Valparaíso, 2001. p. 13–21.

SAXENA, R. C. et al. Thermo-chemical routes for hydrogen rich gas from biomass: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 7, p. 1909–1927, set. 2008.

SCHLAMADINGER, B.; MARLAND, G. The role of forest and bioenergy strategies in the global carbon cycle. **Biomass and Bioenergy**, v. 10, n. 95, p. 275–300, 1996.

SCHUSCHNY, A. **Método DEA y su aplicación al estudio del sector energético y las emisiones de CO2 en América Latina y el Caribe**. Santiago de Chile: Naciones Unidas, 2007.

SCOLFORO, J. R. **O mundo do Eucalipto: os fatos e mitos de sua cultura**. Rio de Janeiro: Mar de Idéias, 2008.

SHU, G. et al. Alkanes as working fluids for high-temperature exhaust heat recovery of diesel engine using organic Rankine cycle. **Applied Energy**, v. 119, p. 204–217, 2014.

SIDDIQI, M. A.; ATAKAN, B. Alkanes as fluids in Rankine cycles in comparison to water, benzene and toluene. **Energy**, v. 45, n. 1, p. 256–263, 2012.

SILVA, E. DA. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA BIOMASSA CULTIVADA PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA: Estudo Comparativo entre Capim Elefante e Eucalipto com a incorporação da Energia Solar na Secagem**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2012.

SILVA DE CASTRO, J. **Plantio de Eucalipto com Responsabilidade Ambiental**. Viçosa: Editora UFV, 2008.

SILVA, E. et al. Biomassa in Natura: Combustão e Acionadores Primários. In: SILVA L., E. E.; VENTURINI, O. J. (Eds.). . **Biocombustíveis**. Primera ed. Río de Janeiro: Editora Interciencia, 2012. p. 47–172.

SILVA L., E. E.; QUINTERO B., Q. R.; ESCOBAR P., J. C. Generación de energía eléctrica con biomasa. In: RINCÓN M., J. M.; SILVA L., E. E. (Eds.). . **Bioenergía: fuentes, conversión y sustentabilidad**. Primera Ed ed. Bogotá D.C: Red Iberoamericana de Bioenergía, 2015. p. 247–274.

SILVA L., E. E. et al. Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade

e biocombustíveis. In: SILVA L., E. E.; VENTURINI, O. J. (Eds.). . **Biocombustíveis**. Rio de Janeiro: Editoria Interciencia, 2012. p. 411–498.

SIMS, R. E. H. Biomass, Bioenergy and Biomaterials: future prospects. In: **Biomass and Agriculture: sustainability, markets and policies**. Paris: OECD Publishing, 2004.

SMEETS, E. M. .; LEMP, D.; DEES, M. **Methods & Data Sources for Biomass Resource Assessments for Energy**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.eu-bee.info>.

SOARES DE MELLO, J. C. C. B. et al. **Curso de Análise Envolvente de Dados** Pesquisa Operacional e o Desenvolvimento Sustentável. **Anais...**2005

STASSEN, H. M. Strategies for upgrading producer gas from fixed bed gasifier systems to internal combustion engine quality. In: R.G. GRAHAM (Ed.). . **Biomass Gasification – Hot gas cleanup**. [s.l.] IEA, 1993.

STYLES, D.; JONES, M. **Energy crops in Ireland: An assessment of their potential contribution to sustainable agriculture, electricity and heat production... Report. Johnstone Castle, Wexford, Ireland**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://testweb.epa.ie/pubs/reports/research/econ/styles_report_ertdi_70_for_web1.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2013.

SULTANA, A.; KUMAR, A.; HARFIELD, D. Development of agri-pellet production cost and optimum size. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 14, p. 5609–5621, 2010.

TCHANCHE, B. F. et al. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles - A review of various applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 8, p. 3963–3979, 2011.

TEAGASC; AFBI. **MISCANTHUS BEST PRACTICE GUIDELINES**. Northern Ireland: [s.n.].

TELMO, C.; LOUSADA, J. Heating values of wood pellets from different species. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 2634–2639, 2011.

TEMITOPE A, M. P. **Financing Risks in Large-Scale Biomass Projects Financing Risks in Large-Scale Biomass Projects**. [s.l.] Wageningen University, 2007.

Turboden. Disponível em: <<http://www.turboden.eu/en/home/index.php>>. Acesso em: 10 dez. 2012.

TWIDELL, J.; WEIR, T. **Renewable Energy Resources**. Abingdon, UK: Taylor & Francis, 1986.

USDA. *Pennisetum purpureum*. In: FRANCIS, J. (Ed.). . **Wildland Shrubs of the United States and its Territories: Thamnic Descriptions**. [s.l.] U.S. Department of Agriculture, Forest Service International Institute of Tropical Forestry and Shrub Sciences Laboratory, 2012. v. 56.

USDA/NRCS. **Keys to Soil Taxonomy**. Wasington D.C.: [s.n.]. Disponível em: <ftp://ftp-fc.sc.egov.usda.gov/NSSC/Soil_Taxonomy/keys/2010_Keys_to_Soil_Taxonomy.pdf>.

VAN SPRONSEN, J. et al. Separation and recovery of the constituents from lignocellulosic biomass by using ionic liquids and acetic acid as co-solvents for mild hydrolysis. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 50, n. 2, p.

196–199, fev. 2011.

VANSLAMBROUCK, B.; VANKEIRSBILCK, I. Turn waste heat into electricity by using an Organic Rankine Cycle. **Proceedings of 2nd ...**, p. 1–14, 2011.

VILELA, H. **Agronomia: o portal da Ciência e Tecnologia**. Disponível em: <http://www.agronomia.com.br/conteudo/artigos/artigos_producao_de_briquete_de_capim_el_efante.html>.

VITAL, M. Impacto ambiental de florestas de eucalipto. **Revista do BNDES, Rio de Janeiro**, p. 235–276, 2007.

VUB, SEGHERS BETTER TECHNOLOGY, D. **A FLUIDIZED BED AIR BIOMASS GASIFICATION CHP PLANT WITH AN EXTERNALLY FIRED EVAPORATIVE GAS TURBINE CYCLE**, 1992. Disponível em: <http://ec.europa.eu/energy/res/sectors/doc/bioenergy/gasification/027bm_367_92.pdf>

WELCH, P.; BOYLE, P. New Turbines to Enable Efficient Geothermal Power Plants. **Geothermal Resources Council Transactions**, v. 33, p. 765–772, 2009.

WEST, H. H.; PATTON, J. M.; STARLING, K. E. **SELECTION OF WORKING FLUIDS FOR THE ORGANIC RANKINE CYCLE** First Industrial Energy Technology Conference Houston. **Anais...**Houston: 1979

WILSON, S. S. Discussion on “selecting a working fluid for a Rankine-cycle engine”. **Applied Energy**, v. 24, n. 1, p. 65–68, 1986.

WNA. **Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources**. London: [s.n.]. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/uploadedFiles/org/WNA/Publications/Working_Group_Reports/comparison_of_lifecycle.pdf>.

WRIGHT, C. T. et al. A Review on Biomass Densification Technologies for Energy Application Jaya Shankar Tumuluru. n. August, p. 96, 2010.

WSK Kehl. Disponível em: <<http://www.wsk-group.com./>>. Acesso em: 10 dez. 2012.

WU, C. Z. et al. An economic analysis of biomass gasification and power generation in China. **Bioresource technology**, v. 83, n. 1, p. 65–70, 2002.

YIM, R. et al. A study of the impact of project classification on project risk indicators. **International Journal of Project Management**, v. 33, n. 4, p. 863–876, 2015.

ZAMORANO, M. et al. A comparative study of quality properties of pelletized agricultural and forestry logging residues. **Renewable Energy**, v. 36, n. 11, p. 3133–3140, 2011.

ZANETTI, J. **Identificação de Genótipos de Capim-Elefante (Pennisetum purpureum Schumach.) de Alta Produção de Biomassa com Qualidade para Fins Energéticos**. [s.l.] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2010.

ZEGADA-LIZARAZU, W.; MONTI, A. Energy crops in rotation. A review. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 1, p. 12–25, jan. 2011.

ZHANG, L.; DAWES, W.; WALKER, G. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. **Water resources research**, v. 37, n. 3, p. 701–708, 9

mar. 2001.

ZHANG, Y.; FAN, Z.-P. An optimization method for selecting project risk response strategies. **International Journal of Project Management**, v. 32, n. 3, p. 412–422, 2014.

Zuccato Energia. Disponível em: <<http://www.zuccatoenergia.it/>>. Acesso em: 10 dez. 2012.