



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DO ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE DOUTORADO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**BIOMASSA FLORESTAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EM
SISTEMA DE PRODUÇÃO SILVIPASTORIL**

Sérgio Inácio Gomes

Maringá – PR – Brasil



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DO ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE DOUTORADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**BIOMASSA FLORESTAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EM
SISTEMA DE PRODUÇÃO SILVIPASTORIL**

Sérgio Inácio Gomes
Engenheiro Eletricista, FEJ, 1983
Mestre em Eng. Química, UEM, 2007
Orientador: Prof. Dr. Cid Marcos G. Andrade
Coorientador: Prof. Dr. Mauro Antonio S. S.
Ravagnani

**Tese submetida à Universidade
Estadual de Maringá, como parte
dos requisitos necessários à
obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia Química, área de
Desenvolvimento de Processos.**

Maringá – PR – Brasil
Maio de 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

G633b Gomes, Sérgio Inácio
Biomassa florestal para geração de energia em sistema de produção silvipastoril / Sérgio Inácio Gomes. -- Maringá, 2017.
92 f. : il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Cid Marcos Gonçalves Andrade.
Coorientador: Prof. Dr. Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2017.

1. Cogeração de energia - Simulação. 2. Análise termoeconômica. 3. Custo exergoeconômico. 4. Rendimento exergoeconômico. 5. Sistema silvipastoril. 6. Modelagem. I. Andrade, Cid Marcos Gonçalves, orient. II. Ravagnani, Mauro Antonio da Silva Sá, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

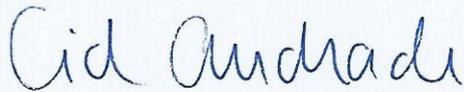
CDD 21.ed. 621.31

Mariza Nogami CRB 9/1569

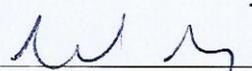
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE DOUTORADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Esta é a versão final da tese de Doutorado a ser apresentado por Sérgio Inácio Gomes perante a Comissão Julgadora do Curso de Doutorado em Engenharia Química em 02 de maio de 2017.

COMISSÃO JULGADORA



Prof. Dr. Cid Marcos Gonçalves Andrade
Orientador



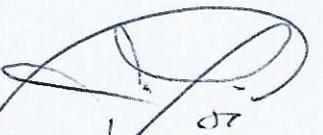
Prof. Dr. Mauro Antonio S. Sá Ravagnani
Coorientador



Prof. Dr. José Ozinaldo Alves de Sena
Membro



Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira
Membro



Prof. Dr. Ivan Crespo Silva
Membro



Prof. Dr. Marcos de Souza
Membro

AGRADECIMENTOS

Na minha modesta condição de “a-lumno”, que significa “sem luz”, sou grato a tantos e tantas que me ajudaram a iluminar o caminho a seguir para chegar ao final de um extenso trabalho com a sensação de “missão empreendida e missão cumprida”.

Em particular agradeço à minha família, que com sua persistente tolerância, compreensão e incentivo muito me ajudaram a chegar à conclusão desse trabalho, em especial à minha esposa, meus filhos e filhas, inclusive minha neta.

Um agradecimento especial ao Professor Dr. Cid Marcos G. Andrade, que não se limitou à condição tão somente de orientador, mas me incentivou inclusive a iniciar os primeiros estudos e ingressar no mestrado, há mais de 12 anos passados até concluir hoje o doutorado, de quem sempre recebi o apoio necessário, bem como também ao Professor Dr. Mauro Ravagnani pela excelente qualidade da orientação recebida.

Agradeço aos colegas Prof^a. Dr^a. Camila de Brito Miranda e Prof. Dr. Rafael Krummenauer pela ajuda de vocês e, aos demais colegas professores do curso de engenharia elétrica da UEM, bem como também aos companheiros/as do Sindicato dos Engenheiros pela amizade e convívio agradável.

Aos demais membros componentes da comissão examinadora da presente pesquisa, por aceitarem prontamente o convite ao desafio de avaliarem meu trabalho com dedicação e profissionalismo.

Aos colegas, Prof. Dr. Erci Marcos Del Quiqui Campus Umuarama – UEM, Eng. Florestal Erni Libberger e ao Zootecnista João Batista Barbi, ambos da Emater, entre diversos outros profissionais das ciências agrárias ou outras especialidades que contribuíram com informações que foram úteis para a elaboração do presente trabalho.

Expresso a todos e todas minha gratidão.

LISTA DE TABELAS:

Tabela 1 – Objetivos e premissas da simulação dos estudos de casos a serem avaliados

Tabela 2 – Grandezas constantes do processo caso 1

Tabela 3 – Características silviculturais médias para o estudo de caso 1

Tabela 4 – Variáveis do processo para o estudo de caso 1

Tabela 5 – Influência da variação de parâmetros no custo exergoeconômico no estudo de caso 1

Tabela 6 – Grandezas constantes do processo no caso 2

Tabela 7 – Características silviculturais para o estudo de caso 2

Tabela 8 – Variáveis do processo para o estudo de caso 2

Tabela 9 – Influência da variação de parâmetros no custo exergoeconômico no estudo de caso 2

Tabela 10 – Grandezas constantes do processo

Tabela 11 – Características silviculturais para o estudo de caso 3

Tabela 12 – Variáveis do processo para o estudo de caso 3

Tabela 13 – Influência da variação de parâmetros no dimensionamento da termoelétrica no estudo de caso 3

Tabela 14 – Influência da variação de parâmetros no custo exergoeconômico no estudo de caso 3

Tabela 15 – Grandezas constantes do processo no caso 4

Tabela 16 – Influência da variação de parâmetros no dimensionamento da termoelétrica do estudo de caso 4

Tabela 17 – Influência da variação de parâmetros no custo exergoeconômico no estudo de caso 4

Tabela 18 – Grandezas constantes do processo para o caso 5

Tabela 19 – Influência da variação de parâmetros no custo exergoeconômico no estudo de caso 5

Tabela 20 – Grandezas constantes do processo para o caso 6

Tabela 21 – Características silviculturais para o estudo de caso 6

Tabela 22 – Variáveis do processo para o estudo de caso 6

Tabela 23 – Fluxos de massa e de energia da indústria em operação e do projeto de ampliação

Tabela 24 – Exergias do sistema de cogeração da indústria original e projetada

Tabela 25 – Variáveis consideradas no projeto original da indústria do estudo de caso 7

Tabela 26 – Variáveis consideradas no projeto de ampliação da indústria do estudo de caso 7

NOMENCLATURA:

Letras Latinas:

- A_p Grandeza matricial de ordem $1 \times n$ referente à distribuição de áreas do sistema silvipastoril em função de suas espécies, expressa em (*hectares*)
- B_f Grandeza matricial de ordem $1 \times n$ referente à taxa mássica média horária de biomassa florestal, expresso em (*kg/h*)
- B_{ft} Grandeza escalar referente à taxa mássica média horária global de biomassa florestal, expresso em (*kg/h*)
- C_{ap} Grandeza escalar referente à capacidade de carga do caminhão em (m^3)
- C_{bf} Grandeza escalar referente ao custo variável médio anual total para a disponibilização da biomassa florestal para o transporte proveniente da atividade silvipastoril, expresso em (*US\$/ano*)
- C_f Grandeza escalar referente ao custo fixo médio anual global para produção de energia, expresso em (*US\$/ano*)
- C_{fgEE} Grandeza escalar referente ao custo fixo médio anual devido atividades de *O&M* em função da capacidade instalada para geração de energia elétrica em sistema de cogeração, expresso em (*US\$/kW*)
- C_{fgH} Grandeza escalar referente ao custo fixo médio anual devido atividades de *O&M* em função da capacidade instalada para geração de energia térmica em sistema de cogeração, expresso em (*US\$/kW*)
- C_{fpEE} Grandeza escalar referente ao custo fixo médio anual global para produção de energia elétrica, expresso em (*US\$/ano*)
- C_{fpH} Grandeza escalar referente ao custo fixo médio anual global para produção de energia térmica, expresso em (*US\$/ano*)
- C_{iEE} Grandeza escalar referente ao custo médio anual do investimento no sistema de cogeração para geração de energia elétrica, expresso em (*US\$/ano*)
- C_{igEE} Grandeza escalar referente ao custo do investimento médio em capacidade instalada para a geração de energia elétrica em sistema de cogeração, expresso em (*US\$/kW*)

- C_{igH} Grandeza escalar referente ao custo do investimento médio em capacidade instalada para a geração de energia térmica em sistema de cogeração, expresso em $(US\$/kW)$
- C_{iH} Grandeza escalar referente ao custo médio anual do investimento no sistema de cogeração para geração de energia térmica, expresso em $(US\$/ano)$
- C_{pf} Grandeza escalar referente ao custo variável médio anual para a produção da biomassa florestal por área de cultivo da atividade monocultural de silvicultura, expresso em $(R\$/ha. ano)$
- C_{pfs} Grandeza escalar referente ao custo variável médio anual total para a produção da biomassa florestal proveniente da atividade silvipastoril, expresso em $(US\$/ano)$
- C_{rem} Grandeza escalar referente ao custo variável médio anual total para remuneração pelo uso da terra para atividade silvicultural, expresso em $(US\$/ano)$
- C_t Grandeza escalar referente ao custo variável médio anual total para o transporte da biomassa florestal, expresso em $(US\$/ano)$
- C_{tm} Grandeza escalar referente ao custo variável médio para o transporte da biomassa florestal por volume e distância, expresso em $(R\$/m^3.km)$
- C_{tot} Grandeza escalar referente ao custo total médio anual para produção de energia elétrica e térmica, expresso em $(US\$/ano)$
- C_v Grandeza escalar referente ao custo variável médio anual global para produção de energia elétrica e térmica, expresso em $(US\$/ano)$
- C_{vgEE} Grandeza escalar referente ao custo variável médio anual em função da geração de energia elétrica em sistema de cogeração, expresso em $(US\$/MWh)$
- C_{vgH} Grandeza escalar referente ao custo variável médio anual em função da geração de energia térmica em sistema de cogeração, expresso em $(US\$/MWh)$
- C_{vpEE} Grandeza escalar referente ao custo variável médio anual global para produção de energia elétrica em sistema de cogeração, expresso em $(US\$/ano)$
- C_{vpH} Grandeza escalar referente ao custo variável médio anual global para produção de energia térmica em sistema de cogeração, expresso em $(US\$/ano)$
- C_{xe} Grandeza escalar referente ao custo exergoeconômico ou custo tarifário médio anual do sistema integrado para produção de energia, expresso em $(R\$/kWh)$

- d_a** Grandeza matricial de ordem $1 \times n$ que representa as distâncias entre as árvores enfileiradas em renques, expressa em (m)
- D_b** Grandeza matricial de ordem $1 \times n$ referente à densidade básica em (g/cm^3)
- d_f** Grandeza matricial de ordem $1 \times n$ que representa as distâncias entre as fileiras de árvores em renques, expressa em (m)
- D_{med}** Grandeza escalar referente à distância média do campo à termoeétrica para o transporte da biomassa florestal, expresso em (km)
- D_r** Grandeza matricial de ordem $1 \times n$ que representa as distâncias entre os renques de árvores enfileiradas duplas, expressa em (m)
- E_{Eg}** Grandeza escalar referente à energia elétrica gerada anual, expressa em (MWh/ano)
- E_{ga}** Grandeza escalar referente à energia térmica primária anual gerada na saída do ciclo térmico, expressa em (MWh/ano)
- E_{Hg}** Grandeza escalar referente à energia térmica gerada anual, expressa em (MWh/ano)
- E_{xga}** Grandeza escalar referente à exergia total gerada anual, expressa em (MWh/ano)
- E_{xibm}** Grandeza escalar referente à taxa de exergia média global disponibilizada pela biomassa florestal em base úmida à entrada do ciclo térmico, expresso em (MJ/kg)
- E_{xibs}** Grandeza matricial de ordem $1 \times n$ referente à taxa de exergia média oferecida por espécie de biomassa florestal em base seca à entrada do ciclo térmico, expresso em (MJ/kg)
- E_{xibu}** Grandeza matricial de ordem $1 \times n$ referente à taxa de exergia média oferecida por espécie de biomassa florestal em base úmida à entrada do ciclo térmico, expresso em (MJ/kg)
- e_{xw}** Grandeza escalar referente à exergia química da água líquida (~ 50 kJ/kg)
- F_a** Grandeza escalar adimensional entre zero e a unidade referente ao fator de fomento ao sistema silvipastoril, que representa o critério de remuneração pelo uso da terra de pastagem em relação ao valor típico do arrandamento da terra praticado na região
- F_c** Grandeza escalar adimensional entre zero e a unidade referente ao fator de carga ou fator de capacidade, que representa a relação entre a energia garantida em (MWh) e o produto da potência nominal em (MW) pelo tempo de operação do gerador em ($horas$)

- F_e Grandeza escalar adimensional referente ao fator espacial, que representa a expectativa de produtividade estimada de biomassa de um sistema silvipastoril em relação a de um sistema de silvicultura monocultural de referência
- F_s Grandeza matricial de ordem $1 \times n$ adimensional referente ao fator silvipastoril, que representa a perspectiva de produtividade de biomassa florestal em relação a distribuição espacial em relação a um sistema silvicultural de referência
- F_{bu} Grandeza matricial adimensional referente ao fator de multiplicação da relação entre a umidade e a exergia das espécies florestais
- F_u Grandeza matricial adimensional da relação entre a umidade e a exergia das espécies florestais
- I_{ma} Grandeza matricial de ordem $1 \times n$ referente ao incremento médio anual de biomassa florestal, expresso em $(m_{sólido}^3/ha.ano)$
- L Grandeza escalar referente à entalpia de vaporização da água, expresso em (MJ/kg)
- n Dimensão de colunas das matrizes de características das espécies do sistema silvipastoril pretendido
- N_a Grandeza matricial de ordem $1 \times n$ que representa a densidade de árvores por área, expressa em $(unidades/ha)$
- N_{aref} Grandeza escalar referente ao número de árvores por área de um sistema silvicultural de referência, expressa em $(unidades/ha)$
- P_{bref} Grandeza matricial referente à produtividade mássica total de biomassa florestal em base úmida de um sistema silvicultural de referência, expressa em (ton/ha)
- P_{ciB} Poder calorífico inferior da biomassa em base seca, expresso em (MJ/kg)
- P_{cibs} Grandeza matricial de ordem $1 \times n$ referente ao poder calorífico inferior médio da espécie de biomassa florestal em base seca, expresso em (MJ/kg)
- P_{cibu} Grandeza matricial de ordem $1 \times n$ referente ao poder calorífico inferior médio da espécie de biomassa em avaliação em base úmida, expresso em (MJ/kg)
- P_{csbs} Grandeza matricial de ordem $1 \times n$ referente ao poder calorífico superior médio da espécie de biomassa florestal em base seca, expresso em (MJ/kg)
- P_{ei} Grandeza escalar referente à potência efetiva média de entrada do ciclo térmico, expresso em (MW)

- P_{es} Grandeza escalar referente à potência efetiva média de saída do ciclo térmico (mecânica e térmica), expresso em (MW)
- P_{esEE} Grandeza escalar referente à potência elétrica efetiva média obtida na saída do gerador, expresso em (MW)
- P_{esH} Grandeza escalar referente à potência térmica efetiva média obtida na saída do ciclo térmico, expresso em (MW)
- \mathbf{P}_{mf} Grandeza matricial de ordem $1 \times n$ referente à produtividade mássica média anual de biomassa florestal em base seca projetada para o arranjo silvipastoril proposto, expresso em (ton/ano)
- P_{mft} Grandeza escalar referente à produtividade mássica média anual global de biomassa florestal em base úmida projetada para o arranjo silvipastoril proposto, expresso em (ton/ano)
- P_n Grandeza escalar referente à potência nominal da geração (potência instalada), expressa em (MW)
- \mathbf{P}_{vf} Grandeza matricial de ordem $1 \times n$ referente à produtividade volumétrica média anual de biomassa florestal projetada ao arranjo silvipastoril proposto, expresso em (m^3/ano)
- P_{vft} Grandeza escalar referente à produtividade volumétrica média anual global de biomassa florestal projetada ao arranjo silvipastoril proposto, expresso em (m^3/ano)
- R_{em} Grandeza escalar referente ao custo variável médio anual para remuneração pelo uso da terra por área de cultivo para atividade silvicultural, expresso em ($R\$/ha.ano$)
- \mathbf{R}_{ex} Grandeza matricial adimensional de ordem $1 \times n$ referente à relação de exergia específica por espécie de biomassa florestal em base seca
- \mathbf{T}_{cref} Grandeza matricial referente ao tempo de permanência de uma plantação até a colheita de um sistema silvicultural de referência, expressa em ($anos$)
- T_{di} Grandeza escalar referente ao tempo de depreciação do investimento em ($anos$)
- T_f Grandeza escalar referente à temperatura final da água, expresso em (K)
- T_i Grandeza escalar referente à temperatura inicial da água, expresso em (K)
- T_{oa} Grandeza escalar referente ao tempo de operação anual previsto, expresso em ($horas$)

U_{bu} Grandeza matricial referente à umidade percentual da biomassa florestal em base úmida, expresso em (%)

$U_{\$}$ Grandeza escalar referente à cotação da moeda de referência “dólar” em relação à moeda nacional (R\$), expresso em (R\$/US\$)

Letras Gregas:

η_{cog} Grandeza escalar referente ao rendimento energético percentual do sistema de cogeração, expresso em (%)

η_{EE} Grandeza escalar referente ao rendimento energético percentual do processo termoeletrico, expresso em (%)

η_{pcog} Grandeza escalar referente ao rendimento energético percentual ponderado adotado por critérios econômicos ou políticos por agentes públicos para avaliação da eficiência energética de sistemas térmicos, expresso em (%)

ψ_{cog} Grandeza escalar referente ao rendimento exergetico percentual do sistema de cogeração, expresso em (%)

ψ_{xcog} Grandeza escalar referente ao rendimento exergoeconomico do sistema de cogeração, expresso em (kWh/US\$)

BIOMASSA FLORESTAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EM SISTEMA DE PRODUÇÃO SILVIPASTORIL

AUTOR: Sérgio Inácio Gomes

ORIENTADORES: Prof. Dr. Cid Marcos Gonçalves Andrade

COORIENTADOR: Prof. Dr. Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá; Av. Colombo, 5790, BL D90; CEP: 87020-900 – Maringá – PR, Brasil; Defendida em 02 de Maio de 2017. 158p.

RESUMO: Os sistemas silvipastoris são caracterizados pela associação entre cultivos arbóreos, pastagens e animais e podem também constituir-se em um meio eficiente e sustentável de suprimento de biomassa florestal para fins energéticos como a geração de energia elétrica, mecânica e térmica. Trata-se de uma alternativa energética não convencional e a avaliação do potencial energético oferecido por esse sistema produtivo depende de diversos fatores, como as técnicas de manejo, espécies florestais, características do sistema silvipastoril e o dimensionamento do processo de conversão e de utilização energética. A energia gerada e seus custos também dependem de diversos fatores, tais como a demanda térmica e características tecnológicas de sua utilização e os custos de produção. Neste contexto, desenvolveu-se um modelo matemático para determinar a eficiência econômica de um sistema de produção silvipastoril integrado a um sistema de cogeração para produção da energia térmica, mecânica e elétrica. Foram realizados sete estudos de caso com características diferentes para verificar a aplicabilidade do modelo proposto. Os resultados obtidos mostraram que os custos exergoeconômicos variaram entre $0,07 R\$/kWh$ e $0,15 R\$/kWh$. Pode-se concluir que estes resultados são muito vantajosos em relação às modalidades convencionais de geração de energia, levando em conta os preços da energia elétrica praticados no mercado.

Palavras-chave: cogeração de energia; análise termoeconômica; custo exergoeconômico; rendimento exergoeconômico; sistema silvipastoril, modelagem, simulação.

FORESTRY BIOMASS FOR ENERGY GENERATION IN SILVIPASTORIL PRODUCTION SYSTEM

AUTHOR: Sérgio Inácio Gomes

SUPERVISOR: Prof. Dr. Cid Marcos Gonçalves Andrade

COSUPERVISOR: Prof. Dr. Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani

Doctoral Thesis; Chemical Engineering Post-Graduate Program; State University of Maringá; Av. Colombo, 5790, BL D90; CEP: 87020-900 900 – Maringá – PR; Defended on 2th May 2017. 158p.

ABSTRACT: The silvipastoral systems are characterized by the association between tree crops, pastures and animals and can also constitute an efficient and sustainable means of supplying forest biomass for energy purposes such as electric, mechanical and thermal energy generation. It is an unconventional energy alternative and the evaluation of the energy potential offered by this productive system depends on several factors, such as management techniques, forest species, silvipastoral system characteristics and the design of the conversion and energy utilization process. The energy generated and its costs also depend on several factors, such as the thermal demand and technological characteristics of its use and the costs of production. An exergetic analysis was performed and economic values were attributed to the energetic quantities offered by the process to obtain the exergoeconomic cost to analyze the economic viability of the silvipastoral system for the production of forest biomass integrated to the cogeneration system. In the present work a mathematical model was developed to determine the economic efficiency of a silvipastoral production system integrated to a cogeneration system for the production of thermal, mechanical and electrical energy. Seven case studies with different characteristics were carried out to verify the applicability of the proposed model. The results showed that the exergoeconomic costs varied between $0.07 R\$/kWh$ and $0.15 R\$/kWh$. It can be concluded that these results are very advantageous in relation to the conventional modalities of energy generation, taking into account the electricity prices practiced in the market.

Keywords: cogeneration of energy, thermoeconomic analysis, exergoeconomic cost, exergoeconomic efficiency, silvipastoral system, modeling, simulation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Sistemas Silvipastoris	3
<i>2.1.1. Arranjo espacial em sistema silvipastoril</i>	5
2.2. Fundamentos da termodinâmica e termoeconomia	7
<i>2.2.1. Análise exergética</i>	7
<i>2.1.1. Termoeconomia</i>	8
<i>2.1.2. Sistema de cogeração</i>	9
3. METODOLOGIA	10
3.1. Balanço de massa	12
<i>3.1.1. Densidade de árvores no sistema silvipastoril</i>	12
<i>3.1.2. Fator silvipastoril</i>	12
<i>3.1.3. Incremento médio anual da biomassa florestal</i>	13
<i>3.1.4. Produção mássica média anual</i>	13
<i>3.1.5. Produtividade volumétrica matricial do sistema silvipastoril</i>	13
<i>3.1.6. Taxa mássica média por espécie florestal</i>	14
3.2. Balanço de energia	14
<i>3.2.1. Exergia específica da biomassa florestal em base seca</i>	14
<i>3.2.2. Exergia específica da biomassa em base úmida</i>	15
<i>3.2.3. Exergia média de entrada em base úmida</i>	15
<i>3.2.4. Potência efetiva de entrada do processo termoelétrico</i>	15
<i>3.2.5. Potência efetiva de saída do processo termoelétrico</i>	16
<i>3.2.6. Potência da geração de eletricidade</i>	16
<i>3.2.7. Potência efetiva da geração térmica</i>	16
<i>3.2.8. Energia elétrica e térmica médias anual geradas</i>	17
<i>3.2.9. Rendimento exergético do sistema de cogeração</i>	17
<i>3.2.10. Energia média gerada anual</i>	17
<i>3.2.11. Exergia média gerada anual</i>	17
3.3. Balanço termoeconômico	18
<i>3.3.1. Custos fixos do sistema</i>	18
<i>3.3.2. Custos variáveis do sistema</i>	19
<i>3.3.3. Custo total do sistema</i>	20

3.3.4. <i>Rendimento exergoeconômico</i>	21
3.3.5. <i>Custo exergoeconômico</i>	21
3.4. Considerações	21
3.4.1. <i>Considerações com relação ao balanço de massa</i>	21
3.4.2. <i>Considerações com relação balanço de energia</i>	24
3.4.2.1. <i>Considerações sobre a potência elétrica e térmica geradas</i>	26
3.4.3. <i>Considerações com relação a balanço termoeconômico</i>	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1. Estudo de caso 1	31
4.2. Estudo de caso 2	34
4.3. Estudo de caso 3	36
4.4. Estudo de caso 4	40
4.5. Estudo de caso 5	44
4.6. Estudo de caso 6	47
4.7. Estudo de caso 7	48
4.8. Discussão sobre os estudos de casos	52
5. CONCLUSÃO	56
6. REFERÊNCIA	57
7. ANEXOS	72

1. INTRODUÇÃO

Os procedimentos de produção e uso dos recursos energéticos são o centro das preocupações do mundo contemporâneo, que exige o estabelecimento de uma relação mais harmoniosa entre as questões relacionadas ao clima, energia, meio-ambiente e a sociedade (Li, et al., 2015).

A biomassa de origem florestal é um recurso renovável em potencial, que pode ser planejada e utilizada como uma alternativa energética em vista da necessidade da diversificação da matriz energética (Goerndt, et al., 2013).

Segundo o trabalho desenvolvido por Lauri et al. (2013), estima-se que em 2050 até 14% da energia primária consumida mundialmente poderá ser suprida pela biomassa florestal, excluindo toda biomassa florestal proveniente de florestas nativas, desde que desenvolvam modelos de produção que sejam ambientalmente, tecnicamente e economicamente viáveis.

Coerente com os cenários das tendências futuras do setor energético e de seu planejamento, o sistema silvipastoril é uma modalidade agroflorestal de grande potencial (Fey, Malavasi, & Malavasi, 2015). De acordo com Nepomuceno et al. (2007), os sistemas silvipastoris são sistemas agroflorestais caracterizados pela associação de cultivos arbóreos, pastagens e animais, constituindo um meio eficiente de promover o uso sustentável da terra.

De acordo com Chakravarty et al. (2012) a atividade pecuária comercial é o principal fator de desmatamento no mundo, com vários impactos ambientais e sociais negativos. A restauração florestal, por outro lado, pode aumentar a produtividade e a fertilidade do solo (Stark, et al., 2015). Pode também melhorar a infiltração da água e seu fluxo preferencial de escoamento, uma vez que as árvores no sistema de pastagem reduzem o escoamento superficial diante de maiores intensidades de chuvas (Benegas, et al., 2014). Tornando o sistema silvipastoril uma modalidade de elevado interesse.

Muitos estudos têm demonstrado os benefícios ambientais e econômicos que podem ser obtidos com a utilização dos sistemas silvipastoris na atividade agropecuária. Joele et al. (2016) avaliaram os impactos dos sistemas de arborização de pastagens na atividade pecuária em relação à qualidade da carne (Joele, et al., 2017). Outros estudos analisaram os estoques de carbono (Mcgroddy, et al., 2015), à qualidade do solo (Martínez, et al., 2014) e à influência de pastoreio na decomposição de tocos e raízes de árvores (Mancilla-Leytón, et al., 2013) entre outros.

Desta forma, os sistemas silvipastoris possuem maior biodiversidade e oferecem mais serviços ambientais quando comparados aos sistemas da pecuária convencional. Pode

também oferecer benefícios ambientais e econômicos com a adição de um sistema de produção sustentável de biomassa florestal e geração de renda aos agricultores (Knowles, 1991).

Guerreiro et al. (2015) observaram em seu trabalho a vulnerabilidade de variedades de eucalipto com relação a predação pelo gado. Os autores estudaram dez variedades de eucalipto e concluíram que algumas delas são menos propensas aos danos analisados. Concluíram que o sistema silvipastoril é aplicável, porém exige uma avaliação da biomassa de origem florestal que pretende-se cultivar.

O trabalho realizado por Fahlvik et al. (2014) realizou-se simulações com diferentes sistemas silvipastoris com objetivo de avaliar o crescimento florestal desses sistemas, podendo assim possibilitar melhor planejamento (Fahlvik, et al., 2014). O trabalho desenvolvido por Borges et al. (2014) utilizou-se de diferentes métodos de simulações para avaliar os chamados “efeitos de borda” em problemas de planejamento florestal. O trabalho elaborado por Temesgen et al. (2015) propôs simulações para estimar a produtividade potencial de biomassa florestal.

Estudos também mostram que a configuração da plantação de árvores possui uma interação com o ambiente gerando impactos na produtividade, nas características ambientais e no solo, tais como em suas propriedades hidrológicas (Lunka, et al., 2016).

Nota-se disponíveis na literatura uma variedade de trabalhos direcionados ao estudo de sistemas silvipastoris, mostrando assim o interesse por parte pesquisados em avaliar e assim aperfeiçoar essa modalidade de cultivo de biomassa florestal integrado a agropecuária. Neste contexto, esse trabalho tem como finalidade desenvolver um modelo matemático capaz de fazer a avaliação termoeconômica de um sistema silvipastoril para fins energéticos. Para o desenvolvimento do trabalho serão considerados fatores de custos e características produtivas dos sistemas silvipastoris, apropriados para a região do Arenito Caiuá, noroeste do Estado do Paraná, Brasil. Ressalta-se que o sistema proposto engloba o sistema silvipastoril somado ao processo de cogeração em que utiliza-se como matéria-prima a biomassa de origem florestal. O modelo matemático desenvolvido foi aplicado para sete estudos de casos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sistemas Silvistoris

Um sistema silvistoril é uma modalidade do sistema chamado “agroflorestal” aplicada à atividade pecuária. Ou seja, o consórcio entre pastagens e árvores, sendo que todos os tipos de arranjos produtivos que fogem das monoculturas se aproximam do ambiente sustentável de acordo com os princípios da agroecologia como Altieri (1999) e Perry (2008).

De acordo com Barrett et al. (2013), os sistemas silvistoris são de grande importância para restabelecer os serviços do ecossistema original das terras amazônicas convertidas em pastagens.

Da Silva et al. (2010) pesquisaram os efeitos do ambiente arborizado com o sistema silvistoril em função de variáveis microclimáticas. Os autores comprovaram as melhorias na qualidade do microclima e do conforto térmico animal com a redução na carga térmica média de 26% comparado com o ambiente ensolarado e monocultura de gramíneas.

Segundo Bernardino e Garcia, (2010), as pesquisas com sistemas silvistoris foram iniciadas no final da década de 1970 e as vantagens advindas de um sistema silvistoril são inúmeras e devidamente reconhecidas. Os autores destacam que apesar dos grandes avanços no conhecimento de culturas anuais e dos componentes arbóreos, principalmente o eucalipto e gramíneas forrageiras (tolerantes à diminuição da intensidade luminosa) ainda é necessário se conhecer melhor o manejo do sub-bosque sob os efeitos do pastejo.

Com a preocupação em avaliar os efeitos e impactos do uso dos solos agrícolas causam nos recursos hídricos Mello et al. (2008) desenvolveram e aplicaram um modelo de simulação para a gestão de uma bacia hidrográfica para prever os impactos hidrológicos em decorrência de mudanças do uso da terra. As mudanças simuladas pelos autores foram feitas a partir da troca de áreas de pastagens convertidas em plantações de eucalipto avaliados em três cenários diferentes, concluindo que o escoamento hidrológico sofreu uma redução médio anual de até 17,8% devido aumento na taxa de evapotranspiração para o plantio de eucalipto.

Conforme aponta Mead e Pimentel (2006) quando o assunto é a tomada de decisão acerca de atividades silvicultoras para fins energéticos as definições críticas necessitam de estudos mais aprofundados do que normalmente são feitos, tais como avaliar o rendimento energético líquido por hectare quando envolve várias opções de silvicultura, tais como a diversidade de espécies florestais.

De acordo com Baliscei et al. (2013) os efeitos no microclima decorrente do sombreamento do sistema silvipastoril, apontou diversas vantagens e verificou que o referido sistema tornou o ambiente mais harmonioso, reduzindo as diferenças climáticas entre as estações e que, em relação ao bem estar animal, concluíram que o comportamento ingestivo de bovinos de corte foi alterado pelo sombreamento.

Segundo Bernardino et al. (2011) a fertilização do sub-bosque é eficiente e necessária para a intensificação do uso de sistemas integrados eucalipto-pastagem. Os autores avaliaram a produção de forrageira e o desempenho de bovinos de corte pastejando sub-bosque de um sistema silvipastoril.

De acordo com Azar et al. (2013) a atividade microbiana do solo é um importante componente que contribui para manutenção do ecossistema de pastagens e obteve como resultados a indicação de que o sistema silvipastoril favorece a biomassa e a referida atividade microbiana do solo. Além disso, a atividade decompositora é acelerada neste sistema.

De acordo com Limberger (2012), no solo estudado (argiloso vermelho distrófico latossólico), no sistema silvipastoril a disponibilidade hídrica diminui nas camadas de subsolo próximo ao renque de eucalipto e aumenta na camada superficial à distâncias maiores dos renques.

Xavier et al. (2011) utilizando métodos adequados de análise de nitrogênio no solo concluiu que a presença de leguminosas e de eucalipto em sistema silvipastoril proporcionou aumentos nas quantidades de nitrogênio com o incremento e produção de serapilheiras (deposição de matéria orgânica morta) na superfície do solo, que é rica em nitrogênio e contribui para a sustentabilidade das pastagens de braquiária a longo prazo.

Na mesma linha, Paciullo (2011), concluiu que os ajustes fenotípicos, em resposta à diminuição de luz, indicam que as forrageiras estudadas (braquiária) apresentam tolerância ao sombreamento moderado.

De acordo com Vieira e Oliveira Junior (1997), no planejamento energético é importante valorizar os fluxos exergéticos. Se a cultura do desperdício é a “fonte” geradora de resíduos florestais, a medida remediadora correta é combater a cultura do desperdício, mas valorizar o fluxo disponível de matéria prima, seja ela na forma biomassa residual ou de produção de biomassa florestal para se beneficiar do correto planejamento de aproveitamento energético disponibilizado pelo fluxo energético existente.

Em relação ao sequestro de carbono, Estrella et al. (2012) comparou a produtividade de matéria seca e a captura de carbono entre um sistema silvipastoril e um sistema tradicional

e concluiu que o sistema silvipastoril com variedades adequadas e o pastoreio de rotação favorecem a produção de matéria seca e a captura de carbono.

2.1.1. Arranjo espacial em sistema silvipastoril

Um sistema silvipastoril pode se constituir por diferentes arranjos espaciais arbóreos. É um fator de grande relevância quando pretende-se realizar estudos voltados para análises de sistemas silvipastoris, uma vez que está diretamente associado a produtividade da biomassa florestal, pastagem e criação de animais.

A avaliação da produtividade da biomassa em função do espaçamento ou disposição das árvores sem alterar a densidade dessas na área ocupada foi objeto de estudo de Ghezehei et al. (2015). Os autores concluíram que o chamado “efeito de borda” possui influência no crescimento da biomassa.

Naji et al. (2014) estudaram o efeito da densidade inicial de plantio e as características da árvore sobre o crescimento, densidade da madeira e propriedades anatômicas para a espécie florestal.

De acordo com a pesquisa de Rodrigues et al. (2014) é importante fazer a avaliação da influência do arranjo espacial do sistema silvipastoril no que se refere à quantidade e qualidade da luz e seus efeitos sobre a produção e composição química do pasto. Trata-se de um aspecto produtivo relevante para a atividade pecuária e comparou o efeito para um grupo de arranjos espaciais. Verificou que o espaçamento 3,0m x 2,0m ofereceu o maior incremento de produção de matéria seca, mas os espaçamentos mais densos ofereceram melhorias na composição das forrageiras.

Segundo Soares et al. (2009) que estudou a influência da luminosidade no comportamento de onze espécies forrageiras, a produção de matéria seca foi afetada negativamente pelo sombreamento, mas que, por outro lado, o teor de proteína bruta foi maior nas parcelas sombreadas em relação ao pleno sol. Os pesquisadores observaram também que, além da menor radiação, a velocidade do vento e a temperatura do solo nas parcelas sombreadas foram menores e que a produtividade de matéria seca das espécies forrageiras, respondem diferentemente ao sombreamento, sugerindo a aplicabilidade de determinadas espécies para utilização em ambiente silvipastoril, a exemplo da *Brachiaria brizantha* e *Axonopus catharinensis*.

Castilhos et al. (2010) fizeram avaliações acerca da produtividade de biomassa florestal e animal com testes de diferentes densidades arbóreas com a espécie florestal acácia-negra. Os autores observaram que o maior rendimento de madeira foi obtido com o

arranjo de 1667 árvores/ha. Eles verificaram também que, a partir do quinto ano, a produtividade foi a mesma para a densidade de 1000 árvores/ha. A produtividade animal teve maior índice com densidades menores, de 833 ou de 500 árvores/ha e recomendaram que, para a produção animal, que se adote o sistema silvipastoril com densidades de 1000 ou 833 árvores/ha.

Oliveira *et al.* (2010) pesquisou o desempenho silvicultural e produtivo de eucalipto sob diferentes arranjos espaciais em sistema silvipastoril. Os autores constataram que o volume de madeira por planta não mostrou diferença entre os arranjos até 18 meses. A partir de 27 meses, eles verificaram que quanto maior a área útil por árvore, maior o diâmetro à altura do peito, reforçando essa verificação com 38 meses em diante. Até quatro anos, os arranjos 3,33m x 2m; 3,33m x 3m e 5m x 2m são indicados para maior produção de madeira em termos quantitativos e os arranjos 10m x 3m e 10m x 4m, para produção de madeira com maiores dimensões.

Conforme Da Silva (2005), a escolha do espaçamento de plantio para uma determinada espécie em silvicultura (monocultura) é de alta relevância por condicionar a quantidade de recursos naturais disponíveis ao crescimento de cada árvore. Isto influencia as taxas de crescimento e sobrevivência das plantas e a produtividade de madeira por hectare, afetando as práticas de manejo e colheita e, conseqüentemente, os custos de produção florestal. O autor pesquisou o incremento médio anual de diferentes arranjos e estabeleceu escalas de redução na produção em função dos espaçamentos experimentados. Ele verificou que com o tempo de avaliações dendrométricas de 1 a 6 anos, a redução média na produção, (ao término de 6 anos) foram respectivamente de 10% e 18% para os espaçamentos de 10,5m² por planta (3 x 3,5m ou 6 x 1,75m) e de 15,0 m² por planta (3 x 5m ou 6 x 2,5m) em relação a produtividade média obtida pelo espaçamento de 6,0 m² por planta (3 x 2m ou 6 x 1m), o que representa valores de 212 m³/ha ao final da experimentação.

O efeito da densidade da madeira, o crescimento das árvores e as propriedades anatômicas da madeira foram estudados em função da densidade de plantio por Naji et al. (2014). Os autores avaliaram plantios com densidade de 500, 1000, 1500 e 2000 árvores por hectare de *Hevea brasiliensis* de 9 anos na Malásia. Concluíram que diversas características sofrem a influência do espaçamento de plantio e que, o comprimento do fuste foi significativamente aumentado com maiores densidades de plantio. De acordo com os resultados, recomenda-se baixa densidade de plantio (500 árvores por ha) para uma plantação de seringueira.

2.2. Fundamentos da termodinâmica e termoeconomia

2.2.1. Análise exérgica

A energia contida em um ciclo termodinâmico depende das propriedades da matéria e independe das propriedades do ambiente. Seus valores são diferentes de zero mesmo em equilíbrio com ambiente.

Define-se a eficiência energética de um ciclo termodinâmico como sendo a relação entre a energia convertida e a energia fornecida ao sistema. A avaliação energética de um ciclo termodinâmico tem como base a Primeira Lei da termodinâmica e do princípio da conservação de massa, que analisam os fluxos de matéria que entram e saem de um determinado volume de controle.

Segundo Costa (2013) para determinar a eficiência ou rendimento energético em um sistema aberto é necessário fazer o balanço de massa e o balanço de energia que entra e sai do volume de controle, constituindo o balanço térmico. No entanto, o balanço térmico não fornece os valores reais, uma vez que considera-se a conversão integral da energia sem que haja destruições energéticas.

O método exérgico, no entanto, permite analisar a qualidade do processo em que o calor se transforma em trabalho. Permite calcular as perdas energéticas, como a capacidade da realização de trabalho por parte do calor ou do vapor e descobrir suas causas. Com isso, pode-se propor métodos para correção ou eliminação dessas perdas, o que permite aumentar o rendimento exérgico e a eficiência de trabalho do processo.

Portanto, define-se a exergia como sendo o máximo trabalho útil possível de ser obtido por um fluxo de energia sob condições impostas pelo meio ambiente circundante. Segundo Tsatsaronis (1993) a exergia depende do estado do fluido que está sendo considerado e do estado do meio ambiente presente. A exergia de um sistema é definida como a máxima capacidade de trabalho que pode ser realizada pelos compostos do sistema em um ambiente de referência.

Destaca-se que a energia é conservada em qualquer sistema ou processo. A energia que entra no processo com o combustível, eletricidade, fluxo de matéria-prima, etc. pode ser calculada através da obtenção de produtos e subprodutos. A energia não pode ser destruída, enquanto a exergia pode ser destruída ou perdida de acordo com Moran e Sciubba (1994). A exergia incorpora conceitos da Primeira e da Segunda Lei da Termodinâmica, mas em sistemas reais, a exergia nunca é conservada. A análise de um processo ou sistema através do emprego simultâneo da primeira e da segunda Lei da Termodinâmica está, portanto,

associada ao conceito de exergia, ou eficiência, ou energia útil. De acordo com Moran & Sciubba (1994) é portanto a exergia e não a energia que pode ser valorizada como uma mercadoria.

Por meio da análise exérgica de uma unidade de potência, é possível caracterizar e quantificar quanto da exergia disponível devido à queima de um combustível primário é utilizada e destruída nos processos de conversão de energia. O cálculo do rendimento exérgico, é feito através da definição geral de rendimento, que relaciona o efeito útil em relação ao insumo consumido.

A análise exérgica baseia-se na avaliação da eficiência do processo de conversão energética com a minimização da geração de entropias, que são as perdas do processo ou das irreversibilidades. Matematicamente, a exergia pode ser representada pela soma de quatro tipos existentes, que são: exergia potencial, cinética, física e química. Trata-se de uma ferramenta útil com o propósito de promover o uso energético de forma mais eficiente considerando os recursos disponíveis.

2.2.2. Termoeconomia

Naturalmente, por uma simples análise etimológica, o radical “termo” deixa implícito o significado “calor” pela derivação grega e portanto, termoeconomia pode ser literalmente entendida como a combinação da análise de calor e de economia.

De acordo com Lozano e Valero (1993) a termodinâmica é incapaz de avaliar, por si só, as consequências econômicas dos processos de conversão energéticas e os conceitos econômicos somente, por outro lado, tais como recursos, instalações, eficiência e finalidade, também são insuficientes para dar uma explicação física ao custo de produção. A junção entre os conceitos econômicos e a teoria geral de sistemas de conversões energéticas que se fundamenta a chamada, “teoria do custo exérgico”, aplicável a qualquer tipo de processo produtivo, em especial quando o mesmo envolve conversões energéticas.

Conforme Tsatsaronis (1993) a expressão “termoeconomia” foi criada inicialmente para indicar uma adequada combinação da análise exérgica e econômica, na qual a característica principal desta análise consistia na distribuição dos custos para o conteúdo exérgico, e não o energético, em um fluxo de energia.

Nos fundamentos da assim chamada “termoeconomia” encontram-se as restrições que a segunda lei da termodinâmica impõe sobre o consumo de recursos de cada sistema produtivo.

Associado aos conceitos econômicos, a segunda lei da termodinâmica, é o método adequado para se identificar, alocar, quantificar e atribuir custos às causas de ineficiências dos processos que envolvem conversões energéticas.

Este método visa identificar as fontes de custos reais em seus componentes, que são: os custos de investimento de capital; os custos operacionais e de manutenção e os custos associados à destruição ou perda de exergia.

2.2.3. Sistema de cogeração

Segundo Dincer e Rosen (2013a) a cogeração pode ser definida como a produção simultânea de eletricidade e energia térmica. De acordo com os autores, a cogeração pode ser uma melhor eficiência energética quando comparada com as instalações convencionais de conversão de energia, uma vez que a energia térmica produzida é subutilizada ou pode ser melhor utilizada.

A definição de cogeração de energia, conforme consta na Resolução Normativa nº 235 de 14/11/2006 da ANEEL, que estabelece os requisitos para a qualificação de centrais termelétricas cogedoras de energia conceitua em seu Artigo 3º, o seguinte: “processo operado numa instalação específica para fins da produção combinada das utilidades calor e energia mecânica, essa geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária”.

3. METODOLOGIA

Como mencionado, propõe-se um sistema de geração de energia alternativa. Esse sistema envolve um sistema silvipastoril, em que a biomassa florestal desse sistema possa ser utilizada como combustível (matéria-prima) em um sistema de cogeração. Desenvolveu-se um modelo matemático com objetivo de avaliar a viabilidade termoeconômica do sistema proposto. Considerou-se desde o arranjo produtivo do manejo silvipastoril, suas características produtivas e econômicas, incluindo o preparo do solo, plantio e colheita, até a conexão à rede de distribuição de energia elétrica com os custos de planejamento, construção, interligação e transformação energética para obtenção de energia em uma usina termoeletrica, dentre outras considerações que serão apresentadas adiantes. Para o desenvolvimento do modelo matemático foram utilizados conceitos de conservação de massa e energia, bem como ferramentas termodinâmicas (análise exérgica) e contábeis (termoeconômica), como ferramenta computacional utilizou-se o Scilab.

Na metodologia chamada por Cerqueira et al. (1999) de “Teoria do Custo Exérgico” possui semelhanças a metodologia utilizada no desenvolvimento do presente trabalho. Essa metodologia exige a definição dos insumos, produtos e perdas de cada unidade, em consonância com a definição de suas eficiências exérgicas. A esse conjunto denomina-se como “estrutura produtiva”, definições essas que faz uso de conceitos de contabilidade para gerar as equações complementares.

As relações que são estabelecidas entre as grandezas consideradas na simulação matemática encontram-se representadas nos diagramas de blocos qualitativo e quantitativo anexos.

As equações utilizadas no sistema de simulação referem-se, portanto, às relações entre as grandezas envolvidas com base nos balanços de massa, de energia e termoeconômico. Trata-se assim, de um método de quantificação das grandezas envolvidas nos processos de produção e de transformação energética, bem como em relação aos custos associados aos respectivos processos. O mesmo baseia-se na coleta e na estruturação de dados de produção e de processamento da biomassa florestal como recurso energético. Estabelece, assim, relações entre os fatores de um sistema elétrico e termodinâmico, tais como geração de energia e seus custos de produção com os fatores básicos de produtividade de biomassa provenientes da arborização de pastagens e seus respectivos custos de produção.

O custo exergoeconômico C_{ex} contempla o custo médio total do processo. Esse fator pode ser utilizado como critério de análise de viabilidade quando comparado aos custos envolvidos na geração de energia de outras modalidades.

O trabalho desenvolvido por Mendes et al. (2009) propôs a análise da viabilidade de uma planta de cogeração operando com o ciclo de Rankine. Para desenvolvimento do trabalho empregou análises energéticas, exergéticas e termoeconômicas. Utilizaram como critério de viabilidade a comparação dos custos energéticos obtidos com relação a tarifa da concessionária de energia. Concluíram que a geração própria era menor.

De forma semelhante, no que diz respeito a análise comparativa de viabilidade técnica e econômica de uma alternativa energética não convencional em relação à outra mais convencional, Marini & Rossi (2005) utilizaram um sistema de simulação matemática, em que comparou a viabilidade de sistemas fotovoltaicos com a geração diesel para o atendimento a sistemas isolados.

O trabalho desenvolvido por Dantas Filho (2009) avaliou a viabilidade de geração de energia elétrica utilizando o bagaço de cana como combustível. Concluiu que com a venda de excedentes à concessionária local é economicamente viável e atrativo. Destaca-se que o critério de viabilidade foi a comparação dos custos energéticos de produção de energia elétrica a partir do bagaço de cana-de-açúcar com as da concessionária locais (hidroelétricas).

Fundamentada na literatura disponível, utilizou-se o critério de comparação de custo para avaliar a viabilidade termoeconômica do sistema proposto. Tal critério foi realizado por meio da comparação dos custos do processo de cogeração energética utilizando o bagaço de cana-de-açúcar como combustível (matéria-prima) com base nos contratos vigentes em setembro de 2016 UTE (Usina termoelétrica de energia definida pela ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, para as potências instaladas acima de 30 MW) modalidade bagaço de cana-de-açúcar. Os contratos, bem como a média obtida, estão apresentados anexo ao trabalho.

O modelo matemático desenvolvido neste trabalho foi aplicada à realidade regional da região conhecida por Arenito Caiuá, no noroeste do estado do Paraná. Porém, é importante destacar que esse mesmo modelo pode ser replicado para análises em quaisquer outra região que se pretenda avaliar, desde que se respeite as particularidades produtivas com as readequações compatíveis para a realidade regional desejada.

As variáveis características de plantações florestais podem ser dispostas organizadamente em forma matricial, constituindo-se um banco de dados de características

técnicas das diversas espécies de plantações florestais, que por sua vez são dependentes das características de solo, da disponibilidade hídrica, da temperatura e insolação, dos tempos do plantio até a colheita, entre outras. As variáveis requeridas encontram-se representadas nos diagramas de blocos anexos ao trabalho. Anexo encontra-se as informações sobre as características técnicas e produtivas típicas das espécies presentes na região noroeste do Paraná – Brasil.

Nos próximos tópicos serão apresentados os balanços de massa, energia e termoeconômico, bem como a apresentação de sete estudos de casos, em que busca-se aplicar o equacionamento matemático desenvolvido em diferentes cenários silvipastoris.

3.1. Balanço de massa

3.1.1. Densidade de árvores no sistema silvipastoril

A densidade de árvores é uma grandeza matricial que depende do arranjo espacial da arborização na área plantada com o sistema silvipastoril, \mathbf{N}_a . Essa grandeza é função de \mathbf{d}_a uma grandeza matricial de ordem $1 \times n$ que representa as distâncias entre as árvores enfileiradas em renques, expressa em (m), \mathbf{d}_f uma grandeza matricial de ordem $1 \times n$ que representa as distâncias entre as fileiras de árvores em renques, expressa em (m) e \mathbf{D}_r uma grandeza matricial de ordem $1 \times n$ que representa as distâncias entre os renques de árvores enfileiradas duplas, expressa em (m).

$$\mathbf{N}_a = \left(\frac{10^4}{(\mathbf{d}_a \cdot (\mathbf{D}_r + \mathbf{d}_f))} \cdot \left(1 + \frac{\mathbf{d}_f}{\mathbf{d}_f + 10^{-6}} \right) \right) \quad (\text{árvores/ha}) \quad (1)$$

3.1.2. Fator silvipastoril

O fator silvipastoril \mathbf{F}_s é uma função da densidade arbórea da silvicultura de referência, N_{aref} , variável escalar expressa em (árvores/ha), do fator de borda ou fator de competitividade de vizinhança, F_e , variável escalar adimensional e da densidade arbórea do sistema silvipastoril, \mathbf{N}_a , variável matricial de ordem $1 \times n$, expressa em (árvores/ha).

$$\mathbf{F}_s = \frac{F_e}{N_{aref}} \mathbf{N}_a \quad (\text{adimensional}) \quad (2)$$

3.1.3. Incremento médio anual da biomassa florestal

O incremento médio anual da biomassa florestal I_{ma} é uma grandeza matricial expressa em $m^3_{sólido}/ha. ano$. É função das variáveis matriciais, produtividade mássica total de biomassa florestal em base úmida de um sistema silvicultural de referência P_{bref} expressa em (ton/ha), tempo de permanência de plantação até a colheita T_{cref} expresso em ($anos$), densidade básica D_b expresso em (g/cm^3) e fator de umidade U_{bu} , referente à umidade percentual da biomassa florestal em base úmida, seca ao ambiente em campo, expressa em (%).

$$I_{ma} = \left((1 - 10^{-2} U_{bu}) \cdot \left(\frac{\left(\frac{P_{bref} \cdot T_{cref}}{D_b} \right)}{\right) \right) \quad (m^3_{sólido}/ha. ano) \quad (3)$$

3.1.4. Produção mássica média anual

A grandeza matricial P_{mf} representa a produtividade mássica média anual projetada de biomassa florestal em base seca em função da distribuição espacial. P_{mft} é uma grandeza escalar referente à produtividade mássica média anual global de biomassa florestal em base úmida projetada para o arranjo silvipastoril proposto, expresso em (ton/ano). A distribuição das áreas conforme seus arranjos silvipastoris e suas espécies são inseridos na variável matricial A_p expressa em ($hectares$).

$$P_{mf} = (F_s \cdot I_{ma} \cdot D_b \cdot A_p) \quad (ton/ano) \quad (4)$$

$$P_{mft} = \sum_1^n \left(\frac{P_{mf} \cdot T_{cref}}{1 - 10^{-2} U_{bu}} \right) \quad (ton/ano) \quad (5)$$

3.1.5. Produtividade volumétrica matricial do sistema silvipastoril

Para o cálculo do custo do transporte de biomassa florestal se utilizou a carga volumétrica global a ser transportada anualmente.

A produção média anual volumétrica da biomassa florestal \mathbf{P}_{vft} expressa em (m^3/ano).

$$\mathbf{P}_{vf} = (\mathbf{F}_s \cdot \mathbf{I}_{ma} \cdot \mathbf{A}_p) \quad (m^3/ano) \quad (6)$$

A produção anual total volumétrica de biomassa é uma variável escalar composta pela soma dos elementos da matriz \mathbf{P}_{vf} .

$$P_{vft} = \sum_l^n (\mathbf{P}_{vf}) \quad (m^3/ano) \quad (7)$$

3.1.6. Taxa mássica média por espécie florestal

A grandeza matricial \mathbf{B}_f refere-se à vazão mássica média horária de biomassa florestal, expresso em (kg/h) e depende da produção média anual estimada de biomassa e do tempo de operação anual. O regime de operação anual, T_{oa} é o tempo de operação anual previsto, expresso em (*horas*).

$$\mathbf{B}_f = \frac{10^3}{T_{oa}} \mathbf{P}_{mf} \quad (kg/h) \quad (8)$$

A taxa mássica média horária total é dada pela grandeza escalar, B_{ft} e se refere ao fluxo mássico disponibilizado na entrada do ciclo térmico para o processo de conversão termoelétrica.

$$B_{ft} = \sum_l^n \mathbf{B}_f \quad (kg/h) \quad (9)$$

3.2. Balanço de energia

3.2.1. Exergia específica da biomassa florestal em base seca

O poder calorífico superior e inferior da biomassa florestal de cada espécie em base seca \mathbf{P}_{cibs} e \mathbf{P}_{csbs} que são expressos em (MJ/kg), apresentam-se tabelados e são utilizados no modelo de simulação na forma de grandezas matriciais de ordem $1 \times n$. Em que \mathbf{R}_{ex} é uma grandeza matricial adimensional de ordem $1 \times n$ referente à relação de exergia específica por espécie de biomassa florestal em base seca.

$$\mathbf{R}_{ex} = \frac{\mathbf{P}_{cibs}}{\mathbf{P}_{csbs}} \quad (\text{adimensional}) \quad (10)$$

Mantendo-se a mesma sequência matricial das n espécies florestais consideradas pode-se escrever a equação da exergia específica matricial de $1 \times n$ referente à taxa de exergia média oferecida por espécie de biomassa florestal em base seca à entrada do ciclo térmico, \mathbf{E}_{xibs} expresso em (MJ/kg) , que será dada por

$$\mathbf{E}_{xibs} = (\mathbf{R}_{ex} \cdot \mathbf{P}_{csbs}) \quad (MJ/kg) \quad (11)$$

3.2.2. Exergia específica da biomassa em base úmida

A exergia de entrada pode ajustar-se às características de cada espécie florestal de acordo com um fator adimensional matricial da relação entre a umidade e a exergia de cada tipo de biomassa florestal, \mathbf{F}_u .

$$\mathbf{E}_{xibu} = (\mathbf{F}_u \cdot \mathbf{E}_{xibs}) \quad (MJ/kg) \quad (12)$$

3.2.3. Exergia média de entrada em base úmida

Considerando a exergia específica matricial em base úmida e o fluxo médio de biomassa resultante do balanço de massa B_{ft} , pode-se determinar a grandeza escalar referente à taxa de exergia média global de entrada do ciclo térmico em base úmida E_{xibm} expresso em (MJ/kg) .

$$E_{xibm} = \frac{\sum^n (\mathbf{E}_{xibu} \cdot \mathbf{B}_f)}{B_{ft}} \quad (MJ/kg) \quad (13)$$

3.2.4. Potência efetiva de entrada do processo termoelétrico

A exergia térmica total liberada durante a queima da biomassa florestal será quantificada pelo produto da vazão mássica do combustível B_{ft} pela sua contribuição exergética média oferecida à entrada do ciclo térmico, E_{xibm} . Pode-se assim, avaliar a potência efetiva média de entrada do ciclo térmico, P_{ei} , grandeza escalar, expressa em (MW) por:

$$P_{ei} = \frac{E_{xibm} B_{ft}}{3600} \quad (MW) \quad (14)$$

3.2.5. Potência efetiva de saída do processo termoelétrico

De acordo com a literatura e as considerações realizadas, a potência efetiva média de saída do ciclo térmico, P_{es} representa a potência disponibilizada primariamente na forma de energia térmica com capacidade adicional para realizar trabalho mecânico, expresso por (MW):

$$P_{es} = \eta_{cog} P_{ei} \quad (MW) \quad (15)$$

3.2.6. Potência da geração de eletricidade

Conforme foi comentado anteriormente, a potência efetiva na forma de eletricidade gerada será determinada pela média da conversão energética P_{esEE} que, é função do rendimento do ciclo térmico para a geração de eletricidade, η_{EE} e da potência efetiva de entrada P_{ei} e será dada por:

$$P_{esEE} = \eta_{EE} P_{ei} \quad (MW) \quad (16)$$

A relação entre a potência instalada ou potência nominal P_n e a potência efetiva de geração de eletricidade P_{esEE} deverá levar em consideração o fator de capacidade F_c .

$$P_n = \frac{P_{esEE}}{F_c} \quad (MW) \quad (17)$$

3.2.7. Potência efetiva da geração térmica

A potência efetiva média de geração térmica obtida na saída do ciclo térmico, P_{esH} expresso em (MW) será dada pela diferença entre a potência térmica efetiva média disponibilizada primariamente na saída do ciclo térmico e a porção convertida em trabalho mecânico ou energia elétrica.

$$P_{esH} = P_{es} - P_{esEE} \quad (MW) \quad (18)$$

3.2.8. Energia elétrica e térmica médias anual geradas

Tomando por base o conceito de energia dada pela primeira lei da termodinâmica, as potências efetivas médias de geração elétrica e térmica em função do tempo de operação (anual) resultam respectivamente na energia elétrica e térmica geradas anual, E_{Eg} e E_{Hg} uniformizando-se as unidades. Em que, P_{esEE} é um grandeza escalar referente à potência elétrica efetiva média obtida na saída do gerador, expresso em (MW) , P_{esH} é uma grandeza escalar referente à potência térmica efetiva média obtida na saída do ciclo térmico, expresso em (MW) e T_{oa} é uma grandeza escalar referente ao tempo de operação anual previsto, expresso em $(horas)$.

$$E_{Eg} = P_{esEE} T_{oa} \quad (MWh/ano) \quad (19)$$

$$E_{Hg} = P_{esH} T_{oa} \quad (MWh/ano) \quad (20)$$

3.2.9. *Rendimento exerético do sistema de cogeração*

O rendimento exerético total do processo ψ_{cog} pode ser obtido pela seguinte equação, expresso em (%). Em que, T_i é uma grandeza escalar referente a temperatura inicial da água, expresso em (K) e T_f é uma grandeza escalar referente a temperatura final da água, expresso em (K) .

$$\psi_{cog} = \frac{P_{esEE} + \left(1 - \frac{T_i}{T_f}\right) P_{esH}}{P_{ei}} \quad (\%) \quad (21)$$

3.2.10. *Energia média gerada anual*

A potência efetiva de saída P_{es} expressa a energia transformada em energia térmica na saída no ciclo térmico. E_{ga} é a soma da energia mecânica ($\approx E_{Eg}$) com a energia térmica bruta de saída E_{Hg} , considerando o tempo anual de operação.

$$E_{ga} = P_{es} T_{oa} \quad (MWh/ano) \quad (22)$$

3.2.11. *Exergia média gerada anual*

O montante global de exergia gerada depende da eficiência exerética do processo, da potência efetiva de entrada e do tempo de operação anual (ciclo de trabalho). Ou seja, E_{xga} , expressa em (MWh/ano) é a soma da exergia média anual elétrica e térmica.

$$E_{xga} = \psi_{cog} P_{ei} T_{oa} \quad (MWh/ano) \quad (23)$$

3.3. Balanço termoeconômico

O balanço econômico associado ao balanço energético do processo tem a finalidade de estimar o rendimento exergoeconômico do sistema de cogeração proveniente da biomassa florestal produzido pelo sistema silvipastoril. Os custos são agrupados em duas categorias: custos fixos e custos variáveis em que somados, compõem os custos totais do processo.

3.3.1. Custos fixos do sistema

Os custos fixos C_f dependem dos componentes de custos fixos para a produção de energia elétrica C_{fpEE} e térmica C_{fpH} .

$$C_f = C_{fpEE} + C_{fpH} \quad (US\$/ano) \quad (24)$$

Os custos fixos para a produção de energia elétrica são dependentes de C_{fgEE} uma grandeza escalar referente ao custo fixo médio anual função da capacidade instalada para geração de energia elétrica em sistema de cogeração, expresso em $(US\$/kW)$, C_{iEE} uma grandeza escalar referente ao custo médio anual do investimento no sistema de cogeração para geração de energia elétrica, expresso em $(US\$/ano)$ e P_n uma grandeza escalar referente à potência nominal da geração (potência instalada), expressa em (MW) .

$$C_{fpEE} = 10^3 C_{fgEE} P_n + C_{iEE} \quad (US\$/ano) \quad (25)$$

Os custos fixos para a produção de energia térmica são dependentes de C_{fgH} uma grandeza escalar referente ao custo fixo médio anual função da capacidade instalada para geração de energia térmica em sistema de cogeração, expresso em $(US\$/kW)$, C_{iH} uma grandeza escalar referente ao custo médio anual do investimento no sistema de cogeração para geração de energia térmica, expresso em $(US\$/ano)$ e da potência térmica efetiva média obtida na saída do ciclo térmico P_{esH} , expresso em (MW) .

$$C_{fpH} = 10^3 C_{fgH} P_{esH} + C_{iH} \quad (US\$/ano) \quad (26)$$

O custo anual médio referente à parcela de investimento em geração de energia elétrica C_{iEE} , expresso em ($US\$/ano$), função das grandezas escalares referente ao custo do investimento médio em capacidade instalada para a geração de energia elétrica em sistema de cogeração C_{igEE} , expresso em ($US\$/kW$), potência nominal da geração (potência instalada) P_n , expressa em (MW) e o tempo de depreciação do investimento T_{di} , expresso em ($anos$).

$$C_{iEE} = \frac{10^3 C_{igEE} P_n}{T_{di}} \quad (US\$/ano) \quad (27)$$

Com relação ao custo do investimento de geração de energia térmica do modelo proposto, baseia-se no fato de que necessária a construção de uma infraestrutura de geração térmica adicional. Em que, C_{iH} é uma grandeza escalar referente ao custo médio anual do investimento no sistema de cogeração para geração de energia térmica, expresso em ($US\$/ano$), função do custo do investimento médio em capacidade instalada para a geração de energia térmica em sistema de cogeração C_{igH} , expresso em ($US\$/kW$) e da potência térmica efetiva média obtida na saída do ciclo térmico P_{esH} , expresso em (MW).

$$C_{iH} = \frac{10^3 C_{igH} P_{esH}}{T_{di}} \quad (US\$/ano) \quad (28)$$

3.3.2. Custos variáveis do sistema

Os custos variáveis são compostos pela soma do custo da cogeração de energia C_{vpEE} e C_{vpH} , do custo do transporte C_t e do custo da biomassa florestal C_{bf} .

$$C_v = C_{vpEE} + C_{vpH} + C_t + C_{bf} \quad (US\$/ano) \quad (29)$$

As parcelas de custos variáveis anuais para a geração de energia elétrica e térmica do processo de cogeração, podem ser calculados por:

$$C_{vpEE} = C_{vgEE} E_{Eg} \quad (US\$/ano) \quad (30)$$

$$C_{vpH} = C_{vgH} E_{Hg} \quad (US\$/ano) \quad (31)$$

O custo do transporte da biomassa florestal C_t , depende da distância média para o transporte D_{med} , do custo médio do transporte C_{tm} , do volume da carga total a ser transportada, P_{vft} e da cotação do dólar, $U_{\$}$.

$$C_t = \frac{D_{med} C_{tm}}{U_{\$}} P_{vft} \quad (US\$/ano) \quad (32)$$

A equação do custo da biomassa florestal C_{bf} é a soma do custo médio anual total de manejo florestal pelo sistema silvipastoril C_{pfs} com o custo médio anual total da remuneração pelo uso da terra de pastagens C_{rem} .

$$C_{bf} = C_{rem} + C_{pfs} \quad (US\$/ano) \quad (33)$$

O custo de produção da biomassa no sistema silvipastoril C_{pfs} depende da área plantada A_p , do custo de produção da biomassa florestal C_{pf} , da densidade de árvores na área plantada N_a e da cotação do dólar, expressa em ($R\$/US\%$).

$$C_{pfs} = \frac{C_{pf}}{N_{aref} U_{\$}} \sum_1^n (N_a \cdot A_p) \quad (US\$/ano) \quad (34)$$

A equação referente à parcela do custo devido à remuneração pelo uso do solo das terras de pastagens depende do arranjo silvipastoril F_s , do valor típico do arrendamento da terra R_{em} praticado na região, por um parâmetro adimensional F_a e da área plantada A_p .

$$C_{rem} = \frac{F_a R_{em}}{U_{\$}} \sum_1^n (F_s \cdot A_p) \quad (US\$/ano) \quad (35)$$

3.3.3. Custo total do sistema

O custo total do sistema integrado de produção de biomassa florestal e da cogeração de energia será, portanto, a soma dos custos fixos com os custos variáveis, de acordo com a equação a seguir:

$$C_{tot} = C_f + C_v \quad (US\$/ano) \quad (36)$$

3.3.4. *Rendimento exergoeconômico*

A eficiência exergoeconômica é a relação entre a eficiência exergética ψ_{cog} fornecida pelo balanço de energia e o custo total do sistema. A eficiência exergoeconômica é o produto da eficiência do sistema de cogeração pela potência efetiva aplicada à entrada do processo termoelétrico.

$$\psi_{xcog} = \frac{10^3 \psi_{cog} P_{ei} T_{oa}}{C_{totcog}} \quad (kWh/US\$) \quad (37)$$

3.3.5. *Custo exergoeconômico*

Como parâmetro para a comparação da viabilidade econômica da alternativa proposta em relação à outras modalidades de energias, o rendimento exergoeconômico pode ser escrito na forma de um custo tarifário exergoeconômico C_{xe} .

$$C_{xe} = \frac{U_{\$}}{\psi_{xcog}} \quad (R\$/kWh) \quad (38)$$

3.4. *Considerações*

Cada espécie florestal possui características energéticas e celulósicas específicas (Quirino et al., 2005). Diversas são as opções de espécies florestais que poderão ser utilizadas para as estimativas pretendidas, tanto no que se refere à produtividade das espécies florestais quanto aos seus custos de produção. Desta forma, é importante destacar as considerações realizadas no desenvolvimento desse trabalho.

3.4.1. *Considerações com relação ao balanço de massa*

Especificamente em relação aos dados de produtividade da região do Arenito Caiuá no noroeste do Estado do Paraná, são citadas algumas experiências de campo. Duas experimentações de campo foram experimentadas e acompanhadas por Limberger (2012). Em seu estudo avaliou a disponibilidade hídrica do solo em sistema silvipastoril na área de concentração de produção vegetal na região de Paranaíba, noroeste do Estado do Paraná.

Limberger (2012) realizou levantamentos de campo em duas fazendas da região de Paranaíba (Fazendas A e B), registrou que a produção média após colheita com 7 anos, pode ser aproximada para 550 toneladas de biomassa florestal por alqueires paulista, que é a

unidade de medida agrária preponderante na região, área equivalente a 2,42 hectares. Os dados fornecidos por Limberger (2012) foram utilizados como referências para as variáveis P_{bref} e T_{cref} na entrada de dados da simulação proposta, lembrando que os dados dessas e das demais variáveis podem ser atribuídas conforme desejado pelo usuário. Segundo o trabalho de Limberger (2012), considerou-se neste trabalho a densidade básica média da biomassa igual $D_b = 0,52g / cm^3$ e arranjo espacial da plantação de 3 x 3m, o que representa $N_{\text{aref}} = 1.111 \text{árvores} / ha$.

Baseando-se em SIFLOR – Sistema de Informações para Planejamento Florestal disponível (2016) foi possível estimar o incremento médio anual da biomassa em base seca: $I_{\text{ma}} = 46,8m^3_{\text{sólido}} / ha.ano$ que representa o incremento volumétrico médio anual.

É importante ressaltar, que para as mesmas espécies florestais, é comum verificar diferenças com relação aos dados da produtividade de biomassa florestal. De acordo com Da Silva e Paggiani (2011) a explicação dessa diferença está diretamente relacionada à dosagem de insumos que são agregados ao solo na forma de nutrientes agroquímicos, que por sua vez, impactam de forma importante no crescimento e formação da biomassa florestal.

Conforme diagnóstico de Andrade (2011), entende-se que a diversificação de espécies florestais, seja um fator ambiental relevante a ser considerado no projeto de um sistema silvipastoril. Cabe ser ressaltado que o modelo de simulação utilizado contempla a possibilidade da diversificação de espécies florestais.

Assim, as variáveis até agora referidas, serão grandezas expressas matricialmente com matrizes de ordem $1 \times n$ as quais possibilitam inserir informações referentes às n espécies florestais que se pretende simular. Portanto, n será a dimensão de colunas da matriz de características do sistema silvipastoril pretendido.

A variável I_{ma} será uma grandeza matricial, pois a produtividade de biomassa depende da espécie, do tempo da colheita e de sua densidade básica.

De acordo com Castilhos et al. (2010) e Oliveira et al. (2010), a produtividade de biomassa florestal é função do arranjo espacial da arborização de pastagens. Desta forma, o modelo de simulação contempla, além da possibilidade da diversificação da espécie também pode diversificar o tipo de arranjo espacial do sistema silvipastoril pretendido, incluindo algumas características produtivas observadas por Da Silva (2005).

A produtividade média de biomassa florestal a ser estimada em um sistema silvipastoril P_{mf} pode ser realizado a partir do incremento médio anual de biomassa de um

sistema monocultural de silvicultura, I_{ma} pode ser feita por ajustes considerando o efeito do espaçamento de plantio observado por Da Silva e Stape (2005) e do arranjo espacial do sistema silvipastoril pretendido.

O Fator silvipastoril, por outro lado, é uma função da densidade arbórea da silvicultura de referência e do fator de borda ou fator de competitividade de vizinhança. Trata-se de um fator que, multiplicado por 100 representa a perspectiva percentual de produção de biomassa florestal em relação à produtividade estimada do sistema de silvicultura monocultural tomado como referência. Pode-se estabelecer essa variável adimensional F_s composta pelo produto de um fator adimensional de espaçamento F_e , densidade de árvores do arranjo a ser simulado N_a e densidade de árvores do sistema de silvicultura monocultural N_{aref} .

Considerando os dados obtidos experimentalmente por Da Silva e Stape (2005), o Fator de espaçamento F_e para qualquer arranjo silvipastoril pode ser aproximado para um valor escalar cujo comportamento poderá ser generalizado para todas as espécies, onde $F_e = 1,5$. Ressalta-se, apesar da aproximação proposta, esse fator pode ser alterado conforme a espécie estudada em questão, atribuindo assim maior confiabilidade nos dados obtidos.

A produtividade de biomassa florestal depende também da área cultivada. As áreas de pastagens a serem arborizadas pelo sistema silvipastoril desejado, requer a definição com a caracterização de seus respectivos arranjos e espécies florestais. Logo, podemos atribuir a variável A_p a essa grandeza matricial de mesma ordem que as anteriores $1 \times n$.

Estabeleceu três variáveis relacionadas a esse tipo de arranjo espacial com as quais se torna possível calcular a densidade arbórea de um sistema silvipastoril. As três variáveis referidas são as distâncias: distâncias entre os renques de árvores enfileiradas duplas D_r , distância entre as duas fileiras d_f e distância entre as árvores enfileiradas d_a . Por tratar-se de uma diversidade de possibilidades de diferentes arranjos espaciais silvipastoris com diferentes espécies florestais, as três variáveis dimensionais serão organizadas matricialmente de ordem $1 \times n$. Portanto, a densidade de árvores por área N_a também será uma variável matricial de ordem $1 \times n$ e poderá ser determinada pela equação (1).

3.4.2. Considerações com relação balanço de energia

Entre as propriedades da madeira para fins energéticos, o poder calorífico refere-se à quantidade de calor liberada pela combustão completa de unidade de massa do combustível, expressa em cal/g ou J/g (Ragland et al., 1991).

Em um ciclo termodinâmico, como o ciclo de Rankine, considera-se a fornalha o local onde ocorre a queima do combustível, no caso do presente trabalho a biomassa florestal, e saem os produtos da combustão (energia térmica e compostos químicos).

A taxa de energia térmica fornecida durante a queima da biomassa florestal pode ser quantificada como sendo o produto entre a vazão mássica de combustível B_{ft} e seu poder calorífico inferior na umidade da biomassa P_{cibu} . A massa de água e demais compostos produzidos na combustão, conforme considerados por Ragland et al. (1991), saem pela chaminé.

De acordo com Higa (2003), conhecendo-se a fração mássica dos elementos químicos componentes da biomassa (no caso, o bagaço de cana) e a fração em massa de água presente na condição úmida e, considerando-se ainda a entalpia de vaporização da água a 25°C, ($L = 2.442 \text{ kJ} / \text{kg}$) e a exergia química da água líquida ($e_{xw} = 50 \text{ kJ} / \text{kg}$) é possível calcular a exergia da biomassa por meio da equação dada por Szargut et al. (1988) equação 42, apresentada a seguir.

$$E_{xB} = \beta(P_{ciB} + LZ_W) + e_{xw}Z_W \quad (39)$$

Em que,

$$\beta = \frac{(1,0412+0,216Z_{H_2}/Z_C-0,2499Z_{O_2}/Z_C(1+0,7884Z_{H_2}/Z_C)+0,045Z_{N_2}/Z_C)}{(1-0,3035Z_{O_2}/Z_C)} \quad (40)$$

De forma semelhante ao cálculo realizado por Higa (2003) conhecendo-se a fração mássica dos elementos químicos componentes de cada espécie de biomassa florestal e o teor de umidade da biomassa em base úmida U_{bu} , é possível calcular a exergia matricial da biomassa florestal e seu fator β , por meio das equações dadas por Szargut et al. (1988). No presente trabalho, a fração mássica da água presente na biomassa, Z_W será o teor de umidade da biomassa expressa percentualmente, ou seja, ($Z_W = U_{bu} / 100$).

Considerando a dificuldade prática em conhecer a composição química das espécies florestais e da relação entre a exergia química da biomassa e a exergia efetivamente liberada em sua combustão completa, em especial suas frações mássicas de hidrogênio, carbono, oxigênio e nitrogênio, presentes em cada espécie a ser aplicada na simulação, neste trabalho foram utilizadas a relação de exergia a ser liberada ao ciclo térmico por cada espécie florestal

e o seu poder calorífico superior, de acordo com as informações disponibilizadas por Quirino et al. (2005).

Define-se \mathbf{R}_{ex} com uma grandeza matricial adimensional de ordem $1 \times n$, referente a exergia efetivamente disponível no processo de combustão da biomassa florestal de cada espécie. Considerou-se um valor atribuído para o modelo de simulação, o qual foi aproximado para a relação entre o poder calorífico inferior e superior da respectiva espécie florestal.

De acordo com Mendes e Nogueira (2009) e Guohui et al. (2011), a exergia térmica disponibilizada ao ciclo térmico pode ser obtida em função do teor de umidade, da composição química contida na biomassa florestal e da exergia química específica de cada tipo.

O efeito da umidade da biomassa em sua exergia por ser estabelecida com base em critério prático a padronização elaborada por Lima et al. (2008), baseada numa aproximação de uma curva experimental. A equação obtida pode ser reescrita em termos da exergia específica matricial de ordem $1 \times n$ referente à taxa de exergia média oferecida por cada espécie de biomassa florestal em base úmida à entrada do ciclo térmico, \mathbf{E}_{xibu} .

No modelo de simulação utilizou-se o conceito de exergia térmica ao invés da energia térmica, considerando que as características combustíveis de cada tipo de biomassa florestal já foram contempladas na determinação da exergia média.

3.4.2.1. Considerações sobre a potência elétrica e térmica geradas

Com relação à potência efetiva de geração de eletricidade, a mesma será considerada para efeitos teóricos, igual a potência média, assegurada ou garantida pela usina termoeletrica. Define-se potência assegurada, como sendo a máxima potência que uma usina pode fornecer durante seu pior ciclo de disponibilidade de matéria-prima (combustível ou energia primária).

A potência instalada ou potência nominal P_n da termoeletrica deve ser maior que a potência efetiva de geração de eletricidade dependente de seu fator de capacidade, F_c que é a relação entre a energia elétrica anual fornecida e o produto da potência instalada pelo tempo de operação anual. Consideram que uma usina que opere a plena carga em tempo integral, sem intermitência operacional, terá o fator de capacidade unitário, $F_c = 1,0$. Na prática, o fator de capacidade da geração é sempre menor do que a unidade, sendo a média do fator de capacidade da termoeletricidade $F_c = 0,55$, para a hidroeletricidade de grande porte,

$F_c = 0,65$ e para eólicas $F_c = 0,35$ (CPFL, 2015a). Em anexo ao trabalho encontra-se uma tabela com os valores dos fatores de capacidade típicas de usinas geradoras do setor elétrico brasileiro (Wittman, 2015).

De acordo com a análise de Dincer e Rosen (2013b), é importante considerar que a potência elétrica gerada será a própria exergia elétrica entregue na saída, salvo pelas reduzidas perdas de exergia de um fluxo de energia mecânica (rotor de um gerador em movimento) que é convertido em energia elétrica. Do ponto de vista do sistema considerado, a energia útil é aquela efetivamente entregue na saída do processo termoeletrico.

No entanto, o mesmo não acontece do ponto de vista da temperatura, ou seja, da energia térmica, sobre a qual deve-se considerar que a exergia de um fluxo térmico deve ser calculada em função da variação da temperatura da água em relação ao ambiente, indo de T_i a T_f , de acordo com o que Dincer & Rosen (2013b) chamou de fator de temperatura

exérgica $\tau = \left(1 - \frac{T_i}{T_f}\right)$, o mesmo deve ser multiplicado pela potência térmica efetiva média

produzida de saída P_{esH} .

No processo de conversão de energia, as perdas exérgicas foram contabilizadas, resultando numa eficiência exérgica do processo de cogeração ψ_{cog} , sendo essa calculada pela simulação. Ressalta-se que foge ao propósito do presente trabalho trabalhar com as perdas de exérgias, mas é importante apontar que elas estão presentes no processo e que foram quantificadas.

3.4.3. Considerações com relação a balanço termoeconômico

O fator que se procura avaliar no presente estudo é exclusivamente a viabilidade econômica da proposta em relação ao montante exérgico disponibilizado pelos seus fluxos. Portanto, a variável desejada que será utilizada como parâmetro comparativo em relação à viabilidade econômica de outras alternativas energéticas, será o custo exergoeconômico ou custo tarifário exérgico C_{xe} .

Trata-se do custo médio anual de amortização do investimento em geração de energia elétrica por um sistema de cogeração. Inclui os investimentos de infraestrutura necessária à geração de vapor e energia elétrica a partir do ciclo térmico. Tratando-se de um ciclo de Rankine, inclui-se o sistema de geração de vapor, tais como: a fornalha com caldeira; tubulações; o sistema de conversão de energia elétrica (turbina e gerador); sistema de condensação e recalque (sistema de resfriamento e bomba de alimentação).

O dólar é frequentemente utilizado como moeda de referência. Portanto, o custo de investimento médio em geração de energia elétrica em função da capacidade instalada do sistema de cogeração C_{igEE} , que é o quociente entre o investimento total e a potência instalada foi expresso em US\$/kW. Geralmente, o tempo médio de depreciação do investimento T_{di} é de 25 anos (CPFL, 2015a), mas por um critério conservador foi considerado 20 anos.

De acordo com Altieri Silva (2011) um custo típico internacional para conversão de biomassa usando a tecnologia com turbinas de contrapressão é de $C_{igEE} = 830,00 \text{ US\$} / \text{ kW}$ e usando turbinas de condensação é de $C_{igEE} = 1.110,00 \text{ US\$} / \text{ kW}$. O uso de turbinas de contrapressão normalmente são utilizadas nas indústrias sucroalcooleiras onde a geração de energia elétrica está vinculada ao processo produtivo, o que inviabiliza a produção de energia elétrica na entressafra.

No modelo de simulação proposto, diferente de um sistema de cogeração de uma usina suco-alcooleira, o ciclo de trabalho da termoelétrica pode ser ininterrupta com paradas programadas ou não em função das manutenções preventivas ou preditivas, definindo assim a variável T_{oa} .

Quanto ao custo do investimento pode-se considerar os custos estimada por Fortunato (1990), uma vez que a infraestrutura necessária para a obtenção da energia elétrica proveniente de um ciclo térmico, já contempla a parte térmica. Entretanto, considerando os objetivos propostos no presente estudo, faz-se necessário uma infraestrutura adicional, fica estabelecida uma variável de custo independente C_{igH} .

O modelo de simulação adota o parâmetro proposto por Altieri Silva (2011) supõe que o custo fixo para a geração térmica C_{fgH} não são desprezíveis, ou seja, supõe que não estão embutido no custo C_{fgEE} .

Considerou-se que o modelo de cogeração proposto trabalhe por meio do ciclo de Rankine, com turbina de contrapressão, o custo variável típico com o ajuste de unidade compatível $C_{vgEE} = 1,50 \text{ US\$} / \text{ MWh}$.

Com relação a remuneração pelo uso do solo com pastagens, um critério frequentemente utilizado é o valor do arrendamento praticado na região onde está localizada a propriedade. Para desenvolvimento desse trabalho adotou-se como critério de remuneração

a multiplicação do valor típico do arrendamento da terra R_{em} praticado na região por um parâmetro adimensional F_a .

Considerando a região como uniforme no que tange aos valores de remuneração da terra, a variável do custo pela remuneração do solo poderá depender do tipo de arranjo silvipastoril F_s , uma vez que essa variável determina uma porcentagem da utilização da área de pastagem com a atividade silvicultural, dos valores do arrendamento da terra, R_{em} e do parâmetro adimensional F_a .

Com relação ao custo da biomassa florestal C_{bf} , o mesmo refere-se ao valor da produção da biomassa incluindo todas as atividades de manejo florestal, remuneração pelo uso da terra, sistema de transporte da biomassa florestal, dentre outros. Com base no levantamento realizado por Limberger (2012) na região do Arenito Caiuá é possível estimar o custo de produção da biomassa florestal C_{pf} . O custos total médio de manejo florestal para plantação de *Eucalyptus grandis* 3 x 3 m região do Arenito Caiuá é de R\$ 785,17 com Inflação medida pelo Índice Oficial de Inflação geral – Brasileiro: 51,59% referente a 72 meses (agosto/2010 a julho/2016). Destaca-se que o custo de produção da biomassa florestal pelo sistema silvipastoril deve considerar a redução espacial de acordo com a relação (N_a / N_{aref}) .

O custo do transporte será função da distância média de deslocamento do campo à termoeletrica D_{med} , da carga a ser transportada P_{mft} ou P_{vft} e do custo médio do transporte da biomassa C_{tm} .

No caso da simulação proposta, o método utilizado foi o de custo por quilômetro rodado e, será utilizada a variável P_{vft} . Com base nas análises de Alves *et al.* (2013), para efeitos práticos, o custo da variável C_{tm} pode ser estimado. O valor sugerido para as simulações pode ser $(C_{tm} = 0,35 \text{ R\$} / m^3.km)$.

Como um critério alternativo para o cálculo do custo do transporte de biomassa florestal pode ser feita com a aplicação de uma metodologia de mensuração que avalia esse componente de custo no varejo, por transporte realizado, ao invés de fazer a mensuração global e sistêmica. A metodologia alternativa pode ser utilizada com a compatibilização da equação dada por Da Silva *et al.* (2007).

O projeto adequado da planta termoeletrica deve prever a potência efetiva de entrada menor que sua potência nominal (potência instalada), de acordo com o Fator de capacidade,

F_c e do tempo anual de operação do processo termoelétrico T_{oa} , que deve ser planejado de forma compatível com o fluxo de biomassa florestal (combustível) médio que será convertido em energia na entrada do ciclo térmico.

O referido ciclo de trabalho depende do processo industrial. No caso das indústrias do setor sucro-alcooleiro, o tempo médio de operação anual do processo termoelétrico é de 210 dias por ano. Ou seja, $T_{oa} = 5\ 040$ horas/ano. Para o caso da termoelétrica proposta, a operação poderá se dar de forma ininterrupta, ou seja, $T_{oa} = 8\ 760$ horas/ano. O ciclo de trabalho ou tempo de operação, T_{oa} é uma das variáveis contidas no modelo de simulação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo de simulação proposto foi implementado computacionalmente em linguagem de programação Scilab, conforme mencionado. Porém, destaca-se que o procedimento de cálculo não requer o uso de softwares ou linguagens de programações definidas, importando apenas que se relacionem devidamente as variáveis envolvidas no modelo matemático proposto.

Foram realizadas análises de diferentes situações as quais foram trabalhadas como estudos de casos. Trata-se de um conjunto de variáveis que são devidamente inter-relacionadas e que conduzem aos resultados obtidos sobre os quais são feitas as discussões a respeito. Os estudos de casos procurou avaliar a influência das grandezas nos respectivos resultados. Esse procedimento facilita a análise de validação da proposta. Com esse propósito, os estudos de casos foram planejados visando contemplar uma sequência de situações diferentes. Cada situação refere-se a um conjunto de variáveis, cuja premissa inicial refere-se à uma condição de um sistema silvipastoril sem diversidade de espécies e arranjos espaciais. Segue para outros estudos de casos com novas premissas, sempre fazendo alterações em determinado conjunto de grandezas para relacionar suas influências com as do estudo de caso anterior. Avalia-se estudos de casos de um ciclo térmico com fins exclusivamente termoelétricos. Diversas grandezas foram mantidas constantes para todos os casos conforme as considerações realizadas. A tabela 1 apresenta os objetivos e premissas nas simulações realizadas em cada estudo de caso.

Tabela 1 – Objetivos e premissas da simulação dos estudos de casos a serem avaliados

Referência	Objetivos	Parâmetros a serem analisados	Conjunto de condições a simular
Estudo de caso 1	Avaliar os efeitos do custo exergoeconômico para análise de viabilidade econômica da proposta	Estudo de caso de referência para os balanços de massa, de energia e termoeconômico	Parâmetros referenciais, que reproduzam variáveis desejáveis e supostamente reais para um sistema silvipastoril e componentes de custos
Estudo de caso 2	Avaliar os efeitos do custo exergoeconômico e dimensionamento da termoelétrica	Alterações no balanço de massa	Parâmetros relacionados à composição e características do sistema silvipastoril com baixas perspectivas produtivas
Estudo de caso 3	Avaliar os efeitos do custo exergoeconômico e dimensionamento da termoelétrica	Alterações no balanço de massa	Parâmetros relacionados à composição, características e áreas com diversidade de espécies florestais
Estudo de caso 4	Avaliar os efeitos do custo exergoeconômico e dimensionamento da termoelétrica	Alterações no balanço de energia	Parâmetros operacionais: tempo de operação, fator de capacidade, eficiência e temperatura
Estudo de caso 5	Avaliar os efeitos do custo exergoeconômico	Alterações no balanço termoeconômico	Parâmetros relacionados aos componentes de custo com valores elevados
Estudo de caso 6	Avaliar os efeitos do custo exergoeconômico e dimensionamento da termoelétrica	Alterações nos balanços de massa, de energia e termoeconômico	Parâmetros relacionados ao sistema silvipastoril, à condição operacional da cogeração e aos componentes de custo em condições indesejáveis
Estudo de caso 7	Avaliar os efeitos do custo exergoeconômico aplicados a um processo real da indústria sucro-alcooleira	Aplicação a uma usina de açúcar e álcool e de um projeto de ampliação	Parâmetros referenciais para o sistema silvipastoril associado a um sistema de cogeração com um projeto de ampliação

4.1. Estudo de caso 1

A premissa do primeiro estudo de caso é a de avaliar o efeito exergoeconômico do conjunto de condições e parâmetros de um sistema silvipastoril que produz biomassa

florestal capaz de alimentar uma termoelétrica que opera com um sistema de cogeração de energia térmica e mecânica.

A análise da variação dos valores das grandezas (ou do conjunto de grandezas) dos demais estudos de casos são feitas tomando como base o primeiro estudo de caso como referência.

Para o estudo de caso 1 é considerado um conjunto de condições desejáveis e possíveis em relação aos valores das variáveis avaliadas. Considerou uma área de 1000 hectares constituída por uma única espécie florestal e único arranjo espacial do sistema silvipastoril. Na tabela 2 são apresentadas as grandezas constantes para o caso 1. Nas tabelas 3 e 4 são apresentadas as características silviculturais médias para o estudo de caso 1. A tabela 5 apresenta os resultados obtidos na simulação.

Tabela 2 – Grandezas constantes do processo caso 1

Variável	Valor	Unidade	Variável	Valor	Unidade
C_{fgEE}	20	(U\$/kW)	N_{aref}	1111	(árvo/ha)
C_{fgH}	5	(U\$/kW)	R_{em}	1200	(R\$/ha. ano)
C_{igEE}	1100	(U\$/kW)	η_{cog}	75	(%)
C_{igH}	250	(U\$/kW)	T_{di}	20	(ano)
C_{pf}	785.17	(R\$/ha. ano)	T_i	25	(°C)
C_{tm}	0.3	(R\$/m ³ . km)	T_f	200	(°C)
C_{vgEE}	1.5	(U\$/MWh)	T_{oa}	8766	(hora)
C_{vgH}	0.3	(U\$/MWh)	$U_{\$}$	3.50	(U\$/US\$)
D_{med}	50	(km)	η_{EE}	25	(%)
F_a	0.2	(adimensional)	η_{cog}	75	(%)
F_c	0.8	(adimensional)	F_e	1.5	(adimensional)

Tabela 3 – Características silviculturais médias para o estudo de caso 1

Espécie Florestal	D_b (g/cm ³)	P_{csbs} (MJ/kg)	P_{bref} (ton/ha. ano)	Área (ha)	D_r (m)	d_f (m)	d_a (m)
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,52	19,46	225	1000	18	3	1,7

Tabela 4 – Variáveis do processo para o estudo de caso 1

Espécie Florestal	F_{bu} (adim.)	F_u (adim.)	U_{bu} (%)	R_{ex} (adim.)
<i>Eucalyptus grandis</i>	0.0096	0.75	26.0416	0.925

Os resultados obtidos na simulação do estudo de caso 1 são apresentados no anexo do trabalho.

O custo exergoeconômico obtido referente ao processo integrado do sistema silvipastoril com o ciclo térmico com as características propostas foi de 0.0711393R\$/kWh. Sobre esse parâmetro se fundamenta as avaliações e conclusões, pois se trata de um estudo de caso de referência para a análise de viabilidade da proposta. Desta forma, o resultado obtido do primeiro estudo de caso é o mais importante em função dessas características.

Admitindo-se que o custo exergoeconômico obtido pode ser o “parâmetro de referência” para análise de viabilidade da alternativa energética não convencional proposta por esse estudo. O custo exergoeconômico obtido de 0.07 R\$/kWh, indica boa viabilidade econômica para essa alternativa energética, pois as medidas comparativas são feitas com base em valores de custos energéticos típicos, que normalmente, são maiores que o valor encontrado, como a tarifa média nacional de fornecimento de energia elétrica residencial (grupo B1) de 0.45 R\$/kWh (ANEEL, 2016); a tarifa média nacional de fornecimento de energia elétrica ao setor industrial é de 0.218 R\$/kWh; (ANEEL, 2016); o “valor de referência do custo da energia no ambiente de contratação regulada”, que em 2015 foi de 192.61 R\$/MWh, ou seja, 0.19 R\$/kWh (CCEE, 2015); o custo da geração a diesel para uma experimentação em comunidade isolada da região amazônica foi à época, de 0.72 R\$/kWh (Freitas et al., 2006).

Com base em simulações desse estudo de caso, a tabela 5 apresenta uma análise referente a influência da variação de parâmetros nos custos exergoeconômicos para a condição específica da geração exclusiva de energia térmica ou energia elétrica mantendo as características do sistema silvipastoril sem as vantagens oferecidas pelo aproveitamento consorciado da energia térmica e elétrica cogeraada.

Tabela 5 – Influência da variação de parâmetros no custo exergoeconômico no estudo de caso 1

Fatores	Alteração percentual do custo exergoeconômico ΔC_{xe}	
	Influência	(%)
Caso particular em que é mantido o arranjo silvipastoril do presente estudo de caso para gerar a mesma quantidade de energia térmica ($P_{esH} = 3,7MW$), sem geração de energia elétrica.	Elevação	56
Caso particular em que é mantido o arranjo silvipastoril do presente estudo de caso para gerar 50% a mais de energia térmica ($P_{esH} = 5,55MW$), sem geração de energia elétrica.	Elevação	13,9
Caso particular em que é mantido o arranjo silvipastoril do presente estudo de caso para gerar a mesma quantidade de energia elétrica ($P_{esEE} = 1,85MW$), sem aproveitamento da energia térmica.	Elevação	51,9

4.2. Estudo de caso 2

Nessas condições se simula a situação de um sistema silvipastoril constituído por três espécies, sendo duas de eucalipto e uma de grevilea (*Eucalyptus grandis e saligna*, *Grevillea robusta*). A tabela 6 apresenta as grandezas constantes no estudo de caso 2. Os dados de características produtivas a serem utilizadas são apresentadas na tabela 7 e 8. A escolha dessas espécies deve-se ao fato de tratar de espécies com produtividades médias de biomassa florestal e que se aplicam bem à região, sendo a grevilea bastante praticada nos escassos sistemas silvipastoris presentes na região.

Nesse estudo de caso, as referidas espécies são plantadas em área que totalizam 1000 hectares como foi o caso do estudo de caso 1. Conforme pode ser verificado pelos dados indicados, o arranjo espacial desse estudo de caso é caracterizado por espaçamentos levemente maiores que o estudo de caso anterior.

Tabela 6 – Grandezas constantes do processo no caso 2

Variável	Valor	Unidade	Variável	Valor	Unidade
C_{fgEE}	20	(U\$/kW)	N_{aref}	1111	(árvo/ha)
C_{fgH}	5	(U\$/kW)	R_{em}	1200	(R\$/ha. ano)
C_{igEE}	1100	(U\$/kW)	η_{cog}	75	(%)
C_{igH}	250	(U\$/kW)	T_{di}	20	(ano)
C_{pf}	785.17	(R\$/ha. ano)	T_i	25	(°C)
C_{tm}	0.3	(R\$/m ³ . km)	T_f	200	(°C)
C_{vgEE}	1.5	(U\$/MWh)	T_{oa}	8766	(hora)
C_{vgH}	0.3	(U\$/MWh)	$U_{\$}$	3.50	(U\$/US\$)
D_{med}	50	(km)	η_{EE}	25	(%)
F_a	0.2	(adimensional)	η_{cog}	75	(%)
F_c	0.8	(adimensional)	F_e	1.2	(adimensional)

Tabela 7 – Características silviculturais para o estudo de caso 2

Espécie Florestal	D_b (g/cm ³)	P_{csbs} (MJ/kg)	P_{bref} (ton/ha. ano)	Área (ha)	D_r (m)	d_f (m)	d_a (m)
<i>Eucalyptus grandis</i>	0.52	19.46	175	300	21	3	2.5
<i>Eucalyptus saligna</i>	0.62	19.67	205	300	21	3	2.5
<i>Grevillea robusta</i>	0.6	19.46	125	400	21	3	2.5

Tabela 8 – Variáveis do processo para o estudo de caso 2

Espécie Florestal	F_{bu} (adim.)	F_u (adim.)	U_{bu} (%)	R_{ex} (adim.)
<i>Eucalyptus grandis</i>	0.0095	0.70	31.5789	0.925
<i>Eucalyptus saligna</i>	0.0090	0.75	27.7778	0.925
<i>Grevillea robusta</i>	0.0100	0.80	20.0000	0.850

Os resultados obtidos na simulação do estudo de caso 2 são apresentados no anexo do trabalho.

Os resultados obtidos em relação ao estudo de caso referencial 1 mostraram que o fluxo volumétrico anual de biomassa florestal reduziu para 30,85%, que corresponde a redução equivalente do fluxo mássico para 34,7%, implicou no redimensionamento da

potência instalada da termoelétrica para 33,6% (de 2.4 MW para 0.81 MW) e o custo exergoeconômico aumentou em 16.1%.

A tabela 9 apresenta a análise da influência da alteração de parâmetros especificados e seus impactos em relação ao custo exergoeconômico obtido pelo estudo de caso 1. No mesmo quadro se analisa a variação nos custos exergoeconômicos para a condição da geração exclusiva de energia térmica ou elétrica sem as vantagens da cogeração de energia.

Tabela 9 – Influência da variação de parâmetros no custo exergoeconômico no estudo de caso 2

Fatores	Alteração percentual do custo exergoeconômico ΔC_{xe}	
	Influência	(%)
Arranjo silvipastoril com 3 espécies e respectivas características propostos para o estudo de caso 2	Elevação	7.6
Relação da exergia específica dependendo da espécie ΔR_{ex} , conforme o estudo de caso 2	Elevação	9.2
Fator espacial do arranjo silvipastoril, ΔF_e , conforme estudo de caso 2	Elevação	15.9
Fator da umidade da biomassa a ser transportada, ΔF_u , conforme estudo de caso 2	Elevação	19.2
Caso particular em que é mantido o arranjo silvipastoril do presente estudo de caso para gerar a mesma quantidade de energia térmica ($P_{esH} = 1,29MW$), sem geração de energia elétrica	Elevação	68.7
Caso particular em que é mantido o arranjo silvipastoril do presente estudo de caso para gerar 50% a mais de energia térmica ($P_{esH} = 1,94MW$), sem geração de energia elétrica	Elevação	20.8
Caso particular em que é mantido o arranjo silvipastoril do presente estudo de caso para gerar a mesma quantidade de energia elétrica ($P_{esEE} = 0,59MW$), sem aproveitamento da energia térmica	Elevação	55.5

6.3. Estudo de caso 3

O conjunto de condições e parâmetros que se simula nesse sub-item considera alterações na composição e características do sistema silvipastoril, o que implica em fazer alterações no balanço de massa e avaliar seus efeitos nos parâmetros pertinentes ao dimensionamento da planta termoelétrica.

As alterações avaliadas foram referentes as características do sistema silvipastoril, que refletem no balanço de massa e possibilitam avaliar seus impactos no custo exergoeconômico e no dimensionamento da termoelétrica. As características referidas foram as áreas por espécies florestais cultivadas, os arranjos espaciais e a diversificação de espécies florestais. São assumidos valores de variáveis com os cenários que privilegiam a diversificação de espécies, áreas manejadas por tipo de espécie e de arranjos espaciais do sistema silvipastoril.

O estudo de caso simula a situação de um sistema silvipastoril constituído por oito espécies florestais (*Eucalyptus grandis e saligna*, *Grevillea robusta*, *Hovenia dulcis*, *Melia azedarach*, *Schizolobium parahyba*, *Centrolobium tomentosum e Piptadenia gonoacantha*). A tabela 10 apresenta as grandezas constantes no caso 3. Os dados de características produtivas a serem utilizadas são apresentados nas tabelas 11 e 12.

A escolha dessas espécies na presente simulação deve-se ao fato de tratar de maior diversidade de espécies que apresentam médias promissoras de produtividade de biomassa florestal se manejadas adequadamente, supostamente aplicáveis à região noroeste do Estado do Paraná.

Tabela 10 – Grandezas constantes do processo

Variável	Valor	Unidade	Variável	Valor	Unidade
C_{fgEE}	20	(U\$/kW)	N_{aref}	1111	(árvo/ha)
C_{fgH}	5	(U\$/kW)	R_{em}	1200	(R\$/ha. ano)
C_{igEE}	1100	(U\$/kW)	η_{cog}	75	(%)
C_{igH}	250	(U\$/kW)	T_{di}	20	(ano)
C_{pf}	785.17	(R\$/ha. ano)	T_i	25	(°C)
C_{tm}	0.3	(R\$/m ³ . km)	T_f	200	(°C)
C_{vgEE}	1.5	(U\$/MWh)	T_{oa}	8766	(hora)
C_{vgH}	0.3	(U\$/MWh)	$U_{\$}$	3.50	(U\$/US\$)
D_{med}	50	(km)	η_{EE}	25	(%)
F_a	0.2	(adimensional)	η_{cog}	75	(%)
F_c	0.8	(adimensional)	F_e	1.3	(adimensional)

Tabela 11 – Características silviculturais para o estudo de caso 3

Espécie Florestal	D_b (g/cm^3)	P_{csbs} (MJ/kg)	P_{bref} ($ton/ha.ano$)	Área (ha)	D_r (m)	d_f (m)	d_a (m)
<i>Eucalyptus grandis</i>	0.52	19.46	218	500	18	3	2
<i>Eucalyptus saligna</i>	0.62	19.67	258	500	18	3	1.7
<i>Grevillea robusta</i>	0.6	19.46	154	500	18	2.5	2.5
<i>Hovenia dulcis</i>	0.61	19.67	128	250	25	3	3
<i>Melia azedarach</i>	0.55	19.12	175	500	18	2.5	2.5
<i>Schizolobium parahyba</i>	0.44	19.02	93	500	21	3	3
<i>Centrolobium tomentosum</i>	0.75	18.16	158	750	18	3	1.7
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	0.7	19.54	147	500	18	3	2

Tabela 12 – Variáveis do processo para o estudo de caso 3

Espécie Florestal	F_{bu} (adim.)	F_u (adim.)	U_{bu} (%)	R_{ex} (adim.)
<i>Para o conjunto das espécies citadas acima</i>	0.0095	0.7500	26.3158	0.9250

Os resultados obtidos na simulação do estudo de caso 3 são apresentados no anexo do trabalho.

Os resultados obtidos em relação ao estudo de caso referencial 1 mostraram que com o acréscimo do fluxo volumétrico anual de biomassa florestal em 110%, implicou no aumento do dimensionamento da potência nominal instalada da termoeletrica em 143% (de 2.3 MW para 5.6 MW), com o custo exergoeconômico aumentado em 4.9%.

Foi verificado o grau de influência dos parâmetros alterados sobre o custo exergoeconômico e sobre o dimensionamento da potência instalada da termoeletrica. Observou-se que a relação entre área cultivada e potência instalada não é uma relação linear, pois envolve a diversidade de espécies, cada qual com suas características produtivas

específicas. São fatores que também interferem no custo exergoeconômico final. A avaliação acerca da condição específica quanto à alteração no arranjo espacial mantendo a aplicação de espécie única em mesma área cultivada teve como efeito, o da redução de biomassa florestal, o que também implica na redução do dimensionamento da termoelétrica. Com aspecto prático a ser considerado em relação aos valores simulados, tem-se que o aumento da potência nominal projetada para o estudo de caso 3 em relação ao estudo de caso 1, a densidade de áreas de pastagens na região de abrangência da termoelétrica deve ser aumentada para manter inalterada a distância média do transporte de biomassa florestal

$$D_{med} \cdot$$

A análise da influência da alteração de parâmetros individuais na simulação desse estudo de caso relacionados ao balanço de massa (produtividade de biomassa florestal com aumento da área cultivada em 300%) e seus impactos em relação ao dimensionamento da potência nominal da termoelétrica que opera com o processo integrado são apresentados na tabela 13.

Tabela 13 – Influência da variação de parâmetros no dimensionamento da termoelétrica no estudo de caso 3

Fatores	Alteração percentual no dimensionamento da termoelétrica ΔP_n	
	Influência	(%)
Arranjo silvipastoril com 8 espécies e respectivas características propostos para o estudo de caso 3	Elevação	146
Redução da produtividade de biomassa florestal	Redução	Relação direta

Na tabela 14 apresenta a análise da influência da alteração de parâmetros na simulação desse estudo de caso relacionados aos fatores especificados e seus impactos em relação ao custo exergoeconômico em relação ao estudo de caso 1. No mesmo quadro se analisa a variação nos custos exergoeconômicos para a condição da geração exclusiva de energia térmica ou elétrica sem as vantagens da cogeração de energia.

Tabela 14 – Influência da variação de parâmetros no custo exergoeconômico no estudo de caso 3

Fatores	Alteração percentual do custo exergoeconômico ΔC_{xe}	
	Influência	(%)
Arranjo silvipastoril com 8 espécies e respectivas características propostos para o estudo de caso 3.	Elevação	4.9
Diversificação com 8 espécies mantendo mesma área cultivada ($A_p = 1000ha$) e arranjos espaciais do sistema silvipastoril (D_r, d_f, d_a) do estudo de caso 1.	Elevação	6.9
Acréscimo da área cultivada total ΔA_p em 4 vezes, mantendo inalterados os arranjos espaciais e espécie florestal.	Sem influência	0.0
Caso particular em que é mantido o arranjo silvipastoril do presente estudo de caso para gerar a mesma quantidade de energia térmica ($P_{esH} = 8,99MW$), sem geração de energia elétrica	Elevação	59.7
Caso particular em que é mantido o arranjo silvipastoril do presente estudo de caso para gerar 50% a mais de energia térmica ($P_{esH} = 13,48MW$), sem geração de energia elétrica	Elevação	15.9
Caso particular em que é mantido o arranjo silvipastoril do presente estudo de caso para gerar a mesma quantidade de energia elétrica ($P_{esEE} = 4,49MW$), sem aproveitamento da energia térmica	Elevação	53.0

6.4. Estudo de caso 4

O conjunto de condições e parâmetros que se simula nesse sub-item trabalhou com alterações nos parâmetros do balanço de energia, tais como o rendimento do sistema de cogeração η_{cog} , a temperatura final considerada útil do processo T_f , o tempo de operação anual, T_{oa} e o fator de capacidade F_c da termoeletrica.

Dentre essas premissas, avaliou-se a situação em que $\eta_{cog} = \eta_{EE}$, cujo significado é o ciclo térmico dedicado exclusivamente à produção de energia elétrica sem aproveitamento útil adicional da energia térmica rejeitada pelo ciclo termodinâmico.

Nesse estudo de caso foram inseridas alterações no balanço de energia, permanecendo inalteradas as demais variáveis com relação ao estudo de caso 1. O tempo de operação anual desse estudo de caso é o mesmo de uma indústria do setor sucroalcooleiro que trabalha durante 210 dias/ano em média. Na tabela 15 são apresentadas as grandezas constantes do processo para caso 4.

Tabela 15 – Grandezas constantes do processo no caso 4

Variável	Valor	Unidade	Variável	Valor	Unidade
C_{fgEE}	20	(U\$/kW)	N_{aref}	1111	(árvo/ha)
C_{fgH}	5	(U\$/kW)	R_{em}	1200	(R\$/ha. ano)
C_{igEE}	1100	(U\$/kW)	η_{cog}	75	(%)
C_{igH}	250	(U\$/kW)	T_{di}	20	(ano)
C_{pf}	785.17	(R\$/ha. ano)	T_i	25	(°C)
C_{tm}	0.3	(R\$/m ³ . km)	T_f	150	(°C)
C_{vgEE}	1.5	(U\$/MWh)	T_{oa}	5040	(hora)
C_{vgH}	0.3	(U\$/MWh)	$U_{\$}$	3,50	(U\$/US\$)
D_{med}	50	(km)	η_{EE}	25	(%)
F_a	0.2	(adimensional)	η_{cog}	50	(%)
F_c	0.5	(adimensional)	F_e	1.5	(adimensional)

Os resultados obtidos na simulação do estudo de caso 4 são apresentados no anexo do trabalho.

Os resultados obtidos em relação ao estudo de caso referencial 1, mostraram que os parâmetros alterados referente ao balanço de energia impactaram de forma importante no custo exergoeconômico mantendo o mesmo fluxo anual de biomassa florestal proveniente do mesmo sistema silvipastoril.

Na tabela 16 apresenta a análise da influência da alteração dos fatores especificados sobre o dimensionamento da potência instalada da termoelétrica, relacionados ao balanço de energia (parâmetros operacionais) do processo integrado.

Tabela 16 – Influência da variação de parâmetros no dimensionamento da termoelétrica do estudo de caso 4

Fatores	Alteração percentual no dimensionamento termoelétrica ΔP_n	no da
	Influência	(%)
Redução do fator de capacidade (ou de carga) da geração para 50% ($F_c = 0,5$).	Elevação	61
Redução do tempo de operação para 210 dias/ano, ($T_{oa} = 5040hs / ano$).	Elevação	75

Diante da influência que os parâmetros alterados pertinentes ao balanço de energia tiveram de forma importante sobre o custo exergoeconômico obtido pelo estudo de caso 4, mantendo o mesmo fluxo de biomassa, a análise da influência da alteração dos fatores separadamente em seus impactos em relação ao custo exergoeconômico torna-se particularmente importante.

Na tabela 17 se apresenta a análise da influência da alteração de parâmetros especificados na simulação desse estudo de caso, relacionados aos impactos da variação de fatores do balanço de energia em relação ao custo exergoeconômico obtido em relação ao estudo de caso 1. No mesmo quadro se analisa a variação nos custos exergoeconômicos para a condição da geração exclusiva de energia térmica ou elétrica sem as vantagens da cogeração de energia para as mesmas condições do fluxo de biomassa.

Uma consideração acerca da redução do rendimento energético para produção exclusiva de energia elétrica é que se exclui a possibilidade de auferir o benefício pelo aproveitamento da parte térmica e esta situação é muito comum na prática e significa uma grande perda de energia com baixo rendimento e alto custo exergoeconômico. Portanto é o pior cenário em termos de aproveitamento energético.

Tabela 17 – Influência da variação de parâmetros no custo exergoeconômico no estudo de caso 4

Fatores	Alteração percentual do custo exergoeconômico ΔC_{xe}	
	Influência	(%)
Conjunto de condições e parâmetros do estudo de caso 4	Elevação	102.0
Redução do tempo de operação para 210 dias/ano ($T_{oa} = 5040hs / ano$).	Elevação	30.0
Redução do rendimento do sistema de cogeração para 50% ($\eta_{cog} = 0,5$).	Elevação	19.0
Redução do fator de capacidade (ou de carga) da geração para 50% ($F_c = 0,5$).	Elevação	17.7
Redução da temperatura útil a ser extraída do processo térmico ($T_f = 150^\circ C$).	Elevação	9.4
Elevação da temperatura útil a ser extraída do processo térmico ($T_f = 300^\circ C$).	Redução	11.2
Elevação do fator de capacidade para ($F_c = 1,0$).	Redução	5.9
Elevação da temperatura útil a ser extraída do processo térmico ($T_f = 300^\circ C$) e fator de capacidade ($F_c = 1,0$).	Redução	16.5
Caso particular em que são mantidos os demais parâmetros do presente estudo de caso para gerar apenas energia elétrica ($P_{esEE} = 3,22MW$), sem aproveitamento da energia térmica.	Elevação	20.6
Caso particular em que são mantidos os demais parâmetros do presente estudo de caso para gerar apenas energia térmica ($P_{esH} = 3,22MW$), sem geração de energia elétrica	Elevação	86.7

6.5. Estudo de caso 5

O conjunto de condições e parâmetros que se simula nesse sub-item trabalha com alterações no balanço termoeconômico, com finalidade avaliar a influência dos principais componentes de custo do processo produtivo no custo final exergoeconômico.

Entre os componentes de custo é avaliada a influência dos custos do processo produtivo de biomassa florestal e da possibilidade de se verificar custos parametrizados acima dos utilizados nos estudos de casos anteriores.

A definição quanto ao sistema silvipastoril e suas características por espécies, são mantidas a do estudo referencial (estudo de caso 1) e inseridas alterações no balanço termoeconômico, permanecendo inalteradas as demais variáveis. Na tabela são apresentadas as grandezas constantes no estudo de caso 5.

Tabela 18 – Grandezas constantes do processo para o caso 5

Variável	Valor	Unidade	Variável	Valor	Unidade
C_{fgEE}	26	(U\$/kW)	N_{aref}	1111	(árv/ha)
C_{fgH}	5	(U\$/kW)	R_{em}	1500	(R\$/ha. ano)
C_{igEE}	1500	(U\$/kW)	η_{cog}	75	(%)
C_{igH}	400	(U\$/kW)	T_{di}	20	(ano)
C_{pf}	1000	(R\$/ha. ano)	T_i	25	(°C)
C_{tm}	0.4	(R\$/m ³ . km)	T_f	200	(°C)
C_{vgEE}	2.0	(U\$/MWh)	T_{oa}	8766	(hora)
C_{vgH}	0.5	(U\$/MWh)	$U_{\$}$	3.50	(U\$/US\$)
D_{med}	75	(km)	η_{EE}	25	(%)
F_a	0.3	(adimensional)	η_{cog}	75	(%)
F_c	0.8	(adimensional)	F_e	1.5	(adimensional)

Os resultados obtidos na simulação do estudo de caso 5 são apresentados no anexo do trabalho.

Os resultados do estudo de caso 5 em relação ao estudo de caso 1, mostraram que os parâmetros alterados pertinentes ao balanço termoeconômico impactaram de forma moderada no custo exergoeconômico.

O propósito do presente estudo de caso é avaliar os custos fixos e variáveis referentes a investimentos, operação e manutenção para a geração de energia por uma pequena central termoelétrica.

Considerando que tais valores sejam mais elevados do que os estimados por Altieri Silva (2011), foram realizadas simulações para verificar a influência da alteração de fatores no custo exergoeconômico e os resultados observados encontram-se descritos a seguir.

Na tabela 19 se apresenta a análise da influência da alteração de parâmetros especificados nesse estudo de caso relacionados a fatores do balanço termoeconômico e seus impactos em relação ao custo exergoeconômico obtido pelo estudo de caso 1. No mesmo quadro se analisa a variação nos custos exergoeconômicos para a condição da geração exclusiva de energia térmica ou elétrica sem as vantagens da cogeração de energia para as mesmas condições do fluxo de biomassa.

Conforme pode ser observado, após a verificação do grau de influência que os parâmetros alterados separadamente tiveram sobre o custo exergoeconômico, verificou-se a influência de conjuntos de componentes de custos e verificou-se que os fatores que mais impactaram no custo exergoeconômico foram os componentes de custo referentes ao transporte da biomassa florestal.

Outra observação sobre a influência de conjuntos de fatores sobre o custo exergoeconômico, os valores mostraram que quando tratar-se de uma pequena central termoelétrica, PCT – Pequena central termoelétrica definida (pela ANEEL) para a faixa de potências instaladas entre 1 e 30 MW, ou mesmo determinadas condições particulares em que, os componentes de custo possuam custos de investimento e mesmo custos variáveis maiores que os custos das grandes centrais termoelétricas, o impacto de tais fatores no custo exergoeconômico final é moderado.

Tabela 19 – Influência da variação de parâmetros no custo exergoeconômico no estudo de caso 5

Fatores	Alteração percentual do custo exergoeconômico ΔC_{xe}	
	Influência	(%)
Conjunto de condições e parâmetros do estudo de caso 5.	Elevação	60.3
Duplicação dos fatores $C_{igEE}, C_{igH}, C_{fgEE}, C_{fgH}, C_{vgEE}, e C_{vgH}$, com as demais condições do estudo de caso de referência.	Elevação	46.4
Acréscimo na distância do transporte em 50% ($D_{med} = 75km$).	Elevação	12.8
Custo do transporte ($C_{tm} = 0,50R\$ / m^3.km$).	Elevação	17.0
Acréscimo da remuneração de referência pelo uso da terra de pastagens em 50% ($R_{em} = 1.800,00R\$ / ha.ano$).	Elevação	4.4
Acréscimo do custo de produção de referência do sistema silvicultural ($C_{pf} = 1.000,00R\$ / ha.ano$).	Elevação	5.3
Duplicação de todos os fatores de custos fixos e variáveis de investimento e de geração de energia térmica e elétrica.	Elevação	46
Acréscimo concomitante da distância de transporte em 50% e do acréscimo do custo do transporte passando de ($C_{tm} = 0,50R\$ / m^3.km$) para ($C_{tm} = 0,50R\$ / m^3.km$).	Elevação	32
Acréscimo concomitante da remuneração de referência pelo uso da terra de pastagens em 50% e o acréscimo do custo de produção de referência do sistema silvicultural ($C_{pf} = 1.000,00R\$ / ha.ano$).	Elevação	10
Caso particular em que são mantidos os demais parâmetros do presente estudo de caso para gerar apenas energia elétrica ($P_{esEE} = 1,85MW$), sem aproveitamento da energia térmica.	Elevação	52.4
Caso particular em que são mantidos os demais parâmetros do presente estudo de caso para gerar apenas energia térmica ($P_{esH} = 3,70MW$), sem geração de energia elétrica.	Elevação	64.5

6.6. Estudo de caso 6

Nesse estudo de caso é considerada a pior condição nos valores das variáveis para avaliação no modelo de simulação utilizado em relação ao custo exergoeconômico e ao dimensionamento da central termoelétrica.

São consideradas as mesmas espécies florestais do estudo de caso 2, por se constituírem em espécies que se adequem bem à região noroeste do Paraná com suas características produtivas consideradas em aproximadamente 70% da produtividade estimada pelo sistema de silvicultura monocultural. O arranjo espacial também será o mesmo do estudo de caso 2. Na 20 são apresentadas as grandezas constantes no estudo de caso 6. Nas tabelas 21 e 22 são apresentadas as variáveis do processo.

Tabela 20 – Grandezas constantes do processo para o caso 6

Variável	Valor	Unidade	Variável	Valor	Unidade
C_{fgEE}	25	(U\$/kW)	N_{aref}	1111	(árvo/ha)
C_{fgH}	6	(U\$/kW)	R_{em}	1500	(R\$/ha. ano)
C_{igEE}	1500	(U\$/kW)	η_{cog}	75	(%)
C_{igH}	300	(U\$/kW)	T_{di}	20	(ano)
C_{pf}	1000	(R\$/ha. ano)	T_i	25	(°C)
C_{tm}	0.45	(R\$/m ³ . km)	T_f	200	(°C)
C_{vgEE}	2.0	(U\$/MWh)	T_{oa}	8000	(hora)
C_{vgH}	0.5	(U\$/MWh)	$U_{\$}$	3.50	(U\$/US\$)
D_{med}	75	(km)	η_{EE}	25	(%)
F_a	0.2	(adimensional)	η_{cog}	75	(%)
F_c	0.5	(adimensional)	F_e	1.2	(adimensional)

Tabela 21 – Características silviculturais para o estudo de caso 6

Espécie Florestal	D_b (g/cm ³)	P_{csbs} (MJ/kg)	P_{bref} (ton/ha. ano)	Área (ha)	D_r (m)	d_f (m)	d_a (m)
<i>Eucalyptus grandis</i>	0.52	19.46	160	300	21	3	2.5
<i>Eucalyptus saligna</i>	0.62	19.67	180	300	21	3	2.5
<i>Grevillea robusta</i>	0.6	19.46	125	400	21	3	2.5

Tabela 22 – Variáveis do processo para o estudo de caso 6

Espécie Florestal	F_{bu} (adim.)	F_u (adim.)	U_{bu} (%)	R_{ex} (adim.)
<i>Eucalyptus grandis</i>	0.0096	0.712	30.0000	0.900
<i>Eucalyptus saligna</i>	0.0096	0.712	30.0000	0.900
<i>Grevillea robusta</i>	0.0096	0.712	30.0000	0.900

Os resultados obtidos na simulação do estudo de caso 6 são apresentados no anexo do trabalho.

Os resultados obtidos mostraram, que o custo exergoeconômico resultante de uma avaliação desfavorável em quase todos os aspectos foi de $0,15R\$/kWh$, parâmetro sobre o qual cabem as comparações realizadas na avaliação da viabilidade do estudo de caso de referência (estudo de caso 1), em que, pode-se afirmar que mesmo sobre esse valor desfavoráveis, ainda valem considerações otimistas acerca da viabilidade da proposta.

Não foi realizada a análise da influência dos fatores individualmente, pois essa análise foi realizada nos estudos de casos anteriores.

6.7. Estudo de caso 7

A premissa do estudo de caso 7 é a de avaliar o efeito exergoeconômico do conjunto de condições e parâmetros referenciais de um sistema silvipastoril associado a uma indústria real que opera com um sistema de cogeração de energia e que contempla um projeto de ampliação na planta industrial.

Uma indústria do setor sucro-alcooleiro, conforme Higa (2003), apresenta o esquema tradicional de geração e consumo de vapor, bem como a produção adicional e consumo próprio de energia mecânica e elétrica (sistema de cogeração).

A descrição das características e dados de processamento da indústria e do vapor gerado, a configuração e o esquema operacional, as potências de geração e de turboacionadores existentes e projetados, bem como o balanço energético e exergético do processo são considerados por Higa (2003), conforme os anexos.

Para a avaliação exergética de entrada do sistema de cogeração, foi feita análise proposta por Szargut (1988) aplicada à biomassa florestal e suas composições químicas de forma semelhante à que foi aplicada por Higa (2003) ao bagaço de cana em sua análise.

A indústria processa 108,1 toneladas de bagaço de cana por hora, conforme consta no esquema operacional, na qual o vapor gerado nas caldeiras sai com pressão de 2,1 MPa e

temperatura de 300°C, sendo utilizado em um turbo-gerador de capacidade de 9.500 kW, que opera gerando 9.460 kW de energia elétrica e nos turbo-acionadores mecânicos (moendas, bombas, etc.) que produz 7.800 kW de energia mecânica para auto-consumo.

A energia elétrica tem um excedente de 2.620 kW para exportação à rede de distribuição e o escape destas turbinas é realizado para alimentar o processo de fabricação de açúcar e álcool, que requer energia térmica sob pressão de 0,25 MPa a aproximadamente, 127°C.

Visando ampliar a oferta de energia elétrica excedente e aproveitar melhor a disponibilidade de bagaço, cujo novo consumo passa a ser de 111,9 toneladas por hora (*tbc/h*), a usina investiu na compra de duas caldeiras novas e de um turbo-gerador de 34 MW, o qual possui uma turbina que opera com a pressão de 6,1 MPa e temperatura de 480°C, tendo uma extração de vapor a 2,1 MPa para alimentar os mesmos turbo-acionadores mecânicos anteriores. Na saída do turbo-acionador, ocorre o escape final na contra-pressão de 0,25 MPa para alimentar a energia térmica do processo de fabricação de açúcar e álcool.

No novo projeto, as caldeiras antigas, que operavam a 300°C e 2,1 MPa e o turbo-gerador de 9,5 MW deixam de operar, sendo que as turbinas mecânicas, são rearranjadas, sendo que, com a substituição de alguns equipamentos, possibilitou à usina diminuir o consumo de potência mecânica e aumentar o consumo próprio, a geração e o excedente de energia elétrica a ser exportado.

De acordo com Higa (2003), o poder calorífico inferior médio do bagaço de cana na umidade ambiente foi considerado de 7.537 kJ/kg (aproximadamente 1800 kcal/kg). De acordo com Szargut et al. (1988), a exergia do bagaço de cana é de aproximadamente 10.032,8 kJ/kg.

Na tabela 23 constam os valores referentes à avaliação da energia e da exergia de entrada do sistema de cogeração para as versões do projeto original e do projeto novo para a indústria.

Tabela 23 – Fluxos de massa e de energia da indústria em operação e do projeto de ampliação

Sistema de cogeração	Fluxo mássico da entrada	Fluxo energético da entrada	Fluxo exergético da entrada
	(ton/h)	(kg/s)	MJ/s ou (MW)
Projeto original	108.1	30.03	226.32
Projeto novo	111.9	31.08	234.28

A análise exergética que se segue para avaliação do estudo de caso 7, também será baseada nos resultados obtidos por Higa, (2003), porém, para o processo termoelétrico, o autor utilizou o método de análise “Pinch”, sendo avaliados as condições exergéticas dos dois processos descritos como: “original” e “projetado” para a indústria, conforme apresenta-se na tabela 24.

Tabela 24 – Exergias do sistema de cogeração da indústria original e projetada

Processo industrial	Exergias (MW)					Processo	Geração de potência disponível
	Biomassa	Gás da caldeira	Vapor da caldeira	Vapor do condensado			
original	301,26	128,26	66,40	35,99		29,47	30,41
projetado	311,85	141,96	85,66	35,99		29,47	49,66

Fonte: Higa (2003)

Para avaliação exergoeconômica do processo integrado contituído pelo sistema silvipastoril e o processo industrial, serão consideradas as mesmas características e espécie florestal do estudo de caso 1 por se constituir no estudo referencial para avaliação do conjunto de condições e parâmetros dos dois processos industriais descritos pelo estudo de caso 7.

Ao invés de bagaço de cana com poder calorífico inferior de 7,537 MJ/kg, a exergia específica média da biomassa florestal em base úmida obtida pelo estudo de caso 1 será a considerada no novo balanço energético na umidade ambiente, variável ($E_{xibm} = 12,816356 \text{ MJ/kg}$).

Assim o arranjo silvipastoril com suas características e parâmetros dos sistemas produtivos e respectivos custos são as mesmas do estudo de caso 1, com os ajustes cabíveis aos valores da análise de Higa (2003). Ressalta-se, que foi realizado um ajuste no procedimento utilizado na simulação, em que o cálculo da potência efetiva de energia térmica de saída do ciclo de Rankine, P_{esH} considera-se apenas a temperatura do processo ($T_f \cong 127^\circ\text{C}$) e não a pressão de escape de 0,25 MPa, resultando portanto em uma aproximação.

As variáveis com os respectivos valores inseridos na linguagem de programação adotada são apresentadas na tabela 25 para o projeto original e na tabela 26 para o projeto de ampliação da indústria.

Tabela 25 – Variáveis consideradas no projeto original da indústria do estudo de caso

7

Variável	Valor	Unidade	Variável	Valor	Unidade
C_{fgEE}	20	(U\$/kW)	N_{aref}	1111	(árvo/ha)
C_{fgH}	5	(U\$/kW)	R_{em}	1200	(R\$/ha.ano)
C_{igEE}	1100	(U\$/kW)	η_{cog}	75	(%)
C_{igH}	250	(U\$/kW)	T_{di}	20	(ano)
C_{pf}	785.17	(R\$/ha.ano)	T_i	25	(°C)
C_{tm}	0.3	(R\$/m ³ .km)	T_f	127	(°C)
C_{vgEE}	1.5	(U\$/MWh)	T_{oa}	8766	(hora)
C_{vgH}	0.3	(U\$/MWh)	$U_{\$}$	3.50	(U\$/US\$)
D_{med}	50	(km)	η_{EE}	13.436	(%)
F_a	0.2	(adimensional)	η_{cog}	64.495	(%)
F_c	0.8	(adimensional)	F_e	1.5	(adimensional)
F_u	0.75	(adimensional)	E_{xibm}	12.8164	(MJ/Kg)
U_{bu}	30	(%)	P_{vft}	1071660.9	(m ³ /ano)

Tabela 26 – Variáveis consideradas no projeto de ampliação da indústria do estudo de caso 7

Variável	Valor	Unidade	Variável	Valor	Unidade
C_{fgEE}	20	(U\$/kW)	N_{aref}	1111	(árvo/ha)
C_{fgH}	5	(U\$/kW)	R_{em}	1200	(R\$/ha.ano)
C_{igEE}	1100	(U\$/kW)	η_{cog}	75	(%)
C_{igH}	250	(U\$/kW)	T_{di}	20	(ano)
C_{pf}	785.17	(R\$/ha.ano)	T_i	25	(°C)
C_{tm}	0.3	(R\$/m ³ .km)	T_f	127	(°C)
C_{vgEE}	1.5	(U\$/MWh)	T_{oa}	8766	(hora)
C_{vgH}	0.3	(U\$/MWh)	$U_{\$}$	3.50	(U\$/US\$)
D_{med}	50	(km)	η_{EE}	21.198	(%)
F_a	0.2	(adimensional)	η_{cog}	70.534	(%)
F_c	0.8	(adimensional)	F_e	1.5	(adimensional)
F_u	0.75	(adimensional)	E_{xibm}	12.8164	(MJ/Kg)
U_{bu}	30	(%)	P_{vft}	1109331.9	(m ³ /ano)

Os resultados obtidos na simulação do estudo de caso 6 são apresentados no anexo do trabalho.

Os resultados obtidos mostraram, que o custo exergoeconômico obtido pelo projeto original da indústria sucro-alcooleira ou o seu projeto de ampliação seriam, em ambos os casos, valores aceitáveis caso deixassem de se utilizar o bagaço de cana como combustível primário, fazendo a substituição pela biomassa florestal proveniente do sistema silvipastoril com as condições, características e custos simulados.

Os valores obtidos entre 8 ou 10 centavos está bem abaixo do valor médio nacional de contratação das usinas termoelétricas de biomassa bagaço de cana, que é de $0,23R\$/kWh$. É natural supor que a biomassa florestal tem um custo elevado para a produção e transporte em relação ao da utilização de biomassa residual, que tem custo zero, como é utilizada no setor sucro-alcooleiro. No entanto, considerando todos os parâmetros utilizados no estudo de caso 7 a proposta de utilização da biomassa florestal proveniente de um sistema silvipastoril ao invés da utilização de bagaço de cana residual (considerado custo zero), indicou uma elevação em 130% no custo exergético para o projeto de ampliação da indústria e de 162% para o projeto original. Considerando a distância média do transporte em 25km (metade da distância considerada antes), a relação de aumento do custo exergético seria de 99,5%.

No entanto, isso não significa que a proposta, nas condições simuladas ao final, seja inviável, mas sim que o custo exergoeconômico sofre a elevação comparativa passando de 3,9 para 7,7 centavos de real, devido à troca de bagaço de cana para biomassa florestal.

6.8. Discussão complementar sobre os estudos de casos

De acordo com a justificativa para o presente trabalho, trata-se de uma modalidade não convencional de energia renovável e interessante em diversos aspectos. Os estudos de casos apresentados confirmaram as estimativas acerca dos benefícios econômicos estimados que são possibilitados pela modalidade analisada. Os benefícios econômicos complementam outras naturezas de benefícios ambientais e sociais, tais como: minimização de custos com impactos ambientais decorrentes da atividade pecuária intensiva; possibilidade de agragação de valor e renda ao agricultor e à comunidade local;

Mesmo levando-se em consideração o custo de fatores para a promoção de políticas de fomento para a viabilização econômica desse tipo de alternativa com a remuneração pelo uso da terra de pastagens, os estudos de casos indicaram que a modalidade avaliada ainda é economicamente interessante.

Verificou-se pela análise dos estudos de casos que o rendimento exergoeconômico $\Psi_{x\text{cog}}$ apresentou uma variação de valores obtidos entre $23,00\text{kWh}/\text{US\$}$ e $48,00\text{kWh}/\text{US\$}$. Isso corresponde ao custo tarifário exergoeconômico, C_{xe} com variação de valores obtidos entre $0,07\text{R\$}/\text{kWh}$ e $0,15\text{R\$}/\text{kWh}$. Foi essa a variação de valores obtidos que são avaliadas como referências comparativas aos custos energéticos típicos comentados ao final do estudo de caso 1.

Conforme observado pelos resultados obtidos trata-se de uma alternativa energética viável economicamente diante dos fatores comparativos considerados. Além dos indicativos econômicos oferecidos pelos resultados numéricos, trata-se de um fluxo contínuo de produção e consumo de biomassa florestal. Isso tem um significado sistêmico importante acerca dessa possibilidade enquanto alternativa energética.

No que se refere aos preços da energia, também é importante considerar que diferentes modalidades de geração de energia, geralmente possuem diferentes preços. O sistema elétrico brasileiro é constituído preponderantemente pela base hidroelétrica, que possui baixos custos de geração comparados aos das termoelétricas. Mesmo entre as termoelétricas se observa uma grande diversidade de preços e custos de geração. A premissa que orienta a operação do sistema elétrico interligado é o da máxima utilização da energia hidráulica motivada pela razão econômica. O ONS – Operador Nacional do Sistema pondera de acordo com modelos matemáticos por uma permanente busca pelo equilíbrio ótimo entre o benefício presente do uso da água e o benefício futuro de seu armazenamento, que é a medida em termos da economia esperada dos combustíveis das usinas termoelétricas. Operacionalmente, o parâmetro econômico é uma premissa que deve ser ponderada, pois de acordo com os critérios operacionais da ONS, não inserir as termoelétricas no sistema resulta em riscos de déficits futuros e por outro lado, conservar o nível dos reservatórios ao máximo possível significa utilizar mais geração térmica e, portanto, aumentar os custos de operação do sistema.

No entanto, é importante considerar que, de acordo com Bohlen e Lewis (2008), as barragens possuem impactos futuros que devem ser avaliados, a exemplo de sua desativação e remoção, em especial no setor elétrico brasileiro, que tem a hidroeletricidade como a base do sistema. Dentro dos atuais estudos de viabilidade de tais empreendimentos e de seus estudos de impactos, alguns aspectos a exemplo daqueles remanescentes da remoção da barragem ao final de sua vida útil, não são levados em consideração.

A proposta de geração de energia analisada no presente trabalho, não apresenta as restrições comentadas nem da hidroeletricidade, nem da termoeletricidade. Pode-se desmontá-la ao final de sua vida útil ou reformá-la, sem impactos ambientais relevantes. Essa modalidade de geração de energia permite, porém, passar por obras de melhorias em diversos aspectos, tais como ampliações.

No caso da termoeletricidade proposta pelo presente estudo, o ONS deverá operar e despachar com base nos mesmos critérios de operação adotados para a operação das termoelétricas que operam com o bagaço de cana. O combustível de ambas as modalidades de termoelétricas, mesmo para o caso de uma pequena central termoelétrica (PCT), referem-se a um fluxo contínuo de produção e de consumo de biomassa (bagaço de cana e florestal).

Essa proposta deve ser pensada dentro de um planejamento energético como sendo uma modalidade para trabalhar como energia de base no sistema elétrico e não como energia complementar como normalmente é o caso das termoelétricas movidas a combustíveis fósseis. Trata-se de um projeto baseado no fluxo contínuo de combustível, diferentemente do caso da energia eólica ou solar, cuja problemática central reside em sua intermitência e sazonalidade, que impactam na operação sistêmica (Cutler, Boerema, MacGill, Outhred, 2011; Qadrdan, Chaudry, Wu, Jenkins, Ekanayake, 2010; Trainer, 2012; Barry, Chapman, 2009; Brown 2012), conforme citados por CPFL (2015c).

Esse estudo optou pela avaliação econômica da termoeletricidade a base de biomassa florestal proveniente de um sistema silvipastoril. Pretende-se que opere atendendo a critérios operacionais definidos no planejamento energético que contemple a operação com elevado fator de carga e sua contribuição como geração de base do sistema, sem as incertezas trazidas por outros modais energéticos citados. Esse critério operacional também contribui para a economicidade da alternativa energética avaliada.

Os valores de variáveis referentes a componentes de custo sem base em situações reais foram definidos e seus critérios explicitados para a atribuição de valores com base no que se julgou razoável e necessário. Sem tais fatores a alternativa proposta jamais poderá ser efetivada na prática. Esses fatores são componentes de custo, como é o caso a remuneração pelo uso da terra de pastagens.

Foram realizadas várias análises para avaliar os impactos no custo exergoeconômico, decorrente de alterações nos balanços de massa, de energia e termoeconômico. Ainda assim, por critério conservador, no estudo de caso 6 foi contemplada a análise da influência que diversos fatores desfavoráveis exercem para a obtenção do custo exergoeconômico do processo.

No estudo de caso 6 foram atribuídos valores maiores para um conjunto de componentes de custo que se supõe serem mais compatíveis a um projeto de empreendimento termoelétrico de pequeno porte. Concomitantemente, foram avaliados também os efeitos da alteração de parâmetros do balanço de massa e de energia. A conclusão foi a de que, mesmo sendo alterações desfavoráveis à economicidade do projeto, ainda assim, os resultados obtidos poderiam ser considerados “economicamente aceitáveis”.

Outra variável contemplada no modelo, conforme avaliado pelo estudo de caso 4, e que também permeia a questão da promoção de políticas de fomento à viabilização econômica da alternativa analisada é o fator de carga ou de capacidade da geração F_c . O ideal é que o fator de capacidade se situe o mais próximo à unidade possível para a obtenção do despacho econômico da termoelétrica como geração de base do sistema.

O presente trabalho procurou associar números na análise dessa questão na avaliação de uma planta industrial do estudo de caso 7. Foi realizada a comparação entre o custo exergético global do processo de produção de biomassa florestal pelo sistema silvipastoril e o da utilização de biomassa residual constituída pelo bagaço de cana. A conclusão foi a de que todo o processo integrado do sistema silvipastoril dobrou o custo exergético, mas ainda é um processo viável economicamente.

5. CONCLUSÃO

No presente trabalho apresentou-se um modelo matemático para a análise da viabilidade econômica da utilização de biomassa florestal proveniente de um sistema silvipastoril para a geração de energia. Foi realizada uma análise exergoeconômica para avaliar a eficiência e os custos do processo. Para a formulação do modelo foram utilizados os balanços de massa, de energia e termoeconômico do sistema integrado. Essa ferramenta mostrou-se útil na análise proposta e cumpriu com o propósito sugerido, que foi o de apresentar e analisar a aplicabilidade do modelo, considerando que o sistema de cogeração usando um ciclo de Rankine convencional.

Foi atendido a um dos objetivos propostos ao trabalho que seria o de testar a aplicabilidade do modelo de simulação à região do Arenito Caiuá, noroeste do Estado do Paraná. Foi também testada a aplicabilidade da análise utilizando os dados do processo de uma indústria real do setor sucro-alcooleiro, inclusive com a avaliação de um projeto de ampliação de seu sistema de cogeração, como sendo um dos estudos de casos realizados.

Avaliou-se também o impacto nos custos exergoeconômicos apresentados pelas possibilidades da geração exclusiva de energia térmica ou de energia elétrica. Essa avaliação foi realizada em um estudo de caso considerando o sistema integrado de produção da biomassa e transformação energética.

Os resultados foram apresentados ao final de cada estudo de caso. Nesses resultados, procurou-se mostrar o efeito das variações analisadas na elevação do custo exergoeconômico. Evidencia-se assim, as vantagens que se obtém com os benefícios oferecidos pelo sistema de cogeração para fornecer energia térmica e elétrica de forma concomitante. Isso impacta em uma maior eficiência do processo e consequentemente, conforme indicaram os resultados obtidos, uma maior eficiência econômica. Assim, os resultados obtidos mostraram que o custo exergoeconômico variou de $0,07R\$/kWh$ e $0,15R\$/kWh$. Trata-se de uma excelente resposta em termos de custos para a análise de viabilidade econômica da proposta. Verificou-se que os custos e valores tradicionais praticados no comércio da energia, especialmente o da energia elétrica, são mais elevados.

6. REFERÊNCIAS

Altieri Silva, R.G. Apresentação: Uso da biomassa na geração de energia, Superintendente de Regulação dos Serviços de Geração – SRG/ANEEL; disponível em: <http://www.relop.org/eventos/Documents/IV/ANEEL%20Rui%20Altieri%20Silva.pdf>. Acesso em 17/08/2016

Altieri, M.A. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Vol. 74(1), pp.19-31. 1999.

Alves, R.T.; Fiedler, N.C.; Da Silva, E.N.; Lopes, E.S.; Do Carmo, F.C.A. Análise técnica e de custos do transporte de madeira com diferentes composições veiculares. *Revista Árvore* Vol.37(5). pp.897-904. 2013.

Andrade, G.C.; Bognola, I.A.; Bellote, A.F.J.; Franciscon, L.; Waterloo, M.J.; Bruijnzeel, L.A.. Avaliações de sítio e produtividade em plantios de *Eucalyptus urograndis* com 3 anos de idade em São Paulo, Brasil. *Pesquisa Florestal Brasileira*. Vol.31(68). 2011.

ANEEL, Resolução Normativa 235 de 14 de novembro de 2006, disponível em <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2006235.pdf>. Acesso em 04/09/2016.

Araújo, C.H.C.; Mariane, L.; Júnior, C.B.; Frigo, E.P.; Frigo, M.S.; Araújo, I.R.C.; Alves, H.J. Brazilian case study for biogas energy: Production of electric power, heat and automotive energy in condominiums of agroenergy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 40, pp. 826. 2014.

Arraut, E.M.; Nobre, P.; Nobre, C.A.; Scarpa, F.M.; Brazilian Network on Global Climate Change Research (RedeCLIMA): structure, scientific advances and future prospects; *Sustentabilidade em Debate*, Vol.3(2), pp.241-256, 01 January 2013.

Arredondo, H.I.V.; Oliveira Junior, S.; Avaliação exergética e exergoambiental da produção de biocombustíveis, Escola Politécnica da USP, Engenharia Mecânica de Energia de Fluidos, SP, 235p, 2009.

Azar, G.S.; De Araújo, A.S.F.; De Oliveira, M.E.; Azevedo, D.M.M.R.; Biomassa e atividade microbiana do solo sob pastagem em sistema de monocultura e silvipastoril; *Semina: Ciências Agrárias*, Vol.34(6), pp.2727-2736, November 2013.

Bahramara, S.; Moghaddam, M.P.; Haghifam, M.R.; Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.62, pp.609-620, September 2016.

Baliscei, M.A.; De Souza, W.; Barbosa, O.R.; Krutzmann, A.; Queiroz, E.; Costa, M.A.T.; Microclima no sistema sem sombra e silvipastoril no verão e no inverno, *Acta Scientiarum - Animal Sciences*, Vol.35(1), pp.49-56, 2013;

Bang,M.; Rokni,M.; Elmegaard,B.; Exergy analysis and optimization of a biomass gasification, solid oxide fuel cell and micro gas turbine hybrid system; *Energy*, Vol.36(8), p.4740(13), August, 2011.

Barrett,K.; Valentim,J.; Turner,B.; Ecosystem services from converted land: the importance of tree cover in Amazonian pastures; *Urban Ecosystems*, Vol.16(3), pp.573-591, 2013.

Beccali,M.; Brunone,S.; Cellura,M.; Franzitta,V.; Energy, economic and environmental analysis on RET-hydrogen system in residential buildings; *Renewable Energy*, Vol.33 Issue:3 pp: 366-382, 2008.

Bellacosa, Julia Marques; Os desafios da reprodução camponesa frente a expansão dos agrocombustíveis. O assentamento Monte Alegre: Araraquara-SP; *Revista NERA*, Vol.16(22), p.55(27), Jan-June, 2013.

Bellote,A.F.J.; Dedecek,R.A.; Da Silva,H.D; Nutrientes minerais, biomassa e deposição de serapilheira em plantio de Eucalyptus com diferentes sistemas de manejo de resíduos florestais, *Pesquisa Florestal Brasileira*, Vol.0 (56), 01 March 2010.

BEN Boletim Energético Nacional 2013, participação de renováveis recua na matriz energética com despacho térmico, *Canalenergia.com.br*, disponível em http://www.epe.gov.br/imprensa/Clipping/20130802_a.pdf. Acesso em 01/09/2016.

Benegas, L., Ilstedt, U., Roupsard, O., Jones, J., & Malmer, A. Effects of trees on infiltrability and preferential flow in two contrasting agroecosystems in Central America. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol. 183, pp. 185-196, 2014.

Bernardino,F.S. & Garcia,R., Sistemas silvipastoris; *Pesquisa Florestal Brasileira*, Vol.0(60), 01 February 2010.

Bernardino,F.S.; Tonucci,R.G.; Rasmø,G.; Neves,J.C.L.; Rocha,G.C.; Produção de forragem e desempenho de novilhos de corte em um sistema silvipastoril: efeito de doses de nitrogênio e oferta de forragem; *Revista Brasileira de Zootecnia*, Vol.40(7), pp.1412-1419, 01 July 2011.

Bioenergia: Desenvolvimento, pesquisa e inovação, Eliana G.M. Lemos e Nelson R. Stradiotto (orgs), São Paulo, Cultura Acadêmicas, ISBN 978-85-7983-256-7, 2012.

Bohlen,C. & Lewis,L.Y.; Examining the economic impacts of hydropower dams on property values usin GIS, *Journal of Environmental Management*, accepted 30 July 2008; Vol 90, pp.258-S269, 2009.

Borges, P., Eid, T., & Bergseng, E. Applying simulated annealing using different methods for the neighborhood search in forest planning problems. *European Journal of Operational Research*. Vol. 233, pp. 700-710. 2014.

Borges,F.Q.; Matrizes elétricas na economia mundial: um estudo sobre os posicionamentos na Alemanha, Estados Unidos e China; *Contribuciones a La Economía*, 01 November 2013.

Borges,L.M.; Quirino,W.F.; Higroscopicidade da madeira de pinus caribeeae var. hondurensis tratado termicamente; *Revista Biomassa & Energia*, Vol.1 n. 2, p. 173-182, abr./jun. 2004.

Boroumandjazi,G.; Rismanchi,B.; Saidur,R.; A review of exergy analysis of industrial sector, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 27, pp.198-203, 2013.

Braciani,U.; Pontes,J.R.; Estruturas de custos para implantação das usinas de geração de energia elétrica no Brasil; *Monografia de Ciências Econômicas, UFSC/CSE/DCE*, 2011.

Brand, Martha Andreia; Muñiz, Graciela Inês Bolzon de; Brito, José Otávio; Quirino, Waldir Ferreira; Influência das dimensões da biomassa estocada de Pinus taeda L. e Eucalyptus dunnii Maiden na qualidade do combustível para geração de energia, *Revista Árvore*, Vol.38(1), pp.175-183, 01 February 2014.

Capelesso,A.J.; Cazella,A.A.; Indicador de sustentabilidade dos agroecossistemas: estudo de caso em áreas de cultivo de milho; *Ciência Rural*, Vol.43(12), P.2297(7); 2013.

Castilhos,Z.M.S.; Barro,R.S.; Savian,J.F.; Amaral,H.R.B.; Produção arbórea e animal em sistema silvipastoril com Acácia-negra; *Pesquisa Florestal Brasileira*, Vol.0(60), 01 February 2010.

CCEE, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, Resultados consolidados de leilões de energia, disponível em www.ccee.org.br, acesso em 03/09/2016.

Cerqueira,S.A.A.G.; Perez,S.A.N.; Horta,L.A.N.; Junior,S.O.; Beltran,J.I.L.; Gallo,W.L.R.; Metodologias de análise termoeconômica de sistemas, UNICAMP, Faculdade Eng^a Mecânica, Tese Doutorado, Programa de Pos-Graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos, 163p., 1999.

Chakravarty, S. K., Ghosh, C. P., Suresh, A. N., & Shukla, G. Deforestation: Causes, Effects and Control Strategies. *Global Perspectives on Sustainable Forest Management*. Vol. 1, pp. 1-27, 2012.

Costa,F.C.; Werneck,M.T.F.; Gases combustíveis como alternativas à eletrotermia em aquecimento direto e calor de processo no setor industrial brasileiro; *Tese de Doutorado, USP São Paulo*, 211p, 2013.

CPFL ENERGIA, GESEL (SRE/ANEEL), USP, GEPEA; Projeto de P&D: Panorama e análise da tarifa de energia elétrica do Brasil com tarifas praticadas em países selecionados, considerando a influência do modelo institucional vigente, Relatório V – formação de custos e preços de geração e transmissão de energia elétrica, Janeiro/2015.

CPFL, 2015a: item 2.2.5 Abordagem comparativa, pg 39, Fonte: Elaboração com base em dados coletados de Maués (2008);

CPFL, 2015b: item 2.2.3. Custos na implantação de usinas termoeletricas – UTE;

CPFL, 2015c: item 2.2.4. Custos na implantação de usinas eólicas – EOL;

Da Gama Rodrigues, Emmanuela Forestieri; Barros, Nairam Félix de; Antonio Carlos Da Santos, Gabriel de Araújo, Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto, Revista Brasileira de Ciência do Solo, Vol. 29(6), pp.893-901, 01 December, 2005.

Da Silva,C.R.; Stape,J.L.; Efeito do espaçamento e arranjo de plantio na produtividade e uniformidade de clones de Eucalyptus na região nordeste do Estado de São Paulo, Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, Recursos Florestais, Piracicaba, 2005.

Da Silva,J.A.R.; Araújo,A.A.; Junior,J.B.L.; Dos Santos,N.F.A.; Garcia,A.R.; Nahúm,B.S.; Conforto térmico de búfalas em sistema silvipastoril na Amazônia Oriental; Pesquisa Agropecuária Brasileira, Vol.46(10), pp.1364-1371, 01 October 2011.

Da Silva,L.L.G.G; Silva,A.; Dias, P.F.; Souto,S.M.; De Azevedo,B.C.; Vieira,M.S.; Colombari,A.A.; Torres,A.Q.A.; Da Matta,P.M.; Perin,T.B.; Franco,A.; Evaluation of thermal comfort in a silvipastoral system in a tropical environment; Archivos Latinoamericanos de Producción Animal; Vol.18(3), 2010.

Da Silva,M.L.; Oliveira,R.J.; Valverde,S.R.; Machado,C.C.; Pires,V.A.V.; Análise do custo e do raio econômico de transporte de madeira de reflorestamentos para diferentes tipos de veículos, Revista Árvore, Vol.31(6), pp.1073-1079, 01 December 2007.

Da Silva,P.H.M.; Poggiani,F.; Impactos das doses e do parcelamento da fertilização na produtividade, lixiviação e ciclagem de nutrientes em plantações de eucalipto, Tese de doutorado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, Recursos Florestais; Piracicaba, 2011.

Dantas Filho, P.L.; Parente, V.; Análise de custos na geração de energia com bagaço de cana de açúcar: Um estudo de caso em quatro usinas de São Paulo; Dissertação de Mestrado, PPGE/USP; São Paulo, 175p, 2009.

Dantas, D.N.; Mauad, F.F.; Uso da biomassa de cana-de-açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista; Dissertação de Mestrado, USP São Carlos, 131p, 2010.

Das,N.; Wongsodihardjo,H.; Islam,S.; Modeling of multi-junction photovoltaic cell using MATLAB/Simulink to improve the conversion efficiency; Renewable Energy, Vol.74, pp.917-924, February 2015.

Faria,G.E.; De Barros,N.F.; Cunha,V.L.P.; Martins,I.S.; Cristo,R.C.; Avaliação da produtividade, conteúdo e eficiência de utilização de nutrientes em genótipos de Eucalyptus spp. no vale do Jequitinhonha, MG; Ciência Florestal, Vol.18(3), 2009.

Wit,M.; Junginger,M.; Faaij,A.; Learning in dedicated wood production systems: Past trends, future outlook and implications for bioenergy, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.19, pp.417-432, March 2013.

Dedecek,R.A.; Gurcio,G.R.; Rachwal,M.F.G.; Simon,A.A.; Efeitos de sistemas de preparo do solo na erosão e na produtividade da acácia-negra (acacia mearnsii De Wild); Ciência Florestal, Vol.17(3), 2007.

Del Carlo,F.R.; Baliestieri,J.A.P.; De Holanda,M.R.; Análise exergoeconômica aplicada a microgeração em condomínios residenciais, Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 92f., Guaratinguetá, SP, 2013

Demirbas,A.; Calculation of higher heating values of biomass fuels, Fuel, 76(5), pp.431-434, 1997.

Dias, A.N.; Leite, H.G.; da Silva, M.L.; Carvalho, A.F.; Avaliação financeira de plantações de eucalipto submetidas a desbaste; Revista Árvore, Vol.29(3), pp.419-429, 01 June 2005.

Do Canto, J.L.; Machado, C.C.; Seixas, F.; De Souza, A.P.; Sant'Anna, C.M.; Avaliação de um sistema de cavaqueamento de ponteiros de eucalipto para aproveitamento energético; Revista Árvore, Vol.35(6), pp.1327-1334, 01 December 2011.

Dos Santos,R.; De Gesmar, S.; Wehrmann, F.; Magda, E. Agroenergia no Brasil: fragilidades, riscos e desafios para o desenvolvimento sustentável; Revista Iberoamericana de Economía Ecológica (REVIBEC), Vol.15, pp.1-13, 2010.

Eloy,E.; Caron,B.O.; Quantificação e caracterização da biomassa florestal em plantios de curta duração, Dissertação de Mestrado; Universidade Federal de Santa Maria, Centro de ciência rurais, curso de pós-graduação em agronomia, Santa Maria, RS; 88p; 2013.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética, Balanço Energético Nacional 2014, Rio de Janeiro, disponível

em

<http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/BEN%202014%20Rel%20S%C3%ADntese%20ab%202013a.pdf>. Acesso em 01/09/2016.

Estrella, C.C.; Lozano, A.M.B.; Barrera, E.; Edilson, J.; Andrés, P.M.; Productividad en materia seca y captura de carbono en un sistema silvipastoril y un sistema tradicional en cinco fincas ganaderas de piedemonte en el departamento de Casanare; *Revista de Medicina Veterinaria*, Issue 24, pp.51-57, 2012.

Fahlvik, N., Elfving, B., & Wikstrom, P. Evaluation of growth functions used in the Swedish Forest Planning System Heureka. *Silva Fennica*. Vol. 48, pp. 1-17. 2014.

Ferreira, R.A.; Estrada, L.H.C.; Thiébaud, J.T.L.; Granados, L.B.C.; Junior, V.R.S.; Avaliação do comportamento de ovinos Santa Inês em sistema silvipastoril no norte Fluminense; *Ciência e Agrotecnologia*, Vol.35(2), pp.399-403, 01 April 2011.

Fey, R., Malavasi, U. C., & Malavasi, M. M. (2015). Silvopastoral system:A review regarding the family agriculture. *Revista de Agricultura Neotropical*. Vol. 2, pp. 26 - 41.

Fortunato,L.A.M.; Introdução ao planejamento da expansão e operação de sistemas de produção de energia elétrica, Universidade Fluminense, Rio de Janeiro, RJ, Editor: EDUFF/Eletróbrás, 232p, 1990.

Freitas,K.T.; Souza,R.C.R.; Seye,O.; Santos,E.C.S.; Xavier,D.J.C. ; Bacelar,A.A.; Custo de geração de energia elétrica em comunidade isolada do Amazonas: Estudo preliminar do projeto NERAM, SBPE, *Revista Brasileira de Energia*, Vol 12/Nº1, 2006.

Freitas,L.C.; Marques,G.M.; Da Silva,M.L.; Machado,R.R.; Machado,C.C.; Estudo comparativo envolvendo três métodos de cálculo de custo operacional do caminhão bitrem; *Revista Árvore*, Vol.28(6), pp.855-863, 01 December 2004.

Furtado, T.S.; Ferreira, J.C.; Brand, M.A.; Neves, M.D.; Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de *Pinus taeda* em diferentes idades; *Revista Árvore*, ISSN 0100-6762; Vol.36(3), pp.577-582, 01 June 2012.

Gaidajis,G.; Angelakoglou,K.; A review of methods contributing to the assessment of the environmental sustainability of industrial systems, *Journal of Cleaner Production*, 108, pp.725-747, 2015.

Gatto,A.; Barros,N.F.; Novais,R.F.; Da Costa,L.M.; Neves,J.C.L.; Efeito do método de preparo do solo, em área de reforma, nas suas características, na composição mineral e na produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis*; *Revista Árvore*, Vol.27(5), pp.635-646, 01 October 2003.

Ghezehei,S.B.; Everson,C.S.; Annandale,J.G.; Can productivity and post-pruning growth of *Jatropha curcas* in silvipastoral systems be regulated by manipulating tree

spacing/arrangement without changing tree density?; *Biomass and Bioenergy*, Vol.74, pp.233-243, March 2015.

Goerndt, M. E., Aguilar, F. X., & Skog, K. Resource potential for renewable energy generation from co-firing of woody biomass with coal in the Northern U.S. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 59, pp. 348-361. 2013.

Gonçalves,J.C.; Dos Santos;G.L.; Junior,F.G.S.; Martins,I.S.; Costa,J.A.; Relações entre dimensões de fibras e de densidade da madeira ao longo do tronco de *Eucalyptus urograndis*, *Scientia Forestalis*, volume 42, n.101, p.81-89, março de 2014.

Guerreiro,M.; Nicodemo,M.; Porfírio-da-Silva,V.; Vulnerability of ten eucalyptus varieties to predation by cattle in a silvipastoral system, *Agroforestry Systems*, Vol.89(4), pp.743-749, 2015.

Guohui,S.; Laihong,S.; Xiao,J.; Estimating specific chemical exergy of biomass from basic analysis data, *Industrial & engineering chemistry research*, [0888-5885], Vol.50, fasc.16, pág 9758-9766, 2011.

Gutmanis,D.; Estoque de carbono e dinâmica ecofisiológica em sistemas silvipastoris, Tese de doutorado em ciências biológicas, Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 142p. 2004.

Hela D.G; Yacine O.; Maria M.; Thierry D.; Emmanuel G.; Stéphane H.; Wood moisture content prediction using feature selection techniques and a kernel method; *Neurocomputing*, available in journal homepage: www.elsevier.com/locate/neucom, accessed in 09/11/2016.

Hepbasli,A.; A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 12, pp.593-661, 2008.

Higa,M.;Bannwart,A.C.; Cogeração e integração térmica em usinas de açúcar a álcool, Tese de doutorado, UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. 2003.

Jardeveski,R. & Porfírio da Silva,V.; Minhocas em uma pastagem arborizada na região noroeste do Estado do Paraná, Brasil; *Pesquisa Florestal Brasileira*, Vol.0(51), 01 March 2011.

Joele, M. R., Lourenço, L. F., Lourenço Júnior, J. B., Araujo, G. S., Budel, J. C., & Garcia, A. R. Meat quality of buffaloes finished in traditional or silvipastoral system in the Brazilian eastern Amazon. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. Vol. 97, pp. 1740-1745, 2017.

Kiyan,M.; Bingöl,E.; Melikoglu,M.; Albostan,A.; Modelling and simulation of a hybrid solar heating system for greenhouse applications using Matlab/Simulink; Energy Conversion and Management, Vol.72, pp.147-155, August 2013.

Lauri, P., Havlík, P., Kindermann, G., Forsell, N., Böttcher, H., & Obersteiner, M. (2014). Woody biomass energy potential in 2050. Energy Policy. Vol. 44, pp. 19-31.

Li, H., Guo, S., Cui, L., Yan, J., Liu, J., & Wang, B. Review of renewable energy industry in Beijing: Development status, obstacles and proposals. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 43, pp. 711-725. (2015).

Lima,E.A.; Abdala,E.M.; Wenzel,A.A., Influência da umidade da madeira no poder calorífico superior da madeira – Comunicado técnico 220 (CT220), Embrapa Florestas, Colombo, ISSN-1517-5030, Dez. 2008;

Limberger,E.; Calonego,J.C.; Fidalski,J.; Disponibilidade de Água no Solo em Sistemas Silvopastoril com Eucalipto em Renque e Pastagem, Dissertação de Mestrado; Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, SP. 2012.

Long,H.; Li,X.; Wang,H.; Jia,J.; Biomass resources and their bioenergy potential estimation: A review; Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.26, p.344(9), Oct, 2013.

Lopes,J.E.G.; Barros,M.T.L.; Modelo de planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de produção de energia elétrica, Tese de doutorado, Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. SP. 2007.

Lourenzani, Wagner Luiz; Caldas, Marcellus Marques; Mudanças no uso da terra decorrentes da expansão da cultura da cana-de-acúcar na região oeste do estado de São Paulo; Ciência Rural, Vol.44(11), p.1980(8), 2014.

Lozano,M.A. & Valero,A.; Theory of The Exergetic Cost, Energy Vol. 18, Nº 9, PP. 939-960, 1993.

Lunka,P.; Patil,S.D.; Impact of tree planting configuration and grazing restriction on canopy interception and soil hydrological properties: implications for flood mitigation in silvipastoral systems; Hydrological Process; Vol 30(6), pp.945-958, 2016.

Luu,T.C.; Binkley,D.; Stape,J.L.; Neighborhood uniformity growth of individual Eucalyptus trees; Forest Ecology and Management, Vol.289, pp.90-97, 1 February 2013.

Machado,C.C.; Lopes,E.S.; Birro,M.H.; Elementos básicos do Transporte Florestal Rodoviário. 2.ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa. MG, 2009.

Mahlia, T.M.I.; Saktisahdan, T.J.; Jannifar, A.; Hasan, M.H.; Matseelar, H.S.C.; A review of available methods and development on energy storage technology update, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 33, pp.532-545, 2014.

Mancilla-Leytón, J.M.; Sánchez-Lineros, V.; Martín Vicente, A.; Influence of grazing on the decomposition of *Pinus pinea* L. needles in a silvipastoral system in Doñana, Spain; *Plant and soil*; Vol 373(1); pp.173-181; 2013.

Marini, J.A. & Rossi, L.A.; Sistematização do dimensionamento técnico e econômico de sistemas fotovoltaicos isolados por meio de programa computacional; *Engenharia Agrícola*, Vol.25(1), pp.67-75, 01 April 2005.

Martínez, J.; Cajas, Y.S.; León, J.D.; Osorio, N.W.B.; Robert, L.; Silvicultural systems enhance soil quality in grasslands of Colombia; *Applied and Environmental Soil Science*, Vol 2014, 8p., 2014.

Marun, F.; Mella, S.C.; Recuperação de pastagens pela sucessão de culturas anuais e bianuais; Londrina, IAPAR, 24p. (IAPAR:Boletim Técnico, 52), 1997.

Mcgroddy, M.E.; Lerner, A.M.; Burbano, D.V.; Schneider, L.C.; Rudel, T.K.; Carbon stocks in silvipastoral systems: A study from four communities in southeastern Ecuador; *Biotropica*; Vol. 47(4), pp.407-415, 2015.

Mead, D.J. & Pimentel, D.; Use of energy analyses in silvicultural decision-making; *Biomass and Bioenergy*, Vol.30(4), pp.357-362, 2006.

Mello, C.R.; Viola, M.R.; Norton, L.D.; Silva, A.M.; Weimar, F.A.; Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin, *Catena*, 75 (2008), p.234-247, 7 July 2008.

Melotto, A.; Nicodemo, M.L.; Bocchese, R.A.; Laura, V.A.; Gontijo Neto, M.M.; Schleder, D.D.; Porfírio da Silva, V.; Sobrevivência e crescimento inicial em campo de espécies florestais nativas no Brasil Central indicadas para sistemas silvipastoris; *Revista Árvore*, Vol.33(3), pp.425-432, 01 June 2009.

Mendes, M.E.S.S.; Nogueira, M.F.M.; Metodologia para análise exergética-econômica de plantas a vapor para geração de eletricidade consumindo resíduo de biomassa amazônica, *Dissertação de Mestrado*; Universidade Federal do Pará, Instituto de tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânicas, Belém, PA; 101p; 2009.

Moran, M.J.; Sciubba, E., *Exergy Analysis; Principles and Practice*, *Journal of Engin. Gas Turb. And Power*, V.116, April, 1994.

Mota, H.S.C.; Fátima, M.S.; Análise técnico econômica de unidades geradoras de energia distribuída; *Dissertação de Mestrado*, 96p., 2011.

Mudasser,M.; Yiridoe,E.K.; Corscadden,K.; Cost-benefit analysis of grid-connected wind–biogas hybrid energy production, by turbine capacity and site; *Renewable Energy*, Vol.80, pp.573-582, August 2015.

Müller,M.D.; Paciullo,D.S.C.; Brighenti,A.M.; de Castro,C.R.T.; Salles,T.T.; Equações e altura, volume e afilamento para eucalipto e acácia estabelecidos em sistema silvipastoril; *Floresta*, Vol.44(3), pp.473-484, 2014.

Murphy,H.T.; O’connell,D.A.; Raison,R.J.; Warden,A.C.; Booth,T.H.; Herr,A.; Braid,A.L.; Crawford, D.F.; Hayward,J.A.; Jovanovic,T.; Mcivor,J.G.; O’connor,M.H.; Poole,M.L.; Prestwidge,D.; Raisbeck-Brown,N.; Rye,L.; Biomass production for sustainable aviation fuels: A regional case study in Queensland; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.44, pp.738-750, April 2015.

Naji,H.R.; Bakar,E.S.; Soltani,M.; Ebadi,S.E.; Abdul-Hamid,H.; Javad,S.K.S.; Sahri,M.H.; Effect of initial planting density and tree features on growth, wood density, and anatomical properties from a *Hevea brasiliensis* trial plantation; *Forest Products Journal*, Vol.64(1-2), p.41(7), March, 2014.

NBR 11941: Madeira – Determinação da densidade básica. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2003.

Nepomuceno, A. N., Silva, I. C. Caracterização e avaliação de sistemas silvipastoris da região noroeste do estado do Paraná. *Revista Floresta*. Vol. 39, pp. 279-287. 2009.

Ni,Y.; Eskeland,G.S.; Giske,J.; Hansen,J.P.; The global potential for carbon capture and storage from forestry; *Carbon Balance and Management*, Vol.11(1), pp.1-8, Feb 2016.

Nicodemo,M.L.F.; Porfírio da Silva,V.; Santos,P.M.; Vinholis,M.M.B.; De Freitas,A.R.; Caputti,G.; Desenvolvimento inicial de espécies florestais em sistema silvipastoril na região sudeste, *Pesquisa Florestal Brasileira*, Vol.0(60), 01 February, 2010.

Nils Fahlvik, Björn Elfving & Peder Wikström; Evaluation of growth functions used in the Swedish Forest Planning System Heureka; *Silva Fennica*; Vol 48(2), 2014. article id 1013, available in <http://dx.doi.org/10.14214/sf.1013> accessed in 07/11/2016.

NREL, National Renewable Energy Laboratory – NREL. Disponível em <<http://www.nrel.gov/>> acesso em 14/07/2016.

NTC: Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística NTC & Logística, disponível em <<http://www.ntctec.org.br/canais/artigos/tecnico-economico-inct/incl-indice-nacional-do-custo-do-transporte-de-carga-lotacao/54>> Acesso em 04/02/2016;

Oliveira Filho,D.; Tanabe,C.S.; Costa,J.M.; Considerações da análise exergética em tarifas de energia elétrica, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - Agriambi, Vol.4(1), pp.114-119, 01 April 2000.

Oliveira,T.K.; Macedo, R.L.G.; Venturin, N.; Higashikawa, E.M.; Desempenho silvicultural e produtivo de eucalipto sob diferentes arranjos espaciais em sistema agrosilvipastoril; Pesquisa Florestal Brasileira, Vol.0(60), 01 February 2010.

ONS, Implantação de fontes alternativas no SIN, constante no Relatório anual de 2013 do Operador Nacional do Sistema: Resultados técnicos em 2013, disponível em http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/relatorios_anuais/2013/HTML/01-00-destaques.html acesso em 25/08/2016.

Paciullo, D.S.C.; Campos, R.C.; Gomide, C.A.M.; Castro; C.R.T.; Tavela, R.C.; Rossiello, R.O.P.; Crescimento de capim-braquiária influenciado pelo grau de sombreamento e pela estação do ano; Pesquisa Agropecuária Brasileira, Vol.43(7), pp.917-923, 01 July 2008.

Paciullo, D.S.C.; Fernandes, P.B.; Gomide, C.A.M.; Castro; C.R.T.; Sobrinho, F.S.; Carvalho, C.A.B.; Dinâmica do crescimento de espécies de braquiária de acordo com a dose de nitrogênio e o sombreamento; Revista Brasileira de Zootecnia, Vol.40(2), pp.270-276, 01 February 2011.

Paz,D.; Cárdenas,G.J. Valoración econômica de las pérdidas de exergía de las operaciones térmicas en la industria azucarera de caña; Revista Industrial y Agrícola de Tucumán, 01, Vol.82(1-2), pp.11-16, December 2005.

Pellegrini,L.F.; Junior,S.O.; Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade; Tese de Doutorado, USP São Carlos, 131p, 2008.

Perry,D.A.; Spatial modelling of succession-disturbance dynamics in forest ecosystems: Concepts and examples; Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, Vol. 9(3), PP.191-210, 2008.

Peter,S.; Stefan,W.; Tobias,S.; Sebastia,K.; Simulating possible impacts of roundwood procurement problems in Austria on wood-based energy production and forest-based industries; Biomass and Bioenergy, Vol.81, p.602(10), 2015.

Plaza, Charlene Maria C. De Ávila; Santos, Nivaldo Dos;Romeiro, Viviane; Inovações tecnológicas e políticas públicas: análises sociais e ambientais no contexto das atividades industriais sucroalcooleiras no Brasil; Revista Internacional Interdisciplinar INTERthesis, Vol.5(1), pp.1-28, 01 January 2008.

PNE Plano Nacional de Energia 2050, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, disponível em <http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/default.aspx?CategoriaID=346>. Acesso em 01/09/2016.

Poddar,S.; Kamruzzaman,M.; Sujan,S.M.A.; Hossain,M.; Jamal,M.S.; Gafur,M.A.; Khanam,M.; Effect of compression pressure on lignocellulosic biomass pellet to improve fuel properties: Higher heating value; Fuel, Vol.131, pp.43-48, 1 September 2014.

Porfírio da Silva,V.; Mazuchowski,J.Z.; Sistemas silvipastoris: paradigma dos pecuaristas para agregação de renda e qualidade, Curitiba: EMATER, 52p. (Informação técnica, 50), 1999.

Porfírio da Silva,V.; Moraes,A.; Moletta,J.L.; Pontes,L.S.; Oliveira,E.B.; PELISSARI,A.; Carvalho,P.C.F.; Danos causados por bovinos em diferentes espécies arbóreas recomendadas para sistemas silvipastoris; Pesquisa Florestal Brasileira, Vol.32(70), 01 June 2012.

Ragland,K.W.; Aerts,D.J.; Baker,A.J.; Properties of wood for combustion analysis; Bioresource Technology; Vol.37(2), pp.161-168; 1991.

Ranking das tarifas residenciais (Grupo B1) disponível em <http://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>. Acesso em 24/08/2016.

Rezac, P. and Matghalchi,H., A Brief Note on the Historical Evolution and Present State of exergy analysis; International Journal Exergy, Vol 1, N°1, PP.4265-437, 2004.

Ribaski,J.;Rakocevic,M.; Porfírio da Silva,V.; Avaliação de um sistema silvipastoril com eucalipto (*Corymbia citriodora*) e braquiária (*Brachiaria brizantha*) no noroeste do Paraná. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 9., São Paulo, Anais, CD-ROM, SP, 2003.

Ribeiro,C.M.; Coelho,S.T.; Análise energética, econômica e ambiental da biodigestão de resíduos agropecuários gerados por pequenos e médios produtores rurais da região sul do Espírito Santo, Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Energia EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo, SP, 2013.

Rodrigues,C.O.D.; Araújo, S.A.C.; Rocha,N.S.; Braz,T.G.S.; Delmar,S.; Villela,J.; Viana, M.C.M.; Relações luminosas e desempenho do capim-braquiária em sistema silvipastoril; Acta Scientiarum - Animal Sciences, Vol.36(2), pp.129-136, 2014.

Santana,R.C.; Barros,N.F.; Leite,H.G.; Comerford,N.B.; Novais,R.F.; Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil; Revista Árvore, Vol.32(4), pp.697-706, 01 August 2008.

Schroeder,S.T.; Costa,A.; Obé,E.; Support schemes and ownership structures – the policy context for fuel cell based micro-combined heat and Power; *Journal of Power Sources*, Vol 196(21), pp.9051-9057, 2011.

Schumacher,M.V.; Witschoreck,R.; Calil,F.N.; Biomassa em povoamentos de Eucalyptus spp. de pequenas propriedades rurais em Vera Cruz, RS; *Ciência Florestal*, Vol.21(1), 2012.

Sciubba,E.; Wall,G.; A brief commented history of exergy from the beginning to 2004, *International Journal of Thermodynamics*, Vol 10(1), pp.1-26, March, 2007.

Seager,T.; Theis,T.; A thermodynamic basis for evaluating environmental policy trade-offs. *Clean Technologies and Environmental Policy*, Vol.4(4), pp.217-226, 2003.

SIFLOR, Projeto SIFLOR – Sistema de Informações para Planejamento Florestal disponível em <<http://projetosiflor.blogspot.com.br/p/software.html>>, Acesso em 25/08/2016.

Silva,A.A.;Salman,A.K.;Guerra, S.M.G., Caracterização das propriedades com sistema silvipastoril na região central de Rodônia; André De Almeida Silva, Bolsista Cnpq/dti/embrapa Rondônia; Ana Karina Dias Salman, Cpaf-RO; Sinclair Mallet Guy Guerra, Pgdra/unir, Porto Velho, RO, 2011.

Silva,S.B.; Silva,M.M.; Severino,M.A.G.; De Oliveira,M.A.G.; A stand-alone hybrid photovoltaic, fuel cell and battery system: A case study of Tocantins, Brazil, *Renewable Energy*, Vol.57, pp.384-389, September 2013.

Soares, A.B.; Sartor, L.R.; Adami, P.F.; Varella, A.C.; Fonseca, L.; Mezzalira, J.C.; Influência da luminosidade no comportamento de onze espécies forrageiras perenes de verão; *Revista Brasileira de Zootecnia*, Vol.38(3), pp.443-451, 01 March 2009.

Souza,B.B.; Silva,I.J.O.; Mellace;E.M.; Santos;R.F.S.; Zotti;C.A.; Garcia,P.R., Avaliação do ambiente físico promovido pelo sombreamento sobre o processo termorregulatório em novilhas leiteiras, *Revista Brasileira de Zootecnia*, V.9, nº3; p685-694, ISSN 1808-6845, 2010c.

Souza,W.; Barbosa,O.R.; Marques,J.A.; Gasparino,E. Cecato,U. Barbero,L.M.; Comportamento de bovinos de corte em sistemas silvipastoris com eucalipto; *Revista Brasileira de Zootecnia*, Vol.39(3), pp.677-684, 01 March 2010b.

Souza,W.;Barbosa,O.R; Marques,J.A.; Costa;M.A.T.; Gasparino,E.; Limberger,E.; Microclima em sistema silvipastoris com eucalipto em renques com diferentes alturas, *Revista Brasileira de Zootecnia*, Vol.9(3); p685-694, 01 March 2010a.

Stark,H.; Nothdurft,A.; Block,J.; Bauhus,J.; Forest restoration with *Betula* ssp. and *Populus* ssp. nurse crops increases productivity and soil fertility; *Forest Ecology and Management*, Vol.339, pp.57-70, 1 March 2015.

Szargut, J.; Morris, D.; Steward, F. R.; *Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes*; New York. 1988.

Temesgen,H.; Hoef,J.M.V.; Evaluation of the spatial linear model, random forest and gradient nearest-neighbour methods for imputing potential productivity and biomass of the Pacific Northwest forests, *Forestry*, Vol.88(1), pp.131-142, 1 January 2015.

Tomé,M.; Barreiro,S.; Analysis of the Impact of the Use of Eucalyptus Biomass for Energy on Wood Availability for Eucalyptus Forest in Portugal: a Simulation Study; *Ecology and Society*, Vol.17(2), pp.14, 01 June 2012.

Tsatsaronis,G.; *Thermoeconomic Analysis and Optimization of Energy Systems*, Progress in Energy and Combustion Science. V.19, PP.227-257, Pergamon Press, Great Britain, 1993.

Van Den Broek,R.; Faaij,A.; Van Wijk,A.; Biomass combustion for power generation; *Biomass and Bioenergy*, Vol.11(4), PP.271-281, 1996.

Vengatesh,R.P. & Rajan,S.E.; Investigation of cloudless solar radiation with PV module employing Matlab–Simulink; *Solar Energy*, Vol.85(9), pp.1727-1734, 2011.

Vieira,S.; Oliveira Junior,S.; Estudo de configurações de sistemas térmicos de geração de energia elétrica através da análise de exergia e de termoeconomia; *Dissertação de Mestrado*; Instituto de Eletrotécnica e Energia USP, São Paulo, 1997.

Wittmann,D.; Aporte para a matriz elétrica do Brasil em 2050 - Descentralizada, mais limpa, eficiente e renovável, 5th Academic International Workshop Advances in Cleaner Production. “Cleaner production towards a sustainable transition”, São Paulo, Brazil, Instituto de Energia e Ambiente – IEE da USP, SP, May 20th to 22th, 2015.

Wittmann,N., Yildiz,O.; A microeconomic analysis of decentralized small scale biomass based CHP plants — The case of Germany, *Energy Policy*, 63, p.123-129, 2013.

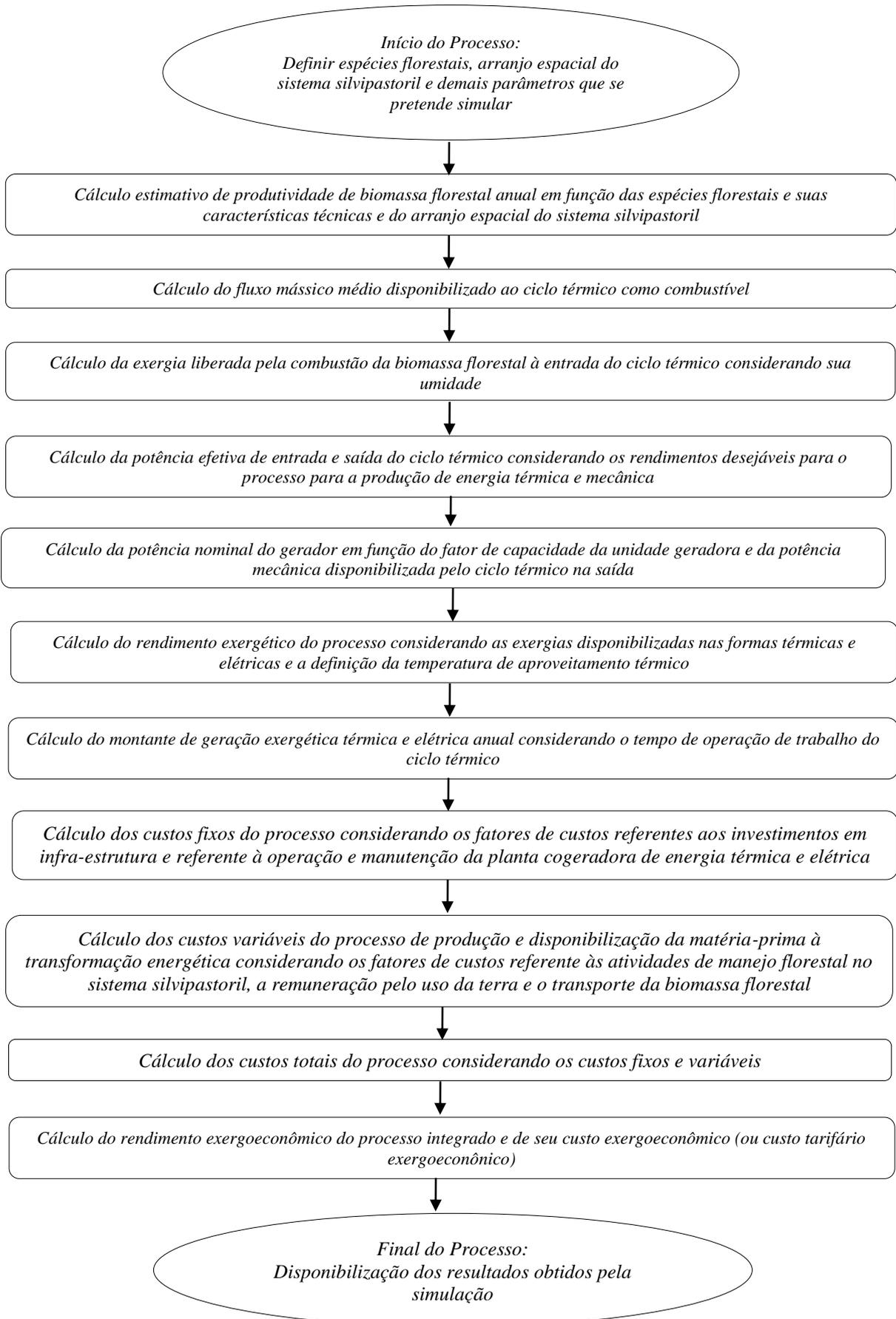
Xavier,D.F.; Ledo,F.J.S.; Paciullo,D.S.C.; Pires,M.F.A.; Boddey,R.M.; Dinâmica da serapilheira em pastagens de braquiária em sistema silvipastoril e monocultura; *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Vol.46(10), pp.1214-1219, 01 October 2011.

Ye,X.; Li,C.; A novel evaluation of heat-electricity cost allocation in cogenerations based on entropy change method, *Energy Policy*, Vol.60, pp.290-295, September 2013.

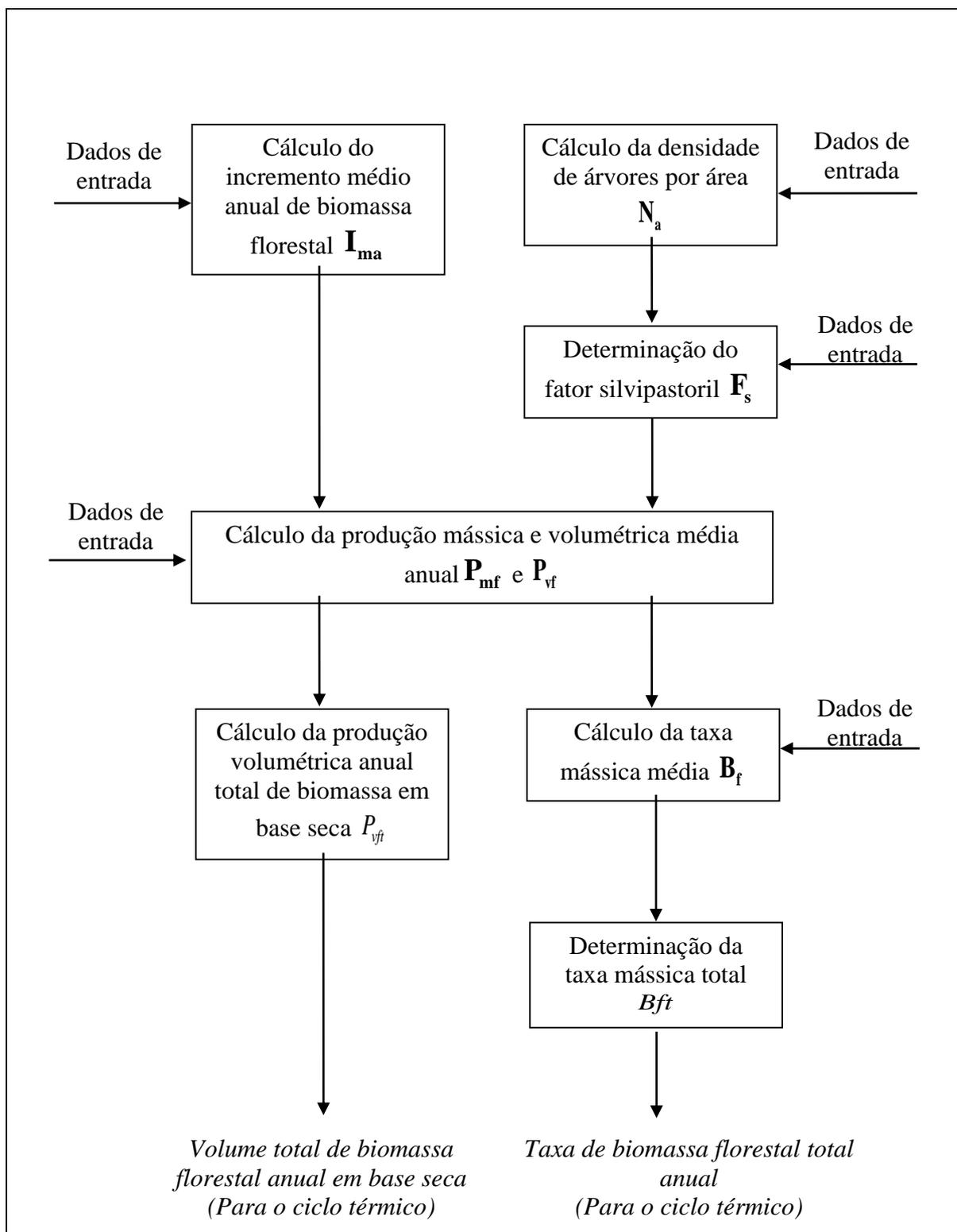
Zhang,L.; Li,X.; Jiang,J.; Li,S.; Yang,J.; Li,J.; Modelagem e análise de um sistema de células de combustível de óxido sólido 5 kW a partir das perspectivas de controle

cooperativo de segurança térmica e alta eficiência dinâmica; International Journal of Hydrogen Energy, Vol.40(1), pp. 456-476, 5 January, 2015.

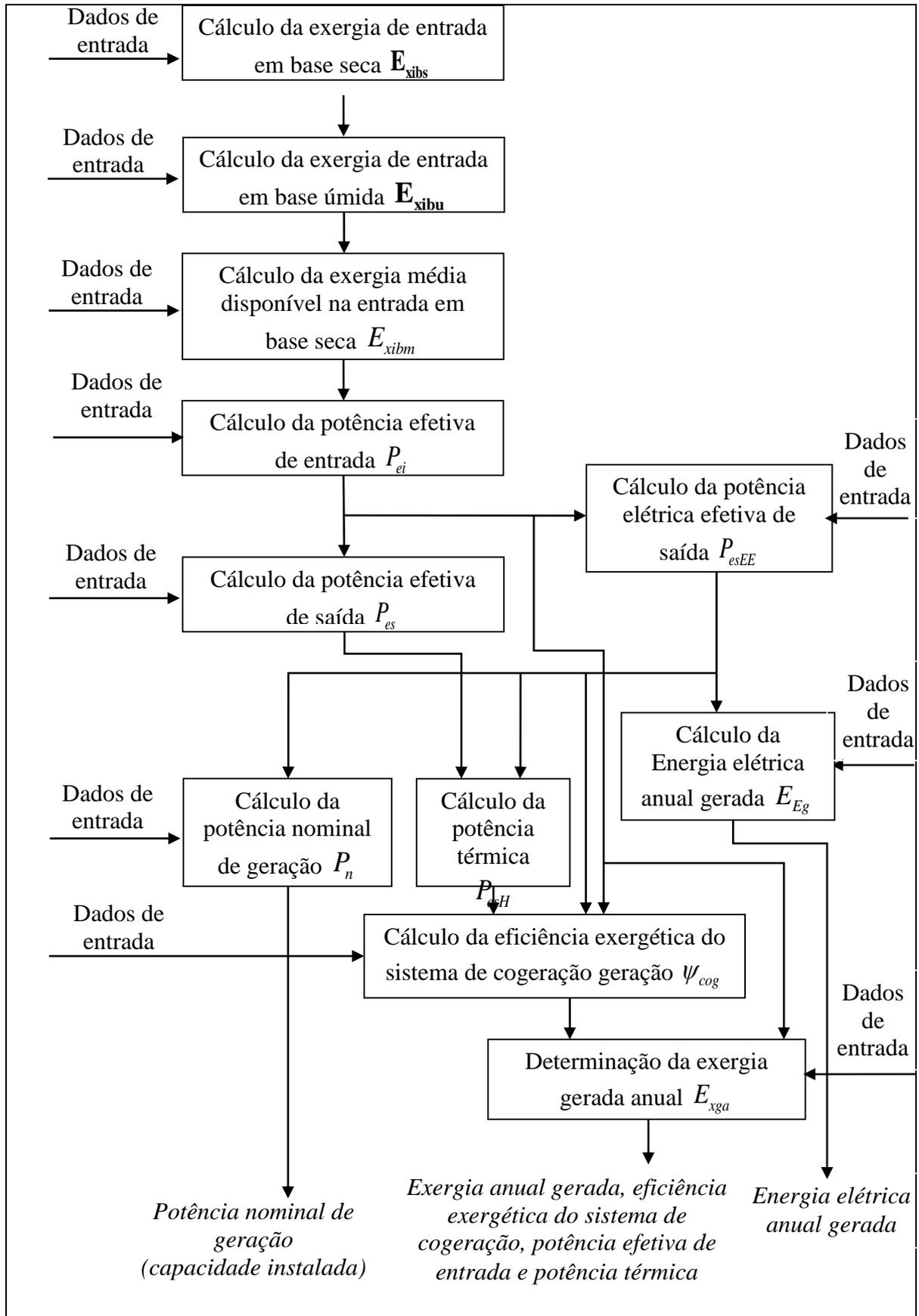
ANEXO A – Diagrama de blocos do sistema proposto



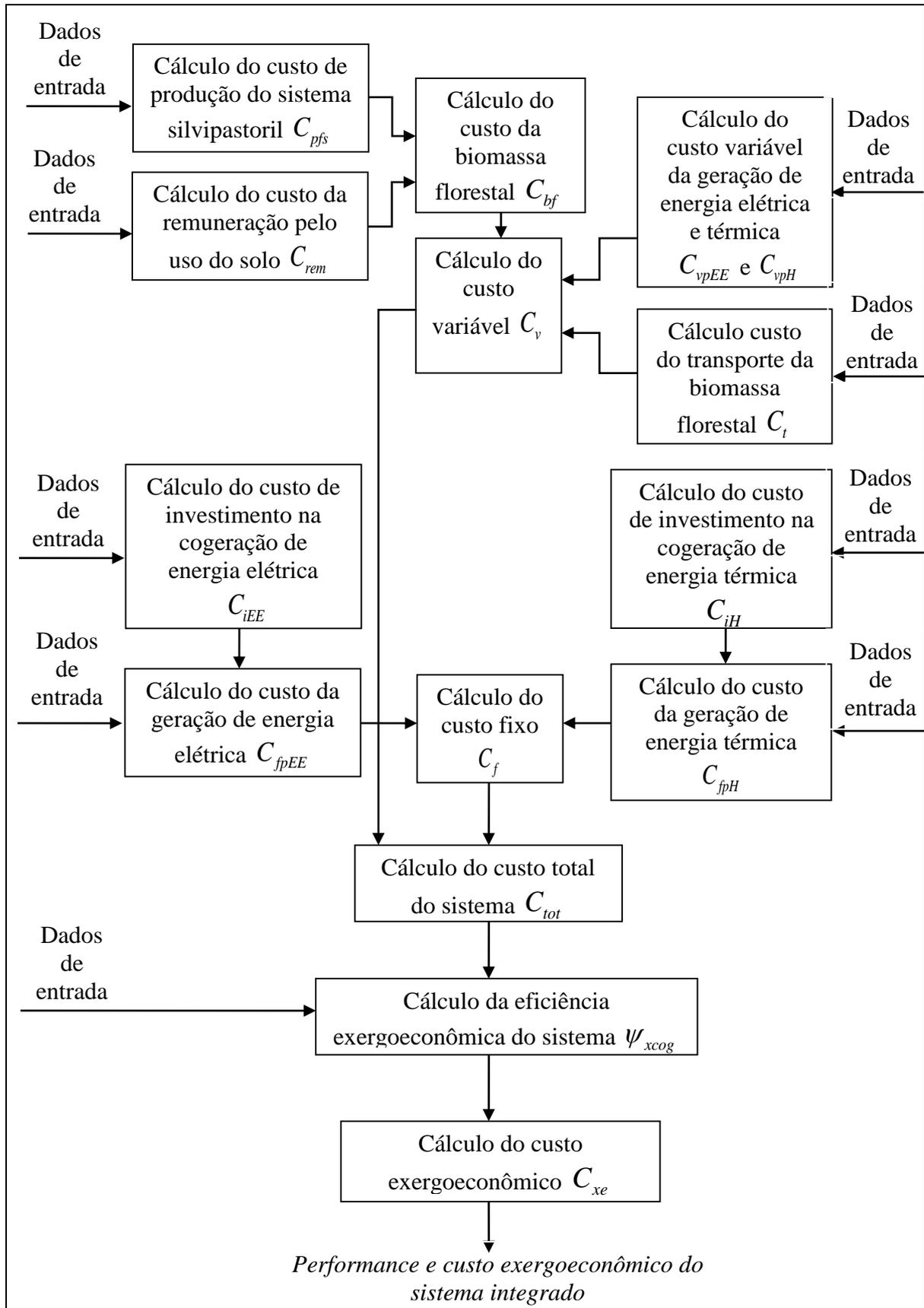
ANEXO B – Diagrama de blocos referente ao balanço de massa do sistema silvipastoril



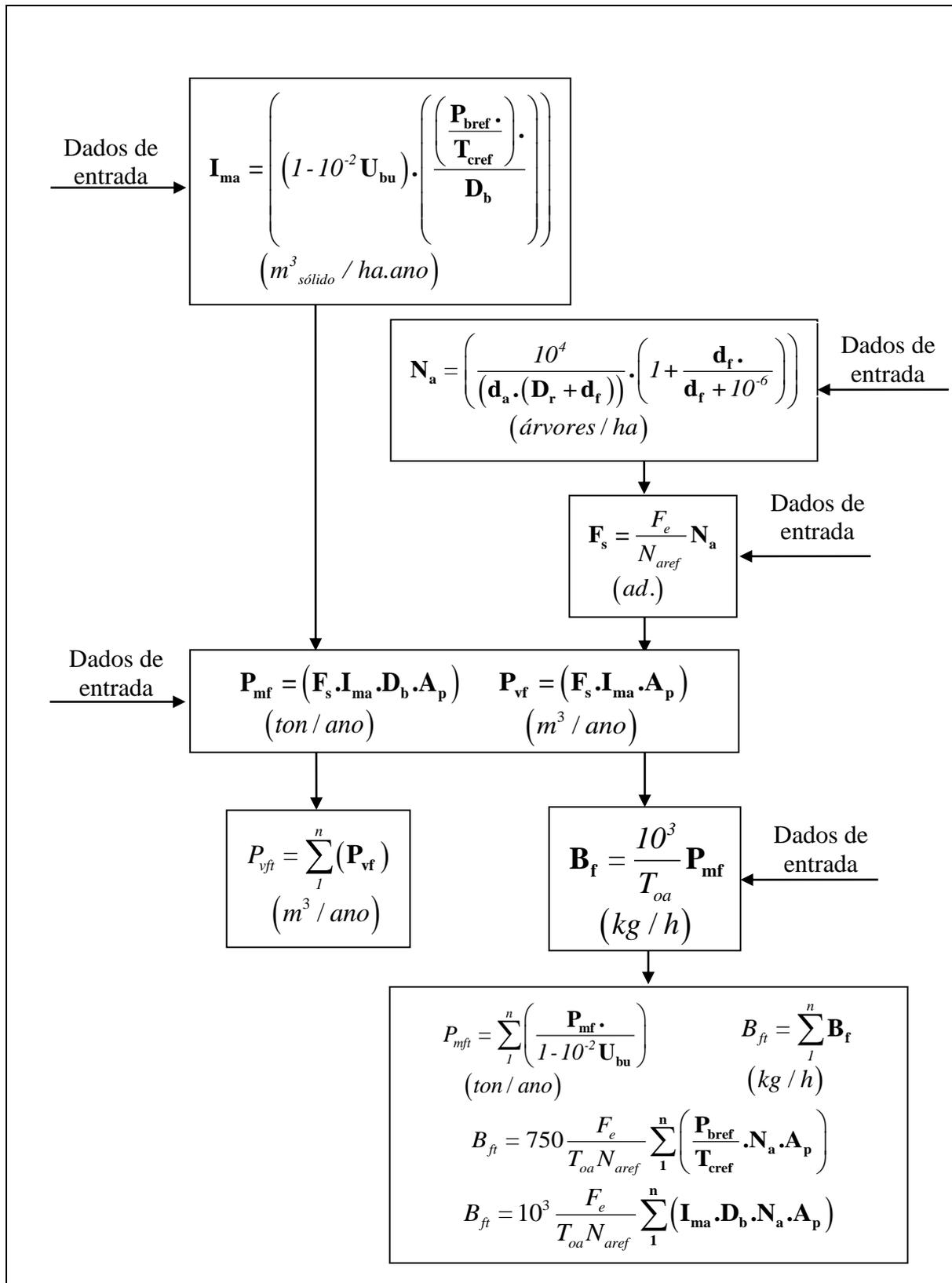
ANEXO C – Diagrama de blocos do balanço de energia do sistema de cogeração



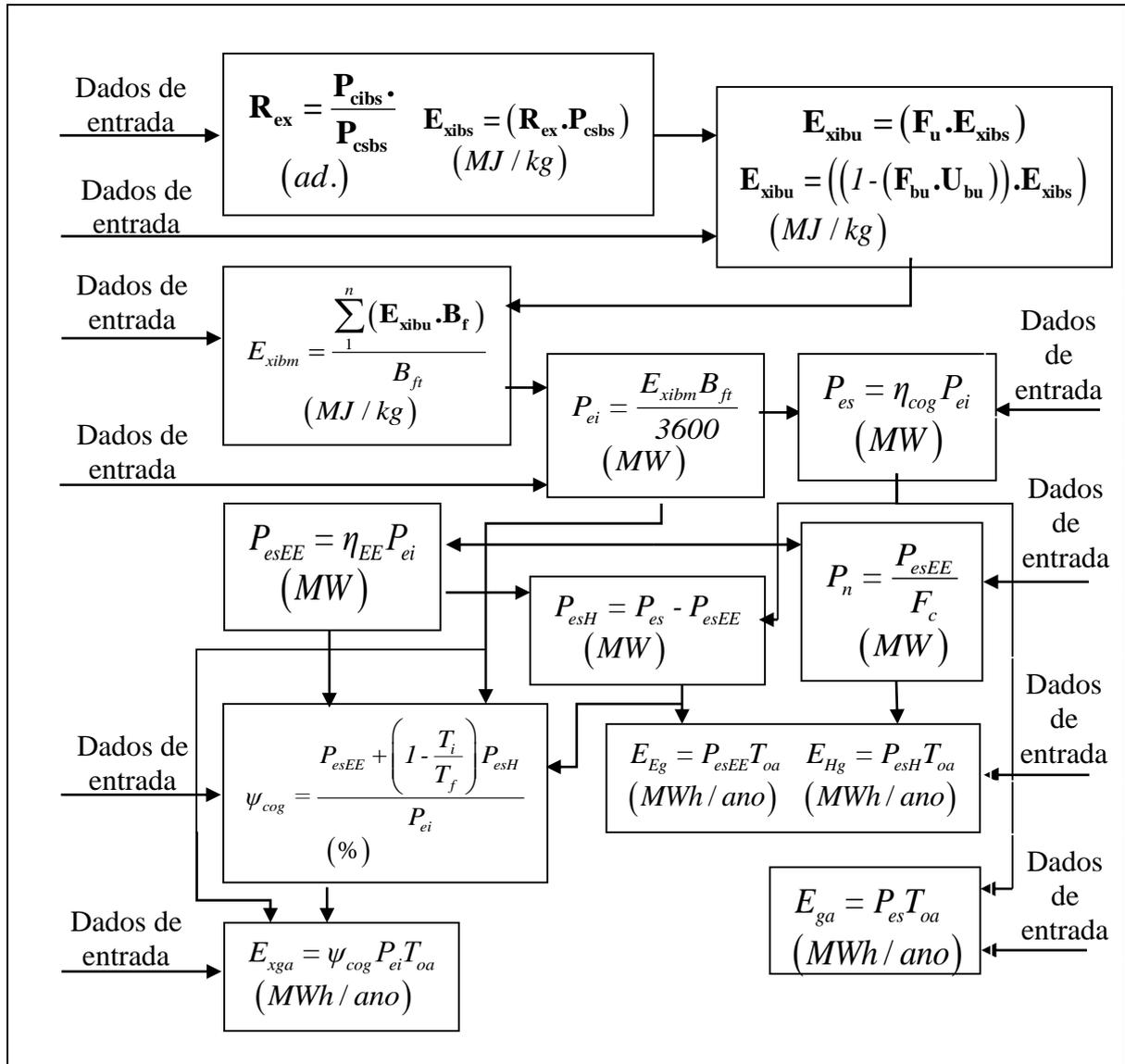
ANEXO D – Diagrama de blocos do balanço termoeconômico do sistema integrado



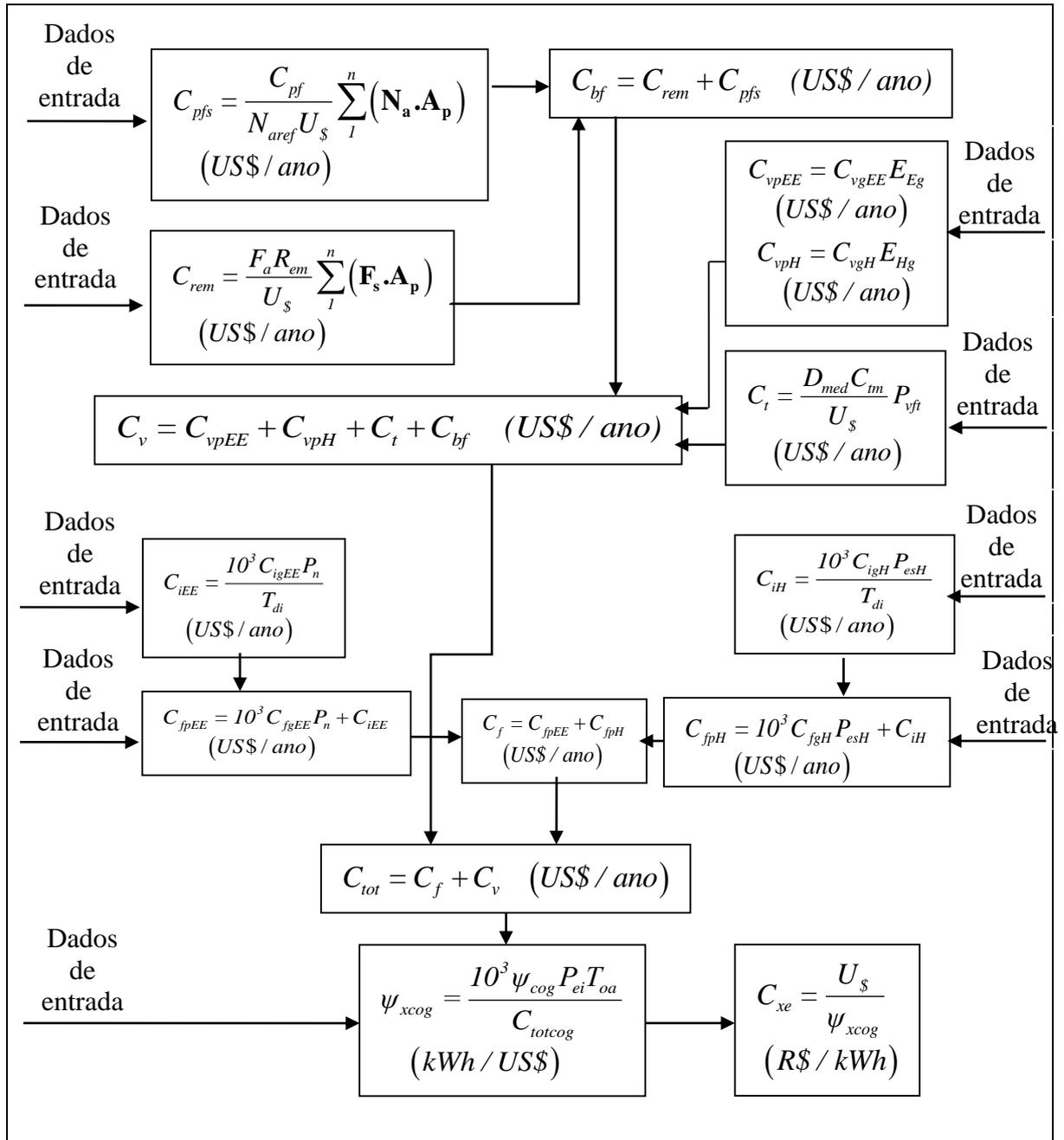
ANEXO E – Diagrama de blocos com representação das equações e variáveis do balanço de massa



ANEXO F – Diagrama de blocos com representação das equações e variáveis do balanço de energia



ANEXO G – Diagrama de blocos com representação das equações e variáveis do balanço termoeconômico



ANEXO H – Levantamento de dados

Tabela H.1: Contratos vigentes em setembro de 2016 UTE modalidade bagaço de cana

Nome da usina	UF	Potência da usina (MW)	Energia negociada por contrato por ano (MW médio)	Preço de venda atualizado (R\$/MWh)	Valores Contratados
PARANAPANEMA	SP	60,0	17,3	143,42	2.481,22
VALE DO TIJUCO II	MG	40,0	15,0	144,57	2.168,52
PASSA TEMPO	MS	67,8	21,8	145,97	3.182,08
TROPICAL BIOENERGIA	GO	50,0	7,3	134,25	980,04
MERIDIANO	SP	60,0	0,1	139,58	13,96
NOBLE ENERGIA II	SP	30,0	0,1	139,59	13,96
BEVAP	MG	60,0	1,0	141,44	141,44
IACO	MS	30,0	4,0	143,42	573,69
VALE DO ROSÁRIO	SP	97,0	10,8	143,44	1.549,12
QUIRINÓPOLIS	GO	80,0	10,0	202,29	2.022,90
PEDRO AFONSO	TO	80,0	18,7	203,43	3.804,07
SAO JOSE COLINA	SP	83,0	33,4	204,41	6.827,34
COLORADO	SP	52,8	0,9	218,20	196,38
CEVASA	SP	48,0	7,0	219,72	1.538,01
DA PEDRA	SP	70,0	24,4	220,44	5.378,81
PORTO DAS AGUAS	GO	70,0	6,3	233,49	1.470,98
ALCIDIA	SP	38,1	11,7	233,73	2.734,66
ANGELICA	MS	64,0	15,0	233,73	3.505,98
ELDORADO	MS	12,0	5,9	233,73	1.379,02
ALTO TAQUARI	MT	72,7	27,0	250,59	6.765,92
COSTA RICA	MS	72,7	27,0	252,32	6.812,76
VALE DO TIJUCO	MG	45,0	7,0	253,62	1.775,32
AGUA EMENDADA	GO	72,7	27,0	253,96	6.856,93
CHAPADAO	MS	192,0	12,0	255,18	3.062,11

PORTO DAS AGUAS	GO	70,0	12,0	255,78	3.069,32
MORRO VERMELHO	GO	72,7	27,0	255,84	6.907,79
DECASA	SP	70,0	16,0	256,49	4.103,90
CACHOEIRA DOURADA	GO	80,0	15,0	256,84	3.852,63
BEVAP	MG	80,0	20,0	257,26	5.145,19
JATAI	GO	105,0	34,0	257,32	8.748,72
SAO FERNANDO ACUCAR E ALCOOL	MS	48,0	5,0	257,76	1.288,82
BARRA BIOENERGIA	SP	136,0	34,0	258,14	8.776,68
CAÇU I	GO	130,0	27,0	258,37	6.975,98
SANTA LUZIA I	MS	130,0	26,0	258,37	6.717,61
CONQUISTA DO PONTAL	SP	100,0	22,0	258,37	5.684,20
BONFIM	SP	45,0	10,0	258,43	2.584,35
IPAUSSU BIOENERGIA	SP	62,0	19,0	258,50	4.911,47
SAO LUIZ	SP	70,0	8,0	258,65	2.069,20
BOA VISTA	GO	80,0	11,0	258,87	2.847,55
CBB - COMPANHIA BIOENERGETICA BRASILEIRA	GO	18,1	6,0	258,89	1.553,31
CLEALCO QUEIROZ	SP	35,0	7,0	259,29	1.815,01
FERRARI	SP	27,0	6,0	259,64	1.557,84
ANGELICA	MS	32,0	10,0	259,67	2.596,70
NOROESTE PAULISTA	SP	60,0	11,0	259,92	2.859,15
BIOPAV II	SP	140,0	15,0	260,14	3.902,03
COCAL II	SP	160,0	22,0	260,33	5.727,21
DESTILARIA ANDRADE	SP	33,0	20,0	261,25	5.225,03
NOBLE ENERGIA	SP	30,0	11,0	261,79	2.879,71
		Total:	704,7		167.034,62
			Médias:	228,13	237,03

Fonte: Elaboração própria com base em CCEE, 2016 – Resultado consolidado dos leilões de energia elétrica por contrato

Tabela H.2: Fatores de capacidade típicas de usinas geradoras do setor elétrico brasileiro

Fonte primária	F _c	Referências
Grandes usinas hidroelétricas UHEs	0,55	EPE-BEN (2014)
Pequenas e médias centrais hidroelétricas PCHs e CGHs	0,57	EPE-BEN (2014)
Grandes usinas termoeletricas UTEs ou CGTs (fósseis)	0,14	EPE-BEN (2012)
Grandes usinas termoeletricas UTEs (renováveis)	0,60	Carvalho (2009)
Usinas termonucleares	0,85	EPE-PNE (2007)
Eólicas existentes até 2013	0,55	EPE-BEN (2014)
Eólicas futuras (projeção)	0,47	ONS (2014)
Solares diretas (sem acumulação)	0,18	EPE-GS (2012)
Solares indiretas (com acumulação)	0,70	Teske et al (2010)
Maremotriz	0,20	Wittmann, (2015)

Fonte: Wittmann (2015)

Tabela H.3: Custo da potência instalada nas últimas usinas UTEs no SIN

Usina UTE	Potência (MW)	Investimento (10 ⁶ R\$)	Combustível	Custo instalado	
				(R\$/kW)	(US\$/kW)
Passa Tempo	67,8	139,71	Biomassa	2061,00	1212,00
Interlagos	40,0	70,0	Biomassa	1750,00	1029,00
Candiota III	350,0	1500,0	Carvão	2857,00	1680,00
Baixada Fluminense	530,0	986,3	Gás	1861,00	1095,00
Maranhão III	499,2	1100,0	Gás	2204,00	1296,00
Custo Médio:				2147,00	1262,60

Fonte: Braciani (2011) e CPFL (2015b) com adequação.

Tabela H.4: Características e produtividade de espécies florestais

Espécie florestal	D _b (g/cm ³)	P _{csbs} (MJ/kg)	I _{ma} (m ³ /ha. ano)
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,52	19,46	45
<i>Eucalyptus saligna</i>	0,62	19,46	44,5
<i>Mimosa scabrella (bracatinga)</i>	0,66	20,09	22
<i>Grevillea robusta</i>	0,6	19,46	27,5
<i>Hovenia dulcis (Uva-do-Japão)</i>	0,61	19,67	22,5

<i>Melia azedarach (Cinamomo-gigante)</i>	0,55	19,12	34
<i>Schizolobium parahyba (Guapuruvu)</i>	0,44	19,02	23
<i>Piptadenia gonoacantha (Pau-Jacaré)</i>	0,75	18,16	20

ANEXO I – Definição das variáveis na janela de programação/comando

```
clear
Dr=[21 18 18];df=[0 3 3];da=[2 1.7 3];
Pbref=[225 212 75];Tcref=[7 6 3];Db=[0.52 0.62 0.45];Ap=[200 250 300];
Fu=[0.75 0.73 0.77];Fbu=[0.0096 0.0093 0.0098];Fe=1.5;Naref=1111;Toa=365*24;
Rex=[0.9 0.95 0.85];Pcsbs=[19.46 19.05 19.12];
ncog=0.75;nEE=0.25;Ti=25;Tf=224;
CigEE=1100;Tdi=20;CigH=250;CfgEE=20;CfgH=5;
CvgEE=1.5;CvgH=0.5;Rem=1200;Fa=0.2;U$=3.50;
Cpf=785.17;Dmed=25;Ctm=0.30;
```

```
Na=(10000*(da.*(Dr+df)).^(-1)).*(1+df.*(df+1e-6).^(-1));
Ubu=((1-Fu)/Fbu);
Fs=Fe/Naref.*Na;Ima=(1-0.01*Ubu).*((Pbref./Tcref)./Db);
Pmf=prod([Fs;Ima;Db;Ap],1);Pmft=sum(Pmf./(1-0.01.*Ubu));
Bf=1e3/Toa*Pmf;Bft=sum(Bf);
etc.
```

ANEXO J – Solução utilizada para apresentação dos resultados

```
clear
//PARA O BALANÇO DE MASSA:
//INSERIR VALORES DAS VARIÁVEIS MATRICIAIS (1 x n): Dr,df, da
Dr=[21 18 18];df=[0 3 3];da=[2 1.7 3];
//INSERIR VALORES DAS VARIÁVEIS MATRICIAIS (1 x n): Pbref,Tcref,Db, Ap
Pbref=[225 212 75];Tcref=[7 6 3];Db=[0.52 0.62 0.45];Ap=[200 250 300];
//INSERIR VALORES DAS VARIÁVEIS (escalares): Fu, Fe, Naref, Toa
Fu=0.75;Fe=1.5;Naref=1111;Toa=365*24;
//PARA O BALANÇO DE ENERGIA:
//INSERIR VALORES DAS VARIÁVEIS MATRICIAIS (1 x n): Rex,Pcsbs
Rex=[0.9 0.95 0.85];Pcsbs=[19.46 19.05 19.12];Fu=[0.75 0.73 0.77];
Fbu=[0.0096 0.0093 0.0098];
//INSERIR VALORES DAS VARIÁVEIS (escalares): ncog, nEE, Ti, Tf
ncog=0.75;nEE=0.25;Fc=0.8;Ti=25;Tf=224;
//PARA O BALANÇO TERMOECONÔMICO:
//INSERIR VALORES DAS VARIÁVEIS (escalares): CigEE, Tdi, CigH, CfgEE, CfgH
CigEE=1100;Tdi=20;CigH=250;CfgEE=20;CfgH=5;
//INSERIR VALORES DAS VARIÁVEIS (escalares): CvgEE, CvgH, Rem, Fa, U$
CvgEE=1.5;CvgH=0.5;Rem=1200;Fa=0.2;U$=3.50;
//INSERIR VALORES DAS VARIÁVEIS (escalares):Cpf, Dmed, Ctm
Cpf=785.17;Dmed=25;Ctm=0.30;
// BALANÇO DE MASSA: CÁLCULO DA DENSIDADE ARBÓREA (Na):
Na=(10000*(da.*(Dr+df)).^(-1)).*(1+df.*(df+1e-6).^(-1)); //Eq(1)
```

```
// CÁLCULO DO INCREMENTO MÉDIO ANUAL E FATOR SILVIPASTORIL (Ima,Fs):
Fs=Fe/Naref.*Na;Ima=(1-0.01*Ubu).*((Pbref./Tcref)./Db); //Eq(2,3)
// CÁLCULO DA PRODUTIVIDADE MÁSSICA E VOLUMÉTRICA BF
(Pmf,Pmft,Pvf,Pvft):
Pmf=prod([Fs;Ima;Db;Ap],1);Pmft=sum(Pmf./(1-0.01.*Ubu)); //Eq(4,5)
Pvf=Fs.*Ima.*Ap;Pvft=sum(Pmf./Db); //Eq(6,7)
// CÁLCULO DO FLUXO DE MASSA (Bf,Bft):
Bf=1e3/Toa*Pmf;Bft=sum(Bf); //Eq(8,9)

// BALANÇO DE ENERGIA:
// CÁLCULO DA EXERGIA DE ENTRADA DO CICLO TÉRMICO (Exibs,Exibu,Exibm):
etc.
```

```
// APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS
// PROPÓSITO : APRESENTAR O RENDIMENTO E O CUSTO EXERGOECONÔMICO:
D1=[Pxcog Cxe];disp('RENDIMENTO E CUSTO EXERGOECONÔMICO DO
PROCESSO: ');
disp(' Psixcog Cxe');
disp(' [kWh/US$] [R$/kWh]');disp(D1)
```

RENDIMENTO E CUSTO EXERGOECONÔMICO DO PROCESSO:

<i>Psixcog</i>	<i>Cxe</i>
[kWh/US\$]	[R\$/kWh]
56.166481	0.0623147

```
// APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS
// PROPÓSITO : APRESENTAR OS DADOS DO BALANÇO DE MASSA:
// DEFINE E APRESENTA D1 COM GRANDEZAS E UNIDADES
D1=[Na Ima Fs;Pmf Bf Pvf];disp('Resultados Obtidos: balanço de massa MATRIZ 2 x n')
disp(' Na[arv/ha] Ima[m3/ha.ano] Fs[adim]');
disp(' Pmf[ton/ano] Bf[kg/h] Pvf[m3/ano]');
disp(D1)
```

Resultados Obtidos: balanço de massa MATRIZ 3 x 6

<i>Na</i> [arv/ha]	<i>Ima</i> [m3/ha.ano]	<i>Fs</i> [adim]	<i>Pmf</i> [ton/ano]	<i>Bf</i> [kg/h]	<i>Pvf</i> [m3/ano]
238.09524	46.35989	0.3214607	1549.8999	176.92921	2980.5767
560.224	42.741935	0.7563780	5011.0045	572.03247	8082.2653
317.46026	41.666667	0.4286142	2410.955	275.22317	5357.6777

```

// APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS
//PROPÓSITO:APRESENTAR DADOS PARA ANÁLISE DE COMPONENTES DE
CUSTOS
disp(' RESULTADOS OBTIDOS: CUSTOS DIVERSOS EM (US$/ano) E EM (%)')
// DEFINE E DESCREVE D1
D1=[Ctot Cf Cv]
disp(' CustoTotal CustosFixos CustosVariáveis');
// DEFINE D11,D21 E APRESENTA D21 (ABSOLUTO E PERCENTUAL)
D11=100*D1./Ctot;D21=[D1;D11];disp(D21)

// DEFINE E DESCREVE D2
D2=[Crem Cpfs Ct Cbf CvpEE CvpH];
disp(' Crem Cpfs Ct Cbf CvpEE CvpH');
// DEFINE D12,D22 E APRESENTA D22 (ABSOLUTO E PERCENTUAL)
D12=100*D2./Ctot;D22=[D2;D12];disp(D22)

// DEFINE E DESCREVE D3
D3=[CiEE CiH CfpEE CfpH];
disp(' CiEE CiH CfpEE CfpH');
// DEFINE D13,D23 E APRESENTA D23 (ABSOLUTO E PERCENTUAL)
D13=100*D3./Ctot;D23=[D3;D13];disp(D23)

```

RESULTADOS OBTIDOS: CUSTOS DIVERSOS EM (US\$/ano) E EM (%)

<i>CustoTotal</i>	<i>CustosFixos</i>	<i>CustosVariáveis</i>			
232295.34	97486.769	134808.57			
100.	41.966735	58.033265			
<i>Crem</i>	<i>Cpfs</i>	<i>Ct</i>	<i>Cbf</i>	<i>CvpEE</i>	<i>CvpH</i>
26192.291	57126.115	35186.828	83318.407	11645.238	4658.0951
11.275427	24.59202	15.147453	35.867447	5.0131173	2.0052469
<i>CiEE</i>	<i>CiH</i>	<i>CfpEE</i>	<i>CfpH</i>		
48743.384	22156.084	66468.251	31018.517		
20.983368	9.5378944	28.613683	13.353052		

ANEXO K – RESULTADOS

Tabela K.1: Resultados obtidos na simulação do estudo de caso 1

RESULTADOS OBTIDOS SOBRE DADOS DIVERSOS DO PROCESSO					
<i>Na[arv/ha]</i>	<i>Ima[m3/ha.ano]</i>	<i>Fs[adim]</i>	<i>Pmf[ton/ano]</i>	<i>Bf[kg/h]</i>	<i>Pvf[m3/ano]</i>
560.224	45.716003	0.7563780	17980.862	2051.2049	34578.58
<i>Bft[kg/h]</i>	<i>Pmft[ton/ano]</i>	<i>Pvft[m3/ano]</i>	<i>Exibm[MJ/kg]</i>		
<i>Pei[MW]</i>	<i>Pes[MW]</i>	<i>PesEE[MW]</i>	<i>Pn[MW]</i>		
<i>PesH[MW]</i>	<i>EHg[MWh/ano]</i>	<i>EEg[MWh/ano]</i>	<i>Psicog[%]</i>		
2051.2049	24312.151	34578.58	13.500375		
7.6922319	5.7691739	1.923058	2.4038225		
3.8461159	33715.052	16857.526	43.498943		
<i>Todas unidades de custo em (US\$/ano) e em (%) em relação ao Ctot</i>					
<i>Crem</i>	<i>Cpfs</i>	<i>Ct</i>	<i>Cbf</i>	<i>CvpEE</i>	
<i>CvpH</i>	<i>CiEE</i>	<i>CiH</i>	<i>CfpEE</i>	<i>CfpH</i>	
51865.922	113121.02	148193.92	164986.94	25286.289	
10114.516	132210.24	48076.449	180286.68	67307.029	
8.699776	18.974453	24.857437	27.674229	4.2414179	
1.6965672	22.1764	8.0641454	30.240545	11.289804	
RENDIMENTO E CUSTO EXERGOECONÔMICO DO PROCESSO:					
<i>Psixcog</i>	<i>Cxe</i>				
<i>[kWh/US\$]</i>	<i>[R\$/kWh]</i>				
49.199252	0.0711393				

Tabela K.2: Resultados obtidos na simulação do estudo de caso 2

RESULTADOS OBTIDOS SOBRE DADOS DIVERSOS DO PROCESSO					
<i>Na[arv/ha]</i>	<i>Ima[m3/ha.ano]</i>	<i>Fs[adim]</i>	<i>Pmf[ton/ano]</i>	<i>Bf[kg/h]</i>	<i>Pvf[m3/ano]</i>
333.33328	32.894737	0.3600359	1847.5529	210.7635	3552.9863
333.33328	34.114183	0.3600359	2284.5138	260.61074	3684.6997
333.33328	23.809524	0.3600359	2057.3482	234.69636	3428.9137
<i>Bft[kg/h]</i>	<i>Pmft[ton/ano]</i>	<i>Pvft[m3/ano]</i>	<i>Exibm[MJ/kg]</i>		
<i>Pei[MW]</i>	<i>Pes[MW]</i>	<i>PesEE[MW]</i>	<i>Pn[MW]</i>		
<i>PesH[MW]</i>	<i>EHg[MWh/ano]</i>	<i>EEg[MWh/ano]</i>	<i>Psicog[%]</i>		
706.0706	8435.1278	10666.6	13.196548		
2.5882484	1.9411863	0.6470621	0.8088276		
1.2941242	11344.293	5672.1464	43.498943		
<i>Todas unidades de custo em (US\$/ano) e em (%) em relação a Ctot</i>					
<i>Crem</i>	<i>Cpfs</i>	<i>Ct</i>	<i>Cbf</i>	<i>CvpEE</i>	
<i>CvpH</i>	<i>CiEE</i>	<i>CiH</i>	<i>CfpEE</i>	<i>CfpH</i>	

24688.179	67292.432	45713.999	91980.611	8508.2196
3403.2879	44485.52	16176.553	60662.073	22647.174
10.599635	28.891367	19.626871	39.491002	3.6529233
1.4611693	19.099436	6.9452493	26.044685	9.723349

RENDIMENTO E CUSTO EXERGOECONÔMICO DO PROCESSO:

<i>Psixcog</i>	<i>Cxe</i>
[kWh/US\$]	[R\$/kWh]
42.372881	0.0826

Tabela K.3: Resultados obtidos na simulação do estudo de caso 3

RESULTADOS OBTIDOS SOBRE DADOS DIVERSOS DO PROCESSO

<i>Na[arv/ha]</i>	<i>Ima[m3/ha.ano]</i>	<i>Fs[adim]</i>	<i>Pmf[ton/ano]</i>	<i>Bf[kg/h]</i>	<i>Pvft[m3/ano]</i>
476.1904	44.129555	0.5571985	6393.1194	729.30863	12294.46
560.224	43.803056	0.6555276	8901.3752	1015.4432	14357.057
390.24382	27.017544	0.4566309	3701.1139	422.2124	6168.5232
238.0952	22.088007	0.2785992	938.43955	107.05448	1538.4255
390.24382	33.492823	0.4566309	4205.8113	479.78682	7646.9296
277.77773	22.248804	0.3250324	1590.9483	181.49079	3615.7916
560.224	22.175439	0.6555276	8176.8446	932.79085	10902.46
476.1904	22.105263	0.5571985	4310.9567	491.78151	6158.5096

<i>Bft[kg/h]</i>	<i>Pmft[ton/ano]</i>	<i>Pvft[m3/ano]</i>	<i>Exibm[MJ/kg]</i>
<i>Pei[MW]</i>	<i>Pes[MW]</i>	<i>PesEE[MW]</i>	<i>Pn[MW]</i>
<i>PesH[MW]</i>	<i>EHg[MWh/ano]</i>	<i>EEg[MWh/ano]</i>	<i>Psicog[%]</i>
4359.8687	51868.112	62682.156	13.312525
16.122461	12.091846	4.0306152	5.0382691
8.0612305	70664.746	35332.373	43.498943

Todas unidades de custo em (US\$/ano) e em (%) em relação a Ctot

<i>Crem</i>	<i>Cpfs</i>	<i>Ct</i>	<i>Cbf</i>	<i>CvpEE</i>
<i>CvpH</i>	<i>CiEE</i>	<i>CiH</i>	<i>CfpEE</i>	<i>CfpH</i>
141627.77	356416.27	268637.81	498044.04	52998.56
21199.424	277104.8	100765.38	377870.18	141071.53
10.415173	26.210518	19.755372	36.625691	3.8974643
1.5589857	20.378027	7.4101915	27.788218	10.374268

RENDIMENTO E CUSTO EXERGOECONÔMICO DO PROCESSO:

<i>Psixcog</i>	<i>Cxe</i>
[kWh/US\$]	[R\$/kWh]
45.209488	0.0774174

Tabela K.4: Resultados obtidos na simulação do estudo de caso 4

<i>RESULTADOS OBTIDOS SOBRE DADOS DIVERSOS DO PROCESSO</i>					
<i>Na[arv/ha]</i>	<i>Ima[m3/ha.ano]</i>	<i>Fs[adim]</i>	<i>Pmf[ton/ano]</i>	<i>Bf[kg/h]</i>	<i>Pvf[m3/ano]</i>
560.224	45.716003	0.7563780	17980.862	3567.6313	34578.58
<i>Bft[kg/h]</i>	<i>Pmft[ton/ano]</i>	<i>Pvft[m3/ano]</i>	<i>Exibm[MJ/kg]</i>		
<i>Pei[MW]</i>	<i>Pes[MW]</i>	<i>PesEE[MW]</i>	<i>Pn[MW]</i>		
<i>PesH[MW]</i>	<i>EHg[MWh/ano]</i>	<i>EEg[MWh/ano]</i>	<i>Psicog[%]</i>		
3567.6313	24312.151	34578.58	13.500375		
13.378989	6.6894945	3.3447472	6.6894945		
3.3447472	16857.526	16857.526	32.387707		
<i>Todas unidades de custo em (US\$/ano) e em (%) em relação a Ctot</i>					
<i>Crem</i>	<i>Cpfs</i>	<i>Ct</i>	<i>Cbf</i>	<i>CvpEE</i>	
<i>CvpH</i>	<i>CiEE</i>	<i>CiH</i>	<i>CfpEE</i>	<i>CfpH</i>	
51865.922	113121.02	148193.92	164986.94	25286.289	
5057.2578	367922.2	41809.341	501712.09	58533.077	
5.7388436	12.516577	16.397312	18.255421	2.7978691	
0.5595738	40.709735	4.6261063	55.513275	6.4765488	
<i>RENDIMENTO E CUSTO EXERGoeCONômICO DO PROCESSO:</i>					
<i>Psixog</i>	<i>Cxe</i>				
<i>[kWh/US\$]</i>	<i>[R\$/kWh]</i>				
24.164417	0.1448411				

Tabela K.5: Resultados obtidos na simulação do estudo de caso 5

<i>RESULTADOS OBTIDOS SOBRE DADOS DIVERSOS DO PROCESSO</i>					
<i>Na[arv/ha]</i>	<i>Ima[m3/ha.ano]</i>	<i>Fs[adim]</i>	<i>Pmf[ton/ano]</i>	<i>Bf[kg/h]</i>	<i>Pvf[m3/ano]</i>
560.224	45.716003	0.7563780	17980.862	2051.2049	34578.58
<i>Bft[kg/h]</i>	<i>Pmft[ton/ano]</i>	<i>Pvft[m3/ano]</i>	<i>Exibm[MJ/kg]</i>		
<i>Pei[MW]</i>	<i>Pes[MW]</i>	<i>PesEE[MW]</i>	<i>Pn[MW]</i>		
<i>PesH[MW]</i>	<i>EHg[MWh/ano]</i>	<i>EEg[MWh/ano]</i>	<i>Psicog[%]</i>		
2051.2049	24312.151	34578.58	13.500375		
7.6922319	5.7691739	1.923058	2.4038225		
3.8461159	33715.052	16857.526	43.498943		
<i>Todas unidades de custo em (US\$/ano) e em (%) em relação a Ctot</i>					
<i>Crem</i>	<i>Cpfs</i>	<i>Ct</i>	<i>Cbf</i>	<i>CvpEE</i>	
<i>CvpH</i>	<i>CiEE</i>	<i>CiH</i>	<i>CfpEE</i>	<i>CfpH</i>	
97248.604	144072.01	296387.83	241320.61	33715.052	
16857.526	200318.54	85469.243	260414.1	104699.82	
10.200243	15.111472	31.087624	25.311715	3.5363154	
1.7681577	21.011076	8.9647259	27.314399	10.981789	

RENDIMENTO E CUSTO EXERGOECONÔMICO DO PROCESSO:

<i>Psixcog</i>	<i>Cxe</i>
[kWh/US\$]	[R\$/kWh]
30.765196	0.1137649

Tabela K.6: Resultados obtidos na simulação do estudo de caso 6

RESULTADOS OBTIDOS SOBRE DADOS DIVERSOS DO PROCESSO

<i>Na[arv/ha]</i>	<i>Ima[m3/ha.ano]</i>	<i>Fs[adim]</i>	<i>Pmf[ton/ano]</i>	<i>Bf[kg/h]</i>	<i>Pvf[m3/ano]</i>
333.33328	33.653846	0.3600359	1890.1887	236.27359	3634.9783
333.33328	33.064516	0.3600359	2214.2211	276.77763	3571.3243
333.33328	20.833333	0.3600359	1800.1797	225.02246	3000.2995

<i>Bft[kg/h]</i>	<i>Pmft[ton/ano]</i>	<i>Pvft[m3/ano]</i>	<i>Exibm[MJ/kg]</i>
<i>Pei[MW]</i>	<i>Pes[MW]</i>	<i>PesEE[MW]</i>	<i>Pn[MW]</i>
<i>PesH[MW]</i>	<i>EHg[MWh/ano]</i>	<i>EEg[MWh/ano]</i>	<i>Psicog[%]</i>

738.07368	8435.1278	10206.602	12.520431
2.5669446	1.9252085	0.6417362	1.2834723
1.2834723	10267.778	5133.8892	43.498943

Todas unidades de custo em (US\$/ano) e em (%) em relação a *Ctot*

<i>Crem</i>	<i>Cpfs</i>	<i>Ct</i>	<i>Cbf</i>	<i>CvpEE</i>
<i>CvpH</i>	<i>CiEE</i>	<i>CiH</i>	<i>CfpEE</i>	<i>CfpH</i>
30860.224	85722.844	98420.806	116583.07	10267.778
5133.8892	96260.423	19252.085	128347.23	26952.919
8.000977	22.224936	25.517074	30.225913	2.662076
1.331038	24.956962	4.9913924	33.27595	6.9879494

RENDIMENTO E CUSTO EXERGOECONÔMICO DO PROCESSO:

<i>Psixcog</i>	<i>Cxe</i>
[kWh/US\$]	[R\$/kWh]
23.159498	0.1511259

Tabela K.7a: Resultados obtidos na simulação para o projeto original da indústria do estudo de caso 7

<i>RESULTADOS OBTIDOS SOBRE DADOS DIVERSOS DO PROCESSO</i>					
<i>Na[arv/ha]</i>	<i>Ima[m3/ha.ano]</i>	<i>Fs[adim]</i>	<i>Pmf[ton/ano]</i>	<i>Bf[kg/h]</i>	<i>Pvf[m3/ano]</i>
560.224	46.35989	0.7563780	557263.68	63571.033	1071660.9
<i>Bft[kg/h]</i>	<i>Pmft[ton/ano]</i>	<i>Pvft[m3/ano]</i>	<i>Exibm[MJ/kg]</i>		
<i>Pei[MW]</i>	<i>Pes[MW]</i>	<i>PesEE[MW]</i>	<i>Pn[MW]</i>		
<i>PesH[MW]</i>	<i>EHg[MWh/ano]</i>	<i>EEg[MWh/ano]</i>	<i>Psicog[%]</i>		
63571.033	743018.24	1071660.9	12.816356		
226.31916	145.96477	30.408017	38.010021		
29.466972	1012970.5	266556.67	26.455996		
<i>Todas unidades de custo em (US\$/ano) e em (%) em relação a Ctot</i>					
<i>Crem</i>	<i>Cpfs</i>	<i>Ct</i>	<i>Cbf</i>	<i>CvpEE</i>	
<i>CvpH</i>	<i>CiEE</i>	<i>CiH</i>	<i>CfpEE</i>	<i>CfpH</i>	
1585105.6	3457159.3	4592832.5	5042264.8	399835.01	
303891.15	2090551.1	1444459.4	2850751.6	2022243.2	
10.420224	22.726798	30.192528	33.147023	2.6284498	
1.9977306	13.742941	9.4956396	18.740373	13.293895	
<i>RENDIMENTO E CUSTO EXERGOECONÔMICO DO PROCESSO:</i>					
<i>Psixcog</i>	<i>Cxe</i>				
<i>[kWh/US\$]</i>	<i>[R\$/kWh]</i>				
34.503709	0.1014384				

Tabela k.7b: Resultados obtidos na simulação para o projeto de ampliação da indústria do estudo de caso 7

<i>RESULTADOS OBTIDOS SOBRE DADOS DIVERSOS DO PROCESSO</i>					
<i>Na[arv/ha]</i>	<i>Ima[m3/ha.ano]</i>	<i>Fs[adim]</i>	<i>Pmf[ton/ano]</i>	<i>Bf[kg/h]</i>	<i>Pvf[m3/ano]</i>
560.224	46.35989	0.7563780	576852.58	65805.679	1109331.9
<i>Bft[kg/h]</i>	<i>Pmft[ton/ano]</i>	<i>Pvft[m3/ano]</i>	<i>Exibm[MJ/kg]</i>		
<i>Pei[MW]</i>	<i>Pes[MW]</i>	<i>PesEE[MW]</i>	<i>Pn[MW]</i>		
<i>PesH[MW]</i>	<i>EHg[MWh/ano]</i>	<i>EEg[MWh/ano]</i>	<i>Psicog[%]</i>		
65805.679	769136.78	1109331.9	12.816356		
234.27473	165.2185	49.662025	62.077531		
29.466902	1012968.1	435337.31	33.776126		
<i>Todas unidades de custo em (US\$/ano) e em (%) em relação a Ctot</i>					
<i>Crem</i>	<i>Cpfs</i>	<i>Ct</i>	<i>Cbf</i>	<i>CvpEE</i>	
<i>CvpH</i>	<i>CiEE</i>	<i>CiH</i>	<i>CfpEE</i>	<i>CfpH</i>	
1640825.1	3578685.2	4754279.5	5219510.3	653005.97	
303890.42	3414264.2	1444456.	4655814.8	2022238.3	
9.318243	20.323347	26.999545	29.64159	3.7084197	
1.7257932	19.3896	8.2030628	26.440364	11.484288	
<i>RENDIMENTO E CUSTO EXERGOECONÔMICO DO PROCESSO:</i>					
<i>Psixcog</i>	<i>Cxe</i>				
<i>[kWh/US\$]</i>	<i>[R\$/kWh]</i>				
39.39204	0.0888504				

ANEXO L – FIGURAS

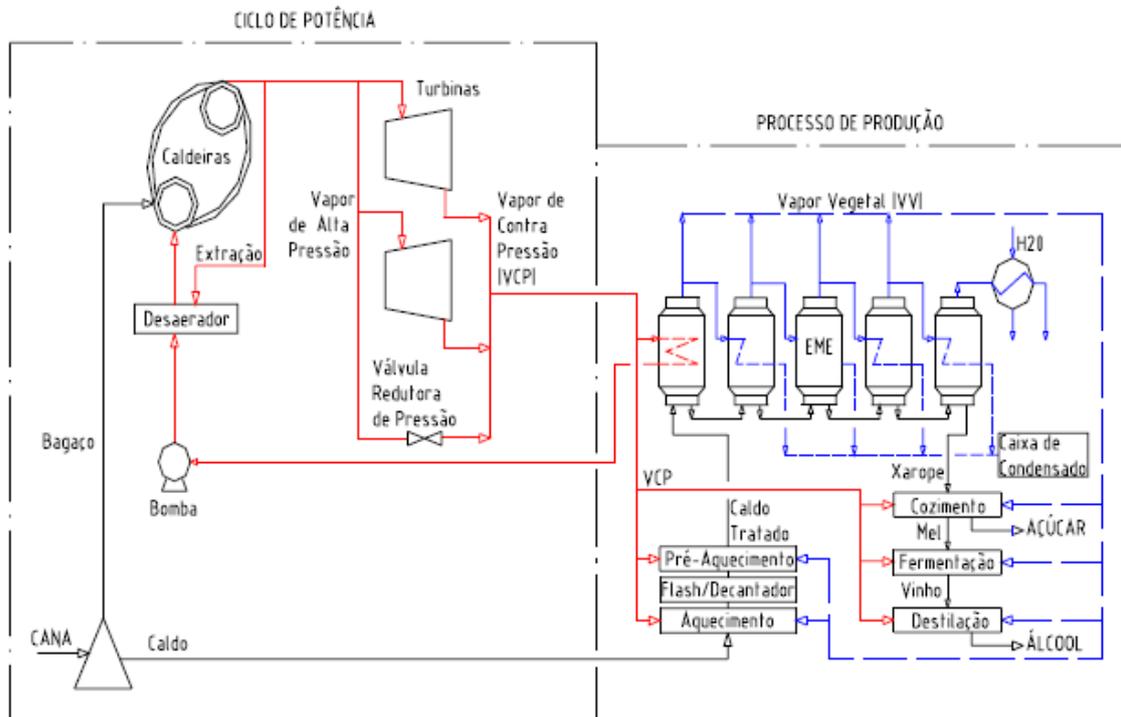


Figura L.1: Esquema tradicional de geração e consumo de energia mecânica, elétrica e térmica em usinas de açúcar e álcool no Brasil
 Fonte: Higa (2003)

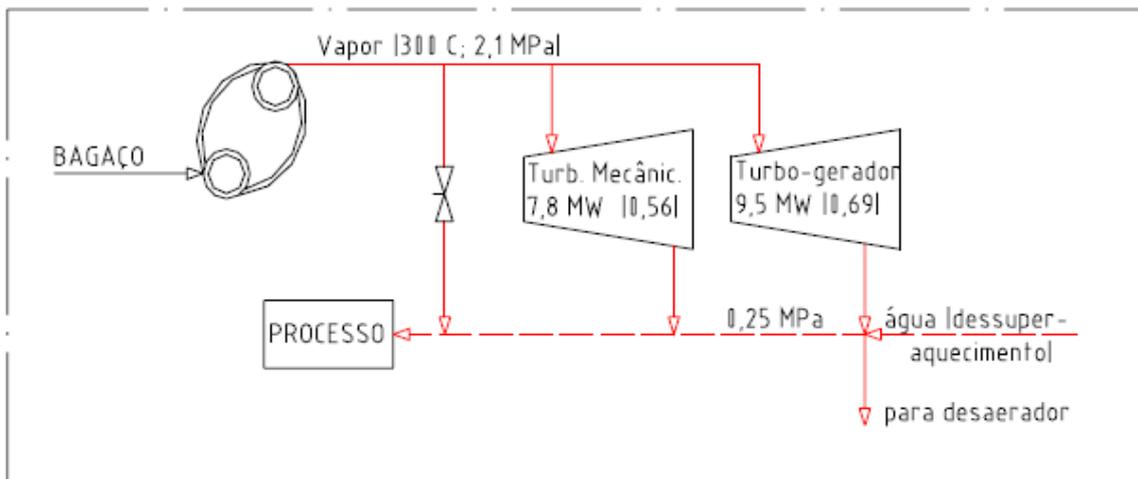


Figura L.2: Esquema de cogeração (original) da indústria em operação
 Fonte: Higa (2003)

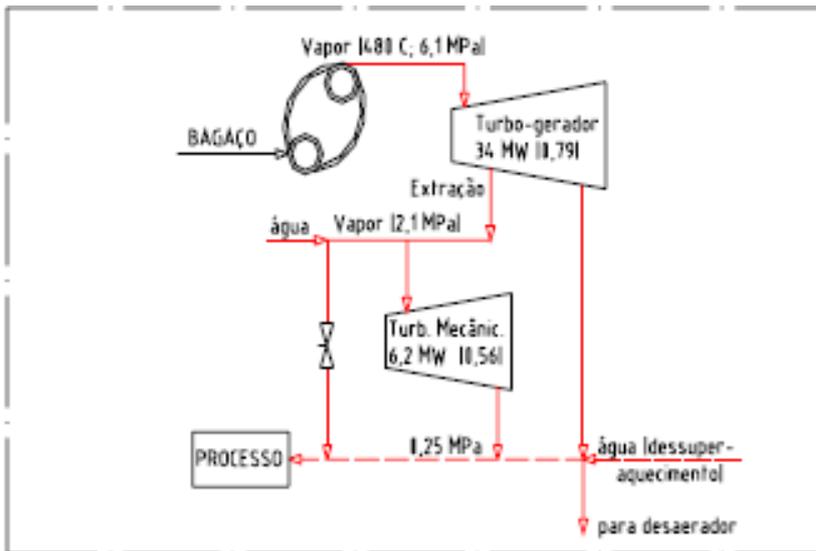


Figura L.3: Esquema de cogeração (projetada) à indústria
 Fonte: Higa (2003)