Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Desempenho energético de diferentes processos de produção de carvão vegetal

Francisco Fernandes Bernardes

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2019

Francisco Fernandes Bernardes
Engenheiro Florestal

Desempenho energético de diferentes processos de produção de carvão vegetal

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **THIAGO LIBÓRIO ROMANELLI**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Bernardes, Francisco Fernandes
Desempenho energético de diferentes processos de produção de carvão vegetal / Francisco Fernandes Bernardes. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2019.
102 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Sistema de produção de carvão vegetal 2. Desempenho energético 3. Fluxo de energia 4. Otimização. I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, que sempre acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por ter me dado força, perseverança e fé para acreditar e alcançar meus sonhos e conquistas diariamente.

À Capes, pela disponibilidade da bolsa de estudos para a realização da minha pesquisa.

Ao meu amigo, companheiro e orientador Prof. Thiago Libório Romanelli, pela paciência, parceria, atenção e, principalmente, pelos seus ensinamentos.

Ao Prof. José Otávio Brito, pela amizade, pelo apoio e pelo acolhimento na Esalq.

À minha família: ao meu pai, “Ditão”; à minha mãe, “Coroa”, pelo exemplo e determinação, por acreditar em mim e me estimular sempre e sempre a ter perseverança para alcançar meus ideais; às minhas irmãs, “Fran” e “Fla”, amigas e companheiras de toda a minha trajetória da vida; e aos meus cunhados, “Guibas” e “Shrek”.

À minha esposa, “Má”, por toda atenção, paciência e suporte nos momentos mais críticos; e ao melhor presente da minha vida, que chegou este ano: meu filho Túlio.

Aos grandes e verdadeiros amigos de toda a caminhada do meu doutorado, Artur Lana e Ananias Júnior, pelos conselhos, pelas viagens, pelos artigos e pelos momentos de descontração.

Ao Prof. “Lepo”, meus sinceros sentimentos de reconhecimento, satisfação e agradecimento por me auxiliar a direcionar e conduzir a pesquisa. Muito obrigado, meu grande irmão e amigo.

Ao meu parceiro, amigo e irmão de longa data, Júlio Pelegrineli, pela “paciência”, pelo auxílio psicológico e pela motivação.

Às repúblicas “Latinha” e “Galo”, pela ajuda diária, acadêmica e pelo acolhimento em Piracicaba, e a todos que passaram por elas: Fernando, Hermes, João Paulo, Lepo, Lanas, Cenoura e Ary.

Aos companheiros do LQCE, Wesley, Carlos Rogério, Juliana, Glauco, Regina, Luciana, Neto, Udemilson, e aos demais.

À Giovanna Monteiro, pela atenção e pelo carinho com os alunos; e ao professores Demóstenes, Edson Vidal, Teresa Magro e Francides Júnior.

Ao pessoal da Faculdade de Computação da Universidade Federal de Uberlândia (Facom – UFU), principalmente à Profa. Dra. Márcia Aparecida Fernandes, pela atenção, pela dedicação e pela disponibilidade em colaborar e contribuir com minha pesquisa.

Aos alunos da pós-graduação, Luiz Carlos Carvalho e Thaís Borges Ferreira, pelo auxílio. Meus mais sinceros votos de agradecimento a vocês.

Ao Prof. Dr. Welligton Betencurte da Silva da Universidade Federal do Espírito Santo pelo apoio e sugestões na condução da pesquisa.

Às instituições Carvão São Manuel e às outras, que solicitaram que se mantivesse seu nome em sigilo, pela disponibilidade em realizar a entrevista e por conceder as informações necessárias para a realização da pesquisa.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo; e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais (PPGRF), pelo suporte acadêmico e pelo acolhimento para a realização da pesquisa.

"Não sabendo que era impossível, ele foi lá e fez".

Jean Cocteau

SUMÁRIO

RESUMO **8**

ABSTRACT **9**

LISTA DE FIGURAS **10**

LISTA DE TABELAS **11**

1. INTRODUÇÃO **13**

2. REFERENCIAL TEÓRICO **15**

2.1. O GÊNERO *EUCALYPTUS* COMO MATÉRIA-PRIMA PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL 15
2.2. ASPECTOS DA TRANSFORMAÇÃO DA MADEIRA EM CARVÃO VEGETAL 17
2.3. PRINCIPAIS METODOLOGIAS UTILIZADAS PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL 19
2.4. ENERGIA E TRABALHO DE ACORDO COM OS CONCEITOS TERMODINÂMICOS 24
2.5. ANÁLISE ENERGÉTICA EM SISTEMAS PRODUTIVOS 25
2.6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS PRODUTIVOS 28

3. MATERIAL E MÉTODOS **33**

3.1. CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS ANALISADOS 33
3.2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 37
3.3. IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS ANALISADAS NOS PROCESSOS DE CARBONIZAÇÃO 39
3.4. COLETA DE DADOS DOS PROCESSOS ANALISADOS 40
3.5. DETERMINAÇÃO DOS FLUXOS DE MATERIAIS 43
3.6. DETERMINAÇÃO DOS FLUXOS DE ENERGIA 44
3.7. CENÁRIOS ANALISADOS 47
3.8. INDICADORES DE DESEMPENHO ENERGÉTICO 51
3.9. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PROCESSOS 52
3.10. OTIMIZAÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHOS ENERGÉTICOS 53
3.11.1. DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DOS PROCESSOS 55
3.11.2. DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO 55

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES **58**

4.1. FLUXOGRAMA DOS PROCESSOS 58
4.2. DIAGRAMA DO FLUXO DE MATERIAL DOS PROCESSOS 61
4.3. MODELOS TEÓRICOS PROPOSTOS PARA A CONSTRUÇÃO DO FLUXO DE ENERGIA DOS PROCESSOS 62
4.4. DESEMPENHO ENERGÉTICO DOS PROCESSOS 63
4.5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE 69
4.6. OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO ENERGÉTICO 70

5. CONCLUSÕES **88**

REFERÊNCIAS **89**

APÊNDICE **101**

RESUMO

Desempenho energético de diferentes processos de produção de carvão vegetal

O Brasil é, ao mesmo tempo, o maior produtor e o maior consumidor de carvão vegetal do mundo, com aproximadamente 85% da produção destinada à siderurgia, 12% à cocção de alimentos e os outros 3% às indústrias farmacêuticas, químicas e cimenteiras. O processo de transformação de madeira em carvão vegetal é caracterizado por apresentar baixo rendimento gravimétrico e por gerar outros produtos, como atiço, finos, gases condensáveis e gases não condensáveis. Diante disso, o estudo do fluxo de energia da carbonização é de fundamental importância para relacionar a entrada de madeira (matéria-prima) e a saída de carvão vegetal (principal produto) do processo e, contabilizar a energia disponível e consumida no produto final, representado por uma unidade energética os fatores de produção. O desempenho energético é apresentado na forma de indicadores como balanço, lucratividade e intensidade energética. Dessa forma, este estudo tem como objetivo geral estimar o desempenho energético da produção de carvão vegetal em diferentes processos (fornos retangulares, fornos circulares com fornalha e fornos de encostas) diante da proposição de um modelo téorico utilizando variáveis do processo de carbonização, como o rendimento gravimétrico, o poder calorífico, a umidade (madeira e carvão vegetal), a mão de obra e as operações mecanizadas. Para isso, o trabalho foi conduzido em etapas. A primeira ocorreu com base em um levantamento dos dados da produção realizado por meio de questionários, entrevista e visitas. A segunda, em função da particularidade de cada processo, algumas variáveis foram correlacionados com pesquisas bibliográficas. A terceira sucedeu por meio das estimativas dos materiais utilizados na produção do carvão, assim como a energia envolvida. Ao final, identificou-se que o processo que utiliza o forno de encosta apresenta o melhor desempenho energético e que as variáveis mão de obra e operações mecanizadas pouco influenciam na determinação do desempenho energético.

Palavras-chave: Lucratividade energética; Balanço energético; Intensidade energética; Fluxos de materiais; Fluxos de energia na produção de carvão vegetal

ABSTRACT

Energy performance of different charcoal production processes

At the same time, Brazil is the largest producer and largest consumer of charcoal in the world, with approximately 85% of production for the steel industry, 12% for food cooking and the other 3% for the pharmaceutical, chemical and cement industries. The process of transformation of wood into charcoal is characterized by low gravimetric yield and to generate other products, such as ash, fines, condensable gases and non-condensable gases. Therefore, the study of carbonization energy flow is of fundamental importance to relate the input of wood (raw material) and the output of charcoal (main product) of the process and to account for the energy available and consumed in the final product, represented by an energy unit the factors of production. Energy performance is presented in the form of indicators such as balance sheet, profitability and energy intensity. Thus, this study has as a general objective to estimate the energy performance of charcoal production in different processes (rectangular furnaces, furnace circular furnaces and slope furnaces) before proposing a theoretical model using variables of the carbonization process, such as gravimetric efficiency, calorific value, moisture (wood and charcoal), manpower and mechanized operations. For this, the work was conducted in stages. The first one was based on a survey of production data by means of questionnaires, interviews and visits. The second, due to the particularity of each process, some variables were correlated with bibliographical research. The third was achieved by estimating the materials used in the production of coal, as well as the energy involved. At the end, it was identified that the process that uses the hillside furnace presents the best energy performance and that the variables labor and mechanized operations have little influence in the determination of the energy performance.

Keywords: Energy efficiency; Energetic balance; Energy intensity; Flow of materials; Energy flows in the production of charcoal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Forno de encosta 19
Figura 2. Forno "rabo-quente" 20
Figura 3. Processo que utiliza o forno de superfície, em que: (A) chaminé interligada aos fornos, (B) construção dos fornos, (C) mão de obra para o enfornamento da madeira, (D) abertura da porta e retirada de carvão vegetal 21
Figura 4. (A) forno retangular, (B) sincronismo da unidade produtiva. 22
Figura 5. (A) expedição do carvão, (B) descarga e (C) enfornamento da madeira 23
Figura 6. Forno container (Rima Industrial) 24
Figura 7. Disposição dos componentes de uma otimização. 30
Figura 8. Disposição dos fornos na unidade produtiva (A) e (C) abertura do forno para a retirada do carvão. Em destaque, orifício para controle do fluxo de oxigênio (B) e ignição do forno (D). 34
Figura 9. Forno retangular FR390. 35
Figura 10. Forno fornalha do LAPEM (UFV) 36
Figura 11. Organograma de execução do método de trabalho 38
Figura 12. Características interligadas à madeira (matéria-prima) 39
Figura 13. Principais produtos oriundos do processo de carbonização e as características físicas atribuídas ao carvão vegetal. 40
Figura 14. Diagrama de fluxo de materiais na produção de carvão vegetal 44
Figura 15. Otimização dos processos analisados 54
Figura 16. Fluxograma do processo de produção de carvão vegetal em forno de encosta 59
Figura 17. Fluxograma do processo de produção de carvão vegetal em forno retangular FR390 60
Figura 18. Fluxograma do processo de produção de carvão vegetal em forno fornalha 61
Figura 19. Diagrama de fluxo de material na produção de carvão vegetal 62
Figura 20. Participação da energia contida nos materiais de entrada por tipo de processo 63
Figura 21. Participação da energia contida dos materiais de saída no cenário 1 64
Figura 22. Materiais de saída com a queima dos gases nos diferentes processos analisados. 66
Figura 23. Materiais de saída com a condensação dos gases nos diferentes processos analisados 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação do esforço físico diário dispendido em atividades florestais.....25
Tabela 2. Balanço de massa e energia em uma tonelada de madeira. 28
Tabela 3. Dados coletados durante as visitas e aplicação dos questionários.....41
Tabela 4. Características físicas e químicas da madeira.....42
Tabela 5. Características físicas e químicas do carvão vegetal. 42
Tabela 6. Composição em massa seca dos gases não condensáveis da carbonização de três temperaturas finais.....46
Tabela 7. Cenários analisados em função dos processos, a fim de se obter os indicadores de desempenho energético.....47
Tabela 8. Modelo teórico proposto para o fluxo de energia dos materiais de entrada no processo 1 (forno de encosta) e no processo 3 (forno fornalha) aplicado em todos os cenários 49
Tabela 9. Modelo teórico proposto para o fluxo de energia para os materiais de entrada no processo 2 (forno retangular) aplicado em todos cenários 49
Tabela 10. Modelo teórico do fluxo de energia para os materiais de saída em todos processos no Cenário 1 (clássico) 50
Tabela 11. Modelo teórico do fluxo de energia para os materiais de saída em todos processos no Cenário 2 (queimador de gases) 50
Tabela 12. Variáveis utilizadas para a análise de sensibilidade 52
Tabela 13. Variáveis dependentes (x) fixadas para execução da otimização 56
Tabela 14. Indicadores de desempenho energético dos processos no cenário clássico.....65
Tabela 15. Indicadores de desempenho energético em função de cada processo no cenário presente dos queimadores de gases 67
Tabela 16. Indicadores de desempenho energético em função de cada processo no cenário com recuperador de licor pirolenhoso 68
Tabela 17. Energia contida (MJ) nos insumos e produtos.....69
Tabela 18. Coeficientes das variáveis dependentes no cenário 1 (clássico).....71
Tabela 19. Análise de correlação das variáveis dependentes em relação à independente.....72
Tabela 20. Resultados obtidos com a otimização multiobjetiva no cenário clássico 74
Tabela 21. Coeficientes das variáveis de saída no cenário 2 (queimador de gases).....77
Tabela 22. Correlação de Pearson das variáveis dependentes em relação à independente (energia contida).....78
Tabela 23. Resultados obtidos com a otimização multiobjetiva no cenário com queimador de gases.....80
Tabela 24. Coeficientes das variáveis de saída no cenário 3 (recuperador de licor pirolenhoso) 83
Tabela 25. Análise de correlação do cenário 3 (recuperador de licor pirolenhoso) 84
Tabela 26. Resultados obtidos com a otimização multiobjetiva no cenário 3 com recuperador de licor pirolenhoso 85

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a busca por fontes renováveis e alternativas de energia tem se intensificado, e uma das opções mais utilizadas para isso é a biomassa florestal, que se destaca por suas vantagens ambientais, principalmente na mitigação das emissões de gases do efeito estufa, como o CO_2 e o CH_4.

Esse cenário é um reflexo da "redescoberta" do papel energético da madeira, em função de crises com o petróleo, da oscilação do preço do barril e por este se tratar de um recurso finito. Associada a essa questão está a conscientização da sociedade atual quanto à necessidade de se empregar recursos energéticos renováveis e sustentáveis.

Apesar da recente redução dos investimentos no setor florestal, reflexo da crise econômica global e da consequente redução da demanda por energia, ainda é possível notar o crescimento no consumo de madeira para fins energéticos. Segundo Brito (2013), a madeira ainda se sobressai como a mais importante fonte mundial de energia renovável, respondendo por mais de 9% da oferta global de energia primária. A sua utilização em termos energéticos se iguala à soma de todas as demais fontes mundiais de energia renovável, cujas principais são: hidráulica, geotérmica, biogás, resíduos florestais, energia solar e biocombustíveis líquidos (BRITO, 1997).

No setor energético, a madeira é tradicionalmente chamada de lenha e, historicamente, contribuiu para o desenvolvimento da humanidade como a primeira fonte de energia, inicialmente empregada para o aquecimento e a cocção de alimentos (WARNES, 2008). Ao longo dos tempos, passou a ser utilizada como fonte para combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, em processos para a geração de energia térmica, mecânica e elétrica (BRITO, 2007). Estima-se que, a cada seis pessoas, duas utilizem a madeira como principal fonte de energia, principalmente nos países em desenvolvimento, em processos de secagem, cocção, fermentação, produção de eletricidade etc. (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2003).

O Brasil é o maior produtor e, simultaneamente, o maior consumidor de carvão vegetal do mundo, respondendo por cerca de um terço da produção mundial (SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA - SBS, 2015). A produção de carvão vegetal no Brasil, em 2016, foi de cerca de 5,5 milhões de toneladas, e deste total 4,6 milhões foram consumidos pela indústria e por siderúrgicas (BRASIL, 2017).

Para atingir essa produção anual, aproximadamente 90% das tecnologias utilizadas são fundamentadas em fornos de alvenaria, cuja produção apresenta baixo rendimento

gravimétrico e elevada emissão de gases de efeito estufa (BRITO, 2008). De forma geral, o rendimento gravimétrico da transformação de madeira em carvão no processo de carbonização varia de 25% a 35% (ANTAL JÚNIOR et al.,2003).

Do ponto de vista energético, a busca por sistemas produtivos eficientes que associem o entendimento das variáveis relacionadas e o balanço de energia da produção podem contribuir no uso racional dos recursos e matérias primas, redução dos custos, aumento da eficiência dos insumos, economia de energia, com isso valorizando o produto no mercado consumidor. Isso se deve, principalmente, ao fato de o rendimento gravimétrico do carvão ser uma importante ferramenta que calcula a produtividade do processo, o que está diretamente relacionado às variáveis de qualidade desse processo (teor de carbono fixo e poder calorífico). Para isso, informações acerca da relação envolvendo o rendimento gravimétrico e as características do carvão vegetal devem ser consideradas.

Tem-se como hipótese que na produção de carvão vegetal é possível modelar o desempenho energético (balanço, a intensidade e a lucratividade energética) em diferentes processos.

Dessa forma, este estudo teve por objetivo geral estimar o desempenho energético da produção de carvão vegetal por meio da proposição de um modelo teórico determinado pelas variáveis intrínsecas aos diferentes processos (fornos retangulares, fornos circulares com fornalha e fornos de encostas), como as características físicas e produtividade dos principais produtos gerados na carbonização, como a produção de carvão vegetal, e a geração de atiços, finos, gases condensáveis e não condensáveis, e pela força de trabalho manual e mecanizada aplicada à condução do processo, analisando a eficiência energética envolvida. Como objetivos específicos para os diferentes processos analisados, seguem: a) detalhar os diferentes processos por meio da estruturação de um fluxograma; b) determinar e analisar o fluxo de material e posteriormente o fluxo de energia; c) obter o balanço, a lucratividade e a intensidade energética em função das diferentes características dos processos; d) simular três diferentes cenários por meio do modelo teórico proposto para cada um dos processos; e e) identificar dentre os processos qual apresenta o melhor desempenho energético.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. O gênero *Eucalyptus* como matéria-prima para a produção de carvão vegetal

O gênero *Eucalyptus* pertence à família *Myrtaceae* – que dispõe de aproximadamente 70 gêneros e 3.000 espécies – e é oriundo da Austrália, sendo uma espécie adaptada às mais diversas condições de clima e solo (MONTAGU et al., 2003).

O eucalipto foi introduzido no Brasil como cultura florestal em 1903, e atualmente a eucaliptocultura no país possui vantagens edafoclimáticas, sendo uma das mais avançadas do mundo, servindo de referência para outros países, inclusive para a Austrália (SANTOS et al., 2012a). Em 2014, os plantios de eucalipto ocupavam 5,6 milhões de hectares da área de árvores plantadas no País, estando localizados principalmente nos estados de Minas Gerais (25,2%), São Paulo (17,6%) e Mato Grosso do Sul (14,5%), representando 71,9% do total das áreas plantadas (Instituto Brasileiro da Árvore, 2015). Em 2016, ocupavam um total de 7,8 milhões de hectares, sendo 91,0% da produção de madeira voltada para fins industriais, totalizando 6,2% do PIB nacional (IBA, 2017).

Em razão de seu rápido crescimento, a produtividade dessa espécie pode ser considerada como um dos principais fatores que determinaram a sua ampla utilização. Embora a produtividade média anual, considerada em torno de 35,0 m^3 ha^{-1} ano^{-1}, seja relativamente baixa, existem plantios com uso de clones de 60,0 m^3 ha^{-1} ano^{-1} (DOSSA et al 2002). Em 2016, a produção média brasileira de madeira oriunda de eucalipto foi de 35,7 m^3 ha^{-1} ano^{-1} (IBA, 2017). Entretanto, o Brasil, por apresentar vantagens edafoclimáticas, pesquisas e inovações tecnológicas no melhoramento genético, melhorias no manejo florestal e nos tratamentos silviculturais, apresenta um potencial produtivo de até 70,0 m^3 ha^{-1} ano^{-1} (BRACELPA, 2014). A produtividade é analisada por meio da estimativa de massa de madeira por unidade, prevendo a quantidade produzida por material genético em um dado local e sua respectiva quantidade de carbono fixado (TRUGILHO et al., 2010).

O local de plantio e o ambiente onde a floresta é implantada também interferem na produção. Em Minas Gerais, os plantios estão distribuídos em diferentes regiões do estado e apresentam diferentes taxas de incremento volumétrico, as quais sofrem influência do material genético, do ambiente e da interação do genótipo com o ambiente (ZOBEL; JETT, 1995).

As diferentes espécies de eucaliptos são apropriadas para as mais diversas finalidades, sendo sua madeira amplamente utilizada como matéria-prima no segmento de celulose e papel, e também em serrarias, usinas de preservação, indústrias de painéis e chapas de madeira. Outros

empregos importantes são as gerações de energia nos setores comercial, industrial e residencial, através da sua queima direta na forma de lenha ou da sua conversão em subprodutos de maior conteúdo energético, como o carvão vegetal (SANTOS et al., 2012a).

O uso da biomassa florestal para a produção de energia vem sendo discutido pelos pesquisadores há alguns anos. Segundo Brito e Barrichelo (1979), a biomassa florestal brasileira apresenta vantagens competitivas, dentre elas: vocação florestal, condições edafoclimáticas ideais e áreas disponíveis para implantações florestais para fins industriais, tecnologias que propiciam florestas de alta produtividade, experiência em técnicas de manejo para florestas energéticas e demanda para os mais diversificados produtos florestais, sendo assim um investimento versátil.

Na década de 1980, surgiu o conceito de florestas energéticas, visando definir o adensamento florestal, que seria o maior número de árvores por hectare, por conseguinte de curta rotação, objetivando a produção do maior volume de biomassa por área em menor espaço de tempo (MAGALHÃES, 2001). Nesse contexto, os estudos que visam à seleção de espécies em florestas energéticas de eucalipto propõem homogeneizar as propriedades da madeira e melhorar, além da eficiência de queima direta, rendimentos em carvão, teor de carbono e outras propriedades desejadas na sua utilização (SANTOS et al., 2012b).

As florestas energéticas brasileiras apresentam um grande potencial para suprir usinas termoelétricas de forma competitiva, podendo descentralizar o sistema de produção energética, além de mitigar o desmatamento de vegetação nativa (IBA, 2016).

Segundo o Brasil (2017), a energia elétrica ofertada é oriunda majoritariamente da matriz hidrelétrica, seguida do gás natural e em terceiro lugar da biomassa. A energia de biomassa ofertada representa 8,2% e, desse total, 77,6% são provenientes do bagaço da cana e 22,4% de florestas plantadas. Em referência à capacidade instalada no país, as principais fontes são a energia hidráulica (64,5%), a energia não renovável (18,0%) e a energia de biomassa (9,4%) (BRASIL, 2017).

O aproveitamento energético da biomassa apresenta benefícios em sua utilização, como otimização dos recursos florestais disponíveis e agregação de valor ao produto. Além de se tratar de seres vivos clorofilados, as florestas sequestram CO_2 atmosférico durante o processo de fotossíntese, sendo assim essa energia caracterizada como uma energia renovável. (EPE, 2016).

2.2. Aspectos da transformação da madeira em carvão vegetal

O carvão vegetal produzido no Brasil é um produto que pode ser utilizado como fonte energética ou matéria-prima para os mais diversos fins, como na indústria química, na indústria farmacêutica, na siderurgia, na cocção de alimentos (churrasco), na indústria termoelétrica, na indústria cimenteira etc. (BRITO, 1993). Inicialmente empregado para aquecimento e cocção de alimentos, o tradicional "churrasco", o carvão vegetal foi a primeira prática de manipulação alimentar realizada pela humanidade (WARNES, 2008).

De acordo com Santos et al. (2012), estudos que visam à seleção de espécies para usos energéticos propõem homogeneizar as propriedades da madeira e melhorar, além da eficiência da queima direta, rendimentos em carvão e teores de carbono.

O carvão vegetal é o resultado do processo de carbonização da madeira por meio de seu aquecimento sob temperaturas superiores a 200 °C na presença controlada de oxigênio, com o controle do tempo e da temperatura do processo (SANTOS et al., 2012). Segundo Antal Júnior et al. (2003), a carbonização é um conjunto de reações químicas seguida do processo de transferência de calor e massa, havendo uma relação diretamente proporcional entre o calor liberado e a quantidade de carvão produzido. Dessa forma, a carbonização é um processo que promove alterações nos componentes da madeira, aumentando o teor de carbono fixo e o poder calorífico (OLIVEIRA et al., 2015).

Sendo o carvão vegetal produto fortemente dependente da madeira de origem e da metodologia de carbonização, ele pode apresentar uma grande heterogeneidade em suas características físicas e químicas. Para Brito (2002) e Rosa et al. (2012), o carvão vegetal para uso doméstico, por exemplo, deve reunir características como: alta densidade a granel (> 200 kg m^{-3}), alto teor de carbono fixo (≥ 75%), alto poder calorífico, baixa umidade (≤ 5%), baixo teor de materiais voláteis (≤ 25%) e baixo teor de cinzas (≤ 5%). Segundo Coutinho e Ferraz (1988), a qualidade do carvão vegetal para a cocção de alimentos é questionável, pois o controle da carbonização é difícil na maioria dos fornos utilizados. O alto teor de voláteis ocasiona a produção de muita fumaça, além de menor eficiência energética, o que não é desejável (FREDERICO, 2009).

Tratando-se da matéria-prima, de acordo com Trugilho et al. (1997), as madeiras que possuem elevada densidade básica, baixo teor de cinzas, alto teor de lignina e que apresentam fibras de parede celular mais espessa e de menor largura são responsáveis pela qualidade e pelo rendimento do carvão vegetal, podendo ser consideradas como índices de qualidade da madeira para a sua produção. Com isso, os principais fatores que afetam a carbonização e a qualidade

do carvão vegetal estão relacionados às propriedades do material de origem, a madeira. Dentre essas propriedades, destacam-se: a umidade, a densidade básica, o poder calorífico, a composição química, o carbono fixo e o grau de friabilidade.

A madeira se caracteriza por apresentar umidade acima de 30%, o que implica que sua taxa de aquecimento seja lenta, com temperatura máxima média inconstante, em decorrência do excesso de vapor de água liberado, o que, consequentemente, aumenta o tempo da carbonização (ARRUDA et al., 2011; CHAN et al., 1988; URKAN e ARLKOL, 1994).

A densidade básica é classificada como o principal índice de qualidade da madeira e como uma das propriedades físicas de maior significância na produção de carvão vegetal (PANSHIN, 1964). De acordo com Brito e Barrichelo (1980) e Vale et al. (2010), há uma forte correlação entre a densidade básica da madeira e a densidade aparente do carvão vegetal. Brito (1993) ressalva que a densidade da madeira influencia diretamente na capacidade de produção do carvão vegetal, resultando em uma maior produção de massa ocasionada pela ocupação do forno por madeiras mais densas para um determinado volume.

O poder calorífico da madeira é um interessante parâmetro para se avaliar a potencialidade energética de combustíveis de biomassa (BRAND, 2010; FRIEDL et al., 2005; PARIKH et al., 2005), sendo definido como a quantidade de energia liberada na combustão completa de uma unidade de massa do material combustível.

Com relação à composição química da madeira, elevados teores de extrativos e lignina podem resultar em um carvão com maior densidade e resistência físico-mecânica (OPARINA et al., 1971) e de elevado poder calorífico (SATANOKA, 1963). Melhores propriedades químicas do carvão, maiores teores de carbono fixo e menores teores de substâncias voláteis e cinzas estão associados à madeira com altos teores de lignina, relacionados às condições de carbonização. Cada faixa de temperatura gera um produto diferente, sendo que a temperatura final tem grande influência no rendimento e na qualidade do carvão vegetal (OLIVEIRA et al., 2010).

O teor de carbono fixo indica o “grau de pureza” do carvão, sendo inversamente proporcional ao seu rendimento gravimétrico (LIMA et al., 2007). De acordo com Pinheiro e Sèye (1998), quanto maior for a temperatura final durante o processo de carbonização, maior será a porcentagem de carbono fixo, menor o teor de voláteis e menor o rendimento mássico de carvão vegetal.

O grau de friabilidade é a propriedade do carvão vegetal em gerar finos, ao se expor a abrasão e queda durante o manuseio e transporte.

2.3. Principais metodologias utilizadas para a produção de carvão vegetal

A produção brasileira de carvão vegetal, mesmo com as inovações tecnológicas do setor florestal, é realizada por meio da utilização de fornos rudimentares em alvenaria, na grande maioria caracterizados por apresentarem baixo controle e eficiência do processo. Segundo Brito (2010), 60% dos fornos utilizados são do tipo rabo-quente, 10% são fornos de superfície, 20% são fornos retangulares e os 10% restantes utilizam outros tipos de tecnologias.

A principal estrutura utilizada para a produção de carvão vegetal são os fornos de alvenaria. Tendo em vista um menor custo, logística e abastecimento das unidades produtivas, é importante que esses fornos estejam localizados próximos à fonte de matéria-prima (lenha). Os fornos de alvenaria utilizados para a produção de carvão vegetal apresentam diferentes formas, tamanhos e capacidade produtiva, podendo ser mecanizados ou semimecanizados. Os métodos de produção são classificados como tradicionais e não tradicionais: os tradicionais são caracterizados pela ausência de inovação tecnológica, com metodologia de operação empírica; e os não tradicionais apresentam inovações tecnológicas, como a coleta de temperatura e máquinas especializadas na carga e descarga dos fornos. As principais características dos diferentes tipos de fornos, são:

a) Forno de encosta: método tradicional e indicado para regiões com topografia acidentada (Figura 1) por aproveitar o desnível do terreno, apoiando a cúpula sobre a borda, assumindo a função de parede do forno, reduzindo assim a quantidade de materiais utilizados para a sua construção, possuindo um diâmetro de 3 a 4 m e altura de 2,5 a 2,8 m. Os orifícios de entrada de ar são posicionados na cúpula do forno (Mendes et al., 1982).

Figura 1 . Forno de encosta
Fonte: Arquivo pessoal

b) "Rabo-quente": método tradicional e, de acordo com Mendes et al. (1982), recomendado para áreas planas, dotado de orifícios para a entrada de ar e saída dos gases gerados ao longo de sua parede. Esses fornos são simples e de baixo custo, podendo um único trabalhador operar de sete a dez fornos, realizando as atividades de carregamento, controle da carbonização, descarga, deposição na praça e limpeza da área (MINETTE, 2007). É o modelo mais simples de forno de alvenaria e o mais difundido entre os pequenos produtores (Figura 2).

Figura 2. Forno "rabo-quente"
Fonte: Bailis (2013)

A maior parte dos fornos rudimentares de alvenaria opera em capacidade reduzida, com ausência de investimentos em maquinários e estoque de madeira suficiente para o enfornamento necessário para a produção de carvão planejada, sendo um setor caracterizado por apresentar um perfil de pequenos produtores e normalmente familiar. Segundo Oliveira (2009), os pequenos produtores utilizam fornos de diferentes formatos para a produção de carvão vegetal, tornando o processo desuniforme e dependente diretamente da experiência empírica dos operadores.

Segundo Oliveira (2012), os fornos rabo-quente e de superfície apresentam, de modo geral, baixo rendimento mássico, de 20 a 30% na conversão da madeira em carvão vegetal, e não possuem dispositivos que permitam o aproveitamento dos subprodutos gasosos e líquidos, que são perdidos durante o processo, como CO_2, CO, H_2, CH_4 etc., e as frações pirolenhosas, como alcatrões, ácido acético, álcool metílico, dentre outras.

c) Fornos de superfície: método tradicional em que os fornos de superfície apresentam estrutura semelhante à do forno “rabo-quente”, conforme apresentado na Figura 3(A), tendo como diferencial a presença de uma chaminé lateral com tiragem central dos gases gerados durante a carbonização da madeira, melhorando as condições térmicas e o fluxo de gases no interior do forno (ASSIS, 2007).

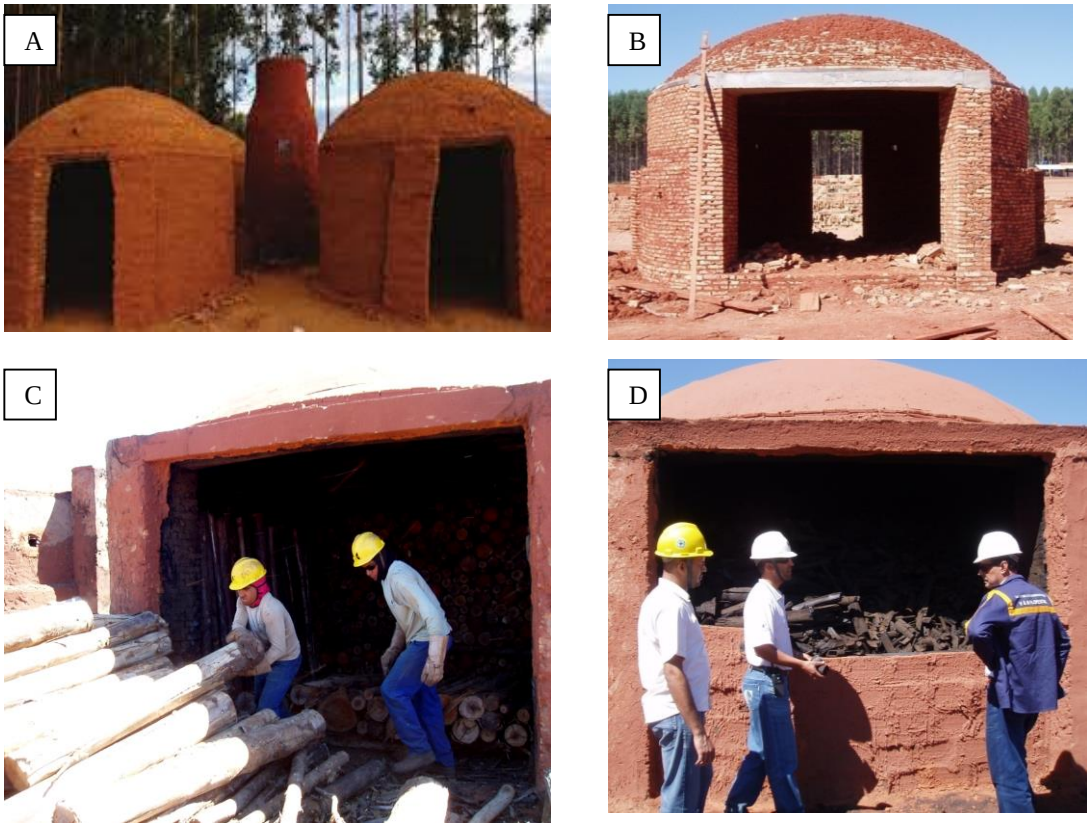

Figura 3. Processo que utiliza o forno de superfície, em que: (A) chaminé interligada aos fornos, (B) construção dos fornos, (C) mão de obra para o enfornamento da madeira, (D) abertura da porta e retirada de carvão vegetal
Fonte: Arquivo pessoal

d) Fornos retangulares: método não tradicional, caracterizado por apresentar inovações em relação com os demais métodos, proporcionando aumento da produtividade. Os grandes produtores de carvão vegetal investiram na construção de fornos retangulares com grande capacidade volumétrica, alto desempenho e mecanizados, conforme a Figura 4 (A). De acordo com Raad (2001), os fornos retangulares têm capacidade de até 700 estéreos[1] (st) de madeira, e as operações de carregamento e descarregamento são mecanizadas. Além disso, é possível a recuperação ou queima dos gases gerados durante a carbonização. O controle da entrada de oxigênio para o processo de carbonização pode ser realizado por câmara de combustão externa, construída em alvenaria na parte externa do forno, interligada através de canais onde os gases aquecidos circulam, promovendo a transformação da madeira em carvão vegetal (ARRUDA, 2005). O ciclo em dias da carbonização nos fornos retangulares é de aproximadamente 12 dias, levando-se em consideração a inclusão das etapas de carregamento, ignição, carbonização, resfriamento do leito de carvão e descarga, sendo normalmente quatro dias para carbonizar a

[1] Estéreo é uma medida de madeira empilhada, que corresponde a 0,7 metro cúbico (0,7 m^3).

madeira e oito dias para o resfriamento do forno (FÁVERO et al., 2007). O rendimento gravimétrico em carvão vegetal desses fornos varia de 30 a 35%.

Figura 4. (A) forno retangular, (B) sincronismo da unidade produtiva.
Fonte: Arquivo pessoal

Figura 5. (A) expedição do carvão, (B) descarga e (C) enfornamento da madeira
Fonte: Arquivo pessoal

Os fornos retangulares apresentam algumas particularidades em relação aos outros tipos, por exemplo, a mecanização das atividades (Figura 5). É possível ter um ganho de até três horas na atividade enfornamento em relação ao tradicional forno do tipo "rabo-quente", que conta com o esforço físico do operador por ser uma atividade manual. Para isso, considera-se a capacitação do operador de máquina especializada e o monitoramento térmico por termopares que permite melhor controle da temperatura na carbonização. Atualmente, a etapa que envolve atividades mecanizadas do processo de carbonização, além do carregamento ou enfornamento, é o descarregamento do forno. Para tal, o operador também é treinado e capacitado para exercer essa função. Visando exemplificar essa etapa do processo, foi selecionada uma pá carregadeira adaptada a uma grua especial (Figura 5).

Outra vantagem é a sua eficiência produtiva e uma melhor homogeneidade do produto, pois para uma mesma matéria-prima é traçado um perfil esperado da qualidade do carvão vegetal produzido, considerando-se teor de cinzas, carbono fixo, umidade etc.

e) Fornos containers: São fornos cilíndricos, construídos de materiais de ligas metálicas e de aproximadamente 12 toneladas de chapas de aço de 25 mm de espessura, apresentando um volume de aproximadamente 35 m³ (Figura 6). As emissões de calor e pirólise produzidas durante a carbonização são reutilizadas de duas maneiras: primeiro, os gases da pirólise são queimados para criar vapor, que conduz uma turbina onde podem ser utilizados para gerar eletricidade, por exemplo; em seguida, os gases de escape quentes são usados para secagem das lenhas de eucalipto, o que permite uma carbonização mais rápida e de maior rendimento (BAILIS et al., 2013).

Figura 6. Forno container (Rima Industrial)
Fonte: Bailis, (2013).

2.4. Energia e trabalho de acordo com os conceitos termodinâmicos

Segundo o Balanço Energético do Estado de São Paulo (2017), existe a adoção de uma unidade de transformação padronizada para os diversos insumos energéticos, decorrente de conceitos físicos em que cada unidade do Sistema Internacional (SI) está associada a alguma forma de energia. Com isso, a caloria (cal) relaciona-se ao calor (petróleo, carvão e lenha), ao joule (J), à energia mecânica (hidráulica e eólica), ao watt hora (Wh) e à eletricidade, de forma que qualquer que seja a unidade escolhida para se contabilizar um balanço de energia, surge imediatamente o problema de conversibilidade entre as diversas formas de energia.

De acordo com o Instituto Nacional de Metrologia – Inmetro (2008), os resultados das experiências calorimétricas devem ser expressos em joule em sistemas que indicam grandeza

de trabalho, energia e quantidade de calor. Em caso de análises realizadas em caloria, como as que envolvem o aumento da temperatura da água, deve-se disponibilizar as informações necessárias para a conversão em joule.

A energia consumida de um ser humano para realizar uma atividade por meio do esforço físico é chamada energia de trabalho, e pode ser calculada pelo consumo de oxigênio (O_2). Cada litro de O_2 consumido pelo corpo é equivalente a 20,1 J. A medição é feita pela diferença do teor de O_2 do ar atmosférico e do exalado, multiplicado pelo volume de ar exalado. A intensidade do esforço físico se dá em função da energia consumida pela quantidade de músculos envolvidos e pela proporção solicitada em modo estático (SEIXAS, 1991). As atividades florestais podem ser classificadas pela carga de trabalho, conforme a

Tabela 1.

Tabela 1. Classificação do esforço físico diário dispendido em atividades florestais

Carga de trabalho	Exemplo de atividades	Energia contida (MJ)
Leve	Atividades no viveiro	Até 4,18
Moderado	Operador de máquinas, plantio manual	4,18 a 6,68
Pesado	Corte com motosserra ou machado, capina	6,68 a 8,36
Extrapesado	Escalar árvores, carregar toras	Maior 8,36

Fonte: Seixas (1991).

Segundo Doering (1980), a contabilidade da energia contida em máquinas e em implementos agrícolas pode apresentar diversas fontes de variação, sendo de origem natural ou antrópica, por exemplo: eficiência operacional, quantidade de horas efetivas para executar uma determinada atividade, variações edafoclimáticas, manejo adotado e finalidade do produto.

2.5. Análise energética em sistemas produtivos

De acordo com Campos e Campos (2004), o balanço energético é utilizado como potencial método para economizar energia e aumentar a eficiência dos insumos, reduzindo custos em sistemas de produção. É ainda um método destinado a contabilizar a energia disponível e a energia consumida de um sistema de produção, cuja finalidade é traduzir em unidades ou equivalentes energéticos os fatores de produção, gerando assim indicadores que visem à eficiência energética (BUENO et al., 2000).

Na gestão e no planejamento de sistemas agroflorestais são solicitados esforços incompatíveis pertinentes à maximização na obtenção dos produtos desejáveis a partir de uma área agricultável definida, e a minimização de investimentos em energia, na forma de insumos,

em vez de se entender a interação entre a cultura e a energia contida nos diversos tratos culturais (SINGH e SINGH, 1992).

No setor agroflorestal, devido à carência dos recursos energéticos, aos limites biofísicos do ambiente, ao uso e à ocupação do solo e à qualidade dos produtos agrícolas, reiterando-se a escassez desses fatores, há a necessidade de se intensificar o uso racional dos aspectos energéticos. Após uma determinada quantidade de aplicação de fertilizantes, são dispensadas tais aplicações por questões técnicas ou econômicas, pois a resposta a essa entrada de insumo será inexistente ou negativa (FERRARO JUNIOR, 1999). Segundo Stout e Myers (1979), visando reduzir o consumo de energia dos sistemas de produção, principalmente, em relação aos recursos naturais, políticas voltadas ao desenvolvimento de recursos energéticos de caráter mais sustentável deveriam ser estimuladas e implantadas, juntamente com tecnologias que diminuam o consumo dos recursos naturais.

De acordo com Melo et al. (2007), com os avanços científicos e tecnológicos, alguns conceitos mensuráveis para a interpretação de resultados sofreram modificações e ajustes complementares, como o conceito básico de identificação de resultados, possibilitando, além do balanço contábil nacional, o chamado balanço energético. Esse balanço identifica e contabiliza a entrada e a saída de energia de um processo de produção, permitindo apontar qual atividade, setor e/ou departamento apresenta saldo energético favorável ou desfavorável.

Na agricultura, o consumo energético de origem fóssil motiva estudos e o desenvolvimento de metodologias que mensurem as energias produzidas e consumidas em um determinado sistema de produção, possibilitando o cálculo da eficiência energética de produtos agrícolas, desenvolvendo índices que representem e expressem para cada unidade de energia investida quanto é produzido em um processo produtivo (BEBER, 1989).

Nos países industrializados, a energia consumida de origem fóssil na agricultura pode ser reduzida por meio de mudanças nos sistemas de cultivo e pela substituição dos sistemas que apresentem uma menor demanda energética de derivados fósseis (MELO et al., 2007). Sistemas alternativos, que amenizem manejos do meio ambiente, são mais viáveis e estão mais ajustados ao ecossistema natural. Essas alternativas propõem a redução do uso de combustíveis fósseis como fertilizantes, pesticidas e máquinas agrícolas, favorecendo o manejo do solo e os recursos de água. Para definir as melhores estratégias no sistema de produção agrícola, deve-se levar em consideração não apenas as condições ambientais específicas, mas os dados de entrada de energia, bem como os dados econômicos de custo/benefício. Quanto maior o conhecimento detalhado do sistema de produção, melhores serão as estratégias de administração e cultivo (PIMENTEL et al. 1984).

As unidades de transformação de energia (indústrias, processos etc.) são definidas como sistemas que convergem fontes primárias em secundárias. Ao se processar determinada energia, proporciona-se não apenas a energia desejada, mas também outras que não são aproveitadas, por exemplo, o calor. São as chamadas “perdas” no processo de transformação, de acordo com a segunda lei da termodinâmica, i.e., a entropia (MACEDÔNIO e PICCHIONI, 1985).

A mensuração da energia indireta contida nas máquinas e nos implementos agrícolas, adicionada aos produtos químicos utilizados como insumos em uma dada cultura, é um obstáculo na obtenção de um indicador energético. Isso se deve ao fato de a energia total contida no sistema ser obtida pela análise do processo ou pela matriz do produto que contabiliza indústrias, lavouras, comércios e serviços, destacando os materiais utilizados como insumo e suas formas de energia direta consumidas na fabricação do produto. A eficiência energética pode ser avaliada de maneira direta ou indireta, destacando-se a energia dos parâmetros, a intensidade de energia e a relação entre entradas e saídas (SERRA et al., 1979).

O fluxo de material é um método de análise física de um processo produtivo para determinar a convergência de insumos em um sistema de produção. O conhecimento e a relação completa dos fluxos de materiais subsidiam quaisquer análises produtivas (análise de energia, síntese de emergia, balanço energético) e econômicas. Esses insumos podem ser utilizados diretamente (insumos transformados para que um produto seja obtido) ou indiretamente (insumos que não sofrem transformação: força de trabalho, energia demandada e infraestrutura) (ROMANELLI e MILAN, 2010).

De acordo com Scholz et al. (1998), o balanço energético na produção de combustíveis sólidos oriundos da produção agrícola e florestal, em função da tecnologia empregada, apresenta valores inferiores nos materiais de entrada em relação aos de saída, pois cada unidade de energia investida pode retornar de 7 a 30 unidades na colheita, atingindo até 50 unidades extras, levando-se em consideração os subprodutos.

No processo de produção de carvão vegetal, o fluxo de material pode ser afetado por diversos fatores, incluindo as condições de carbonização, em especial pela taxa de aquecimento e pela temperatura final de carbonização (KUMAR e GUPTA; SHARMA, 1992; TRUGILHO e SILVA; 2001).

Especificamente, no processo de produção de carvão vegetal, o balanço de energia permite a redistribuição dos produtos resultantes, permitindo verificar o equilíbrio da conversão da madeira em carvão, podendo ser utilizado como uma alternativa para verificar os rendimentos em massa e energia que não foram aproveitados no processo (JESUS, 2016). O fluxo de energia em processos, como na produção de carvão vegetal, é a energia incorporada (EI) de cada

insumo, que pode ser obtida através de medições diretas nas unidades produtivas e/ou a partir de referências utilizadas (ROMANELLI e MILAN, 2010).

Segundo Barcellos et al. (2004), o balanço de energia tem o objetivo de verificar o equilíbrio da conversão da massa da madeira em energia disponível, avaliando a eficiência do sistema, as perdas e as possibilidades de uso. Num trabalho realizado pelos mesmos autores, observou-se que o balanço de energia realizado no processo de carbonização em forno container resultou em que 47,0% da energia do processo de conversão da madeira em carvão foi perdida, sendo recuperada apenas 53,0% da energia inicial. Todavia, informações para fornos de alvenaria ainda são incipientes e pouco estudadas. A

Tabela **2** apresenta um exemplo realizado pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC, 1980) com os principais produtos obtidos em um balanço de massa e energia teórico, calculado para uma tonelada de madeira carbonizada a 450 °C e cujo poder calorífico foi de 19,47 GJ t^{-1}.

Tabela 2. Balanço de massa e energia em uma tonelada de madeira.

Produtos	**Composição (%)**	**PCS**	**Potencial energético (GJ)**
Carvão	34,3	29,73 GJ t^{-1}	10,22
Água	25,4	-	-
Gases não condensáveis	20,8	10,47 MJ m^{-3}	1,63
Ácido acético	6,7	14,65 GJ t^{-1}	0,96
Licor pirolenhoso	2,3	29,31 GJ t^{-1}	0,67
Alcatrão	10,5	14,65 GJ t^{-1}	4,19
Total	100	-	17,67

Em que: PCS = Poder Calorífico Superior (kJ)

Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais (1980)

2.6. Análise de sensibilidade e otimização de sistemas produtivos

A análise de sensibilidade em sistemas produtivos fundamenta-se em medir em que magnitude uma alteração prefixada em um ou mais fatores altera o resultado final. Esse procedimento permite avaliar de que forma as alterações de cada uma das variáveis pode influenciar na rentabilidade dos resultados esperados (BUARQUE, 1991).

Um dos principais objetivos da análise de sensibilidade é entender se o projeto é exequível e como as variáveis se comportam em diversos cenários. Uma vez obtida a solução satisfatória, variam-se alguns parâmetros para analisar o comportamento do modelo. Um parâmetro frequentemente a ser variado é a probabilidade de ocorrência de eventos aleatórios (SILVA e BELDERRAIN, 2004).

O processo de otimização é definido como sendo uma busca automática, sistemática e dirigida para obter a melhor solução dentro do universo de soluções existentes. Com isso, tarefas desnecessárias, erros e desperdícios são consideravelmente reduzidos, melhorando os métodos de trabalho e proporcionando resultados mais satisfatórios (TRANCEDI, 2008).

Uma das áreas de pesquisa em que a otimização tem sido mais intensivamente estudada desde o século XIX na esfera da engenharia civil é a área do cálculo estrutural. O objetivo básico é reduzir o peso da estrutura mantendo o seu desempenho (rigidez, frequência de ressonância). Assim, a maior parte das contribuições na otimização de sistemas mecânicos tem sido desenvolvida na área de otimização estrutural (TRANCEDI, 2008).

De acordo com Silva (2007), é comum no Brasil o termo “otimização” ser aplicado equivocadamente. Frequentemente trabalhos são publicados sob o título de “otimização” de um elemento estrutural ou mecânico, sendo que o autor, ao utilizar um método ou uma ferramenta computacional, realiza uma análise diferenciada, permitindo verificar que uma modificação apresente uma maior eficiência, sendo assim denominada “estrutura otimizada”.

Segundo Ávila (2005) e Takahashi (2007), otimização é um processo de maximização e minimização que visa buscar a melhor solução para um determinado problema. Para Aimotion (2012), como exemplo simples de um problema de otimização, pode-se citar o Problema do Caixeiro Viajante (PCV), em que o indivíduo tem que visitar pessoalmente várias cidades conectadas por rodovias, com o objetivo de fazer uma viagem circular em que o ponto de partida seja o mesmo de chegada, sem passar duas vezes pela mesma cidade e fazendo o menor percurso possível. Como determinar o melhor trajeto para atender ao problema? Existe um grande número de trajetos possíveis, ou seja, de soluções adequadas. O trajeto ótimo, de acordo com o problema, é aquele que percorre todas as cidades uma única vez e no menor percurso possível.

Para se desenvolver um processo de otimização, alguns conceitos são importantes (ÁVILA, 2006). Os principais são:

- função objetivo: equação matemática que expressa a melhoria de interesse em um dispositivo/processo. Sinônimos: critério de otimização, função custo ou função de mérito (*fitness function*);
- parâmetros: são as variáveis da função objetivo ajustadas no processo de otimização, visando adquirir soluções satisfatórias. Sinônimos: variáveis de otimização, variáveis objeto, variáveis de concepção ou de projeto (*design variables*);

- espaço de busca: domínio (delimitado ou não) que apresenta os limites dos parâmetros, correspondendo ao espaço de soluções. É definido pelo número de parâmetros envolvidos nas soluções;
- restrições: são delimitações específicas do problema intrínseco aos espaços de parâmetros. Por exemplo, requisitos de projeto podem impor que abaixo de certo valor a solução não seja considerada;
- domínio realizável: região do espaço (dos parâmetros e/ou objetivos) onde as restrições são respeitadas. Sinônimo: espaço viável, admissível ou factível;
- domínio não viável: região do espaço onde as restrições são violadas.

O procedimento para a análise dos espaços de busca e a particularidade de cada metodologia de otimização estão vinculados a parâmetros de controle (número de interações e direção de procura) e a condições iniciais (valores iniciais dos parâmetros e limites dos domínios). A Figura 7 ilustra um arranjo genérico das metodologias de otimização.

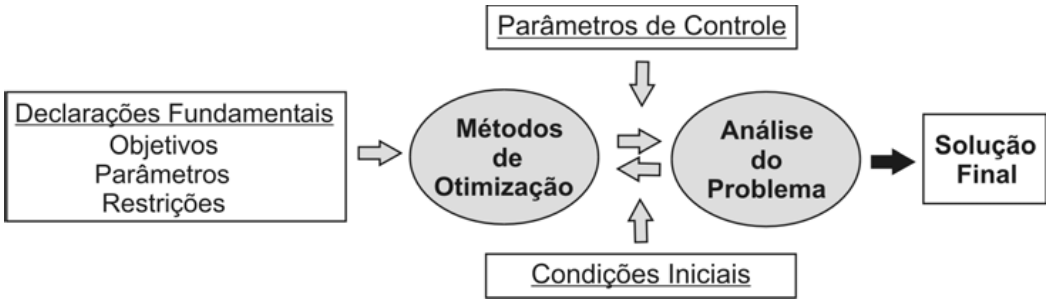

Figura 7. Disposição dos componentes de uma otimização.
Fonte: Ávila, 2006.

Existem várias ferramentas para realizar a otimização de processos, como o *software* MATLAB, um sistema interativo de alto desempenho voltado para o cálculo numérico, integrando análise numérica, matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos de fácil interpretação, e a tomada de decisão em cenários onde problemas e soluções são expressos numericamente, escritos de forma matemática, ao contrário da programação tradicional (MATLAB, 1991).

A grande maioria dos problemas reais realizam otimização simultânea de múltiplos objetivos. Alternativamente a uma única solução, o resultado da multiobjetivo é geralmente um conjunto de soluções que caracteriza o comprometimento entre os objetivos, sendo intitulado de Pareto Ótimo. As soluções que compõem a otimização são consideradas ótimas em função da inexistência de uma melhor solução quando todos os objetivos são analisados simultaneamente. Portanto, a otimização multiobjetivo (multicritério ou vetorial) consiste em

obter as soluções Pareto e, consequentemente, em conhecer o conjunto dos compromissos possíveis entre os objetivos. Isso possibilita ao projetista/engenheiro uma melhor compreensão de seu problema (PARETO, 1896).

As soluções de um problema de otimização estão presentes entre os valores de amplitude de busca do problema, cujos valores da função da otimização são mínimos ou máximos, dependendo do objetivo da otimização. Assim, uma definição para esse tipo de problema é dada pela Equação 1, em que foi destacada uma função mínima da otimização (BOYD e VANDENBERGUE, 2004).

$$min\ f(x) \qquad \textbf{(Eq. 1)}$$

$$g_i(x) \leq b_i,\ \ i = 1, \ldots, m,$$

Onde: x = (x1, x2, . . . , xn) é o vetor das variáveis do problema; f é a função objetivo que se deseja otimizar (minimizar); as funções gi, i = 1, . . . , m são as restrições do problema; e as constantes b1, . . ., bm são os limites das restrições.

A Equação 1 apresenta uma única função objetivo. Porém, para uma otimização formada por mais de uma função objetivo, ou seja, multiobjetivo, segue a Equação 2:

$$f(x) = \{f1(x), f2(x), \ldots, fnumobj(x)\}, \qquad \textbf{(Eq. 2)}$$

Onde: fi(x), para i = 1, . . . numobj, é uma função objetivo; e numobj é o número de objetivos.

Muitos problemas de otimização consideram o aspecto multiobjetivo, conforme destacam alguns pesquisadores, como Cheng et al. (2011); Zhang et al. (2009); Xia e Wu (2005); e Chiang e Lin (2013). Segundo Carvalho (2015), para classificar uma solução de um problema multiobjetivo existem algumas abordagens que devem ser consideradas, como:

- abordagem de objetivo único: escolhe-se um objetivo e os demais serão restritos;
- método da função utilitária: modifica-se o problema multiobjetivo em um problema com um objetivo por meio de uma função auxiliar. Tradicionalmente, é feita a soma ponderada dos objetivos, destacando-se a importância de cada um deles;
- Ótimo de Pareto: executa-se o algorítmico por meio de aplicações e definições do Ótimo de Pareto e relação de dominância, visando comparar as melhores soluções do problema em análise.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Características dos processos analisados

A pesquisa ocorreu três processos de produção de carvão vegetal e seus respectivos tipos de fornos do setor de produção de carvão vegetal. Os processos serão detalhados a seguir.

a) Processo 1 – Forno de encosta

A instituição selecionada para exemplificar os fornos de encosta atua no mercado de comercialização para cocção localizado no município de Atibaia, SP. A sua produção é de aproximadamente 250 t mês^{-1}. A organização encontra-se em fase de credenciamento do Selo Carvão Premium do estado de São Paulo, sendo um modelo para o segmento da produção de carvão (DIAS JUNIOR, 2018).

A empresa é responsável por toda a cadeia produtiva, contemplando as etapas de plantio, corte, baldeio, carbonização, empacotamento e distribuição dos produtos. Toda a matéria-prima (madeira/lenha) utilizada pela empresa para a produção do carvão vegetal é oriunda de plantios de *Eucalyptus* sp. Porém, atualmente, por questões estratégicas de mercado, compra madeira no mercado. Levando-se em consideração a adequação da matéria prima, a empresa adota o Clone I-144, produzido principalmente em Minas Gerais, cultivado em todo o Brasil e utilizado para fins energéticos, indicado para regiões que apresentam solo com baixos teores de argila.

Os fornos de encosta utilizados pela empresa são indicados para regiões de topografia acidentada. Para o exemplo da instituição em estudo, possuem dimensões internas de 2,5 m de diâmetro e 2,5 m de altura, apresentando uma capacidade de enfornamento de aproximadamente 7 m³ de madeira. O forno é construído com tijolos maciços cerâmicos. Na porta existem dois orifícios para a entrada de ar que são vedados após a ignição e, na copa do forno é alocado um orifício para a saída dos gases gerados que são vedados ao final do processo para a fase de resfriamento, conforme destacado na Figura 8B.

Figura 8. Disposição dos fornos na unidade produtiva (A) e (C) abertura do forno para a retirada do carvão. Em destaque, orifício para controle do fluxo de oxigênio (B) e ignição do forno (D). **Fonte:** Arquivo pessoal.

b) Processo 2 – Forno retangular

A instituição selecionada para exemplificar os fornos retangulares é uma siderúrgica localizada em Belo Horizonte (MG). A organização solicitou sigilo quanto à divulgação de seu nome, embora tenha fornecido todos os dados necessários para a pesquisa.

O setor de carbonização foi fundado em 1969, com sede atual na região de Curvelo (MG), e tendo por objetivo principal produzir carvão vegetal oriundo de florestas de eucalipto, visando ao abastecimento da usina.

Os fornos retangulares (Figura 9), com estrutura composta de concreto e metal, alvenaria em tijolo comum e porta de concreto armado e aço, foram utilizados para a coleta dos dados. São caracterizados pela presença de inovações tecnologias, carregamento de madeira sendo realizado em 4 h e descarga do carvão em 2 h, ambos totalmente mecanizados e operados por mão de obra capacitada. O forno possui duas portas para carga e descarga, apresentando quatro câmaras defletoras subterrâneas utilizadas para o controle de entrada de oxigênio e duas chaminés para exaustão dos gases, contendo também aproximadamente 20 poços para a aferição da temperatura ao longo do forno por um termômetro infravermelho (tubos metálicos de fundo ocluso inseridos nas paredes até o interior do forno). Esse forno possui as seguintes dimensões: 32 m de comprimento x 4 m de largura x 4 m de altura, resultando em uma capacidade de enfornamento de madeira de 310 m^3 (aproximadamente 446 estéreos).

Figura 9. Forno retangular.
Fonte: Arquivo pessoal

c) Processo 3 – Forno fornalha

Trata-se de um processo experimental, porém já aplicado a algumas empresas do setor. Além da aplicação do questionário e entrevista foram analisados os dados experimentais apresentados por Lana (2014). O forno possui 3,2 m de diâmetro e 2,2 m de altura, com capacidade de enfornamento de 8,5 m³ (~12 estéreos), conforme Figura 10. Esse forno é caracterizado por ter sido construído com tijolos maciços cerâmicos e revestido por argamassa, cujo objetivo é a melhoria da vedação para reduzir a entrada de ar, as perdas térmicas e as manutenções periódicas. O forno definido do tipo superfície possui seis orifícios de 10 cm x 15 cm, distribuídos em suas duas laterais de forma uniforme, com entrada de ar que controla a oxigenação do sistema e, consequentemente, a temperatura, auxiliando na condução da carbonização. O controle da carbonização é feito por meio da coleta de temperatura por um termômetro infravermelho (pirômetro) em oito cilindros metálicos, sendo quatro localizados na copa do forno e quatro nas laterais.

Figura 10. Forno fornalha
Fonte: Lana (2014)

3.2. Procedimentos metodológicos

Para a realização da pesquisa, foi necessário dividir os procedimentos metodológicos em etapas para cada um dos três processos analisados, conforme apresentado na Figura 11.

Conforme se pode observar na Figura 11, o desenvolvimento do trabalho foi realizado em nove etapas, e cada um dos processos distribuído sucintamente da seguinte forma:

1) identificação das variáveis inerentes a cada um dos processos produtivos;

2) coleta dos dados (entrevistas, visitas técnicas e revisão bibliográfica);

3) estruturação dos fluxogramas dos processos analisados;

4) fluxo de massa;

5) fluxo de energia;

6) definição e simulação dos três diferentes cenários atribuídos a cada um dos processos mapeados;

7) modelo teórico proposto (elaborado por meio dos dados coletados) e análise de sensibilidade;

8) otimização multiobjetivo;

9) determinação dos indicadores de desempenho energético.

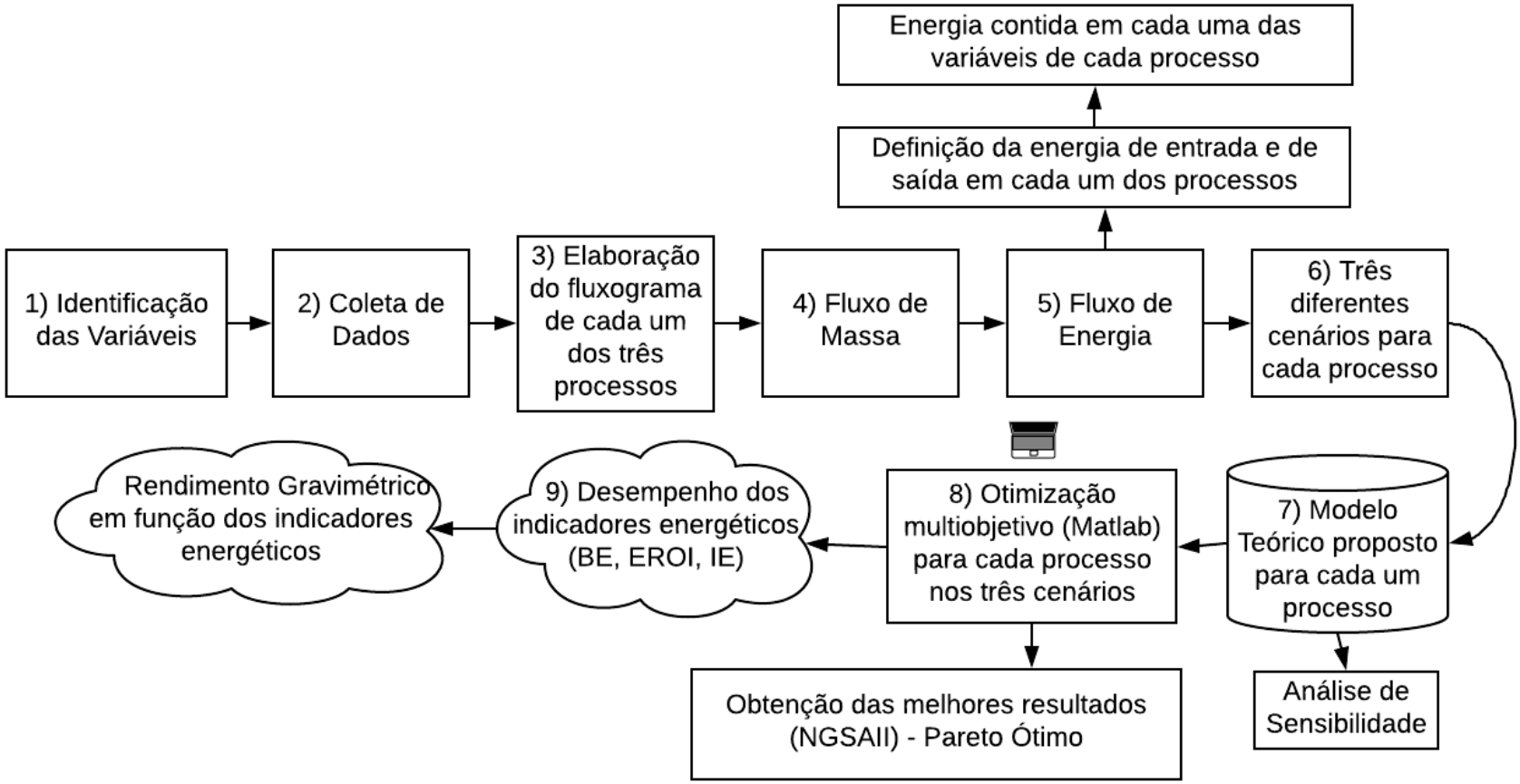

Figura 11. Fluxograma de execução do método de trabalho

Em que: BE = balanço energético (MJ), EROI = lucratividade energética, IE = intensidade energética (MJ t^{-1})

3.3. Identificação das variáveis analisadas nos processos de carbonização

Levando-se em consideração as características anatômicas e as propriedades químicas, físicas e mecânicas, a madeira de qualquer espécie, de uma forma geral, pode ser considerada um material heterogêneo, estando diretamente ligada às variações nos sentidos radial, longitudinal e tangencial do material.

O poder calorífico é uma variável de suma importância para se avaliar a potencialidade energética de biomassa (BRAND, 2010; FRIEDL et al., 2005; PARIKH et al., 2005), podendo ser definido como a quantidade de energia liberada na combustão de uma unidade de massa do material.

Para a definição da variável de entrada de madeira (insumo), nos processos mapeados levaram-se em consideração algumas premissas, conforme apresentado na Figura 12.

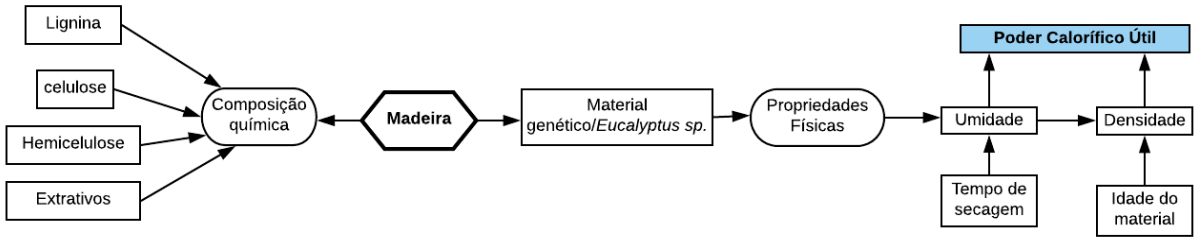

Figura 12. Características interligadas à madeira (matéria-prima)

Na Figura 12 são apresentadas as características que podem influenciar na energia contida da madeira, como composição química, material genético e propriedades físicas. Considerando-se o tipo de material analisado e sua origem, espécies do gênero eucalipto e clones, as características que mais influenciam e estão diretamente ligadas ao poder calorífico útil da madeira são as atribuídas às propriedades físicas, como a umidade e a densidade.

Uma variável de entrada relevante assumida para a produção de uma tonelada de carvão vegetal utilizada nos materiais de entrada foi a mão de obra e as operações mecanizadas essenciais para realizar as atividades de carbonização. Foi mensurado o tempo necessário na execução da atividade de carga e descarga dos processos analisados que demandam atividades manuais. E para as operações mecanizadas mensurou-se o consumo de óleo diesel e o tempo dos operadores e dos monitores do processo.

As variáveis de saída dos processos, interligadas aos principais produtos oriundos da carbonização, são apresentadas na Figura 13. As proporções dos principais produtos podem ser alteradas em relação ao tipo e às características inerentes de cada um dos processos analisados.

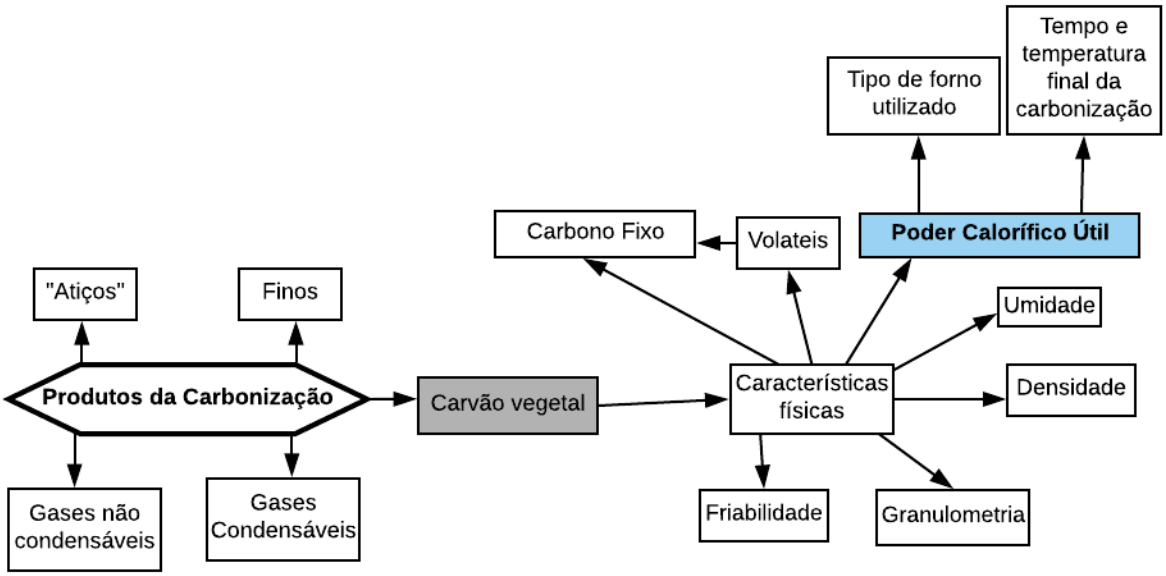

Figura 13. Principais produtos oriundos do processo de carbonização e as características físicas atribuídas ao carvão vegetal.

Conforme apresentado na Figura 13, além do principal produto oriundo da carbonização, o carvão vegetal, outros estão presentes nos processos, por exemplo: finos, atiços, gases não condensáveis (dióxido e monóxido de carbono, hidrogênio, metano, entre outros) e gases condensáveis (líquido pirolenhoso). Visando ao entendimento das principais características atribuídas à potencialidade energética dos produtos da carbonização, o poder calorífico útil, poderá ser influenciado pelo teor de carbono fixo, tipo de forno utilizado (processo), o tempo e a temperatura final da carbonização.

3.4. Coleta de dados dos processos analisados

Visando ao entendimento técnico e detalhado do processo de produção de carvão vegetal, foram realizados questionários e visitas em diferentes instituições do setor, a exemplo de Meira (2002), Santos (2017) e Dias Júnior (2018). Adicionalmente, por meio do questionário, buscou-se informações das análises laboratoriais inerentes às propriedades físicas e químicas realizadas pelas instituições relacionadas à madeira e o carvão vegetal. Assim como informações relacionadas à particularidade de cada processo e à operacionalização realizada manualmente pelos funcionários ou operações mecanizadas, conforme apresentado na

Tabela **3**. Também foram disponibilizados pelas instituições, os rendimentos médios dos produtos da carbonização (carvão vegetal, finos, atiços, gases condensáveis e não condensáveis).

Tabela 3. Dados coletados durante as visitas e aplicação dos questionários

Madeira	Forno	Produtos da carbonização
Clone/Espécie	Capacidade (m³)	Rendimento gravimétrico (%)
Umidade (%)	Enfornamento manual/mecanizado (h)	Cinzas (%)
Densidade (kg m^{-3})	Descarga manual/mecanizada (h)	Atiço (kg)
Diâmetro (cm)	Medição da temperatura (h)	Umidade (%)
Comprimento (m)	Ignição (h)	Densidade (kg/m³)
Massa enfornada (kg)	Carbonização (h)	Massa na base seca de carvão vegetal (kg)
PCS (MJ kg^{-1})	Resfriamento (h)	Finos (%)
-	Temperatura final do processo (°C)	PCS (MJ kg^{-1})
	Consumo da máquina (L h^{-1})	Licor pirolenhoso

Em que: PCS = poder calorífico superior (MJ kg^{-1})

Na

Tabela **3**, em relação a mão de obra, a determinação do tempo útil necessário para realização das atividades de carga e descarga dos fornos de produção de carvão vegetal foi mensurado, assim como o tempo para manutenção e monitoramento do processo. Ou seja, o dispêndio energético dado pelo tempo (horas) necessário para a execução da atividade dos funcionários, levou-se em consideração que cada operador consome 2,2 MJ h^{-1} de trabalho efetivo (SERRA, 1979).

Para a carga e descarga dos sistemas mecanizados dos fornos de carbonização, outras informações foram coletadas, por exemplo, o consumo de óleo diesel e lubrificantes. O consumo de combustíveis para as máquinas especializadas utilizadas para o enfornamento é de aproximadamente 0,33 L m³ (LANA, 2012). Nessa atividade também foi contabilizada a demanda energética do funcionário ao operar uma máquina, sendo ela de 1,39 MJ h^{-1} (SEIXAS, 1991).

Além da coleta de dados por meio das visitas e dos questionários, foi realizada uma pesquisa bibliográfica a fim de se estabelecer uma padronização da base de dados, principalmente, das variáveis não mensuradas pelas instituições e importantes para a contabilização do desempenho energético. Sendo assim, algumas bibliografias consultadas foram Antal Júnior et al. (2003); Arruda et al. (2011); Barcellos et al. (2004); Brand (2010); Brito (1993); Brito (2002); Brito e Barrichelo (1980); Chan et al. (1988); Frederico (2009);

Friedl et al. (2005); Jesus (2016); Lima et al. (2007); Oliveira et al. (2010); Oliveira et al. (2015); Parikh et al. (2005); Rosa et al. (2012); Santos et al. (2012); Satanoka (1963); Sharma (1992); Trugilho e Silva (2001); Trugilho et al. (1997); Urkan e Arlkol (1994);Vale et al. (2010). As variáveis relacionadas ao material de entrada (madeira) foram obtidas através dessa revisão bibliográfica.

Visando comparar as informações obtidas por intermédio dos questionários das instituições entrevistadas e dos dados encontrados na literatura, avaliou-se a forma e os métodos utilizados pelos processos de forno de encosta e retangular para as obtenções das características físicas e químicas da madeira de *Eucalyptus sp*. A

Tabela 4 apresenta as principais características inerentes à madeira, assim como as normas e os procedimentos utilizados.

Tabela 4. Características físicas e químicas da madeira.

Análise	Unidade	Norma	Referência
Massa e densidade específica básica	kg m^{-3}	NBR 11941	ABNT (2003)
Poder Calorífico Superior	kJ	NBR 8633	ABNT (1983)
Análise imediata	%	NBR 8112	ABNT (1983)

Referente ao carvão vegetal, assim como na madeira, para a obtenção das variáveis foi necessário comparar a forma e os métodos adotados pelas instituições para a obtenção de suas características físicas e químicas. A Tabela 5 apresenta as principais características físicas e químicas, assim como as normas e os procedimentos utilizados para a obtenção das características do carvão vegetal.

Tabela 5. Características físicas e químicas do carvão vegetal.

Análise	Unidade	Norma	Referência
Densidade a granel	kg m^{-3}	NBR 11941	ABNT (2003)
Poder Calorífico Superior	kJ	NBR 8633	ABNT (1983)
Análise química imediata (U%, TC%, CF%, MV%)	kcal	NBR 8112	ABNT (1986)
Grau de friabilidade	mm	NBR 7402	ABNT (2003)

Em que: U = umidade, TC = teor de carbono fixo, CF = carbono fixo, MV = materiais voláteis

Foi adotado de acordo com Oliveira (1977) a média da geração de finos total de 25%, estando distribuída da seguinte forma: nas carvoarias, 3,7%; carregamento e transporte, 5,8%; armazenamento, 6,3%; e peneiramento, 9,4%. A função do grau de friabilidade é analisar a geração de finos desde a fabricação até a sua utilização, devido a fatores como processo de fabricação, estocagem, peneiramento, transporte e outros.

Para a análise e avaliação das variáveis atribuídas aos processos analisados, a temperatura final da carbonização foi adotada entre 400 °C e 500 °C.

O indicador do rendimento gravimétrico foi determinado conforme a Equação 3, destacando-se a temperatura final do processo de carbonização.

$$RGC = (MCbs / Mmbs) \times 100, \qquad \textbf{(Eq 3)}$$

Onde: RGC = rendimento gravimétrico da carbonização (%); MCbs = massa do carvão seco (kg); e Mmbs = massa da madeira seca (kg).

Com base nos dados obtidos por meio das visitas, aplicação do questionário e entrevistas com os responsáveis técnicos de cada instituição, elaborou-se um fluxograma com o objetivo de detalhar os tipos de fornos e suas respectivas etapas do processo e, principalmente, de investigar como as principais variáveis se relacionam e interagem na atuação na energia contida e respectivamente no desempenho energético, tanto para os materiais de entrada quanto para os de saída.

3.5. Determinação dos fluxos de materiais

Para a elaboração do fluxo de material das variáveis da carbonização propostos, foram adotados os procedimentos descritos por Romanelli e Milan (2010). Tal método é dividido em três etapas:

a) Construção do diagrama após a elaboração do fluxograma baseado no método *Energy Language System*, considerando os insumos necessários ao processo.

b) Determinação do fluxo de materiais por meio da contabilização dos insumos diretamente utilizados. Neste estudo considerou-se a entrada da matéria-prima (madeira) e a saída dos produtos da carbonização. A Figura 14 apresenta o diagrama com o fluxo de material dos processos mapeados, enfatizando a carbonização que ocorre nos fornos.

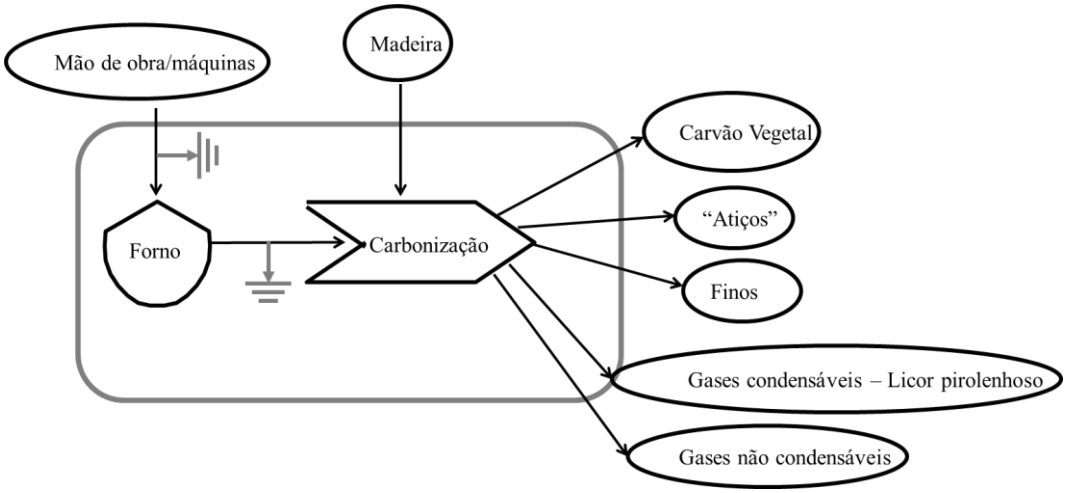

Figura 14. Diagrama de fluxo de materiais na produção de carvão vegetal

c) Determinação do fluxo de materiais por meio dos insumos indiretamente utilizados: foram consideradas as operações manuais e mecanizadas realizadas respectivamente pelos operadores e pelas máquinas especializadas para a carga e descarga dos fornos utilizados no processo. As máquinas especializadas utilizadas foram do tipo pá carregadeira com rodas e potência de 114 kW, com largura da pá de 2,5 m e capacidade de 2,1 m³, apresentando um consumo de combustível de 6,88 L h^{-1} (LANA, 2012).

3.6. Determinação dos fluxos de energia

Após a determinação do fluxo de material, foi calculado o fluxo de energia. Cada material direta e indiretamente utilizado foi multiplicado pelo seu respectivo índice de energia incorporada (MJ $unidade^{-1}$). No caso da madeira, do carvão vegetal, dos finos, dos atiços e do licor pirolenhoso, foi estimado o poder calorífico útil, que leva em conta a interferência da umidade na quantidade de energia, para cada um dos processos mapeados.

Para os demais produtos da carbonização, os gases não condensáveis (CO_2, CO, H_2, CH_4), foi considerado o poder calorífico superior, conforme descrito por Lana (2014) e Santos (2017). De acordo com Seixas (2001) e Serra (1979) para a mão de obra o gasto energético horário (MJ h^{-1}). Segundo Lana (2012) as operações mecanizadas, o gasto energético horário (MJ h^{-1}).

As equações 4 e 5, a seguir, ilustram a forma de obtenção do poder calorífico útil (MJ) (BRITO, 1993).

$$PCI = PCS - 1{,}27, \qquad \textbf{(Eq 4)}$$

Onde: PCI= poder calorífico inferior (MJ kg^{-1}); PCS = poder calorífico superior (MJ kg^{-1}); e 1,27 = energia de formação de vapor d'água (MJ kg^{-1}).

$$PCU = PCI\ x \left(100\ - \frac{U}{100}\right) - 6 \times U, \qquad \textbf{(Eq 5)}$$

Onde: PCU = poder calorífico útil (MJ kg^{-1}); PCI = poder calorífico inferior (MJ kg^{-1}); 6 = fator de conversão referente à energia para a evaporação da água de formação; e U = umidade (%), base úmida

A determinação da energia contida na madeira e no carvão vegetal foi dada pelas equações 6 e 7:

$$ECm = PCUm * M_M, \qquad \textbf{(Eq 6)}$$

Onde: *ECm* = energia contida na madeira (MJ); *PCUm* = poder calorífico útil da madeira (MJ kg^{-1}); M_M = massa da madeira (kg).

$$ECcv = PCUcv * Mcv, \qquad \textbf{(Eq. 7)}$$

Onde: ECcv = energia contida no carvão vegetal (MJ); PCUcv = poder calorífico útil do carvão vegetal (MJ kg^{-1}); *Mcv* = massa do carvão vegetal (kg).

As energias contidas nos materiais constituintes dos fornos foram desconsideradas, dado que cada ciclo produtivo da carbonização representa aproximadamente 1% da vida útil do forno. Com isso, a energia contida nos fornos foi representada pela mão de obra (operadores/funcionários) e pelas operações mecanizadas do processo de enfornamento da madeira e da descarga de carvão vegetal do forno. Para a determinação do dispêndio energético de cada operador, foi considerada a Equação 8.

$$ECop = ECOop * Nhe, \qquad \textbf{(Eq. 8)}$$

Onde: ECop = energia contida na força de trabalho de cada operador (MJ); ECOop = energia consumida na força de trabalho de cada operador por hora efetiva (MJ h^{-1}); Nhe = tempo efetivo para a realização da atividade (h).

As operações mecanizadas analisadas neste estudo, representadas pelas máquinas especializadas do tipo pá carregadeira, foram obtidas pela Equação 9. Nessa atividade também foi contabilizada a energia contida necessária para o funcionário operar a máquina.

$$ECmec = ECOmec * Nhe + ECop * Nhe, \qquad \textbf{(Eq. 9)}$$

Onde: ECmec = energia contida na força de trabalho da máquina especializada (MJ); ECOmec = energia consumida da máquina especializada por hora efetiva (2,2 MJ h^{-1}); Nhe = tempo efetivo para a realização da atividade (h); ECop = energia consumida pelo operador de máquina (1,39 MJ h^{-1}).

Os demais produtos do processo de carbonização, finos, atiços, licor pirolenhoso, gases condensáveis ou não, foram contabilizados no fluxo de energia, sendo representados pelas equações 10, 11, 12 e 13.

$$ECfinos = PCUfinos * Mfinos, \quad \textbf{(Eq. 10)}$$

Onde: ECfinos = Energia contida nos finos (MJ); PCUfinos = poder calorífico útil dos finos (MJ kg^{-1}); Mfinos = massa de finos gerada no processo (kg).

$$ECatiços = PCUatiços * Matiços, \quad \textbf{(Eq. 11)}$$

Onde: ECatiços = Energia contida nos atiços (MJ); PCUatiços = poder calorífico útil dos atiços (MJ kg^{-1}); Matiços = massa de atiços gerada no processo (kg).

Segundo Castro (2014), o valor médio do poder calorífico superior dos finos pode ser considerado igual ao do carvão, já o poder calorífico superior dos atiços foi considerado como 76,7% do poder calorífico do carvão vegetal.

$$EClp = PCUlp * Mlp, \quad \textbf{(Eq. 12)}$$

Onde: EClp = Energia contida no licor pirolenhoso (MJ); PCUlp = poder calorífico útil do licor pirolenhoso (MJ kg^{-1}); Mlp = massa do licor pirolenhoso (kg).

$$ECGNC = (PCSCO_2 * MCO_2) + (PCSCO * MCO) + (PCSH_2 * MH_2) + (PCSCH_4 * MCH_4), \quad \textbf{(Eq. 13)}$$

Onde: ECGNC = Energia contida nos gases não condensáveis (MJ); $PCSCO_2$ = Poder Calorífico Superior do CO_2 (MJ kg^{-1}); MCO_2 = massa do CO_2 (kg); PCSCO = Poder Calorífico Superior do CO (MJ kg^{-1}); MCO = massa do CO (kg); $PCSH_2$ = Poder Calorífico Superior do H_2 (MJ kg^{-1}); MH_2 = massa do H_2 (kg); $PCSCH_4$ = Poder Calorífico Superior do CH_4 (MJ kg^{-1}); MCH_4 = massa do CH_4 (kg).

Para a determinação da massa dos gases não condensáveis foi realizada uma interpolação dos dados obtidos por Costa (2012), apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Emissão em massa seca dos gases não condensáveis da carbonização de três temperaturas finais

Temperatura final (°C)	Massa dos gases (kg Mg^{-1} madeira seca)			
	CO_2	**CO**	**H_2**	**CH_4**
400	97,14	43,2	0,36	4,5
550	137,09	56,65	0,69	10,3
700	139,25	57,87	0,91	13,7

Fonte: Costa (2012)

A partir da determinação das energias contidas em cada um dos produtos e insumos do processo, o fluxo de energia dos materiais de entrada foi representado pela Equação 14, e os materiais de saída pela Equação 15.

$$EE = ECm + ECop \quad \textbf{(Eq. 14)}$$

$$ES = ECcv + ECfinos + ECatiços + EClp + ECGNC, \quad \textbf{(Eq. 15)}$$

Onde: *EE* = energia de entrada; *ECm* = energia contida na madeira; *ECop* = energia contida dos operadores; ES = energia de saída; *ECcv* energia contida no carvão vegetal; *ECfinos* = energia contida nos finos; *ECatiços* = energia contida nos atiços; *EClp* = energia contida no licor pirolenhoso; *ECGNC* = energia contida nos gases não condensáveis.

3.7. Cenários analisados

Para a realização dos diferentes cenários, foi necessário padronizar o material de entrada (madeira), considerando que todos os processos analisados usaram a mesma matéria-prima para a produção de uma tonelada de carvão vegetal em todos cenários simulados. As simulações entre os cenários ocorreram para os materiais de saída, sofrendo alterações no fluxo de massa e de energia.

A

Tabela 7 apresenta os cenários e processos mapeados para a obtenção dos indicadores de desempenho energético.

Tabela 7. Cenários analisados em função dos processos, a fim de se obter os indicadores de desempenho energético

Cenários	Processos	Indicadores de Desempenho energético
Cenário 1 - (clássico)	Forno de encosta (Processo 1) Forno retangular (Processo 2) Forno Fornalha (Processo 3)	Balanço energético (BE), lucratividade energética (EROI) e intensidade energética (IE)
Cenário 2 - (queimador de gases)	Forno de encosta (Processo 1) Forno retangular (Processo 2) Forno Fornalha (Processo 3)	
Cenário 3 - (recuperador de licor pirolenhoso)	Forno de encosta (Processo 1) Forno retangular (Processo 2) Forno Fornalha (Processo 3)	

Para cada um dos processos foram analisados três cenários (

Tabela 7), dos quais o primeiro seria o processo clássico, sem aproveitamento dos gases, o segundo com a inclusão de queimadores dos gases, e o terceiro com a recuperação dos gases não condensáveis.

No primeiro cenário utilizou-se um processo ausente de inovações tecnológicas e sem obtenção de outros produtos do processo de carbonização, por exemplo, o licor pirolenhoso e/ou mecanismos utilizados para diminuir a emissão dos gases não condensáveis.

No segundo cenário levaram-se em consideração as modificações nos processos, com a presença de queimadores de gases condensáveis.

De acordo com Santos (2017), com a presença dos queimadores, os gases podem ser reduzidos na proporção de 66,5% para CH_4, de 70,0% para o CO, e de 100,0% para o H_2. Valores superiores foram encontrados por outros pesquisadores, sendo de 86,0% para o CO e 88,0% para o CH_4, encontrados por Lana (2014); de 93,7% (CO) e 96,9% (CH_4), obtidos por Cardoso et al. (2010); de 74,0% (CO) e 99,8% (CH_4), encontrados por Coelho (2013). Esses experimentos foram feitos em fornos de alvenaria (circulares e retangulares) acoplados a diferentes fornalhas (de alvenaria e metálica). Para a redução dos gases, foram feitos cálculos proporcionais por meio de interpolação dos dados da literatura com os dados coletados na pesquisa.

Finalmente, o terceiro cenário foi com a presença do condensador dos gases, o recuperador de alcatrão, a fim de se obter o licor pirolenhoso.

O modelo teórico proposto do fluxo de energia para os cenários simulados encontra-se apresentado nas tabelas de 8 a 11.

Para o cenário 3, em todos os processos foi utilizado o mesmo modelo dos cenários 1 e 2, com a alteração apenas da quantidade de licor pirolenhoso produzido, e da amplitude de 2,3 a 3,5% para 5,0 a 9,0%, em função da presença do recuperador de alcatrão.

Tabela 8. Modelo teórico proposto para o fluxo de energia dos materiais de entrada no processo 1 (forno de encosta) e no processo 3 (forno fornalha) aplicado em todos os cenários

Madeira base seca (kg)	PCU (MJ kg^{-1})	Mão de obra - enfornamento	MO1 (MJ h^{-1})	Mão de obra manual instrumentador	MO2 (MJ h^{-1})	Energia Contida Total (MJ)
=1/RGcv	=Poder Calorífico útil da madeira	=total de horas da mão de obra para enfornar a madeira/massa do carvão produzido (kg)	2,20	=total de horas da mão de obra/massa do carvão produzido (kg)	1,18	=(madeira base seca (kg)*PCU)+(Mão de obra manual enfornamento*PCS)+ (Mão de obra manual instrumentador (hs)*PCS)

Em que: RGcv = Rendimento Gravimétrico do carvão vegetal (%), PCU = poder calorífico útil (MJ kg^{-1}), MO1 = esforço físico para execução da atividade de carga e descarga (MJ h^{-1}), MO2 = esforço físico para a execução da atividade de monitoramento do processo (MJ h^{-1})

Tabela 9. Modelo teórico proposto para o fluxo de energia para os materiais de entrada no processo 2 (forno retangular) aplicado em todos cenários

Madeira (kg)	PCU (MJ kg^{-1})	Máquina especializada (L)	PCS (MJ h^{-1})	Mão de obra manual - operador de maq.	MO3 (MJ h^{-1})	Mão de obra manual instrumentador	MO2 (MJ h^{-1})	Energia Contida Total (MJ)
=1/RG	=Poder Calorífico útil da madeira	=consumo da máquina/ massa do carvão produzido (kg)	38,35[A]	=total de horas da mão de obra operando a máquina/massa do carvão produzido (kg)	1,10	=total de horas da mão de obra/massa do carvão produzido (kg)	1,18	=(madeira base seca (kg)*PCU)+(Mão de obra mecanizada (L)*PCS))+(Mão de obra manual em operar máquina (hs)*PCS)+)+(Mão de obra manual instrumentador (hs)*PCS)

Em que: RG = Rendimento Gravimétrico do carvão vegetal (%), PCU = poder calorífico útil (MJ kg-1), A = poder calorifico superior do óleo diesel, MO3 = esforço físico em operar a máquina especializada (MJ h-1), MO2 = esforço físico para a execução da atividade de monitoramento do processo (MJ h-1)

Tabela 10. Modelo teórico do fluxo de energia para os materiais de saída em todos processos no Cenário 1 (clássico)

Carvão (t)	PCU (MJ kg^{-1})	Atiço (kg)	PCS (MJ kg^{-1})	Licor Pirolenhoso	PCS (MJ kg^{-1})	Finos	PCS (MJ kg^{-1})
1	=Poder Calorífico útil do carvão	=% de atiços * massa de madeira	=78% do PCS do carvão	=% de LP *massa de madeira	PCS do LP (5255)	= % de finos*PCU do carvão	PCS do carvão

CO_2	PCS (MJ kg^{-1})	CO	PCS (MJ kg^{-1})	H_2	PCS (MJ kg^{-1})	CH_4	PCS (MJ kg^{-1})	Energia Contida Total (MJ)
=(97,41^{A}*Massa de madeira seca)/1000	0	=(43,2^{B}*Massa de madeira seca)/1000	10,10	=(0,36^{C}*Massa de madeira seca)/1000	141,65	=(4,5*Massa de madeira seca)/1000	55,47^{D}	=(carvão*PCU)+(atiço*PCS+(LP*PCS)+(finos*PCS)+(massaCO2*PCS)+(CO*PCS)+(h2*PCS)+(CH4*PCS)

Em que: PCU = poder calorífico útil, PCS = poder calorífico superior, A = emissão de 97,41 (kg t^{-1} madeira seca) de CO_2 (dióxido de carbono), B = emissão de 43,2 (kg t^{-1} madeira seca) de CO(monóxido de carbono), C = emissão de 0,36 (kg t^{-1} madeira seca) de H_2 (Hidrogênio), D = emissão de 4,5 (kg t^{-1} madeira seca) de CH_4 (metano).

Tabela 11. Modelo teórico do fluxo de energia para os materiais de saída em todos processos no Cenário 2 (queimador de gases)

Carvão (t)	PCU (MJ kg^{-1})	Atiço (kg)	PCS (MJ kg^{-1})	Licor Pirolenhoso	PCU (MJ kg^{-1})	Finos	PCS (MJ kg^{-1})
1	=Poder Calorífico útil do carvão	=% de atiços * massa de madeira	=78% do PCS do carvão	=% de LP *massa de madeira	2,14	= % de finos*PCU do carvão	PCS do carvão

CO_2	PCS (MJ kg^{-1})	CO	PCS (MJ kg^{-1})	H_2	PCS (MJ kg^{-1})	CH_4	PCS (MJ kg^{-1})	Energia Contida Total
=(97,41^{A}*Massa de madeira seca)/1000	0	=(43,2^{B}*Massa de madeira seca*0,70^{C})/1000	10,10	0	141,65	=(4,5^{D}*Massa de madeira seca*0,665^{E})/1000	55,47	=(carvão*PCU)+(atiço*PCS+(LP*PCS)+(finos*PCS)+(massaCO2*PCS)+(CO*PCS)+(h2*PCS)+(CH4*PCS)

Em que: PCU = poder calorífico útil, PCS = poder calorífico superior, LP = licor pirolenhoso, A = emissão de 97,41 (kg t^{-1} madeira seca) de CO_2 (dióxido de carbono), B = emissão de 43,2 (kg t^{-1} madeira seca) de CO(monóxido de carbono), C = percentual de redução (70%) do CO (monóxido de carbono) com o queimador de gases emissão de 0,36 (kg t^{-1} madeira seca) de H_2 (Hidrogênio), D = emissão de 4,5 (kg t^{-1} madeira seca) de CH_4 (metano), E = percentual de redução (6,65%) do CH_4 (metano).

3.8. Indicadores de desempenho energético

A análise e a quantificação do fluxo de energia de entrada (EE) e de saída (ES) dos processos permitem identificar a demanda total, definir a eficiência energética e obter o desempenho energético por meio da utilização de alguns parâmetros, como o EROI (acrônimo para *Energy Return Over Investment*), o balanço de energia (BE) e a intensidade energética (IE).

O balanço energético, segundo alguns autores, é a razão de energia disponibilizada e demandada por um sistema de produção (SILVA et al., 1987; SIQUEIRA et al., 1999; HETZ et al., 1994). Tal como Romanelli (2007), neste trabalho optou-se por essa razão pela denominação EROI (HALL, 2004), assumindo o balanço de energia como o ganho absoluto de energia por tonelada de carvão vegetal produzido nos tipos de fornos analisados (*output – input*).

O EROI refere-se à razão da energia ofertada/demandada por um processo, podendo ser entendido como a "lucratividade energética". Para ser calculado, foi levada em consideração e Equação 16.

$$EROI = ES/EE, \qquad \textbf{(Eq 16)}$$

Onde: EROI = retorno em energia sobre energia investida (MJ); EE = energia de entrada (MJ); e ES = energia de saída (MJ).

O balanço de energia (BE) refere-se ao ganho líquido de energia por processo realizado. Para a sua obtenção, foi levada em consideração a Equação 17.

$$BE = ES - EE, \qquad \textbf{(Eq 17)}$$

Onde: BE = balanço de energia (MJ); EE = energia de entrada (MJ); e ES = energia de saída (MJ).

A intensidade de energia (IE) é obtida por unidade de produto (massa e volume), sendo importante para avaliar processos cujos produtos não apresentam finalidade de disponibilização de energia, conforme a Equação 18. Esses indicadores são determinados a partir dos fluxos de energia de entrada (EE) e de saída (ES) do sistema.

$$IE = EE / Prod, \qquad \textbf{(Eq 18)}$$

Onde: IE = intensidade energética (MJ m^{-3}); Prod = produtividade, em m^3 ha^{-1}. A produtividade adotada para a madeira foi de 300 m^3 ha^{-1}, e para o carvão vegetal, o seu respectivo rendimento gravimétrico.

3.9. Análise de sensibilidade dos processos

Com base nos dados coletados foi feita uma análise dos dados a fim de se obter os limites inferiores e superiores das variáveis físicas e químicas de cada material de entrada e saída. A

Tabela **12** apresenta as principais variáveis utilizadas para realizar a análise de sensibilidade de cada material, assim como os limites.

Tabela 12. Variáveis utilizadas para a análise de sensibilidade

Material	Variáveis	Processo 1 (Forno de Encosta)		Processo 2 (Forno Retangular)		Processo 3 (Forno Fornalha)	
		LI	LS	LI	LS	LI	LS
Madeira (material de entrada)	Umidade (%)	10,00	35,00	10,00	35,00	10,00	35,00
	Densidade (kg m^{-3})	400,00	550,00	400,00	550,00	400,00	550,00
	PCU (MJ kg^{-1})	18,82	19,75	18,82	19,75	18,82	19,75
	Massa (kg) - base seca	3.188,25	3644,74	3.007,52	3.508,77	3.001,20	3.291,64
	Capacidade do forno (m^3)	6	8	307	312	8,5	10,5
Forno (material de entrada)	RGcv (%)	28,00	32,00	30,00	35,00	31,00	34,00
	Mão de obra (h) - enfornamento	7,14	13,72	-	-	7,59	13,54
	Mão de obra (h) - instrumentador	3,57	6,86	1,38	2,27	3,79	6,77
	Mão de obra (h) - operador	-	-	0,16	0,27	-	-
	Operação mecanizada (L)	-	-	1,13	1,87	-	-
Carvão Vegetal (material de saída)	Umidade (%)	1,00	7,00	1,00	7,00	1,00	7,00
	Densidade (kg m^{-3})	215,00	229,00	220,00	251,00	215,00	251,00
	Produção - base seca (kg)	930,00	990,00	930,00	990,00	930,00	990,00
	PCU (MJ kg^{-1})	29,73	36,26	28,96	31,55	28,96	31,55
Atiços (material de saída)	Produto (%)	8,00	10,00	1,00	3,00	1,00	3,00
	PCU (MJ kg^{-1})	28,45	34,96	27,67	30,26	27,68	30,26
	Massa (kg)	307,20	577,30	30,08	105,26	240,10	329,16
Finos (material de saída)	Produto (%)	15,00	25,00	8,00	15,00	12,00	18,00
	PCU (MJ kg^{-1})	22,19	27,27	21,58	23,60	21,59	23,60
	Massa (kg)	576	1443,25	240,60	526,32	360,14	592,60
Licor Pirolenhoso (material de saída)	Produto (%)	2,30	3,50	2,30	3,50	2,30	3,50
	Massa (kg)	88,32	202,06	69,17	122,81	69,03	115,21
Gases não Condensáveis (kg t^{-1}) Cenário 1	CO_2	373,22	560,79	292,15	340,84	291,54	319,75
	CO	165,90	249,40	129,90	151,60	129,70	142,20
	CH_4	17,28	25,98	13,53	15,79	13,51	14,81
	H_2	1,38	2,08	1,08	1,26	1,08	1,18
Gases não Condensáveis (kg t^{-1}) (queimador) Cenário 2	CO_2	373,22	560,79	292,15	340,84	291,54	319,75
	CO	116,01	174,60	91,90	106,01	90,80	99,50
	CH_4	11,49	17,28	9,10	10,5	8,98	9,85
	H_2	-	-	-	-	-	-
Licor Pirolenhoso (condensador) Cenário 3	Litros (L)	192,96	519,57	150,38	315,19	150,06	286,99

Em que: RGcv = rendimento gravimétrico do carvão vegetal (%); PCS = poder calorífico superior (MJ kg^{-1}); PCU = poder calorífico útil (MJ kg^{-1}); CO_2 = dióxido de carbono (kg t^{-1}); CO = monóxido de carbono; CH_4 = metano; H_2 = Hidrogênio.

A análise de sensibilidade é um método de tomada de decisão que visa identificar o efeito de alterações nas variáveis. Assim como o comportamento, o impacto e a influência nas variáveis podem causar resultados de interesse. Além disso, visa explicar as principais interações e o peso da energia contida total entre as variáveis de cada processo, com os indicadores de desempenho energético, levando em consideração a particularidade operacional e produtiva, como, por exemplo, o rendimento gravimétrico.

Para a estruturação da análise de sensibilidade, foi necessário simular o comportamento de cada uma das variáveis inerentes aos produtos oriundos da carbonização (carvão vegetal, atiço, finos, licor pirolenhoso e gases não condensáveis) por meio da oscilação de cada unidade percentual fixa, estabelecida entre os limites inferiores e superiores das variáveis, determinados pelos intervalos de variação apresentados anteriormente na

Tabela **12**.

Para todas as variáveis apresentadas na

Tabela **12**, foi realizada uma oscilação percentual de 10%, estabelecida entre os limites inferiores e superiores. Posteriormente, foi necessário selecionar uma variável a ser sensibilizada e fixar as outras, com base nos modelos teóricos propostos preestabelecidos de cada processo.

3.10. Otimização dos indicadores de desempenhos energéticos

Após a realização da análise de sensibilidade, foram selecionadas as variáveis com maiores correlações entre as energias contidas nos materiais de entrada e saída. Previamente, a realização da análise de correlação de Pearson foi necessária para normalizar a base de dados por meio uma proporcionalidade em que os maiores valores de cada variável tiveram peso 1, enquanto os demais foram comparados percentualmente, com o objetivo de que todas as variáveis fossem expressas na mesma unidade. Por intermédio da normalização da base de dados, foi realizada a correlação par a par de cada uma das variáveis com a energia contida total de entrada e de saída. Esse procedimento visou identificar quais seriam as variáveis fixas que, independentemente da característica e da particularidade de cada processo, não sofrem alterações, como o poder calorífico superior dos gases condensáveis, o licor pirolenhoso, o óleo diesel e a energia consumida na operação mecanizada.

Para a efetivação da otimização, foi necessária a formulação e a construção de uma equação oriunda dos modelos teóricos apresentados nas Tabelas de 8 a 11 por meio de uma regressão linear múltipla com a base de dados de cada processo analisado. Com a regressão, é

possível prever os dados e estabelecer uma relação com a variável dependente (Y) em função das variáveis independentes (X1, X2, X3... Xn) e realizar diversas comparações entre as combinações das variáveis dos processos e o resultado delas nos indicadores de desempenho energético, ou seja, estabelecer uma relação entre a causa (variáveis) e o efeito (indicadores de desempenho energético), gerando assim uma formulação que foi substituída pelo modelo teórico proposto.

A Figura 15 apresenta um fluxograma utilizado para a realização da otimização. Com a análise de correlação par a par de Pearson, foi possível estabelecer o critério multiobjetivo para a tomada de decisão sobre qual das variáveis seria minimizada ou maximizada para a obtenção da função objetiva.

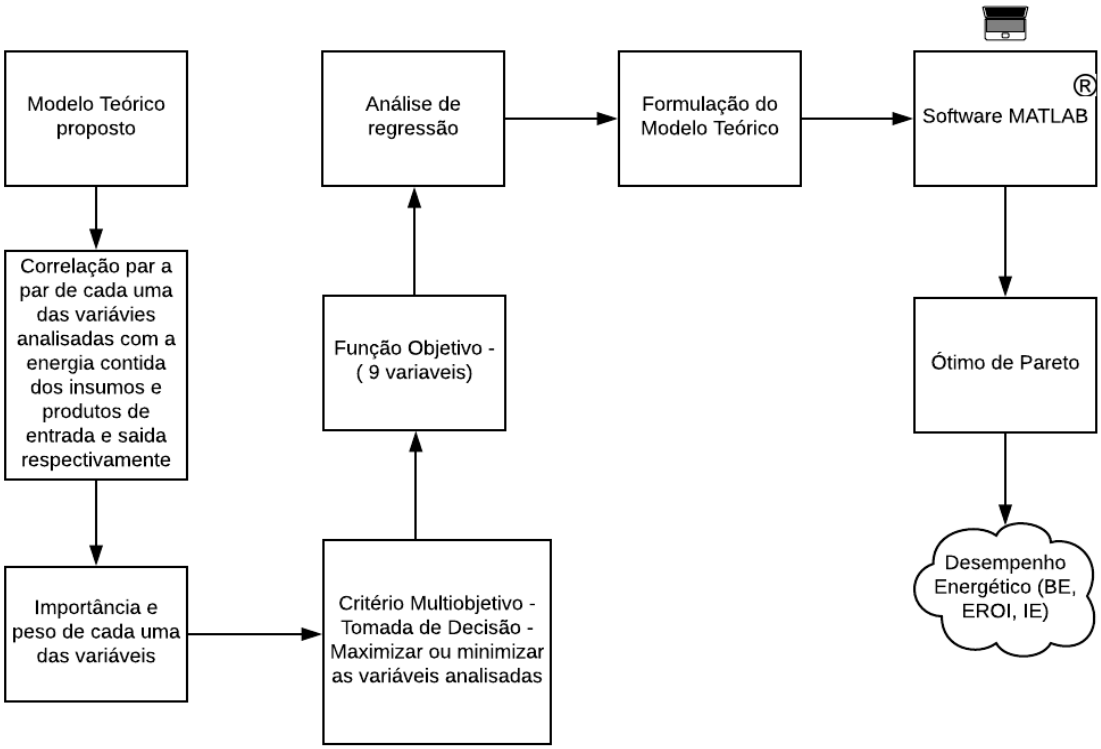

Figura 15. Otimização dos processos analisados

Posteriormente, foi realizada uma otimização multiobjetiva utilizando um algoritmo genético multiobjetivo elitista controlado, sendo este uma variação do *Non-dominated Sorting Genetic Algoritm* (NSGA 2) através do uso do *software* MATLAB®.

A seguir as etapas de construção do processo de otimização de acordo com Trancedi (2008).

3.11.1. Definição das variáveis dos processos

As variáveis são aquelas que representam a particularidade de cada processo, estabelecidas pelo responsável técnico. Essas variáveis agrupam-se em um vetor constituído de *n* variáveis independentes, definido pela Equação 19:

$$X = (x_1, x_2, x_3, x_4, \ldots, x_n)^T \qquad \textbf{(Eq. 19)}$$

Essas variáveis são consideradas determinísticas, não ocorrendo uma distribuição de probabilidades, pois dada uma certa entrada, terão sempre as mesmas saídas. Podem ter um espectro contínuo ao longo de um intervalo, ou estar restritas a valores discretos.

3.11.2. Definição da função objetivo

É uma função escalar das variáveis de projeto a ser otimizada. É importante utilizar critérios objetivos ao se estabelecerem as funções objetivo, evitando aspectos como estética, custos, fabricação, entre outros que possuem aspectos subjetivos ou de difícil formulação. Essa função pode ser definida, genericamente, pela Equação 20:

$$f(X) = f(x_1, x_2, x_3, x_4, \ldots, x_n) \qquad \textbf{(Eq. 20)}$$

Para a maioria dos problemas dos processos, a função objetivo é do tipo “não explícita”, pois os modelos de projeto não só envolvem equações, como também tabelas, gráficos, simulações ou análises numéricas.

O “ponto X” que apresenta o menor valor da função objetivo, delimitada pelas restrições, é denominado mínimo absoluto ou global. Já o ponto que apresenta um valor da função objetivo mínimo, predefinida, é denominado mínimo local.

A função objetiva, sendo as variáveis não fixas nos processos e em cada cenário, foram apresentadas na

Tabela **12**. As variáveis selecionadas são inerentes aos processos analisados, atribuídos às características técnicas e operacionais de cada tipo de forno utilizado para a produção de carvão vegetal. A tomada de decisão para a seleção das variáveis ocorreu tomando-se por base os resultados obtidos com a análise de correlação entre as variáveis e a energia contida.

Para as variáveis de entrada, considerando a madeira como o mesmo material genético para todos os processos analisados. E para o forno, as variáveis selecionadas foram o rendimento gravimétrico em base seca e a capacidade do forno. Já para as variáveis de saída, os produtos gerados no processo, foram analisadas o poder calorífico útil e a quantidade produzida de todos eles. A Tabela 13 apresenta as variáveis que foram fixadas para a realização da otimização, foram obtidas através de levantamento bibliográfico e são fixas e padronizadas.

Tabela 13. Variáveis independentes (x) fixadas para execução da otimização

Variável	Fonte	Poder Calorífico Superior	Esforço físico
Licor pirolenhoso (lp) (MJ kg^{-1})	Cetec, (1982)	2,14	-
CO_2 (MJ kg^{-1})	Lana, (2014)	0,00	-
CO (MJ kg^{-1})	Lana, (2014)	10,10	-
CH_4 (MJ kg^{-1})	Lana, (2014)	55,47	-
H_2 (MJ kg^{-1})	Lana, (2014)	141,65	-
Mão de obra - Instrumentador (MJ h^{-1})	Seixas, (1991)	-	1,18
Mão de obra - Enfornamento (MJ h^{-1})	Seixas, (1991)	-	2,2
Mão de obra - Operador (MJ h^{-1})	Seixas, (1991)	-	1,10
Óleo diesel (MJ h^{-1})	Seixas, (1991)	38,35	-

Em que: CO_2 = dióxido de carbono (kg t^{-1}), CO = monóxido de carbono, CH_4 = metano, H_2 = Hidrogênio

No caso dos gases não condensáveis, apesar do gás H_2 apresentar o maior poder calorífico superior dos gases (141,65 MJ), a sua emissão foi eliminada totalmente dos processos no cenário 2, que envolve a queima dos gases. Consequentemente, o metano, apesar de apresentar o segundo maior poder calorífico (55,47 MJ) dentre os gases que são emitidos e de apresentar alta correlação com a energia contida dos materiais, não foi uma variável que se destacou na formulação obtida por meio da regressão. Com isso, a otimização dos gases não condensáveis ocorreu apenas com o CO, em função do seu destaque na formulação feita pela análise de regressão entre as variáveis de saída.

A mão de obra (operadores) necessária para realizar a atividade de carga e descarga do forno e o monitoramento deste pelo instrumentador, em função da formulação obtida pela regressão, foram selecionados para a utilização na função objetiva. As operações mecanizadas são particularidades exclusivas do processo que utiliza o forno retangular e, por estarem ausentes na formulação da análise de regressão e nas análises de correlação, não foram selecionadas para ser uma variável utilizada na função objetiva.

Com a aplicação de uma otimização multiobjetivo, foi possível identificar soluções e respostas consideradas satisfatórias (Pareto Ótimo). Além das variáveis de saída, o rendimento gravimétrico e os indicadores de desempenho energético (BE, EROI e IE) também foram

maximizados, a fim de se obter um ponto ótimo que concilie a melhor resposta entre as variáveis e os indicadores.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Fluxograma dos processos

a) Processo 1 – Forno de encosta

Um fluxograma de todo o processo foi elaborado. Foi possível detalhar todas as atividades relativas à operacionalização do forno de encosta, assim como os esforços dos operadores relativos às operações manuais inerentes à atividade. Dentre elas, destacam-se: carga, descarga e manutenção do forno. O monitoramento deste durante a carbonização da madeira é realizado por meio de conhecimentos empíricos dos operadores adquirido durante a prática das atividades, aliados aos conhecimentos tradicionais e hereditários ("passados de pai para filho"). Com isso, evidencia-se o caráter mais rudimentar do processo, com pouca inovação tecnológica. Os principais aspectos de observação dos operadores são: a coloração da fumaça, aspectos sensoriais em relação à temperatura do forno e o tempo decorrido de carbonização.

O processo de produção de carvão vegetal, se inicia com as atividades de enfornamento com duração de 3 a 5h, seguido do fechamento da porta do forno. As operações são executadas pela mão de obra (operadores) por meio do dispêndio de esforço físico. Posteriormente ocorre a fase de carbonização com a duração de três a cinco dias. A primeira atividade dessa fase é a ignição, caso exista recuperador dos gases não condensáveis ou queimador de gases, são acionados nesta fase. A segunda atividade, também realizada pelo operador (instrumentador), é o controle do fluxo de gases e oxigenação, nesta etapa ocorre o monitoramento da taxa de aquecimento e consequentemente controle da temperatura, seguida da vedação do forno. Adiante ocorre a fase de resfriamento do forno com a duração de três a quatro dias, finalizando a fase de carbonização e iniciando a fase de descarga do forno dos produtos atiço e carvão vegetal.

Na Figura 16 é apresentado o fluxograma desse processo.

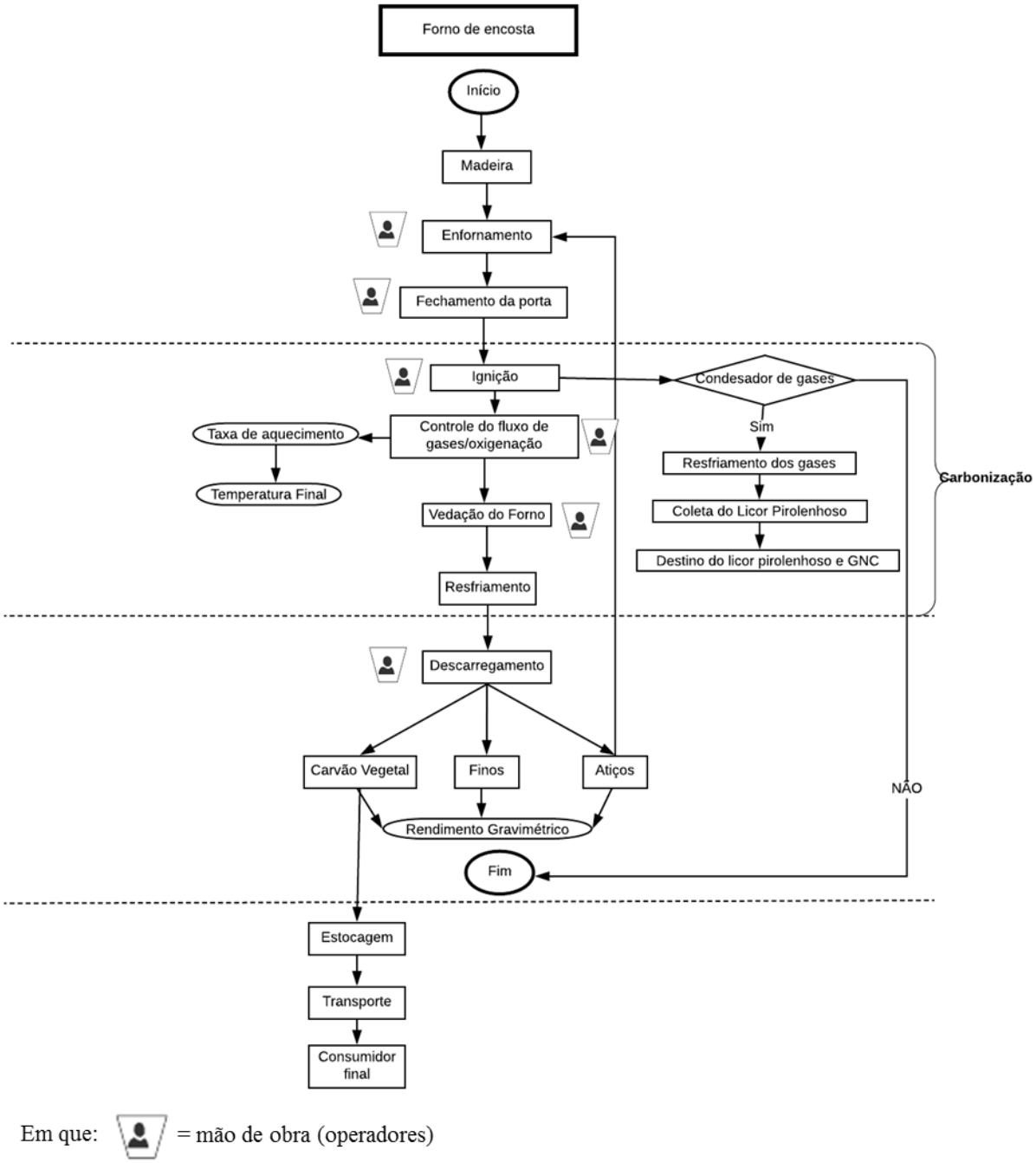

Figura 16. Fluxograma do processo de produção de carvão vegetal em forno de encosta

O ciclo médio de carbonização para a produção de carvão é realizado em aproximadamente oito dias, sendo quatro dias para a carbonização e outros quatro para o resfriamento do forno. Atualmente a empresa está realizando a condensação dos gases, gerando o licor pirolenhoso. A empresa comercializa esse produto, que possui inúmeras aplicações, principalmente na agricultura, atuando como herbicida, bioestimulante vegetal e indutor de enraizamento (SAIGUSA, 2000).

b) Processo 2 – Forno retangular

O fluxograma detalhando o processo de produção em forno retangular é apresentado na Figura 17. Destacam-se as atividades inerentes às operações mecanizadas, aplicadas para carga e descarga do forno, assim como as atividades ligadas às operações manuais, para condução da carbonização e coleta de temperatura de duas em duas horas nos tubos de instrumentação.

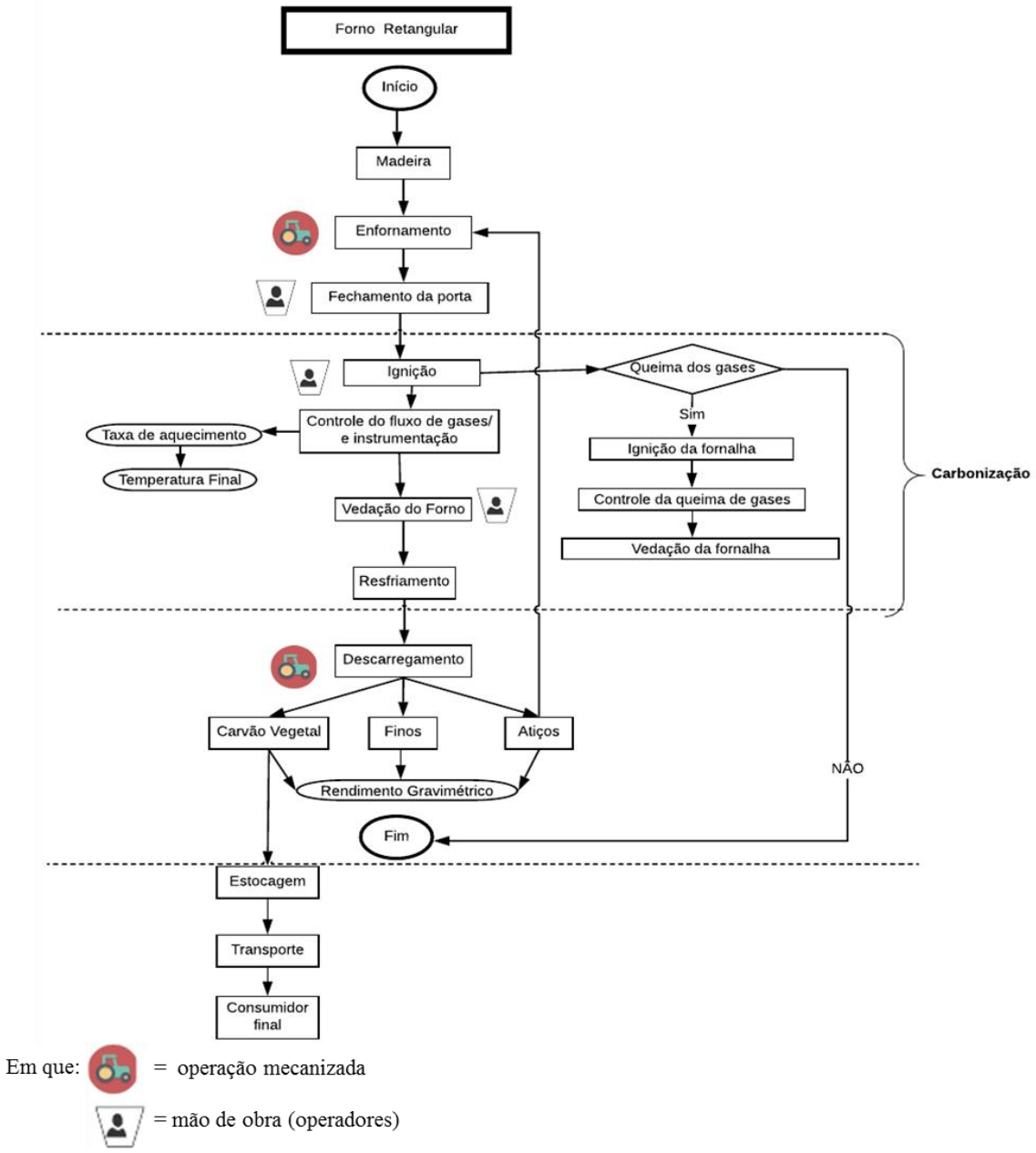

Figura 17. Fluxograma do processo de produção de carvão vegetal em forno retangular FR390

c) Processo 3 – Forno fornalha

Para o forno tipo fornalha, um fluxograma foi elaborado detalhando o processo, Figura 18. Nesse fluxograma apresentam-se as atividades inerentes às operações manuais aplicadas à carga, descarga e monitoramento do forno. O diferencial desse processo é a queima dos gases não condensáveis.

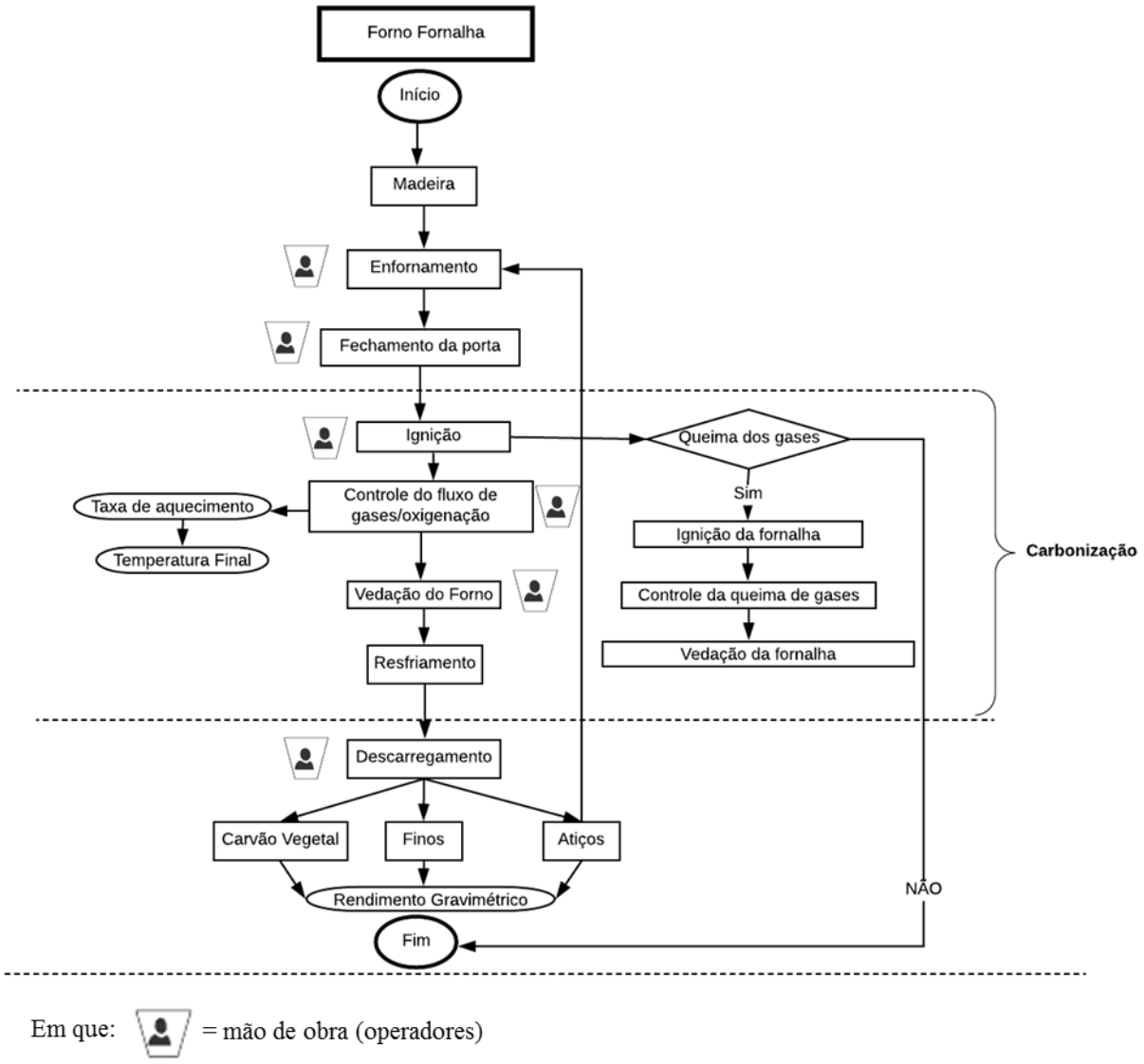

Figura 18. Fluxograma do processo de produção de carvão vegetal em forno fornalha

4.2. Diagrama do fluxo de material dos processos

Com a execução do fluxograma de cada processo, foi possível elaborar um diagrama do fluxo de material para os processos analisados, visando contabilizar os insumos diretos e os indiretos dos processos, apresentados na Figura 19. Apesar de cada processo apresentar sua característica peculiar, a principal diferença entre eles está na participação percentual de cada um dos produtos da carbonização, na mão de obra e nas operações mecanizadas.

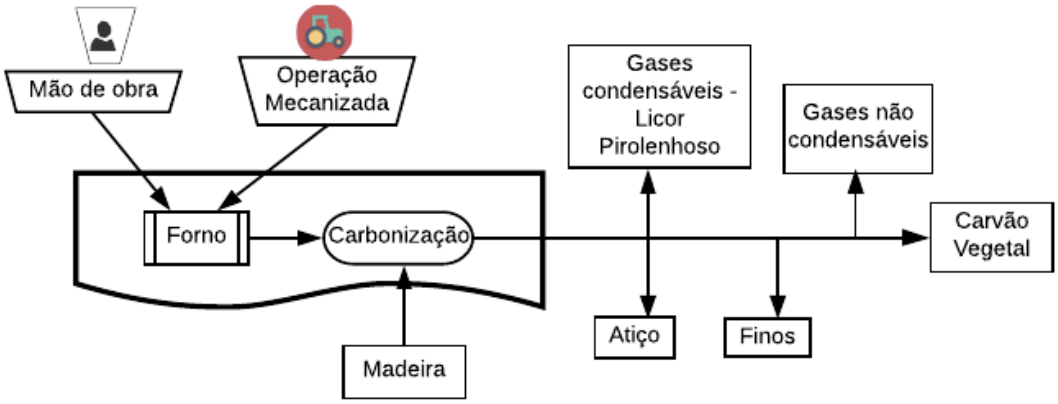

Figura 19 . Fluxograma dos materiais na produção de carvão vegetal

Conforme o fluxograma (Figura 19), as variáveis como a mão de obra e as operações mecanizadas foram definidas pela metodologia adotada (seção 3.4), sendo representadas pelos insumos indiretos. Com o fluxo de material e posteriormente o de massa, foi possível evidenciar que essas variáveis estão diretamente relacionadas com os tipos de fornos de cada processo, caracterizados pela utilização da mão de obra, nos fornos de encosta e fornalha, e pela utilização das operações mecanizadas, nos fornos do tipo retangular.

Os demais produtos obtidos no processo de produção de carvão vegetal (atiço, finos, licor pirolenhoso e gases não condensáveis) foram definidos como insumos diretos do processo. Por serem diretos, os produtos estão relacionados à fase de carbonização dos processos.

4.3. Modelos teóricos propostos para a construção do fluxo de energia dos processos

Após a obtenção do fluxograma e do diagrama do fluxo de material, propôs-se um modelo teórico para a produção de uma tonelada de carvão vegetal e para a análise dos processos referentes ao fluxo de energia, juntamente com a da energia contida em cada variável analisada nos materiais de entrada e saída.

4.4. Desempenho energético dos processos

Conforme estabelecido pelo método adotado neste trabalho (seção 3.8), o material de entrada (madeira) foi padronizado para todos os três cenários analisados. Ademais a quantidade de carvão vegetal produzido em cada processo foi analisada para a produção de 1 tonelada de carvão vegetal.

A madeira apresentou a maior participação na contabilização da energia contida nos materiais de entrada, seguida da mão de obra e das operações mecanizadas. No caso dos processos que utilizam as operações mecanizadas, a participação da energia contida de entrada foi de 0,7%. Já nos processos que utilizam a mão de obra, houve uma participação de 2,0% na energia contida dos materiais de entrada (Figura 20).

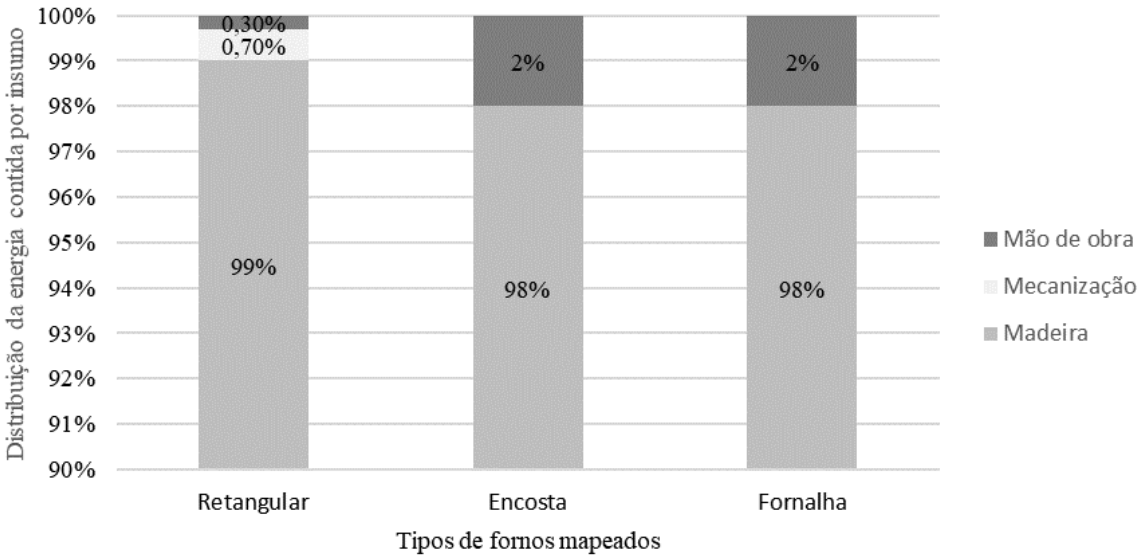

Figura 20. Participação da energia contida nos materiais de entrada por tipo de processo

Em função da baixa participação na energia contida dos dados obtidos com a mão de obra e as operações mecanizadas nos materiais de entrada no processo de produção de carvão vegetal (Figura 20) corrobora que para a elaboração de estudos futuros podem ser desprezados.

a) Cenário 1 (clássico)

Nesse cenário, os materiais de saída para os diferentes processos apresentaram variações nos produtos da carbonização (atiços, finos, gases não condensáveis e licor pirolenhoso). A Figura 21 apresenta a participação dos produtos na contabilidade da energia contida nos materiais de saída.

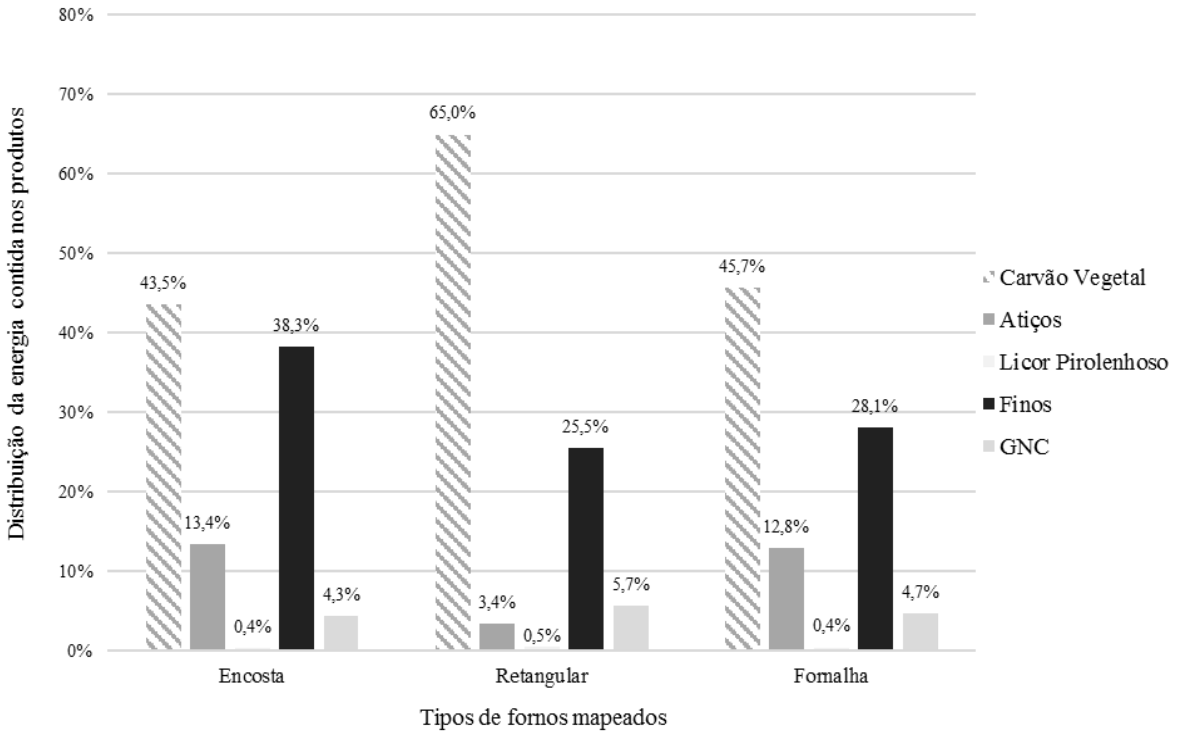

Figura 21. Participação da energia contida dos materiais de saída no cenário 1

Além de apresentar a maior participação dentre os produtos na contabilidade da energia contida nos materiais de saída, o carvão foi o que demonstrou a maior variação na participação da energia contida de saída nos processos analisados, variando de 43,5% a 65,0%, ou seja, demonstrando uma variação de 49,4% entre todos os processos. Em números absolutos, variou 21% nos processos analisados.

Na Figura 21, o forno retangular apresentou a maior participação do carvão vegetal na energia contida dos materiais e, consequentemente, uma menor participação dos demais produtos. O atiço se destacou dos demais processos por apresentar o menor valor (3,4%), enquanto o forno de encosta apresentou o maior valor (13,4%), sendo 2,94 vezes maior em relação ao retangular. Em números absolutos variou 10,0% entre os processos.

O produto finos apresentou a menor variação entre os processos, alterando de 25,5 para 38,3%, ou seja, variando 50,0% entre os processos, fato que se justifica pela particularidade de cada processo. O forno de encosta apresentou a maior de geração de finos, o que se deve ao fato de o carvão vegetal ser mais friável para esse tipo de forno. A friabilidade é uma propriedade do carvão que mensura a sua resistência mecânica: quanto mais friável, mais "quebradiço" é o carvão. O forno de encosta é caracterizado por produzir carvão com alto teor de carbono fixo, tornando-o mais friável.

A Tabela 14 apresenta os indicadores energéticos dos processos no cenário clássico

Tabela 14. Indicadores de desempenho energético dos processos no cenário clássico

Tipo de forno	Desempenho energético - clássico		
	BE (MJ)	**EROI**	**IE (MJ t^{-1})**
Encosta	- 7557,81	0,90	264,50
Retangular	- 16.372,79	0,72	196,10
Fornalha	- 9.351,63	0,85	202,40

Em que: BE = balanço energético (MJ), EROI = lucratividade energética, IE = intensidade energética (MJ t^{-1})

O balanço energético foi negativo em todos os processos de carbonização, corroborando com os dados da bibliografia. Resultados aproximados foram encontrados por Barcelos et al. (2004) e Jesus (2016). Segundo esses autores, aproximadamente 50% da energia é perdida, não sendo aproveitada em muitos processos. É inevitável que haja perdas energéticas durante o processo, principalmente na forma de calor (BROWNSORT, 2009).

A Tabela 14 demonstra como o forno de encosta se destacou em relação ao forno retangular e ao forno fornalha em todos os indicadores de desempenho energético (balanço energético, lucratividade energética e intensidade energética). Isso se deve ao fato de esse processo apresentar os maiores valores atribuídos à variável poder calorífico do carvão vegetal. Essa variável refere-se à energia disponível por unidade de carvão vegetal. Ademais, esse processo se destaca por apresentar os maiores valores de teor de carbono fixo (acima de 75,0%). Por outro lado, apresenta os menores valores inerentes ao rendimento gravimétrico.

Altos teores de carbono fixo resultam em menores rendimentos gravimétricos, porém o elevado teor de carbono fixo está diretamente ligado ao poder calorífico, propiciando maior balanço energético e, consequentemente, maior eficiência energética. O poder calorífico refere-se à energia disponível por unidade de carvão vegetal. O teor de carbono fixo e o poder calorífico estão diretamente relacionados com a temperatura final do processo (TOSSERO, 1981). Fornos de encosta são caracterizados por apresentar altas temperaturas na fase final da carbonização, em torno de 500°C. Por serem construídos em locais que apresentam alta declividade, utilizam o declive para auxiliar na construção da parede do forno. Com isso, destacam-se pelo isolamento térmico do forno.

b) Cenário 2 (queimador de gases)

Caracterizado pela presença do queimador de gases não condensáveis (GNC), ocorre uma redução na participação percentual desses materiais na energia contida de saída, devido à redução de 70,0% do CO e de 66,5% do CH_4 (SANTOS, 2017). A participação da energia de saída dos processos é apresentada na Figura 22.

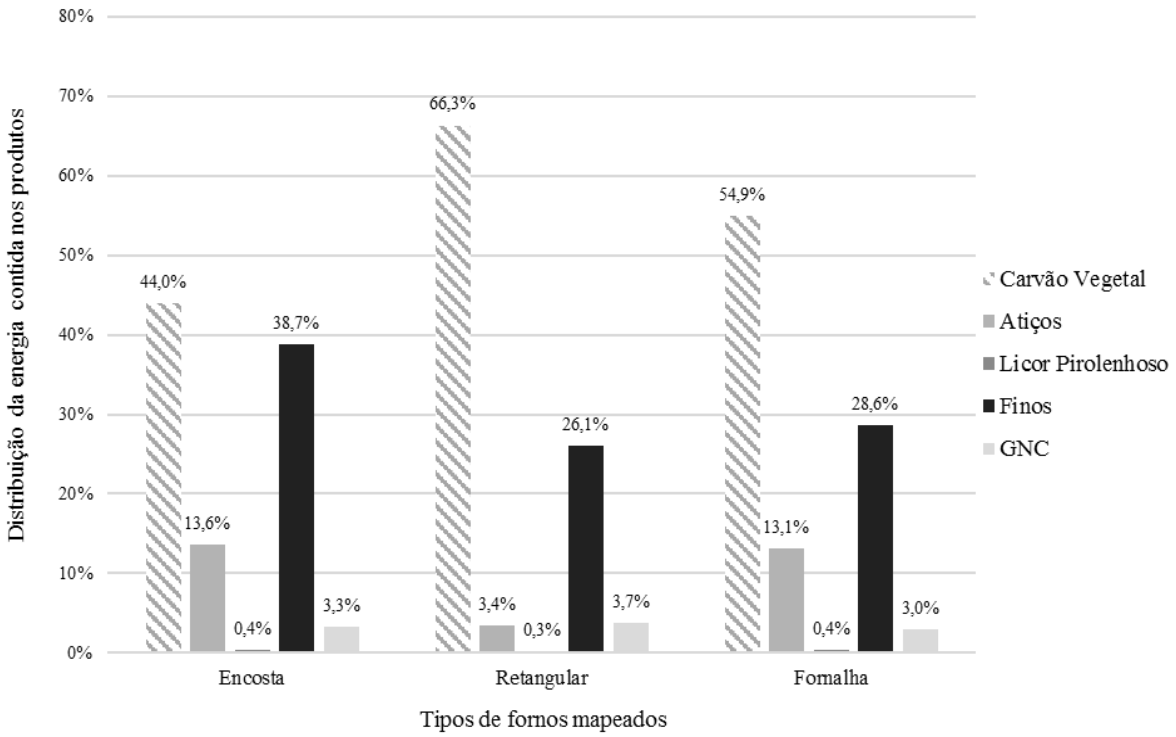

Figura 22. Materiais de saída com a queima dos gases nos diferentes processos analisados

Na Figura 22 a participação na energia contida de saída dos produtos no cenário 2 foi próxima em relação aos produtos do cenário clássico (1). No cenário 2, em relação aos gases não condensáveis, em função da presença do queimador, ocorreu uma redução de até 2,0% no caso do forno retangular.

Essa redução na emissão dos gases, principalmente no caso do metano (CH_4), poderá propiciar para a instituição um ativo ambiental em relação a projetos de créditos de carbono e ferramentas do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL). Apesar de apresentar um baixo valor percentual de mitigação (2,0%) no caso do forno retangular, equivalendo em média à redução de 5,0 kg de metano por tonelada de carvão vegetal produzido, ao extrapolar para a produção anual (315 mil toneladas), reduzirá anualmente a emissão em 1.575 toneladas de

metano. Em se tratando da energia contida, isso equivale a 87.511 GJ, equivalendo a uma geração de energia elétrica de 0,2 TWh.

A Tabela 15 apresenta os indicadores de desempenho energético desse cenário.

Tabela 15. Indicadores de desempenho energético em função de cada processo no cenário presente dos queimadores de gases

Tipo de forno	Desempenho energético - queimador		
	BE (MJ)	**EROI**	**IE (MJ t^{-1})**
Encosta	- 8.326,86	0,90	264,50
Retangular	- 17.241,87	0,71	196,10
Fornalha	- 10.212,62	0,83	202,40

Em que: BE = balanço energético (MJ), EROI = lucratividade energética, IE = intensidade energética (MJ t^{-1})

Na Tabela 15 observa-se como o forno de encosta apresentou o melhor balanço energético em relação aos demais tipos de fornos, destacando-se na lucratividade energética (EROI) e na intensidade energética. O EROI é um indicador que mensura o dispêndio energético em relação à energia investida, ou seja, o consumo da energia de saída em relação à de entrada. Sendo assim, comparativamente pode-se afirmar que o forno de encosta apresenta melhor desempenho energético em relação aos demais.

c) Cenário 3 (recuperador de licor pirolenhoso)

Nesse cenário, foi considerada a condensação dos gases e, consequentemente, a recuperação do licor pirolenhoso. A participação percentual da energia contida no material de saída licor pirolenhoso no cenário 3 foi proporcional em todos os processos analisados.

A Figura 23 apresenta a participação dos produtos na contabilidade da energia contida de saída.

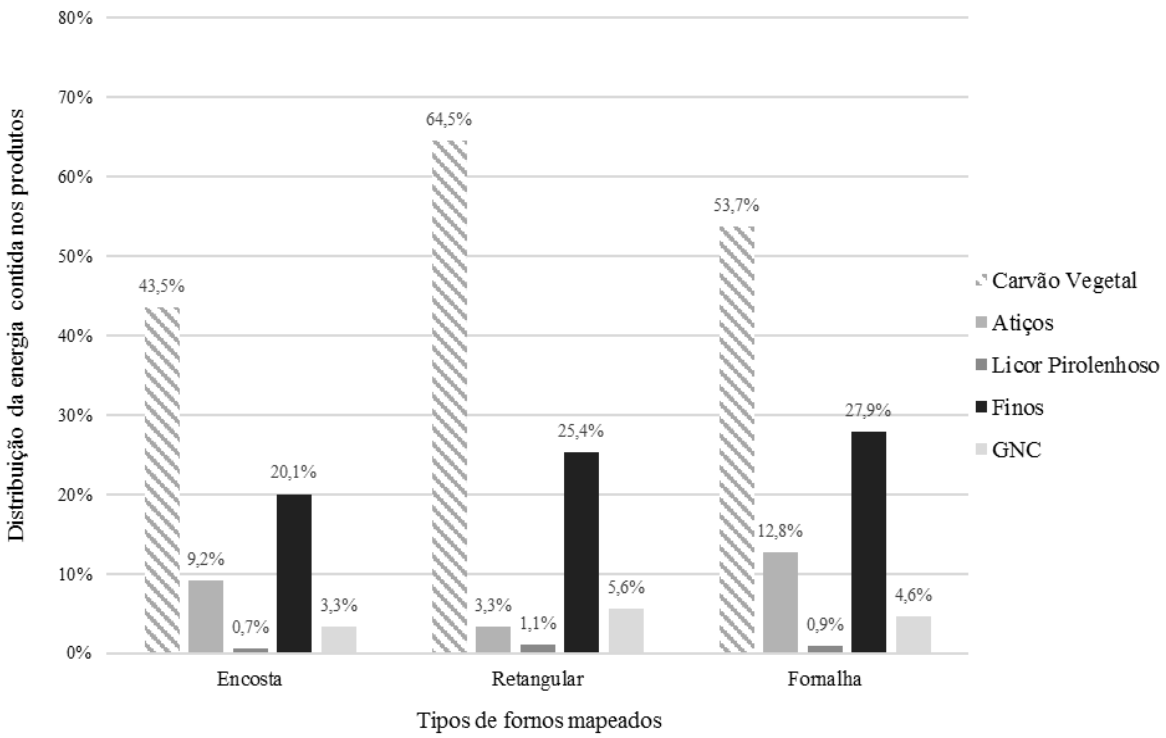

Figura 23. Materiais de saída com a condensação dos gases nos diferentes processos analisados

Na Figura 23, observa-se que os valores da participação na energia contida dos produtos foram próximos aos valores obtidos no cenário clássico, porém a variável que foi alterada (licor pirolenhoso) aumentou percentualmente a sua participação na energia contida de saída.

Tabela 16. Indicadores de desempenho energético em função de cada processo no cenário com recuperador de licor pirolenhoso

Tipo de forno	Desempenho energético - recuperador		
	BE (MJ)	**EROI**	**IE (MJ t^{-1})**
Encosta	- 7.459,87	0,91	264,50
Retangular	- 16.092,85	0,73	196,10
Fornalha	- 9.071,66	0,85	202,40

Em que: BE = balanço energético (MJ), EROI = lucratividade energética, IE = intensidade energética (MJ t^{-1})

De acordo com a Tabela 16, os valores atribuídos aos indicadores desempenho energético em todos os processos foram próximos ao cenário clássico (1). Isso se deve ao fato de a variável que foi maximizada (licor pirolenhoso) apresentar um baixo poder calorífico (2,14 MJ kg^{-1}) quando relacionado ao do carvão vegetal (em média 30 MJ kg^{-1}), podendo ser até 15 vezes maior.

4.5. Análise de sensibilidade

Com a obtenção dos parâmetros energéticos de cada um dos processos, foi realizada uma análise de sensibilidade das variáveis relacionadas aos materiais de entrada e de saída. Assim, obteve-se a energia contida (MJ) em cada um dos produtos e insumos com o objetivo de atestar os principais indicadores que sofrem maiores alterações na obtenção do balanço energético, da lucratividade energética e da intensidade energética, conforme a Tabela 17.

Tabela 17. Energia contida (MJ) nos insumos e produtos

Material	Indicador - Energia Contida (MJ)	Processo 1 (Forno de Encosta)		Processo 2 (Forno Retangular)		Processo 3 (Forno Fornalha)	
		LI	LS	LI	LS	LI	LS
Madeira (entrada)	Ecm	76.366,40	84.109,13	56.041,40	60.958,05	58.378,90	61.939,29
Forno (entrada)	Ecmop1	15,72	30,21	-	-	16,71	29,81
	Ecmop2	4,21	8,09	1,62	2,68	4,47	7,99
	Ecmop3	-	-	0,18	0,30	-	-
	Ecmec	-	-	43,32	72,02	-	-
Carvão Vegetal (saída)	Eccv	27.924,64	33.155,44	26.048,28	29.099,40	27.168,57	28.486,99
Finos (saída)	Ecfinos	19.824,58	33.479,65	8.419,97	12.634,17	10.950,51	17.068,07
Atiços (saída)	Ecatiços	8.247,03	10.445,65	820,95	1.970,93	5.694,26	7.396,16
Licor Pirolenhoso (saída)	Eclp	228,26	286,36	170,87	227,62	161,99	234,32
Gases não Condensáveis - Cenário 1 (saída)	Ecgnc	2.822,62	3.423,80	2.243,68	2.563,09	2.309,67	2.429,79
Gases não Condensáveis (queimador) - Cenário 2 (saída)	Ecgnc	2.125,73	2.578,48	1.435,14	1.639,44	1.477,35	1.554,18
Licor Pirolenhoso (condensador) - Cenário 3 (saída)	Eclp	286,47	440,42	371,47	585,32	352,15	602,53

Em que: LI = limite inferior; LS = limite superior; Ecm = energia contida na madeira; Ecmop1 = energia contida na mão de obra necessária para realizar a carga e a descarga do forno; Ecmop2 = energia contida na instrumentação; Ecmop3 = energia contida no operador da máquina; Ecmec = energia contida na operação mecanizada; Eccv = energia contida no carvão vegetal; Ecfinos = energia contida no finos; Ecatiços = energia contida no atiço; Eclp = energia contida no licor pirolenhoso; Ecgnc = energia contida nos gases não condensáveis.

Esses intervalos de variação entre os limites inferiores e superiores da madeira e do carvão vegetal referentes à energia contida no material se assemelham aos dados obtidos na literatura. A variável poder calorífico, por ser a energia contida por unidade em cada material analisado, foi indispensável para a obtenção dos limites estabelecidos na Tabela 17. Neves (2012), ao analisar as características de diferentes clones do gênero eucalipto para a produção de carvão vegetal, encontrou valores para o poder calorífico superior da madeira em média de 19,2 MJ kg^{-1}. Já no caso do carvão vegetal oriundo desses clones, a média foi de 31,3 MJ kg^{-1}.

Com base nos dados gerados na Tabela 17, foi possível eliminar algumas variáveis que possuem pouca influência na determinação da energia total contida no processo, por exemplo, as atividades realizadas pela mão de obra e as operações mecanizadas, com cerca de 1,0 a 2,0% de interação na contabilização da energia total de entrada nos processos.

As variáveis sensibilizadas, apresentam relação direta e proporcional com a energia contida nos materiais e que são inerentes aos procedimentos operacionais, técnicos e plausíveis a serem alterados na operacionalização e condução dos processos, como a capacidade do forno, a taxa de conversão da madeira em carvão vegetal e, respectivamente, os demais produtos da carbonização (finos, atiços e licor pirolenhoso), que são influenciados pela particularidade de cada processo.

As variáveis que apresentam ou não influências significativas na contabilização da energia contida dos materiais foram comprovadas com a análise de correlação de Pearson, de acordo com a metodologia adotada.

4.6. Otimização multiobjetivo dos indicadores de desempenho energético

De acordo com o método adotado para realizar a otimização, a formulação do "problema" foi necessária. Sendo assim, realizar uma análise de regressão com base no modelo teórico estabelecido e proposta para cada processo analisado foi fundamental.

a) Cenário 1 (clássico)

As formulações obtidas por meio da análise de regressão são apresentadas na Tabela 18. Dentre as formulações obtidas, foi possível identificar que todos os processos analisados apresentaram coeficiente de determinação (R^2 ajustado) satisfatório. Isso demonstra o quanto as variáveis independentes (X, variáveis dos processos) conseguem explicar sua participação na variável dependente (Y, o efeito que as variáveis têm na energia contida).

Tabela 18. Coeficientes das variáveis independentes no cenário 1 (clássico)

Energia contida de entrada[1]	Coeficientes		
	Encosta (R^2=97%)	Retangular (R^2=91%)	Fornalha (R^2=95%)
Interseção	-3,54E^3+07	2,30E+08	-2,20E+07
Umidade da madeira[2] (%)	-2,67E+07	-1,66E+07	-1,59E+07
Densidade da madeira[2] (kg m^{-3})	3,87E+04	1,99E+04	2,98E+04
Capacidade do forno[2] (m^3)	3,28E+05	-8,36E+05	4,23E+04
PCS[2] (kcal kg^{-1})	3,35E+03	5,23E+03	2,81E+03
Mão de obra[2] (min) - enfornamento - op1	3,11E+04	-	2,15E+04
Mão de obra[2] (min) - instrumentador - op2	6,50E+03	1,07E+05	-3,43E+02
Energia contida de saída[1]	Encosta (R^2=86%)	Retangular (R^2=83%)	Fornalha (R^2=87%)
Interseção	-1,95E+07	-9,95E+06	-1,22E+07
Carvão seco[2] (kg)	8,23E+03	7,04E+03	7,05E+03
PCS[2] (kcal kg^{-1})	2,04E+02	1,33E+03	1,79E+03
Atiço[2] (kg)	1,50E+03	2,29E+03	5,57E+03
LP[2] (Kg)	-1,48E+03	1,83E+03	-
Finos[2] (kg)	1,80E+02	7,62E+03	6,99E+03
CO[2]	1,36E+05	4,28E+03	-2,00E+03

Em que: 1 = variáveis dependentes (Y); 2 = variáveis independentes (X); PCS = poder calorífico superior (MJ/kg); LP = licor pirolenhoso (kg); CO = monóxido de carbono; 3 = exponencial – E (10^7)

Conforme se pode verificar na Tabela 18 a energia contida de entrada destacou-se em relação à saída. O coeficiente de determinação do processo que utiliza o forno do tipo encosta apresentou um R^2 de 97% de ajuste, resultando em um ótimo ajuste de equação para esse processo. Na energia contida de saída, destacou-se o processo que utiliza o forno fornalha, com R^2 de 87%.

Sobre os coeficientes encontrados na Tabela 18, a energia contida de entrada, em relação ao ponto de interseção do forno do tipo retangular, destacou-se por ser positiva em comparação aos outros tipos de fornos. Para coeficientes atribuídos às variáveis independentes (X) que interagem com as variáveis dependentes (Y) da energia de entrada, destacaram-se o poder calorífico e a densidade da madeira, que foram positivos em todos os tipos de fornos por serem maiores que os demais, consequentemente apresentando alta correlação com a energia de entrada, assim como pela relação diretamente proporcional entre densidade e poder calorífico da madeira. Densidades elevadas da madeira poderão obter elevados valores de poder calorífico.

Na energia contida de saída (Tabela 18), todos os coeficientes de interseção foram negativos em todos os tipos de fornos. Já o coeficiente da variável independente que mais se destacou foi o carvão vegetal, o que se explica pelo fato de esse cenário clássico considerar o carvão vegetal como o principal produto de saída.

Posteriormente à formulação, a fim de se obter a função objetiva da otimização, foi realizada uma correlação de Pearson visando entender quais variáveis dependentes seriam maximizadas ou minimizadas (Tabela 19).

Tabela 19. Análise de correlação das variáveis independentes em relação à dependente.

Energia de entrada				
Variável	Função objetiva	Encosta	Retangular	Fornalha
Umidade da madeira	A	-1%	-2%	-1%
Densidade da madeira (kg m^{-3})	B	66%	57%	67%
Capacidade do forno (m^3)	A	11%	16%	-13%
Madeira seca (kg)	B	97%	93%	67%
PCS (MJ kg^{-1})	B	71%	68%	74%
PCU (MJ kg^{-1})	B	71%	68%	74%
Mão de obra (min) - enfornamento – operador 1	A	29%	-	-24%
Operação mecanizada (L)	A	-	21%	-
Mão de obra - operador de máquina	A	-	21%	-
Mão de obra (min) - instrumentador – operador 2	A	18%	21%	-18%
Energia de saída				
Variável	Função objetiva	Encosta	Retangular	Fornalha
Umidade do carvão	A	-4%	-11%	-12%
Carvão seco (kg)	A	4%	11%	12%
PCS (MJ kg^{-1})	B	86%	33%	43%
Atiço (kg)	C	71%	94%	89%
LP (kg)	C	99%	94%	90%
Finos (kg)	C	99%	94%	90%
CO_2	C	88%	93%	90%
CO	C	88%	93%	90%
H_2	C	88%	93%	90%
CH_4	C	88%	93%	90%

Em que: A=variável que permanece inalterada para a função objetiva; B=maximizada; C=minimizada; PCS = poder calorífico superior; LP = licor pirolenhoso.

As variáveis independentes relacionadas à energia de entrada (Tabela 19) que apresentaram alta correlação e por isso são maximizadas na função objetiva foram a madeira seca enfornada (97% no processo forno de encosta) e o poder calorífico superior (74% no processo forno fornalha). Apesar de a densidade da madeira ter uma correlação mediana, ela foi maximizada por apresentar correlação com o poder calorífico superior.

Apesar do poder calorífico superior e útil (Tabela 19) apresentarem a mesma correlação, o útil desconta a energia dispendida para a evaporação da água presente na umidade da madeira, que apresentou baixa correlação em relação à energia contida, sendo negativa (-1%) em todos os processos. Com isso, a variável umidade permaneceu inalterada na função objetiva.

No tocante às variáveis de saída dos processos (Tabela 19), apesar de as variáveis finos, licor pirolenhoso, atiço, CO_2, CO, H_2, CH_4 apresentarem a maior correlação com a energia contida de saída, foram minimizadas por não serem o produto de interesse desse cenário clássico. O principal produto de todos os cenários é o carvão vegetal, porém, como a método adotado neste trabalho foi para a produção de uma tonelada de carvão vegetal úmido em todos os processos, ele permaneceu inalterado. A única variável maximizada na energia de saída foi o poder calorífico superior. Além das variáveis maximizadas, o rendimento gravimétrico e os indicadores de desempenho energético (BE, EROI e IE) também foram maximizados, a fim de se obter um ponto ótimo que concilie a melhor resposta entre as variáveis e os indicadores.

A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos com a otimização para o cenário clássico.

Tabela 20. Resultados obtidos com a otimização multiobjetivo no cenário clássico

Tipos de fornos	RG (%)	Cap (m³)	U (%)	D (kg/m³)	PCUm (MJ/kg)	MO 1 (min)	MO 2 (min)	Atiço (kg)	Finos (kg)	PCUcv (MJ/kg)	LP (kg)	CO (kg)	BE (MJ)	EROI	IE (MJ)
Encosta (processo 1)	30,0	6,6	34,7	543,8	21,3	820,1	206,8	350,2	1208,8	31,2	89,4	230,1	- 395,0	1,0	314,7
	29,0	7,4	27,2	548,7	20,5	544,7	299,6	478,2	775,4	33,8	160,5	213,6	- 428,2	1,0	283,2
	28,9	6,4	35,0	478,5	20,3	753,3	342,6	340,3	1100,7	31,7	192,4	225,8	- 708,0	1,0	303,3
	32,2	7,3	30,0	519,3	20,0	566,2	271,5	534,9	990,6	32,2	154,2	198,4	- 965,0	1,0	256,8
	31,1	6,1	35,0	550,8	19,5	584,3	314,5	336,1	629,6	31,0	195,4	178,3	- 1.438,4	1,0	213,2
	28,3	7,3	32,9	512,8	20,2	586,7	291,8	514,1	1198,5	33,7	122,4	195,7	- 1.678,6	1,0	255,9
	29,1	6,4	26,4	489,0	20,5	596,9	291,7	332,1	1028,8	31,1	138,7	206,6	- 1.838,8	1,0	270,8
	32,9	6,5	30,5	516,8	20,3	709,5	280,7	343,9	785,2	31,4	167,2	230,9	- 2.068,2	1,0	317,1
	30,8	6,3	33,6	540,8	19,9	744,6	287,5	408,5	769,4	32,3	132,8	207,2	- 2.170,1	1,0	275,0
	31,7	6,5	28,9	537,6	20,2	575,5	339,7	417,0	817,8	32,5	122,0	209,4	- 2.407,7	1,0	280,5
Retangular (processo 2)	33,5	310,4	25,4	463,6	19,3	-	71,3	31,4	352,0	29,3	72,3	130,4	- 435,6	1,0	103,2
	33,2	311,9	35,0	550,0	20,2	-	124,6	74,1	508,3	31,0	99,0	148,1	- 580,6	1,0	167,0
	34,2	311,4	34,3	530,0	20,1	-	128,7	99,6	490,1	31,3	122,3	151,6	- 2.769,5	0,9	175,1
	34,2	311,4	34,3	530,0	19,6	-	128,7	99,6	490,1	31,3	122,3	151,6	- 2.770,4	0,9	175,1
	35,3	307,1	26,3	464,0	19,5	-	71,4	30,4	242,5	29,3	70,6	130,0	- 4.548,4	0,9	140,8
	35,4	309,2	29,6	480,4	19,8	-	96,5	67,5	292,7	29,4	98,6	132,8	- 5.007,3	0,9	150,2
	33,7	309,3	33,9	538,0	20,1	-	112,2	96,8	494,6	30,4	76,9	140,5	- 5.434,8	0,9	178,5
	30,6	307,5	24,0	518,1	20,3	-	72,8	44,4	269,8	30,4	101,4	134,0	- 6.769,4	0,9	157,8
	34,8	310,8	30,9	495,9	20,6	-	132,9	94,9	477,8	31,3	111,5	151,0	- 6.929,9	0,9	187,1
	30,1	310,9	21,4	503,7	19,5	-	117,0	56,8	497,4	30,6	98,8	145,3	- 7.676,2	0,9	186,7

Em que: RG = rendimento gravimétrico (%); Cap = capacidade do forno (m³); U = umidade da madeira (%); D = densidade da madeira (kg/m³); PCUm = poder calorífico útil da madeira (MJ/kg); MO 1 = tempo para a mão de obra realizar a carga e a descarga do forno (min); MO 2 = tempo para a mão de obra monitorar a produção (min); PCScv = poder calorífico útil (MJ/kg); LP = licor pirolenhoso (kg); CO = monóxido de carbono (kg); BE = balanço energético (MJ); EROI = lucratividade energética; IE = intensidade energética (MJ/t)

Tabela 20. Resultados obtidos com a otimização multiobjetivo no cenário clássico (continuação)

Tipos de fornos	RG (%)	Cap (m³)	U (%)	D (kg/m³)	PCUm (MJ/kg)	MO 1 (min)	MO 2 (min)	Atiço (kg)	Finos (kg)	PCUcv (MJ/kg)	LP (kg)	CO (kg)	BE (MJ)	EROI	IE (MJ)
Fornalha (processo 3)	32,0	9,1	16,2	427,2	19,8	620,8	259,4	278,4	587,7	31,1	-	140,8	- 6.920,3	0,9	210,8
	33,6	9,9	24,8	413,8	20,5	649,9	296,8	292,6	427,8	30,2	-	137,2	- 10.132,3	0,8	201,7
	31,6	8,6	19,0	467,7	19,7	600,6	224,4	284,0	537,6	29,8	-	141,0	- 11.422,8	0,8	214,0
	30,7	8,9	16,3	450,8	19,6	624,4	257,4	310,8	495,7	30,5	-	141,4	- 12.450,4	0,8	219,6
	31,5	8,7	17,1	452,2	19,3	591,7	237,9	320,2	369,7	29,1	-	136,9	- 14.068,8	0,8	205,0
	29,9	9,0	13,4	460,3	19,4	603,0	253,0	288,2	488,4	30,0	-	137,8	- 14.739,7	0,8	221,7
	31,9	10,4	29,8	445,3	19,9	740,4	369,4	328,7	426,3	30,9	-	141,9	- 15.001,4	0,8	225,1
	29,9	9,9	14,1	414,7	20,9	609,6	228,2	300,1	420,3	29,5	-	129,7	- 15.861,3	0,8	217,0
	31,8	10,1	22,2	412,7	19,1	753,0	207,7	254,6	385,7	30,0	-	140,8	- 19.477,1	0,7	225,0
	30,2	9,4	19,7	461,4	20,3	687,6	296,8	280,6	406,7	30,0	-	137,3	- 23.246,3	0,7	241,6
	30,0	9,0	12,9	458,0	19,5	706,2	275,2	296,1	449,2	30,1	-	137,7	- 25.150,4	0,7	253,5

Em que: RG = rendimento gravimétrico (%); Cap = capacidade do forno (m³); U = umidade da madeira (%); D = densidade da madeira (kg/m³); PCSm = poder calorífico útil da madeira (MJ/kg); MO 1 = tempo para a mão de obra realizar a carga e a descarga do forno (min); MO 2 = tempo para a mão de obra monitorar a produção (min); PCUcv = poder calorífico útil (MJ/kg); LP = licor pirolenhoso (kg); CO = monóxido de carbono (kg); BE = balanço energético (MJ); EROI = lucratividade energética; IE = intensidade energética (MJ/t).

A Tabela 20 apresenta as dez soluções e respostas obtidas com a otimização, com os maiores valores atribuídas ao indicador de desempenho energético, o balanço energético. O processo 1, se destacou dos demais, apresentando o maior número de opções em que o balanço energético foi positivo. Porém de acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica (entropia) em todo processo produtivo, ocorre perda de energia, com isso valores positivos obtidos nas simulações foram eliminados respeitando a premissa de tal Lei. Ademais o processo 1 se destacou dos demais por apresentar o maior valor médio das respostas da otimização em relação ao balanço energético (-1,41 GJ), seguido do processo 2, que utiliza o forno retangular (-4,29 GJ) e por fim o processo 3, que utiliza o forno fornalha (-15,32 GJ).

A resposta que apresenta o maior valor para o balanço energético no processo 1, apresentou um rendimento gravimétrico de 30%, que não foi o máximo valor adotado (32%), e alta umidade da madeira, comprovando que a umidade não apresenta alta correlação com os indicadores de desempenho energético. Uma capacidade de 6,6 m³ foi próxima do limite inferior (6,0 m³). O poder calorífico superior do carvão vegetal encontrado, apesar de ser o que apresenta a maior correlação entre as variáveis de saída para a melhor resposta do balanço energético, apresentou um valor próximo ao limite inferior.

A lucratividade energética do forno de encosta, EROI, teve valor próximo a um em todas as opções. Destacando-se esse tipo de forno por ser viável energeticamente em relação aos demais. Já a intensidade energética, razão entre a energia de entrada e a produtividade (tonelada de carvão produzido por hectare de floresta plantada), e pelo fato de o método adotado ser padronizado com a utilização de madeira em todos os casos, apresentou pouca variação nos processos.

Para o forno retangular também foi possível detectar respostas positivas em relação ao balanço energético, porém utilizando valores próximos do limite superior estabelecido para a variável rendimento gravimétrico (35%), que também foram eliminadas em função das restrições termodinâmicas. O maior valor encontrado para o balanço energético está ligado a uma umidade mediana da madeira (25%). Já o poder calorífico superior encontrado para o maior valor do balanço energético também foi mediano, em torno de 29,3 MJ kg^{-1}.

De acordo com os resultados obtidos pela otimização para o forno retangular, destaca-se uma opção que apresentou o maior valor encontrado para o rendimento gravimétrico (35,4%), porém com um balanço energético (-5,01 GJ) mediano, comprovando que, apesar de o rendimento gravimétrico ser diretamente proporcional à quantidade de madeira enfornada para a produção de uma tonelada de carvão vegetal, quanto maior o rendimento, menor a quantidade necessária de madeira para a produção de uma tonelada de carvão.

A lucratividade energética do forno retangular foi abaixo de um (1) nas opções que apresentaram os menores valores obtidos para o balanço energético, pelo fato de o dispêndio da energia de saída ser acima do de entrada. A intensidade energética, assim como nos outros tipos de fornos desse cenário clássico, foi proporcional a todas as opções, por se tratar do mesmo material de entrada (madeira).

Em relação ao forno fornalha (Tabela 20), todas as opções encontradas referentes ao balanço energético foram negativas. Dentre as opções encontradas, destaca-se a resposta com o maior valor para o balanço energético (-6,92 GJ), que foi determinada com base em um rendimento mediano (30%). A lucratividade energética foi abaixo de um (1) pelo maior dispêndio na energia de saída em relação à de entrada.

A otimização no cenário clássico apresentou alternativas e repostas diferentes das encontradas pela análise de sensibilidade, demostrando ser apta para a simulação de um cenário clássico da produção de carvão vegetal para os processos que envolvem os tipos de fornos de encosta, retangular e fornalha.

b) Cenário 2 (queimador de gases)

O cenário 2 é caracterizado pela presença de queimadores de gases. Possui as suas modificações atribuídas aos materiais de saída, mantendo inalterado o material de entrada (madeira) em relação ao cenário clássico, assim como as formulações obtidas. A Tabela 21 apresenta as formulações para as melhorias apontadas nesse cenário.

Tabela 21. Coeficientes das variáveis de saída no cenário 2 (queimador de gases)

Energia contida de saída[1]	Coeficientes		
	Encosta (R^2=94%)	Retangular (R^2=89%)	Fornalha (R^2=87%)
Interseção	-1,61E+07	-9,95E+06	-1,22E+07
Carvão seco[2] (kg)	7,90E+03	7,04E+03	7,05E+03
PCS[2] (kcal/kg)	1,80E+03	1,33E+03	1,79E+03
Atiço[2] (kg)	4,04E+03	2,29E+03	5,57E+03
LP[2] (Kg)	-2,51E+03	1,83E+03	-
Finos[2] (kg)	8,66E+03	7,62E+03	6,99E+03
CO^2(kg)	1,77E+04	6,12E+03	-4,96E+03

Em que: 1 = variáveis dependentes (Y); 2 = variáveis independentes (X); PCS = poder calorífico superior (MJ/kg); LP = licor pirolenhoso (kg); CO = monóxido de carbono

Dentre as formulações obtidas na Tabela 21, foi possível identificar que todos os processos analisados apresentaram um coeficiente de determinação (R^2 ajustado) satisfatório.

O forno de encosta foi o que mais se destacou, com R^2 de 94%, resultando em um adequado ajuste da equação para esse processo.

Sobre os coeficientes da Tabela 21, o ponto de interseção de todos os processos apresentou valores negativos. Dos coeficientes atribuídos às variáveis dependentes (X), que explicam a sua participação na energia contida de saída (variável independente Y), destacou-se o carvão vegetal em todos os processos, por ser o maior valor dos coeficientes dentre todas as variáveis de saída, apesar dos valores dos coeficientes estarem próximos entre si em todos os processos. Isso se explica pelo fato de o carvão vegetal ser um dos principais produtos de saída em todos os cenários. Nesse cenário caracterizado pela queima dos gases outro produto relevante é o monóxido de carbono (CO), por ser o gás a ser mitigado. Ele apresentou coeficiente positivo nos fornos do tipo encosta e retangular, sendo muito superior no segundo tipo de forno. Por outro lado, apresentou um valor negativo no forno fornalha.

Após a formulação foi realizada uma correlação de Pearson, a fim de se obter a função objetiva e de entender a participação de cada variável em relação à energia contida, além de compreender quais variáveis dependentes seriam maximizadas ou minimizadas em relação à energia contida nos materiais de saída, conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22. Correlação de Pearson das variáveis dependentes em relação à independente (energia contida)

Variável independente	Função Objetiva	Encosta	Retangular	Fornalha
Umidade do carvão	A	-4%	-12%	-13%
Carvão seco (kg)	A	4%	12%	13%
PCS (MJ/kg)	B	86%	57%	66%
Atiço (kg)	C	71%	87%	93%
LP (kg)	C	99%	96%	86%
Finos (kg)	C	99%	93%	87%
CO_2	A	88%	58%	66%
CO	B	88%	58%	66%
CH_4	A	88%	58%	66%

Em que: A = variável que permanece inalterada para a função objetiva; B = maximizada; C = minimizada; PCS = poder calorífico superior (MJ/kg); LP = licor pirolenhoso (kg).

As variáveis independentes que apresentaram alta correlação (Tabela 22) e, por isso, foram maximizadas na função objetiva, foram o monóxido de carbono (CO), com uma correlação de 88% para o forno do tipo encosta, e o poder calorífico superior do carvão vegetal, com uma correlação de 86% para o mesmo tipo de forno. Apesar de outras variáveis, como atiço, finos e licor pirolenhoso terem apresentado alta correlação (99% no caso do licor pirolenhoso e finos no forno de encosta), não são produtos de interesse nesse cenário e, portanto, foram minimizados.

Os principais produtos desse cenário são o carvão vegetal e os gases não condensáveis, sendo que o carvão vegetal apresentou uma baixa correlação, 4% no caso do forno de encosta, fato que se justifica pela metodologia adotada neste trabalho, que foi para uma produção de uma tonelada de carvão vegetal úmido em todos os processos, por isso tornando-se uma variável inalterada.

Os gases não condensáveis (CO_2 e CH_4), apesar de se destacarem pela alta correlação com a energia contida de saída, não foram maximizados. No caso do CO_2, pelo fato de não apresentar poder calorífico, e do CH_4, pelo fato de ser uma variável que não estava presente na formulação pela regressão.

A Tabela 23 apresenta os resultados obtidos com a otimização para o cenário presente de queimadores de gases.

Tabela 23. Resultados obtidos com a otimização multiobjetivo no cenário com queimador de gases

Tipos de fornos	RG (%)	Cap (m³)	U (%)	D (kg/m³)	PCUm (MJ/kg)	MO 1 (min)	MO 2 (min)	Atiço (kg)	Finos (kg)	PCUcv (MJ/kg)	LP (kg)	CO (kg)	BE (MJ)	EROI	IE (MJ)
Encosta (processo 1)	28,5	7,2	35,0	528,0	21,2	754,0	402,6	569,5	1217,9	30,2	93,4	174,6	- 25.861,75	1,0	295,1
	28,9	7,1	34,7	523,2	19,4	379,3	163,5	308,8	579,0	29,8	91,3	117,4	- 26.341,52	1,0	89,1
	28,7	6,2	25,0	527,5	19,5	416,5	233,9	332,5	1078,4	29,9	97,9	119,5	- 28.089,76	1,0	146,2
	28,6	7,1	35,0	530,8	20,0	398,3	200,5	332,5	620,2	35,5	90,2	131,3	- 33.332,47	1,0	110,0
	28,5	6,0	35,0	525,8	19,6	401,0	204,3	397,0	1311,1	29,8	113,8	126,0	- 35.422,67	0,9	154,1
	30,5	6,6	34,8	536,5	19,7	399,0	170,1	336,4	1042,2	29,9	167,2	119,9	- 38.271,55	0,8	105,7
	29,3	7,0	35,0	527,3	20,8	403,0	224,0	432,6	1174,2	30,5	95,5	159,6	- 44.906,27	0,8	120,7
	31,8	6,3	34,7	534,8	19,4	386,7	360,3	498,2	1162,2	31,4	182,7	129,4	- 46.447,60	0,8	113,1
	28,0	7,0	34,6	549,3	19,5	434,8	285,1	516,5	1346,8	31,8	190,1	144,5	- 47.431,38	0,7	138,5
	32,0	6,4	35,0	527,4	19,9	409,8	231,1	362,1	1199,8	31,8	97,9	132,2	- 47.570,60	0,7	111,8
Retangular (processo 2)	31,2	307,2	21,1	490,0	20,0	-	129,8	55,2	403,7	29,5	96,1	102,2	- 421,2	1,0	129,6
	31,5	311,9	20,5	473,8	20,3	-	119,1	89,4	430,5	30,2	114,0	105,3	- 564,2	1,0	121,8
	31,6	308,2	29,2	537,1	20,1	-	169,9	64,0	474,7	29,7	98,3	94,2	- 660,8	1,0	147,6
	31,7	309,3	18,8	465,6	20,9	-	81,3	56,2	399,2	30,5	101,0	102,5	- 423,0	1,0	161,4
	32,6	310,7	29,8	520,9	20,8	-	87,2	86,6	526,3	31,6	107,3	106,0	- 1.135,4	1,0	143,7
	33,3	307,7	21,9	462,1	19,0	-	142,4	40,9	500,1	29,4	118,6	100,3	- 3.535,4	0,9	169,4
	33,7	307,6	35,0	550,0	20,0	-	155,2	86,4	313,6	30,0	108,3	105,1	- 4.813,8	0,9	174,1
	33,8	309,1	33,6	533,0	19,6	-	158,9	93,1	357,7	30,0	118,4	102,1	- 5.254,7	0,9	171,4
	34,2	309,3	35,0	539,0	21,2	-	126,2	97,6	473,3	31,3	116,7	102,6	-10.020,0	0,8	196,8
	34,4	310,6	35,0	533,7	19,5	-	122,0	94,0	464,7	30,3	78,2	93,4	-18.227,8	0,7	216,2

Em que: RG = rendimento gravimétrico (%); Cap = capacidade do forno (m³); U = umidade da madeira (%); D = densidade da madeira (kg/m³); PCSm = poder calorífico útil da madeira (MJ/kg); MO 1 = tempo para a mão de obra realizar a carga e a descarga do forno (min); MO 2 = tempo para a mão de obra monitorar a produção (min); PCUcv = poder calorífico útil (MJ/kg); LP = licor pirolenhoso (kg); CO = monóxido de carbono (kg); BE = balanço energético (MJ); EROI = lucratividade energética; IE = intensidade energética (MJ/t)

Tabela 23. Resultados obtidos com a otimização multiobjetivo no cenário com queimador de gases (continuação)

Tipos de fornos	RG (%)	Cap (m³)	U (%)	D (kg/m³)	PCUm (MJ/kg)	MO 1 (min)	MO 2 (min)	Atiço (kg)	Finos (kg)	PCUcv (MJ/kg)	LP (kg)	CO (kg)	BE (MJ)	EROI	IE (MJ)
Fornalha (processo 3)	33,9	9,1	18,8	410,3	19,3	511,5	233,3	293,1	582,0	29,5	-	91,8	- 4.899,3	1,0	160,2
	34,2	10,1	35,0	459,1	20,1	498,7	223,9	262,0	384,6	29,3	-	92,7	- 1.466,7	1,0	149,0
	31,9	9,8	25,3	443,3	19,3	641,6	285,8	329,2	423,4	30,6	-	98,8	- 8.689,3	0,9	198,6
	32,2	9,2	26,5	472,7	19,9	639,2	294,2	320,7	496,0	30,3	-	96,3	-11.413,7	0,8	212,9
	33,1	8,6	15,9	430,0	19,5	567,0	193,9	258,9	382,0	29,3	-	91,5	-12.118,7	0,8	193,6
	32,2	9,1	20,3	443,1	19,5	619,2	204,4	295,7	383,5	29,8	-	95,4	-13.951,0	0,8	205,2
	33,4	8,9	22,5	447,7	19,3	694,1	216,6	327,3	468,4	30,2	-	93,9	-15.014,3	0,8	222,0
	31,7	9,3	27,0	478,2	20,7	694,5	328,6	307,7	482,9	30,4	-	93,9	-19.435,0	0,7	237,8
	31,4	9,6	20,5	431,3	19,5	752,4	305,7	303,4	464,5	30,6	-	96,5	-20.270,6	0,7	239,6
	31,9	9,0	19,9	448,8	19,5	738,3	264,4	306,9	514,3	29,9	-	93,0	-20.957,1	0,7	243,1

Em que: RG = rendimento gravimétrico (%); Cap = capacidade do forno (m³); U = umidade da madeira (%); D = densidade da madeira (kg/m³); PCUm = poder calorífico útil da madeira (MJ/kg); MO 1 = tempo para a mão de obra realizar a carga e a descarga do forno (min); MO 2 = tempo para a mão de obra monitorar a produção (min); PCScv = poder calorífico útil (MJ/kg); LP = licor pirolenhoso (kg); CO = monóxido de carbono (kg); BE = balanço energético (MJ); EROI = lucratividade energética; IE = intensidade energética (MJ/t)

A Tabela 23 apresenta as dez soluções e respostas obtidas com a otimização, com os maiores valores atribuídas ao indicador de desempenho energético, o balanço energético. Nos três processos foi possível obter um balanço energético positivo. O processo 2, que utiliza o forno do tipo retangular, apresentou o maior número de soluções positivas, sendo quatro respostas. Porém assim como no cenário clássico foram desprezados pelas restrições a Segunda Lei da Termodinâmica. Adicionalmente o processo 2 se destacou dos demais por apresentar o maior valor médio das respostas da otimização em relação ao balanço energético (-3,41 GJ), seguido do processo 3 (-11,55 GJ) e por fim o processo 1(-34,49 GJ).

Para o processo 1, que utiliza o forno de encosta, a melhor resposta da otimização em relação ao balanço energético foi de -25861,75MJ, sendo, com baixo rendimento gravimétrico, de 28,5%, próximo ao limite inferior (28%); máximo valor de umidade (35%); e capacidade mediana do forno (7,05 m^3), comprovando que a umidade não apresenta alta correlação com os indicadores de desempenho energético. O poder calorífico superior do carvão vegetal encontrado, apesar de ser o que apresenta a maior correlação entre as variáveis de saída, apresentou um valor próximo ao limite inferior.

A lucratividade energética do forno de encosta, EROI, ao apresentar respostas próximas de zero, elucida que o dispêndio de energia foi superior ao investido (energia de saída maior que de entrada). Sendo assim, a melhor resposta quanto ao balanço energético apresentou a menor lucratividade energética. Já a intensidade energética, com a padronização da quantidade de carvão vegetal produzido em todos os processos neste cenário, apresentou pouca variação.

No forno retangular, a melhor resposta para o balanço energético foi -421,2 MJ, apresentando baixo rendimento gravimétrico (31,2%), próximo do limite inferior (30%); umidade mediana (21%); e capacidade do forno próxima do limite inferior (307,0 m^3). O poder calorífico superior do carvão vegetal foi próximo ao limite inferior (29,0 MJ kg^{-1}). A lucratividade energética no forno retangular foi satisfatória por apresentar valores próximos de um (1).

O forno fornalha, diferentemente de todos os outros processos (forno de encosta e retangular) em relação aos materiais de saída, como o licor pirolenhoso, não foi uma variável que se destacou na análise de regressão, não tendo sido possível propor, nesse cenário, simulações utilizando essa variável para determinar os indicadores de desempenho energético.

Para o forno fornalha, o maior valor para o balanço energético foi -4,89 GJ, apresentando rendimento gravimétrico próximo do limite superior (33,9%), baixa umidade (9,1%) e poder calorífico mediano (29,0 MJ kg^{-1}).

c) Cenário 3 (recuperador de licor pirolenhoso)

O cenário 3 é caracterizado pela presença do recuperador de licor pirolenhoso. Assim como o cenário 2 (queimador de gases), ele possui as suas modificações atribuídas aos materiais de saída, mantendo inalterado o material de entrada (madeira) em relação ao cenário clássico, bem como as formulações obtidas. A Tabela 24 apresenta as formulações para as melhorias apontadas nesses cenários.

Tabela 24. Coeficientes das variáveis de saída no cenário 3 (recuperador de licor pirolenhoso)

Energia contida de saída[1]	Coeficientes		
	Encosta (R^2=93%)	Retangular (R^2=91%)	Fornalha (R^2=87%)
Interseção	-1,60E+07	-8,05E+06	-1,22E+07
Carvão seco[2] (kg)	7,71E+03	6,99E+03	7,05E+03
PCS[2] (kcal/kg)	1,81E+03	8,19E+02	1,79E+03
Atiço[2] (kg)	4,17E+03	-1,38E+04	3,96E+03
LP[2] (Kg)	1,48E+03	1,35E+04	1,24E+03
Finos[2] (kg)	8,50E+03	5,21E+03	6,94E+03
CO[2]	1,28E+04	1,14E+04	-

Em que: 1 = variáveis dependentes (Y); 2 = variáveis independentes (X); PCS = poder calorífico superior (MJ/kg); LP = licor pirolenhoso (kg); CO = monóxido de carbono

Dentre as formulações obtidas na Tabela 24, foi possível identificar que todos os processos analisados apresentaram um coeficiente de determinação (R^2) satisfatório. O forno de encosta foi o processo que mais se destacou, com R^2 de 94%, resultando em um adequado ajuste da equação para esse processo.

Sobre os coeficientes da Tabela 24, o ponto de interseção de todos os processos apresentou valores negativos. Dentre os coeficientes atribuídos às variáveis independentes (X), destacou-se o carvão vegetal em todos os processos, por ser o maior valor dos coeficientes dentre todas as variáveis de saída. Isso se explica pelo fato de o carvão vegetal ser um dos principais produtos de saída. Esse cenário, caracterizado pela recuperação do licor pirolenhoso, apresentou um coeficiente positivo em todos os processos.

Após a formulação foi realizada uma correlação de Pearson, visando compreender quais variáveis dependentes seriam maximizadas ou minimizadas em relação à energia contida nos materiais de saída, conforme apresentado na Tabela 25.

Tabela 25. Análise de correlação do cenário 3 (recuperador de licor pirolenhoso)

Variável	Função Objetiva	Encosta	Retangular	Fornalha
Umidade do carvão	A	-5%	-11%	-13%
Carvão seco (kg)	A	5%	11%	13%
PCS (kcal/kg)	B	83%	57%	66%
Atiço (kg)	C	88%	87%	93%
LP (kg)	B	88%	93%	83%
Finos (kg)	C	91%	93%	87%
CO	C	86%	57%	65%
H_2	C	86%	57%	65%
CH_4	C	86%	57%	65%

Em que: A=variável que permanece inalterada para a função objetiva; B=maximizada; C=minimizada; PCS = poder calorífico superior; LP = licor pirolenhoso; CO_2 = dióxido de carbono; CO = monóxido de carbono; H_2 = hidrogênio; CH_4 = metano.

As variáveis independentes que apresentaram alta correlação (Tabela 25) e, por isso, foram maximizadas na função objetiva, foram o licor pirolenhoso (LP), com uma correlação de 88% para o forno do tipo encosta, e o poder calorífico superior do carvão vegetal, com uma correlação de 83% para o mesmo tipo de forno. Por outro lado, outras variáveis como atiço, finos, monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H_2) e metano (CH4) apresentaram alta correlação, mas, por não serem produtos de interesse nesse cenário, foram minimizados.

Os principais produtos desse cenário são o carvão vegetal e o licor pirolenhoso, sendo que o carvão vegetal seco apresentou uma baixa correlação, de 5% no caso do forno de encosta, fato que se justifica pela metodologia adotada neste trabalho, que foi para uma produção de uma tonelada de carvão vegetal úmido em todos os processos, por isso tornando-se uma variável inalterada. Além dessas variáveis maximizadas, o rendimento gravimétrico e os indicadores de desempenho energético (BE, EROI e IE) também foram maximizados.

A Tabela 26 apresenta os resultados obtidos com a otimização para o cenário 3, caracterizado por apresentar o recuperador de licor pirolenhoso.

Tabela 26. Resultados obtidos com a otimização multiobjetiva no cenário 3 com recuperador de licor pirolenhoso

Tipos de fornos	RG (%)	Cap (m³)	U (%)	D (kg/m³)	PCUm (MJ/kg)	MO 1 (min)	MO 2 (min)	Atiço (kg)	Finos (kg)	PCUcv (MJ/kg)	LP (kg)	CO (kg)	BE (MJ)	EROI	IE (MJ)
Encosta (processo 1)	31,9	6,3	34,8	530,4	19,9	379,4	178,9	342,7	595,4	30,7	114,1	233,0	- 28.737,4	1,0	95,8
	32,1	6,2	34,7	534,1	19,6	386,7	177,3	339,5	678,3	30,1	106,4	243,5	- 29.253,4	1,0	97,5
	31,0	6,5	34,9	537,8	19,6	391,9	173,6	320,1	627,2	30,1	135,1	247,8	- 30.428,9	1,0	101,4
	28,8	7,1	35,0	524,9	19,6	388,5	280,4	462,9	1062,2	34,5	111,5	193,2	- 31.601,7	1,0	105,3
	29,3	6,8	34,3	535,2	19,6	400,0	188,4	352,1	676,9	30,5	98,9	227,1	- 32.628,7	1,0	108,8
	31,2	6,4	34,9	541,7	19,5	410,7	167,0	334,8	674,3	30,2	96,0	242,0	- 32.929,5	1,0	109,8
	31,9	6,2	34,3	535,6	19,7	407,2	179,1	397,9	779,9	30,2	104,7	243,9	- 33.088,7	0,9	110,3
	28,5	7,1	33,7	522,6	20,0	396,9	205,8	458,4	880,7	32,2	118,0	223,4	- 33.102,2	0,9	110,3
	30,8	6,5	34,1	528,9	19,6	394,5	274,8	508,4	820,6	32,9	105,1	191,6	- 33.102,3	0,9	110,3
	31,0	6,2	33,9	552,9	19,7	388,4	164,4	312,1	603,7	30,0	100,6	173,1	- 33.213,7	0,8	110,7
Retangular (processo 2)	29,9	308,4	21,4	539,3	19,7	-	134,5	100,6	485,2	30,3	221,0	98,0	- 449,7	1,0	142,6
	33,9	312,0	10,0	550,0	19,7	-	143,1	61,9	331,8	30,6	210,8	97,3	- 1.130,8	1,0	139,9
	34,3	308,7	17,0	550,0	19,9	-	135,0	90,1	449,5	30,6	211,3	98,8	- 3.136,2	0,9	150,0
	31,3	309,0	17,1	548,9	19,6	-	136,5	84,1	444,4	30,3	221,1	104,5	- 4.142,4	0,9	156,1
	30,7	308,8	14,1	504,6	19,8	-	155,7	73,6	387,4	29,8	235,4	95,4	- 11.736,6	0,8	179,2
	30,0	308,9	18,8	501,5	19,5	-	161,0	75,4	419,2	29,9	277,7	94,5	- 11.908,3	0,8	190,0
	32,0	307,5	15,8	541,2	19,6	-	144,4	96,6	391,3	29,9	205,6	95,7	- 16.293,5	0,7	185,0
	30,0	307,5	10,9	528,6	19,6	-	138,9	70,2	325,7	30,4	186,3	95,0	- 20.392,0	0,7	196,7
	31,0	308,0	17,3	538,6	19,7	-	180,7	65,5	297,2	30,3	199,0	97,8	- 32.369,6	0,5	237,9
	35,0	307,1	10,0	550,0	19,6	-	191,8	61,0	286,2	30,5	188,4	91,9	- 48.373,5	0,4	289,1

Em que: RG = rendimento gravimétrico (%); Cap = capacidade do forno (m³); U = umidade da madeira (%); D = densidade da madeira (kg/m³); PCUm = poder calorífico útil da madeira (MJ/kg); MO 1 = tempo para a mão de obra realizar a carga e a descarga do forno (min); MO 2 = tempo para a mão de obra monitorar a produção (min); PCUcv = poder calorífico útil (MJ/kg); LP = licor pirolenhoso (kg); CO = monóxido de carbono (kg); BE = balanço energético (MJ); EROI = lucratividade energética; IE = intensidade energética (MJ/t)

Tabela 26. Resultados obtidos com a otimização multiobjetiva no cenário 3 com recuperador de licor pirolenhoso (continuação)

Tipos de fornos	RG (%)	Cap (m³)	U (%)	D (kg/m³)	PCUm (MJ/kg)	MO 1 (min)	MO 2 (min)	Atiço (kg)	Finos (kg)	PCUcv (MJ/kg)	LP (kg)	CO (kg)	BE (MJ)	EROI	IE (MJ)
Fornalha (processo 3)	35,2	10,1	31,1	421,5	19,8	598,1	349,4	268,7	460,9	29,8	247,8	-	- 2.166,5	1,0	168,1
	33,9	9,8	29,3	442,1	21,0	552,4	401,5	273,5	478,0	29,8	251,8	-	- 2.126,9	1,0	177,9
	33,2	10,5	34,0	450,5	19,8	672,5	377,7	286,9	379,5	30,7	278,9	-	- 8.646,7	0,9	196,6
	32,9	10,0	29,9	447,6	20,2	739,4	275,1	295,0	390,7	29,9	270,4	-	- 19.140,0	0,7	228,1
	31,5	10,5	35,0	480,0	19,5	510,1	384,9	246,8	365,4	30,7	213,8	-	- 19.539,2	0,7	232,8
	31,0	9,7	27,1	471,9	20,1	738,8	346,9	329,2	450,5	30,8	228,4	-	- 19.919,2	0,7	243,4
	30,1	9,6	21,3	452,7	20,5	718,2	278,0	268,6	440,3	29,8	187,5	-	- 24.040,9	0,7	246,0
	29,7	9,9	23,3	456,2	20,4	774,2	304,9	311,1	425,2	30,0	222,3	-	- 27.127,6	0,7	258,8
	29,2	9,4	15,2	445,1	20,1	794,4	202,9	261,2	363,3	29,1	188,0	-	- 36.520,2	0,6	275,2
	29,1	10,5	26,9	463,6	20,2	722,9	356,6	278,3	412,2	30,7	235,0	-	- 20.037,8	0,7	236,5

Em que: RG = rendimento gravimétrico (%); Cap = capacidade do forno (m³); U = umidade da madeira (%); D = densidade da madeira (kg/m³); PCUm = poder calorífico útil da madeira (MJ/kg); MO 1 = tempo para a mão de obra realizar a carga e a descarga do forno (min); MO 2 = tempo para a mão de obra monitorar a produção (min); PCUcv = poder calorífico útil (MJ/kg); LP = licor pirolenhoso (kg); CO = monóxido de carbono (kg); BE = balanço energético (MJ); EROI = lucratividade energética; IE = intensidade energética (MJ/t)

A Tabela 26 apresenta as dez soluções e respostas obtidas com a otimização, com os maiores valores atribuídas ao indicador de desempenho energético, o balanço energético. Todos os processos neste cenário apresentaram valores positivos para o balanço energético, assim como os demais cenários, estas opções foram eliminadas. O processo 2 (forno retangular) se destacou por apresentar o maior valor médio para o balanço energético (-14,99 GJ), seguido do processo 3 (-17,96 GJ) e por fim o processo 1 que utiliza o forno de encosta (-31,81 GJ).

No processo 2 (forno retangular), o melhor resultado para o balanço energético (-449,7 MJ) apresentou o menor valor para o rendimento gravimétrico (32,4%), próximo ao limite inferior (30,0%); alta umidade da madeira (32,6%); e um poder calorífico inferior do carvão vegetal mediano (30,4 MJ kg^{-1}).

5. CONCLUSÕES

Os modelos teóricos estabelecidos e propostos para os processos que utilizam diferentes tipos de fornos (encosta, retangular e fornalha) foram considerados apropriados para estimar o fluxo de energia e, consequentemente, os indicadores de desempenho energético.

Foi possível modelar os indicadores de desempenho energético na produção de carvão vegetal levando em consideração as características físicas (umidade e poder calorífico), produtivas (rendimento gravimétrico) e operacionais (mão de obra e máquinas), levando em consideração os principais produtos que são gerados (atiço, finos, licor pirolenhoso, gases não condensáveis e o carvão vegetal).

Com a formulação do modelo teórico proposto, a correlação das variáveis e a definição da função objetiva (maximizar/minimizar), foi possível encontrar situações aderentes ao balanço energético, considerando baixos rendimentos gravimétricos e poder calorífico.

O processo que utiliza o forno de encosta, apesar de suas limitações tecnológicas, operacionais e de mecanização, se destacou com o melhor desempenho energético em todos os indicadores analisados (balanço energético, lucratividade energética e intensidade energética), com exceção no cenário 3 (presença do recuperador de licor pirolenhoso).

O processo que utiliza o forno retangular, apesar de ter o processo mecanizado e presença marcante de inovações tecnológicas, não se destacou como o melhor desempenho energético em todos os cenários.

Com a análise de sensibilidade, a correlação de Pearson e a participação da energia contida nos materiais de entrada, conclui-se que as variáveis mão de obra e operações mecanizadas pouco influenciam o desempenho energético dos processos. Já as variáveis relacionadas aos materiais de saída, ao rendimento gravimétrico, à capacidade do forno, ao poder calorífico superior e à densidade são fatores que apresentam elevada influencia no desempenho energético em processos de produção de carvão vegetal.

REFERÊNCIAS

ANTAL JÚNIOR, M. J.; GRONLI, M.The art, science, and technology of charcoal production.**Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 42, n. 8, p. 1619-164, Mar. 2003.

ARRUDA, T. P. M. **Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares**. 2005. 44p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG. 2005.

ARRUDA, T. P. M. et al. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 949-955, Apr. 2011.

AIMOTION, ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MOTION. **Resolvendo o problema do caxeiro viajante com Algoritmos Genéticos** Disponível em: http://aimotion.blogspot.com.br/2009/03/resolvendo-oproblema-do-caixeiro.html. Acesso em: 02 de ago. 2012.

ASSIS, C. O. **Sistema alternativo para carbonização da madeira.** 2007. 49p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Normas técnicas **NBR 11941**. Brasília: 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Normas técnicas **NBR 8633**: carvão vegetal – determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Normas técnicas **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Normas técnicas **NBR 7402**: carvão vegetal: determinação granulométrica. Rio de Janeiro, 1982.

AVILA, S.L.; TRAVASSOS, X.L.Jr ; CARPES, W. P. Jr ; VASCONCELOS, J.A ; KRAHENBUHL, L. An Educacional Tool for Teaching Optimization in Engineering, In 15th **Conference on the Computation of Eletromagnetic Fields- COMPUMAG**, Liaoning 26-30 June, 2005, Chine.

AVILA, S.L.; **Otimização multiobjetivo e análise de sensibilidade para concepção de dispositivos,** aplicação: Síntese de antenas refletoras para comunicação via satélite. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

BAILIS, R.; RUJANAVECH, C.; DWIVEDI, P.; VILELA, A. O.; CHANG, H.; MIRANDA, R. C. Innovation in charcoal production: A comparative life-cycle assessment of two kiln technologies in Brazil. **Energy for Sustainable Development**, n. 17, 2013. p. 189–200.

BARCELLOS, D. C. et al. A fornalha celular como fonte de controle da poluição e geração de energia no processo de carbonização utilizando forno container. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 1, n. 4, p. 335-342, dez. 2004.

BEBER, J.A.C. **Eficiência energética e processos de produção em pequenas propriedades rurais.** 1989. Dissertação (Mestrado em Extensão Rural), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1989.

BOYD, S.; VANDENBERGHE, L. Convex Optimization. Cambridge University Press, 2004.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanço Energético Nacional – BEN**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2016. EPE, 62 p. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf. Acessado em: 19 de nov. 2016.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanço Energético Nacional – BEN**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2017. EPE, 62 p. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf. Acessado em: 19 de fev. 2018.

BRACELPA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. Florestas plantadas. São Paulo: BRACELPA, 2014. Disponível em: http://www.bracelpa.org.br/shared/iba_2014_pt.pdf. Acesso em: 05 de jul. de 2018.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.

BRITO, J. O. A escolha certa do carvão. Revista Churrasco e Churrascarias 2002; 5(24): 16.

BRITO, J. O. Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. Piracicaba: IPEF, 1993. 6 p. (Circular Técnica, 181).

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. Piracicaba: IPEF, ESALQ, Departamento de Ciências Florestais, 1979, 7p. Circular Técnica n° 52.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre as características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão: 2. densidade da madeira x densidade do carvão. **IPEF**, Piracicaba, v. 1, n. 20, p. 101-113, jun. 1980.

BRITO, J. O. Desafios e perspectivas da produção e comercialização de carvão vegetal. In: FÓRUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL, 2008, Belo Horizonte. Anais. Belo Horizonte: [s.n.], 2008. Disponível em: http://www.ciflorestas.com.br/arquivos/doc_oportunidades_vegetal_31686.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2018.

BRITO, J. O. **Desafios e perspectivas da produção e comercialização do carvão vegetal**. 2010. II Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal. Sete Lagoas – MG, 2010.

BRITO, J. O. Madeira e energia. In: **Bioenergia e biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais**. Viçosa, MG : Editora UFV, 2013. 551p.

BROWNSORT, P. A. **Biomass pyrolysis processes: performance parameters and their influence on biochar system benefits**. 2009. 93 p. Dissertation (Master of Science) - University of Edinburgh, Edinburgh, 2009.

BUARQUE, C. **Avaliação econômica de projetos**. 6 ed. Rio de Janeiro: Campus, 1991. 266p.

BUENO, O.C.; CAMPOS, A.T.; CAMPOS, A.T. Balanço de energia e contabilização da radiação global: simulação e comparativo. In: BUENO, O.C. **Avances en ingeniería agrícola**. Buenos Aires: Editorial Faculdad de Agronomía, 2000. p.477-482.

CAMPOS, A.T.; CAMPOS, A.T. Balanços energéticos agropecuários: uma importante ferramenta como indicativo de sustentabilidade de agrosistemas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.6, p.1977-1985, 2004.

CARDOSO, M. T. et al**. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes**. Cerne, v. 16, n. Suplemento, p. 115–124, jul. 2010.

CARVALHO, L. C. F. **Algoritmo híbrido multiobjetivo para o problema flexible job shop** 157 f. : il. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, 2015.

CASTRO, A. F. N. M. Potencial dos resíduos florestais e dos gases da carbonização da madeira para geração de energia elétrica. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa 5 dez. 2014.

CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. Uso da madeira para fins energéticos. In: PENEDO, W. R. (Ed.). **Teoria da carbonização da madeira.** Belo Horizonte, 1980. p. 9-26. (Série de Publicações Técnicas, 001).

CHAN, W. R.; KELBON, M.; KRIEGER-BROCKETT, B. Single-particle biomass pyrolysis: correlations of reaction products with process conditions. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Seattle, v. 27, n. 1, p.

CHIANG, T.C.; LIN, H.J. **A simple and effective evolutionary algorithm for multiobjective flexible job shop scheduling**. International Journal of Production Economics, 141 (1): 87 – 98. Metaheuristics for manufacturing scheduling and logistics problems, 2013.

CHENG, H. C., CHIANG, T.C., e Fu, L.C. **A two stage hybrid memetic algorithm for multiobjective job shop scheduling.** Expert Systems with Applications, 38(9):10983 – 10998, 2011.

COELHO, M. P. **Desenvolvimento de metodologia para o dimensionamento de câmaras de combustão para gases oriundos do processo de carbonização da madeira.** 2013. Tese (Doutorado) - Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2013.

COUTINHO, A. dos R.; FERRAZ, E. S. B. Determinação da friabilidade do carvão vegetal em função do diâmetro das árvores e temperatura de carbonização. **Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 38, p. 33-37, 1988.

COSTA, J. M. F. N. **Temperatura final de carbonização e queima dos gases na redução de metano, como base à geração de créditos de carbono**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2012.

DIAS JUNIOR, A. F. **Carvão vegetal para cocção de alimentos: aspectos mercadológicos e qualidade do carvão para consumo**. 105p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, C. R.; BRITO, J. O.; MILAN, M. **Desdobramento da função qualidade na avaliação da qualidade do carvão vegetal utilizado para cocção de alimentos.** Floresta & Ambiente, v. 22, n. 2, 2015.

DOERING, O.C. Accounting for energy in farm machinery and buildings. In: PIMENTEL, David. (Ed.). **Handbook of energy utilization in agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 1980. 475p.

DOSSA, D.; SILVA, H.D.; BELLOTE, A.F.J. & RODIGHERI, H.R. **Produção e rentabilidade do eucalipto em empresas florestais**. Colombo, Embrapa, 2002. 4p. (Comunicado Técnico, 83).

FÁVERO, G. C.; VALLE, R. M.; DUARTE, T. M. **Análise térmica de um sistema de combustão de alcatrão em fornos retangulares para secagem da madeira.** In:

CONGRESSO IBERO AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 8., 2007, Cusco. Anais.:, Peru: PUCP, 2007, 343-347.

MELO, D. D., PEREIRA, J. O., SOUZA, E. G. D., FILHO, A. G., NÓBREGA, L. H. P., & NETO, R. P. (2007). **Balanço energético do sistema de produção de soja e milho em uma propriedade agrícola do Oeste do Paraná**. Acta Scientiarum. Agronomy, 29(2), 173–178. https://doi.org/10.4025/actasciagron.v29

FERRARO JÚNIOR, L.A. **Proposição de método de avaliação de sistemas de produção e de sustentabilidade.** 1999. 132p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

FREDERICO, P.G.U. **Influência da densidade e composição química da madeira sobre a qualidade do carvão de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake**. 2009. 75p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

FRIEDL, A.; PADOUVAS, E.; ROTTER, H.; VARMUZA, K. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. **Analytica Chimica Acta**, v. 544, n. 1-2, p. 191–198, 2005.

HALL, C.A.S. The myth of sustainability development – personal reflection on energy, its relation to neoclassical economics and Stanley Jevons. **Journal of Energy Resource Technology**. New York, v.126, n.2, p.85-89, Jun. 2004.

HETZ, E.J.; VILLEGAS, H.B.; RIQUELME, J.S.; CELIS, J.H. Utilizacion de energia en la produccion de raps, bajo cuatro sistemas de labranza, en la Provincia de Ñuble. **Agro Sur**, Valdivia, v.22, n.1, p.1-6, jan. 1994.

JESUS, M. S. **Balanço de massa e energia na pirólise da madeira de *Eucalyptus* em escala macro.** Dissertação de mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras – MG, 2016, 89 f.

IBA, **Instituto Brasileiro de Árvores**. Relatório Anual 2015. Disponível em: http://www.iba.org/images/shared/iba_2015.pdf. Acessado em 23 de out. 2016.

IBA, **Instituto Brasileiro de Árvores**. Relatório Anual 2017 Disponível em: http://www.iba.org/images/shared/iba_RelatorioAnual2017.pdf. Acessado em 05 de jul. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA. Sistema internacional de unidades – SI. 8. ed. Duque de Caxias - RJ, 2012. 94p.

KUMAR, M.; GUPTA, R. C.; SHARMA, T. Effects of carbonisation conditions on the yield and chemical composition of Acacia and Eucalyptus wood chars. **Biomass and Bioenergy**, Dhanbad, v. 3, n. 6, p. 41l-417, Sept. 1992.

LANA, A. Q. **Desempenho e avaliação de uma fornalha metálica para combustão dos gases da carbonização da madeira.** Dissertação (Mestrado) - Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2014.

LANA, G. C. **Efeito na dimensão de toras no processo de colheita florestal e seus impactos no custo e na qualidade do carvão vegetal**. Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná. 81f. , 2012.

LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; MAGALHÃES, W. L. E.; LAVORANTI, O. J. Caracterização individual de árvores de *Eucalyptus benthamii* para uso energético. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento da Embrapa**, Colombo, n. 35, 2007. 26 p.

MACEDÔNIO, A.C.; PICCHIONI, S.A. **Metodologia para cálculo do consumo de energia fóssil no processo de produção agropecuária.** Curitiba: Secretaria de Estado da Agricultura, Depto. de Economia Rural, 95 p., 1985.

MATLAB for Windows User's Guide, The Math Works Inc., 1991.

MAGALHÃES, J. G. R. A energia que vem da floresta. In: **Biomassa**: energia dos trópicos em Minas Gerais, Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. p.133-144.

MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. In: **Produção e utilização do carvão vegetal**. 1982. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. p. 75-89. 1982.

MINETTE, L. J.; PIMENTA, A. S.; FARIA, M. M.; SOUZA, A. P.; SILVIA, E. P.;FIEDLER, N. C. **Avaliação da carga de trabalho físico e análise biomecânica de trabalhadores da carbonização em fornos tipo "rabo-quente"**. 2007. Revista Árvore,Viçosa-MG, v.31, n.5, p.853-858, 2007.

MONTAGU, K. D.; KEARNEY, D. E.; SMITH, R. G. B. The biology and silviculture of pruning planted eucalypts for clear wood production: a review. **Forest Ecology and Management**, v.179, n.1, p.1-13, 2003.

NEVES, T. A. Qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de *eucalyptus* cultivados no sul de minas gerais. Dissertação (Mestrado em Processamento e Utilização da Madeira) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2012.

OLIVEIRA A. F.; BAVARESCO A.; PESSUTI C.A.A., MIYASHIRO C.S.; FRANK J. Análise da Qualidade do Carvão para Consumo Doméstico de Quatro Municípios do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.4, p. 102- 111 , 2015

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O., VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431- 439, 2010.

OLIVEIRA, J.V. - Análise econômica do carvão vegetal. In: **SEMINÁRIO SOBRE CARVÃO VEGETAL**, 1, 1977. Belo Horizonte, IBS/ABM/BDMG, 1977.

OPARINA, L. V. Sb. Tr. VNII GIDROLIZA Rast Mater 19: 176-86. From: - ABIPC, 1971.

PANSHIN, A. J. **Textbook of wood technology**: volume 1. New York: MacGraw-Hill Book, 1964. 643 p.

PARETO, V.; ROUGE, F. ; “Curso de economia política”, v. I e II, Lausanne, 1896. Contextualização matemática entre vetores.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v. 84, n. 5, p. 487–494, 2005.

PIMENTEL, D.; HALL, C.W. **Food and energy resources, In: Food science and technology**. A series of Monograph. Orlando: Academic Press, 1984.

PINHEIRO, P. C. da C.; SÈYE, O. Influência da temperatura de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 53., 1998, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 1998. p. 2032.

RAAD, T. J. **Instrumentação e Controle de Processo de Carbonização dos Fornos Industriais da V&M Florestal.** Anais.:1° Congresso Internacional de uso da biomassa plantada para a produção de metais e geração de eletricidade, Belo Horizonte, Brasil, 8-11 outubro, 2001.

ROMANELLI, T. L.; **Sustentabilidade energética de um sistema de produção da cultura de eucalipto.** 122 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

ROMANELLI, T. L.; MILAN, M. Material flow determination through agricultural machinery management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n. 4, p. 475-495, 2010.

ROSA, R.A.; ARANTES, M. D. C.; PAES, J. B.; ANDRADE, W. S. P.; MOULIN, J. C. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico. **Journal of Biotechnologyand Biodiversity**, Gurupi, v. 3, n. 2, p. 41-48, 2012.

SANTOS, S. F. O. M. **Modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal**. Tese (Doutorado em Ensino de Ciência e Tecnologia) - Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciência e Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

SANTOS, R. C., CARNEIRO, A. C. O., TRUGILHO, P. F., MENDES, L. M., CARVALHO, A. M. L. **Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal.** Revista CERNE vol.18 n.1 Lavras Jan./Mar. 2012b.

SANTOS, L. C., CARVALHO, A. M. M. L., PEREIRA, B. L. C. P., OLIVEIRA A. C., CARNEIRO, A. C. O., TRUGILHO, P. F **Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *eucalyptus* plantados em diferentes locais.** Revista Árvore, Viçosa-MG, v.36, n.5, p.971-980, 2012a.

SÃO PAULO (ESTADO). Secretaria de energia, recursos hídricos e saneamento. **Balanço energético do Estado de São Paulo 2017**: ano base 2016. São Paulo: Cesp, 2017. 276p. Disponível em: http://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalcev2/intranet/BiblioVirtual/diversos/BalancoEnergetico.pdf Acessado em 17 de ago. 2018.

SATANOKAS, S. Hokkaido Daigaku, enshurin Hokuku, 22(2): 609-814. From: C.A., 1963.

SAIGUSA, A. Complete of wood vinegarfor agriculture, 2000, 2ª Edição, Editora Soo Ron Sha

SBS, **Sociedade Brasileira de Silvicultura**. Disponível em: http://www.sbs.org.br/.Acessado em 15 de out. 2015.

SEIXAS, F. **Avaliação do esforço físico em operadores de motosserra**. Série Técnica do IPEF, v.7, n.22, p.1 – 16. jun. 1991.

SERRA, G.E.; MOREIRA, J.R.; GOLDENBERG, J.; HEEZEN, A.M. **Avaliação da energia investida na fase agrícola de algumas culturas**. Brasília : Ministério da Indústria e Comércio. Secretaria de Tecnologia Industrial, 1979. 86p.

SILVA, E. C. N., **Otimização aplicada ao projeto de sistemas mecânicos**, Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, Universidade de São Paulo, 2007.

SILVA, V.; REIS FILHO, J.C.G; CAMARGO, J.R.V. Balanço energético das culturas de feijão e milho segundo o uso de tração animal e motomecanizada, Estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, São Paulo, v.17, n.4. p.23-35, abr. 1987.

SILVA, R. M.; BELDERRAIN, M. C. N.; Considerações sobre análise de sensibilidade em análise de decisão. **O Impacto da Pesquisa Operacional nas Novas Tendências Multidisciplinares**, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São Jõao Del Rey - Minas Gerais, nov. 2004.

SINGH, S.; SINGH, G**. Energy input vs crop yield relationship for four major crops of northern India.** Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America, Tokyo, v.23, n.2, p. 57-62, Feb. 1992.

SIQUEIRA, R.; GAMERO, C.A.; BOLLER, W. Balanço de energia na implantação e manejo de plantas de cobertura do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.19, n.1, p.80-89, set. 1999.

STOUT, B.A.; MYERS, C.A. Energy for worldwide agriculture. **Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America, Tokyo**, v.10. n.3, p.11-18, Oct. 1979.

TANCREDI, T. P. **Otimização Multidisciplinar Distribuída aplicada a Projetos de Engenharia**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI – USP). São Paulo, 2008.

TAKAHASHI, R.H.C. **Otimização Escalar e Vetorial**. UFMG, Departamento de Matemática. Belo Horizonte, 2007.

TRUGILHO, P. F. et al. Estimativa de carbono fixado na madeira de um clone hibrido *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis.* **Revista Cerne,** v.16, p.33-40, 2010.

TRUGILHO, P. F. et al. Aplicação da análise de correlação canonica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore,** Viçosa, MG, v. 21, n. 2, p. 259-267, mar./abr. 1997.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Hymeneacourbaril*L.). **Scientia Agraria**, Paraná, v. 2, n. 1-2, p. 1-9, jan. 2001.

URKAN, M. K.; ARLKOL, M. Burning times of volatiles from Turkish coals during fluidized bed combustion. **Fuel,** London, v. 73, n. 5, p. 768-772, Feb. 1994.

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relação entre as propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 137 145, mar. 2010.

XIA, W. J. e WU, Z. M. **An effective hybrid optimization approach for multiobjective flexible job-shop scheduling problems**. Computers & Industrial Engineering, 48(2):409 – 425, 2005.

WARNES A. **Savage barbecue: race, culture and the invention of america's first food**. Geórgia: British Library; 2008. 201 p.

ZHANG, G., SHAO, X., LI, P., e GAO, L. **An effective hybrid particle swarm optimization algorithm for multiobjective flexible job shop scheduling problem**. Computers & Industrial Engineering, 56(4):1309 – 1318, 2009.

ZOBEL, B. J.; JETT, J. B. **Genetics of wood production**. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 337p.

APÊNDICE

Questionário utilizado para a coleta de informações

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"
Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais

Questionário elaborado para a caracterização das instituições, visando à coleta de dados para a elaboração de um modelo teórico que visa a contabilização do desempenho energético. Este documento tem como objetivo subsidiar dados para o trabalho de conclusão da tese de doutorado em Recursos Florestais (ESALQ – USP.

Dados gerais

1 - Existe alguma atividade terceirizada?

2 - A empresa é fiscalizada por qual órgão do meio ambiente? Com que periodicidade?

3 - A empresa tem algum certificado de qualidade ou ambiental (ISO 14000, ISO 9000 ou outra certificação)?

4 – Quais seus principais clientes?

5 - Atua fora do estado de São Paulo?

6 – Qual a área de atuação no estado de São Paulo?

Especificação da matéria-prima, madeira de *Eucalyptus sp.*

7 - Consumo mensal de madeira (m^3):

8 – Consumo mensal por forno

9 – Tempo de secagem da madeira (dias):

10 – Idade de corte (anos):

11 – Produtividade e Incremento Médio Anual ($m^3 * ha^{-1} *$ano):

12 – Especificação do material genético:

13 – Presença e % de casca:

14 – Distância média dos talhões até a unidade produtiva:

15 – Madeira de 1º ou 2º corte:

Especificação dos equipamentos, das máquinas e da força de trabalho exclusivos para a produção de carvão vegetal

16 – Consumo mensal de energia elétrica (kwh):

17 – Número de funcionários de cada setor produtivo:

Carbonização: Limpeza:

Peneiramento: Manutenção:

Operador de máquina: Administrativo:

18 – Número de máquinas (modelos) e consumo de óleo diesel:

Tratores:

Implementos agrícolas:

Caminhões:

19 – Especificação do equipamento forno de alvenaria:

Tamanho (m^3): Capacidade (m^3):

Enfornamento de madeira (m^3): Número de tijolos:

Tipo do tijolo: Poder calorífico dos tijolos:

Vida útil do forno: Manutenções mensais:

20 - Outros materiais que compõem o forno:

21 – Como é feita a condução do processo de carbonização? Quais controles são utilizados ?

Especificação do produto carvão vegetal:

22 – Produção mensal total da empresa (ton):

23 – Produção mensal por fornada (kg):

24 – Geração de atiços, finos e resíduos por fornada (kg):

25 – Período da carbonização por fornada (dias):

Enfornamento: Ignição:

Carbonização: Resfriamento:

Descarga: Despacho:

26 – Quantidade de extrato pirolenhoso por fornada (kg):

27 - Forma e tipo de resfriamento do carvão vegetal:

28 – Diferenciação dos lotes de produção:

29 – Peneiramento (tamanho médio do carvão vegetal):

30 – Formas e critérios para a seleção de peças para os diferentes tamanhos e pesos:

31 - Tempo de espera para expedição: