

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE (IEE)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA (PPGE)

CAROLINE CONCEIÇÃO FARIA

Avaliação comparativa do ciclo de vida do tratamento de palha de cana-de-açúcar por
carbonização hidrotérmica (HTC)

São Paulo
2023

CAROLINE CONCEIÇÃO FARIA

Avaliação comparativa do ciclo de vida do tratamento de palha de cana-de-açúcar por
carbonização hidrotérmica (HTC)

Versão corrigida

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a Obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Análise e Planejamento Energético

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Moreira

São Paulo
2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Faria, Caroline Conceição.

Avaliação comparativa do ciclo de vida do tratamento de palha de cana-de-açúcar por carbonização hidrotérmica (HTC).. / Caroline Conceição Faria ; orientador José Roberto Moreira. —São Paulo, 2023.

122 f.: il; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Biomassa. 2. Efeito estufa. 3. Carbonização hidrotérmica. 4. Palha de cana-de açúcar I. Título.

Nome: FARIA, Caroline Conceição

Título: Avaliação comparativa do ciclo de vida do tratamento de palha de cana-de-açúcar por carbonização hidrotérmica (HTC)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: 08 / 02 / 23

Banca Examinadora

Prof(a). Dr(a):Patricia Helena Lara dos Santos Matai Instituição: PPGE/IEE – USP

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof(a). Dr(a):Oswaldo dos Santos Lucon Instituição: SIMA-SP

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof(a). Dr(a):Arnaldo César da Silva Walter Instituição: UNICAMP

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof(a). Dr(a):José Roberto Moreira Instituição: PPGE/IEE – USP

Presidente Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Biohack e ao time que me fez debruçar sobre este tema com tanto afinho, dedicação e prazer. Foram tantas aventuras, parcerias, coincidências e apoio, mas também, negativas, barreiras, empecilhos, cancelamentos. E acredito que deu tudo certo porque terminamos essa jornada bem melhores do que quando começamos. À minha ex-sócia Daniele Cohen e Ananda Morgado, nossa fiel escudeira e primeira pesquisadora, dedico estas páginas.

“Um tempo em que aprendi a (...) conversar com as grandes ondas e não discutir com o mau tempo. A transformar o medo em respeito, o respeito em confiança. Descobri como é bom chegar quando se tem paciência. E para se chegar, onde quer que seja, aprendi que não é preciso dominar a força, mas a razão. É preciso, antes de mais nada, querer.” Amyr Klink¹.

¹ KLINK, Amyr. Cem dias entre céu e mar. Editora Schwarcz Ltda., 32ª edição, 2001.

AGRADECIMENTOS

Foram grandes os desafios para concluir este estudo que foi desenhado antes mesmo da pandemia de COVID 19 e, por isso mesmo, contava com ambições maiores e parceria com outra pesquisadora em outra instituição. A pandemia passou, o projeto foi redesenhado duas vezes para acomodar as limitações impostas pelas circunstâncias e contando com a ajuda de familiares, amigos, companheiro e orientador conseguimos concluir esta jornada com êxito. Assim, tenho muito a agradecer ao professor Moreira pela orientação em nossas conversas semanais, compartilhando sua vasta experiência e ensinamentos. Agradeço ainda pelos “puxões de orelha” e veja só, ambos sobrevivemos professor! Agradeço ao meu amigo e colega de profissão Pablo B. Sosa que me encorajou a seguir no mestrado e fez a ponte, junto ao Prof. Sérgio Pacca, para que eu tivesse um orientador e à Profa. Virgínia Parente por assumir essa função até que o Prof. Moreira pudesse fazê-lo. Agradeço às minhas amigas Camila Dias e Mayra Motta, à minha família e ao meu companheiro, Gabriel Volich, que estiveram presentes em todos os momentos difíceis e não me deixaram desistir. Agradeço especialmente à minha mãe Marinalva, minha irmã Sofia e minha sogra Lúcia pelas marmitas que me poupavam tempo e “salvaram” em vários momentos. O Gabriel, então, já é quase um especialista em cana e HTC depois de tantas conversas durante o café para que eu elaborasse meus pensamentos. Agradeço a todos por construírem esse trabalho comigo. Estendo, por fim, minha gratidão pelo suporte recebido durante o programa a todos os colegas, professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo.

RESUMO

FARIA, Caroline Conceição. Avaliação comparativa do ciclo de vida do tratamento de palha de cana-de-açúcar por carbonização hidrotérmica (HTC). 2023. 122 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, 2023.

A carbonização hidrotérmica (HTC, na sigla em inglês) é um tratamento térmico realizado em meio reacional aquoso, em condição subcrítica, pressão autógena e que difere da pirólise, tratamento térmico mais comum, por ocorrer na presença de oxigênio. O produto sólido obtido do HTC é o hidrochar, material carbonáceo que pode substituir o carvão para geração de energia ou ser utilizado como fertilizante, comparável a terra preta de índio (BENTO et al., 2021). Por possibilitar o tratamento de materiais mesmo com alto teor de umidade, optou-se por avaliar o potencial de aplicação do HTC para o tratamento da palha da cana-de-açúcar, um resíduo abundante no Brasil, desde que se adotou a prática de colheita da cana crua. Estima-se que, apenas no estado de São Paulo, exista cerca de 50 milhões de toneladas de palha (em base seca) disponível para uso (CARDOSO; NEVES; CHAGAS, 2017). No entanto, poucas usinas utilizam da palha para a geração de energia e seu recolhimento deve ser feito de maneira a não prejudicar a qualidade do solo, uma vez que a palha é usada como cobertura vegetal e sua retirada excessiva pode causar perdas de carbono do solo, além de favorecer a compactação e lixiviação (CASTIONI et al., 2020). Neste contexto, avaliou-se o potencial de uso da palha de cana-de-açúcar para o processo de HTC e a aplicação do hidrochar como fertilizante (cenário 3) e como combustível junto ao bagaço (cenário 4), comparando-se estas duas opções com os usos atuais da palha como cobertura vegetal (cenário 1) e como combustível misturado ao bagaço (cenário 2). Avaliou-se, então, o impacto ambiental em emissões de GEE de cada cenário proposto por meio da ACV do “berço ao portão”. Adicionalmente, realizou-se uma avaliação comparativa dos cenários propostos (3 e 4) com os cenários de referência que produzem os mesmos benefícios. Assim, foi possível verificar que o uso do HTC para tratamento da palha é vantajoso se comparado aos cenários de referência apenas se for possível otimizar a razão biomassa:água do processo de HTC de modo a reduzir o consumo de energia e, conseqüentemente, as emissões de GEE. Além disso, verificou-se que, nas condições avaliadas a captura de carbono pela aplicação do hidrochar no solo não é suficiente para compensar as emissões do processo. Assim, recomenda-se a realização de estudos *cradle-to-grave* que possam avaliar de forma mais abrangente os impactos do hidrochar na cadeia da cana-de-açúcar e estudos de otimização do HTC.

Palavras-chave: HTC; palha de cana-de-açúcar; ACV; carbonização hidrotérmica; emissões de GEE.

ABSTRACT

Hydrothermal carbonization (HTC) is a thermal treatment carried out in an aqueous reaction medium, in subcritical condition, autogenous pressure and which differs from pyrolysis, the most common thermal treatment, because it occurs in the presence of oxygen. The solid product obtained from HTC is hydrochar, a carbonaceous material that can replace coal for power generation or be used as fertilizer, comparable to indigenous black earth (BENTO et al., 2021). As it allows the treatment of materials even with a high moisture content, it was decided to evaluate the potential application of HTC for the treatment of sugarcane straw which became an abundant residue in Brazil since the practice of raw harvesting was adopted. It is estimated that in the state of São Paulo alone there are around 50 million tons of straw (dry basis) available for use (CARDOSO; NEVES; CHAGAS, 2017). However, few sugarcane industries use straw to generate energy and its removal must be done in a way that does not impair the quality of the soil. Because straw can be used as a soil cover, its excessive removal can cause losses of carbon from the soil in addition to favoring compaction and leaching (CASTIONI et al., 2020). In this context, the potential use of sugarcane straw for the HTC process and the application of hydrochar as fertilizer (scenario 3) and as fuel with bagasse (scenario 4) were evaluated, comparing these two options with the current uses of straw as soil cover (scenario 1) and as fuel mixed with bagasse (scenario 2). The environmental impact on GHG emissions of each proposed scenario was then evaluated through the “cradle to gate” LCA. Additionally, a comparative assessment of the proposed scenarios (3 and 4) was carried out with the reference scenarios that produce the same benefits. Thus, it was possible to verify that the use of HTC for straw treatment is advantageous compared to the reference scenarios only if it is possible to optimize the biomass:water ratio of the HTC process in order to reduce energy consumption and, consequently, the GHG emissions. In addition, it was found that, under the evaluated conditions, the carbon capture by applying hydrochar to the soil is not enough to offset the process emissions. Finally, it is recommended to carry out a cradle-to-grave study to comprehensively assess the impacts of hydrochar on the sugarcane production chain and to perform an optimization study about the HTC process.

Keywords: HTC; sugarcane straw; LCA; hydrothermal carbonization; GHG emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área colhida, em mil hectares, e produção de cana-de-açúcar, em mil toneladas de cana na safra 2020/2021	20
Figura 2 - Área cultivada (%) pelas principais variedades de cana utilizadas no Brasil.	22
Figura 3 - Ciclo fenológico da cana-planta (primeiro corte) e cana-soca (segundo corte em diante).	23
Figura 4 – Evolução do estágio médio de corte (EMC) por safra. Fonte: Braga Junior et al., 2021.	24
Figura 5 - Máquinas colhedoras de cana.	29
Figura 6 - Diagrama geral da produção de açúcar (à esquerda) e etanol (à direita).	30
Figura 7 – Imagens: 1 palha, 2 torta de filtro, 3 vinhaça, 4 topo, 5 raízes e 6 bagaço.	32
Figura 8 - Taxas de acumulação/perda de SOC no solo (Mg C ha-1 ano-1) à esquerda e fatores de emissão regionais para N ₂ O como percentual do N aplicado para os diferentes cenários de manejo de palha:	35
Figura 9 - Rotas para colheita da palha de cana, conforme avaliadas no projeto SUCRE/LNBR/CNPEM.	36
Figura 10 - Temperaturas de degradação da biomassa em condição ambiente versus condição subcrítica.	41
Figura 11 - Diagrama de Van Krevelen da palha de milho, palha de cana e hidrochar.	44
Figura 12 - Balanço de energia do processo de HTC e da combustão direta do lodo de ETE.	48
Figura 13 - Arranjo proposto por Stemann e Ziegler (2011) para o HTC de beech wood chips em sistema semi-contínuo e com recírculos de água e vapor de processo.	50
Figura 14 – À esquerda: comparação entre resultados experimentais (pontos demarcados pelo "x" no gráfico) e resultados estimados pelo modelo matemático (linhas do gráfico). À direita: resultados de potência consumida (linhas pontilhadas) dados pelo modelo matemático considerando: o calor da reação e porosidade da biomassa (linha pontilhada vermelha), sem o calor da reação e com porosidade (linha pontilhada amarela), sem calor da reação e sem porosidade (linha pontilhada preta).	50
Figura 15 - Diagrama dos cenários avaliados.	60
Figura 16 - À esquerda: consumo de combustível em litros por tonelada de palha versus a distância de transporte até a usina para as 3 formas de recolhimento. À direita: consumo de combustível em litros por tonelada de cana colhida versus a distância de transporte até a usina, comparando-se a colheita integral com a colheita convencional (sem recolhimento da palha).	68
Figura 17 - Gráfico do poder calorífico inferior do hidrochar versus rendimento em massa do processo de HTC.	73
Figura 18 - Diagrama do processo de HTC e fronteiras do balanço de massa nos cenários 3 e 4.	76
Figura 19 - Consumo específico de energia térmica no processo de HTC com composto fora de especificação.	80
Figura 20 - Diagrama do processo demonstrando o balanço de energia.	80

Figura 21 - Avaliação comparativa entre cenários propostos (3 e 4) e cenários de referência, com e sem a inclusão de créditos de carbono devido à geração de eletricidade e captura de carbono no solo.....	91
Figura 22 - Resultados das análises de sensibilidade dos cenários 3 e 4 os parâmetros: razão biomassa:água, rendimento do hidrochar, produtividade de cana e calor de reação no HTC..	92
Figura 23 – Emissões nos cenários C3 e C4, respectivas referências e diferenças entre cada cenário e sua referência (em amarelo). Acima: emissões com razão biomassa:água de 1:5. Abaixo: emissões com razão biomassa:água de 1:2.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade recomendada de Nitrogênio, Fósforo, Potássio e Gesso para plantação de cana.	25
Tabela 2 - Estratificação dos produtores de cana associados à ORPLANA de acordo com dados da safra 2018/2019 por área média e capacidade de produção.	27
Tabela 3 - Área média das propriedades recenseadas pelo IAC, considerando a safra 2018/19.	28
Tabela 4 - Composição imediata e elementar da palha de cana (diversos autores).....	38
Tabela 5 - Composição da palha de cana-de-açúcar e de milho.....	43
Tabela 6 - Razões molares calculadas para o Diagrama de Van Krevelen.	45
Tabela 7 - Rendimento de hidrochar e condições de processo para HTC de palha de milho. .	46
Tabela 8 - Efeito da adição de biochar na produtividade de acordo com estudos realizados no Brasil. O biochar foi usado como proxy para o caso do hidrochar devido à falta de dados sobre este último.	54
Tabela 9 - Inventário das Atividade Agrícolas para a ACV nos cenários avaliados e comparação com os dados de Pereira et al. (2019).....	63
Tabela 10 - Consumos de diesel em operações com maquinário, colheita e total.	65
Tabela 11 - Consumo de diesel no transporte campo x usina nos cenários avaliados e comparação com Pereira et al. (2019)	65
Tabela 12 - Parâmetros da produção de etanol nos cenários avaliados e comparação com dados de Pereira et al. (2018).	70
Tabela 13 - Parâmetros do processo de HTC (apenas presente nos cenários 3 e 4).....	75
Tabela 14 - Balanço de massa do processo de HTC da palha de cana.	76
Tabela 15 - Consumo de energia dos equipamentos auxiliares do processo de HTC.	78
Tabela 16 - Balanço de energia do processo de HTC dos cenários 3 e 4.	82
Tabela 17 - Resultados de emissões de GEE dos cenários avaliados e comparação com dados reportados por Pereira et al. (2019)*.	86
Tabela 18 - Benefícios gerados pelos cenários avaliados (3 e 4) e respectivos cenários de referência.	90
Tabela 19 - Análise de sensibilidade do calor de reação e impacto no consumo de gás natural (GN) para aquecimento do reator.	93
Tabela 20 - Análise de sensibilidade para a variação do aumento de produção devido a adição de hidrochar no solo e efeito sobre as emissões.	94
Tabela 21 - Análise de sensibilidade dos resultados à variação do rendimento em sólidos do HTC.	95
Tabela 22 - Análise de sensibilidade da variação da razão biomassa:água.	96

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	Equação de Arrhenius	46
Equação 2	Equação de severidade da reação	46
Equação 3	Emissões de GEE	57
Equação 4	Consumo de diesel	67
Equação 5	Eficiência de cogeração	71
Equação 6	Eletricidade da palha	72
Equação 7	Cálculo do LHV conforme IPCC (2006)	74
Equação 8	Eletricidade do hidrochar	74
Equação 9	Balanço de massa	77
Equação 10	Calor para aquecimento do reator	79
Equação 11	Balanço de energia em reator batelada	81
Equação 12	Balanço de energia simplificado	81
Equação 13	<i>Overpressure</i>	83
Equação 14	Eficiência térmica	83

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ACV	Análise de ciclo de vida	IEA	<i>International Energy Agency</i>
ATR	Açúcar total retido	IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
BPCA	Benzenopolicarboxílicos	LHV	<i>Lower heating value</i>
CEST	<i>Condensing-extraction steam turbines</i>	LNBR	Laboratório Nacional de Biorenováveis
CNPEM	Centro Nacional de Pesquisas em Energia e Materiais	LUC	<i>Land Use Change</i>
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento	MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
CONSECANA-SP	Conselho de Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Etanol do Estado de São Paulo	MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira	ORPLANA	Organização das Associações dos Produtores de Cana do Brasil
DCS	<i>Dry cleaning system</i>	PBGHGP	Programa Brasileiro GHG Protocolo
EMC	Estágio médio de corte (da cana)	SIN	Sistema Interligado Nacional
ETE	Estação de tratamento de efluentes	SOC	<i>Soil organic carbon</i>
GEE	Gases de efeito estufa	SUCRE	<i>Sugarcane Renewable Electricity</i>
GHG	Green House Gas	tc	tonelada de cana
GREET	<i>Green House Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation</i>	UNICA	União da Indústria de Cana-de-açúcar
GWP	<i>Global warming potential</i>	VSB	<i>Virtual Sugarcane Biorefinery</i>
HHV	<i>High heating value</i>	WRI	<i>World Resources Institute</i>
HTC	<i>Hydrothermal carbonization</i>		
IAC	Instituto Agrônômico		
ICV	Inventário de ciclo de vida		

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	15
1.1. OBJETIVOS	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL – DADOS GERAIS	19
2.2. CICLO DA CANA, PRODUTIVIDADE E INSUMOS PRINCIPAIS	22
2.3. PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL	26
2.4. RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE CANA	31
2.4.1. <i>Aproveitamento da palha da cana</i>	33
2.4.2. <i>Aproveitamento energético da palha</i>	37
2.5. HTC COMO TRATAMENTO PARA OS RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE CANA	40
2.5.1. <i>Parâmetros de processo e rendimento</i>	41
2.5.2. <i>Processos unitários do HTC e consumo de energia</i>	47
2.6. ADIÇÃO DE HIDROCHAR NO SOLO E EFEITO SOBRE PRODUTIVIDADE	52
2.7. CONSIDERAÇÕES SOBRE A CAPTURA DE CARBONO PELA APLICAÇÃO DO HIDROCHAR NO SOLO	54
3. METODOLOGIA	56
3.1 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA	56
3.2. DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS AVALIADOS	58
4. DISCUSSÃO E RESULTADOS	61
4.1. INVENTÁRIO DA ACV	61
4.1.1. <i>Atividades agrícolas</i>	61
4.1.1.1. Adição de nutrientes, calcário, herbicidas e pesticidas	61
4.1.1.2. Diesel consumido nas operações agrícolas e colheita	64
4.1.1.3. Diesel consumido no transporte campo x usina	65
4.1.1.4. Outros parâmetros	68
4.1.2. <i>Produção de etanol e excedentes de eletricidade</i>	69
4.1.3. <i>Tratamento da palha de cana via HTC, balanços de massa e energia</i>	74
4.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE FATORES DE EMISSÃO E REMOÇÃO	84
4.3. AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES E REMOÇÕES DE GEE E INDICADORES	85
4.4. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE	91
5. CONCLUSÕES	99
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
ANEXOS	111

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O HTC (carbonização hidrotérmica, na sigla em inglês) é um tratamento térmico similar à pirólise, porém, em condições mais brandas e que utiliza a água como meio reacional e solvente mimetizando o processo natural de carbonização da biomassa (WANG et al., 2018). Por possibilitar o tratamento de biomassas com elevado teor de umidade sem a necessidade de secagem prévia, além de outras vantagens, o HTC vem sendo investigado como uma técnica promissora para tratar diversos tipos de matérias-primas (MACHADO et al., 2018), porém, até o momento de conclusão deste estudo, nenhum trabalho abordou a utilização da palha de cana-de-açúcar como matéria-prima para o HTC, o que pode ser bastante vantajoso se comprovada a eficiência de remoção de impurezas da palha e eficiência energética do processo.

Alguns autores apontam que o tratamento hidrotérmico de biomassas com alto teor de inorgânicos (por exemplo cloro), como a palha da cana, é favorável para a remoção desses compostos, permitindo seu uso de forma otimizada para a geração de eletricidade em caldeiras de alta pressão. O uso de biomassa em caldeiras de alta pressão é limitado pelo conteúdo de cloro e outras impurezas como enxofre, alcalinos e silício. Devido ao efeito corrosivo dessas impurezas, especialmente em altas temperaturas, portanto, sua remoção é desejada (LEAL; HERNANDES, 2020). Contudo, é necessário avaliar os impactos de se adicionar uma etapa de hidrotreamento térmico ao processo de uma usina de etanol.

O papel do Brasil como principal produtor de cana-de-açúcar no mundo (NACHILUK, 2020) e o progressivo abandono da prática de queimadas do canavial anterior a colheita fazem com que a palha da cana se torne uma matéria-prima atrativa para as usinas que podem gerar mais energia ou até mesmo outros produtos à partir dessa biomassa residual. No entanto, além de avaliar a viabilidade técnica ou econômica das rotas para utilização da palha, é necessário também, avaliar os impactos ambientais relacionados aos seus diferentes usos, inclusive, o impacto no solo devido à remoção da cobertura vegetal (CASTIONI et al., 2020).

Assim, neste trabalho, é realizada uma primeira análise do potencial de uso da palha da cana-de-açúcar como matéria-prima para o HTC realizado na própria usina (considerada uma área de 10 mil ha), com a aplicação do produto, o hidrochar, para condicionamento do solo e captura de carbono ou para geração de energia. A aplicação proposta da palha da cana como matéria-prima para o HTC, é comparada, então, aos usos atuais mais comuns da palha: a aplicação como cobertura vegetal e a queima direta para cogeração misturada ao bagaço. Devido à ausência de estudos práticos específicos para a palha de cana aplicando-se o HTC e a impossibilidade de se iniciar um estudo experimental devido à pandemia, são utilizados dados

de literatura de biomassas de composição química similar à da palha de cana. Da mesma forma, dados de literatura foram utilizados para simular o funcionamento da planta de HTC. Para avaliação do impacto ambiental dos processos propostos, é utilizada a Análise de Ciclo de Vida (ACV), considerando na análise de impacto, apenas o impacto sobre as mudanças climáticas e consumo energético. Mais detalhes sobre a metodologia adotada são apresentados no Item 3.

O uso da palha de cana-de-açúcar como matéria-prima para o HTC vem de encontro aos esforços crescentes de desenvolvimento de tecnologias que permitam a obtenção de energia e produtos diversos a partir de biomassa e que podem ser entendidas no contexto das biorrefinarias: “...indústrias que convertam a biomassa e que a utilizem para produzir: combustíveis, energia ou produtos químicos” (NREL, 2008 apud ALVIM et al., 2014). Na definição do IEA² *Bioenergy Task 42* ao conceito de biorrefinarias atribui-se ainda a característica de ser sustentável de forma a deixar ainda mais claro o papel da biorrefinaria na bioeconomia (JUNGMEIER et al., 2013).

No Brasil o conceito de biorrefinarias é bastante explorado, porém, frequentemente limitado à produção de biocombustíveis que é apenas um tipo de produto possível a partir das biorrefinarias. Tal foco em biocombustíveis é justificado, em parte, pela diretriz traçada pelo Plano Nacional de Agroenergia de 2006, que deu origem à Embrapa Agroenergia, braço de pesquisa da Embrapa voltado à pesquisa e desenvolvimento do Etanol, Biodiesel, Florestas Energéticas e seus Coprodutos e Resíduos (CAPDEVILLE, 2017). Em artigo de 2015, Maurício Antônio Lopes, então presidente da Embrapa menciona que “Os avanços em tecnologia de biomassa permitem antever um futuro em que as usinas de açúcar e álcool brasileiras se transformem em biorrefinarias” (LOPES, 2015). A opinião reflete a ampliação do foco da agência que, a partir do final do ciclo do Plano Nacional de Agroenergia, em 2011, passou a direcionar esforços para pesquisa em outras áreas além de biocombustíveis. Desta forma, pode-se afirmar, também, que este trabalho visa contribuir para a ampliação do conceito de biorrefinarias no Brasil.

No capítulo 2 deste trabalho é apresentada a revisão da literatura sobre a produção de cana-de-açúcar no Brasil. Este tema possui uma literatura bastante extensa, portanto, optou-se por utilizar as principais referências setoriais como, por exemplo, o relatório do projeto SUCRE/LNBR/CNPEM (LEAL; HERNANDES, 2020). Após revisar dados da produção de cana-de-açúcar no Brasil, as etapas do ciclo de produção da cana e dados fundamentais como

² Agência Internacional de Energia, na sigla em inglês. O *IEA Bioenergy Task 42* é o grupo da IEA dedicado ao estudo de biorrefinarias.

a produtividade da cana, insumos utilizados na produção de etanol e açúcar, também foram avaliados os resíduos gerados desde a etapa agrícola (cultivo da cana) até a produção industrial do etanol com ênfase nos aproveitamentos possíveis para a palha da cana-de-açúcar. Em seguida, são avaliados estudos que abordam a carbonização hidrotérmica de resíduos agrícolas, parâmetros de processo e rendimento e as etapas do processo de HTC incluindo o consumo energético. Uma vez que não foram encontrados estudos de HTC utilizando a palha de cana, foram abordadas outras biomassas residuais a fim de definir a que melhor se aproxima da palha de cana. Por fim, avaliou-se a literatura sobre o uso do hidrochar no solo e seus efeitos sobre a produtividade agrícola e captura de carbono.

No capítulo 3, abordou-se a metodologia para a análise de ciclo de vida comparativa dos cenários propostos, pois, uma vez que cada cenário apresenta benefícios diferentes (cenário 3, aumento da produtividade agrícola e captura de carbono, e cenário 4, geração de energia), não é possível compará-los diretamente. Assim, adotou-se a metodologia proposta em Meisel et al. (2019), de definir cenários de referência cujos benefícios sejam exatamente os mesmos para comparar aos cenários propostos e, então, comparar as diferenças obtidas entre os cenários propostos e os cenários de referência. Neste capítulo também são descritos os cenários avaliados.

No capítulo 4 são discutidos os resultados obtidos, apresentando-se primeiro, o inventário de ciclo de vida (ICV), onde são mostrados os dados considerados nas análises e premissas adotadas. Neste capítulo, a apresentação dos dados é dividida em etapas: **atividades agrícolas**, que englobam a preparação do solo, fertilização, diesel gasto no transporte de insumos, aplicação de resíduos (vinhaça e torta de filtro), maquinário, queima ou recolhimento da palha de cana, produtividade e área colhida; **transporte campo-usina**, que engloba o consumo de diesel no transporte da cana e palha do campo para a usina e o retorno do hidrochar para o campo no cenário 4; **produção de etanol**, que engloba os insumo usados na produção de etanol, demanda e energia elétrica e térmica e geração de eletricidade excedente, produtos e coprodutos ou resíduos; e **HTC da palha de cana**, onde são abordados os consumos e produção de energia pela planta de HTC, assim como os produtos e resíduos gerados pelo processo.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do estudo e, em seguida, são feitas sugestões para trabalhos futuros no capítulo 6.

1.1. Objetivos

- a) Analisar a possibilidade de utilização da palha da cana-de-açúcar através do processo de carbonização hidrotérmica para condicionamento de solo com captura de carbono ou geração de energia e comparar com aplicações atuais (cobertura vegetal e cogeração);
- b) Avaliar o impacto ambiental das rotas propostas (captura de carbono e geração de energia) para utilização da palha da cana-de-açúcar e comparar com cenários atuais;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Produção de cana-de-açúcar no Brasil – Dados gerais

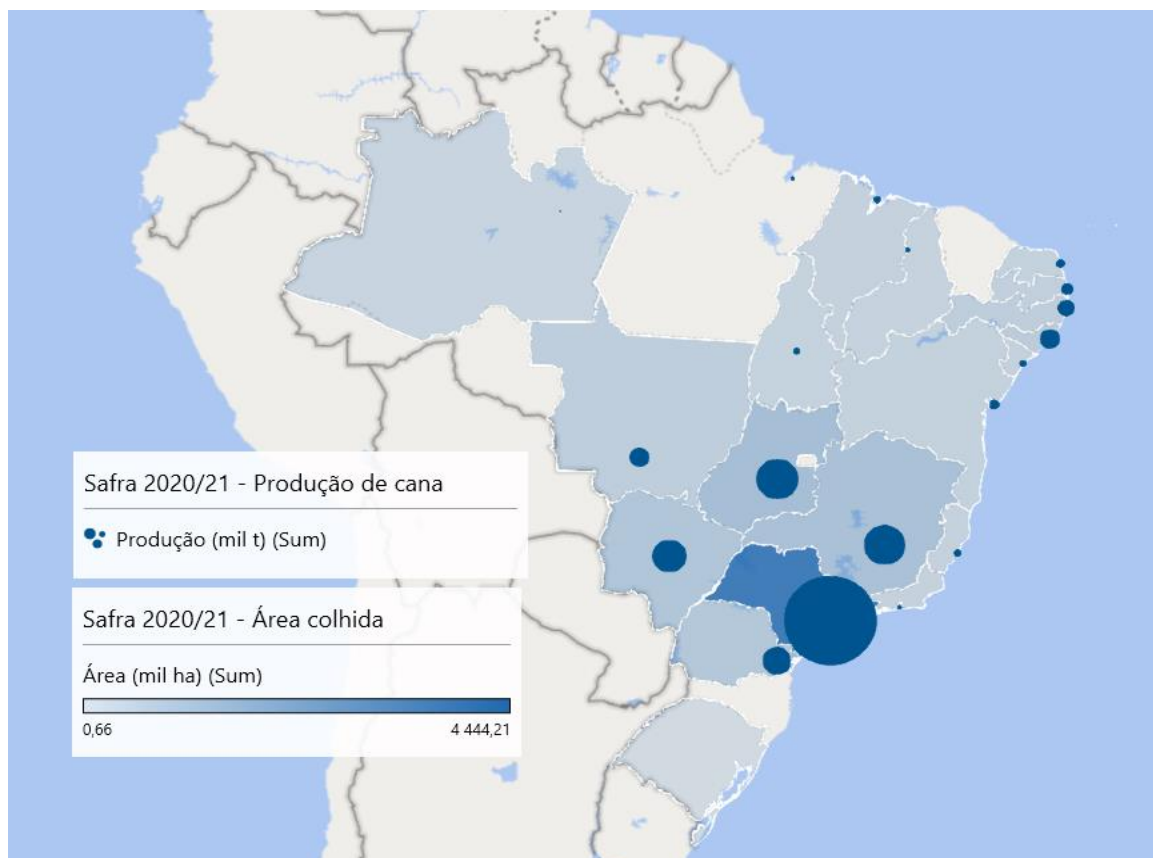
O Brasil possui um longo histórico de produção de cana e figura como o principal produtor de cana-de-açúcar e açúcar do mundo e segundo maior produtor de etanol, exportando o açúcar para diversos países e o etanol principalmente para os EUA (NACHILUK, 2020). A safra da cana-de-açúcar é sempre avaliada, do ponto de vista comercial, em um ciclo de dois anos. No Brasil, isso reflete a diferença entre o período de chuvas da região centro-sul, que ocorre de setembro a fevereiro, fazendo com que a colheita ocorra entre abril e dezembro, e o período de chuvas na região norte-nordeste, que ocorre de junho a julho, fazendo com que a colheita ocorra de agosto a abril (SEABRA, 2008).

A cada safra, a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) faz um acompanhamento quadrimestral, diretamente com todas as unidades de produção ativas, levantando diversos dados, como por exemplo, área cultivada, produtividade por área e corte e desempenho industrial (CONAB, 2019a). Assim, para a safra de 2020/2021, por exemplo, os números finais foram consolidados no quarto boletim publicado em maio de 2021. Segundo dados do CONAB (2021a) o Brasil produziu, na safra 2020/2021, 654,8 milhões de toneladas de cana-de-açúcar com uma área colhida de 8,62 milhões de hectares. O estado de São Paulo figura como o Estado com maior quantidade de área dedicada à cana sendo 4.444 mil ha de área colhida (52% do total), seguido por Goiás (11% da área total) e Minas Gerais (10% da área total), conforme pode ser visualizado na Figura 1 a seguir. Com relação a produção de cana, São Paulo foi o maior produtor, com 354.288 mil tc, ou 54% da produção nacional na safra 2020/21, seguido por Goiás (74.039 mil tc), Minas Gerais (70.565 mil tc) e Mato Grosso do Sul (48.991 mil tc) (CONAB, 2021a).

A produção de açúcar na safra 2020/2021 foi de 41,25 milhões de toneladas segundo dados da CONAB (2021a). O dado é ligeiramente menor do que o divulgado pela USDA (2021) que aponta 42,05 milhões de toneladas de açúcar. Porém, em ambas as referências, foi verificado um aumento de cerca de 38% na produção de açúcar com relação à safra anterior. Já a produção de etanol total (anidro e hidratado) a partir da cana foi de 29,7 bilhões de litros (CONAB, 2021a). A flexibilidade das usinas brasileiras em produzir etanol ou açúcar de acordo com as condições de mercado é uma grande vantagem competitiva para as usinas que podem ajustar a produção para o produto que apresentar melhores possibilidades de retorno. Isso foi especialmente importante nas safras de 2017/18 e 2018/19 quando, devido à desvalorização do açúcar no mercado internacional, a produção deste produto teve uma redução de 8,8 Mt e a de

álcool teve um aumento de 5,9 Gt (LEAL; HERNANDES, 2020). Na Figura 1 a seguir, é possível identificar os maiores estados produtores de cana do Brasil.

Figura 1 - Área colhida, em mil hectares, e produção de cana-de-açúcar, em mil toneladas de cana na safra 2020/2021



Fonte: Figura elaborada pela autora com dados de CONAB (2021a).

Cerca de 10,6% da cana colhida no Brasil é feita e forma manual. Na região Norte/Nordeste o percentual de colheita manual é de 76,8% e na região Centro-Sul é de 2,9% para a safra 2020/21 (CONAB, 2021a). Em ambos os casos, colheita manual ou mecanizada, pode ou não haver a queima prévia do canavial para remoção da palha, facilitando a colheita e diminuindo a quantidade de material a ser transportado. No entanto, a queima é mais comum quando utilizado o processo de colheita manual, pois, aumenta o rendimento da colheita por trabalhador ao reduzir o esforço físico necessário (CONAB, 2020). O alto índice de mecanização na região Centro-Sul, se deve em parte às condições favoráveis de relevo e mão-de-obra mais cara que na região Norte/Nordeste, além do aproveitamento energético dos resíduos da cana, que tornam a mecanização mais competitiva, mas também, ao compromisso firmado pelos produtores. Em 2007 os produtores de cana, por meio da UNICA (União da Indústria de Cana-de-açúcar), firmaram o chamado Protocolo Agroambiental (UNICA, 2021)

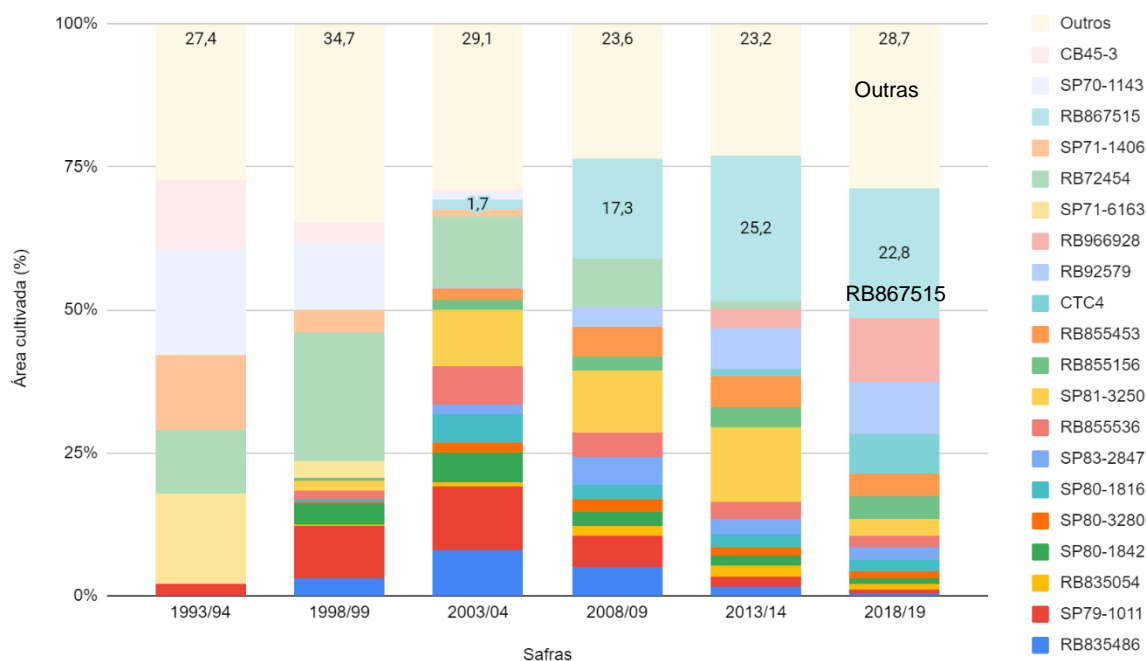
onde se comprometeram a antecipar a eliminação da prática de queima do canavial estabelecida pela Lei Estadual 11.241/2002 do governo do Estado de São Paulo e regulamentada pelo Decreto Estadual N.47700/2003 (SÃO PAULO, 2003). O Decreto estabeleceu a eliminação gradual da queima até 2031 e, através do Protocolo Agroambiental, os produtores se comprometeram em eliminar a queima prévia do canavial até 2014 para as áreas mecanizáveis e 2017 para áreas não mecanizáveis (SEABRA, 2008). Em 2017 o compromisso foi expandido pelo Protocolo Etanol Mais Verde do qual são signatárias 84% das usinas e 50% dos fornecedores de cana do Estado de São Paulo. Na Safra 2020/21 a área de queima autorizada foi a menor da séria histórica, passando de 2,08 milhões ha em 2008/09 para 0,01 milhões ha, uma redução de 99,5%. Com a redução da queima, estima-se que foram evitadas as emissões de 11,8 milhões de tCO₂e (SÃO PAULO, 2021).

A queima do canavial deixa de ser interessante também, quando há a viabilidade de aproveitamento da palhada para geração de energia. Em 2020, dentre os signatários do Protocolo Etanol Mais Verde foram gerados 17,43 mil GWh e exportados para o Sistema Interligado Nacional (SIN) 9,97 mil GWh (SÃO PAULO, 2021). Em âmbito nacional, a biomassa de cana respondeu por 19,1% da oferta interna de energia em 2020 (54,9 Mtep) (EPE, 2021), um aumento de 4% com relação a 2019. Com o uso da palhada para geração de eletricidade essa geração pode ser muito maior, porém, são poucas as usinas que aproveitam a palhada para geração de energia e mesmo as que o fazem, aproveitam apenas uma pequena porção. Estima-se que cerca de 10% da biomassa queimada para geração de energia nas usinas seja constituída de palha da cana (LEAL; HERNANDES, 2020).

Existem mais de 500 variedades de cana-de-açúcar no Brasil (SEABRA, 2008) oriundas do cruzamento entre espécies do gênero *Saccharum* e espécies geneticamente modificadas para se tornarem mais resistentes as pragas, secas, para necessitar de menos fertilização ou para produzir mais fibras, favorecendo, assim, a produção de eletricidade a partir do bagaço e sendo, por isso, chamada de cana energia (SILVA et al., 2019). A variedade mais plantada no Brasil, segundo o quarto censo realizado pelo Instituto Agrônômico (IAC) (2021) é a RB867515 que, na safra 2018/19, representou cerca de um quarto da área cultivada no Brasil. O censo foi realizado em 263 propriedades que representam 6,8 milhões de hectares ou 68% da área cultivada com cana no país. Segundo especialistas do IAC (GOMES, 2018), a RB867515 é uma espécie mais antiga e pouco adaptada ao plantio mecanizado e por isso vem sendo substituída por outras variedades. Na Figura 2, a seguir, é possível visualizar as principais variedades de cana cultivadas no Brasil ao longo dos anos, segundo dados dos censos realizados pelo IAC. A RB867515 figura como a principal variedade nas safras 2008/09 (17,3%

da área cultivada nessa safra), 2013/14 (25,2%) e 2018/19 (22,8%) (BRAGA JUNIOR et al., 2021). O item “Outras” foi adicionado para agrupar as demais variedades de cana não apresentadas totalizando 100% nos dados divulgados pelo IAC.

Figura 2 - Área cultivada (%) pelas principais variedades de cana utilizadas no Brasil.



Fonte: Gráfico elaborado pela autora com dados do quarto censo do IAC (BRAGA, JUNIOR et al, 2021). Outras = demais variedades de cana não discriminadas.

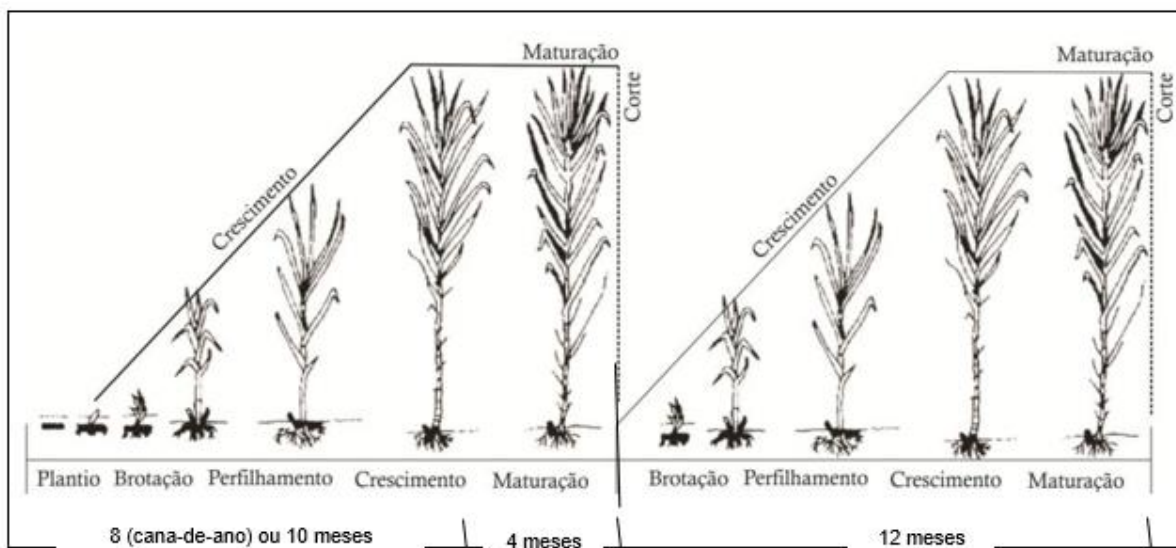
2.2. Ciclo da cana, produtividade e insumos principais

A cana é uma cultura semi perene cuja produção ocorre em ciclos que se iniciam com o plantio da cana, que pode ser feito a partir de colmos ou de mudas de não mais que 12 meses e, depois, 4 ou 5 rebrotas à partir da soca que permanece no solo após o corte. A primeira produção de colmos após o primeiro plantio é chamada de cana-planta. Já os colmos produzidos a partir das rebrotas são chamados de cana-soca (vide Figura 3, a seguir) (SILVA; SILVA, 2012). O envelhecimento da planta e a compactação do solo, principalmente com a colheita mecânica que faz uso mais intensivo de máquinas, fazem com que a produtividade caia a cada rebrota, sendo necessário replantar o canavial após um determinado período de forma a garantir a produtividade mínima necessária para a sua viabilidade econômica.

O desenvolvimento vegetativo da cana-planta depende da época em que ela foi plantada. Quando plantada no início da estação chuvosa e quente (setembro a novembro na região Centro-Sul), o ciclo vegetativo dura cerca de 8 meses e tem-se mais 4 meses de

maturação da cana. Essa é a chamada cana-de-ano. Já se plantada no final do período chuvoso e quente (janeiro a abril no Centro-sul), o ciclo de desenvolvimento vegetativo é mais longo, durando cerca de 10 meses (SILVA; SILVA, 2012). Na Figura 3, a seguir, foram indicadas as durações médias considerando as duas condições de plantio e as etapas da cana-planta e da cana-soca.

Figura 3 - Ciclo fenológico da cana-planta (primeiro corte, à esquerda) e cana-soca (segundo corte em diante, à direita).

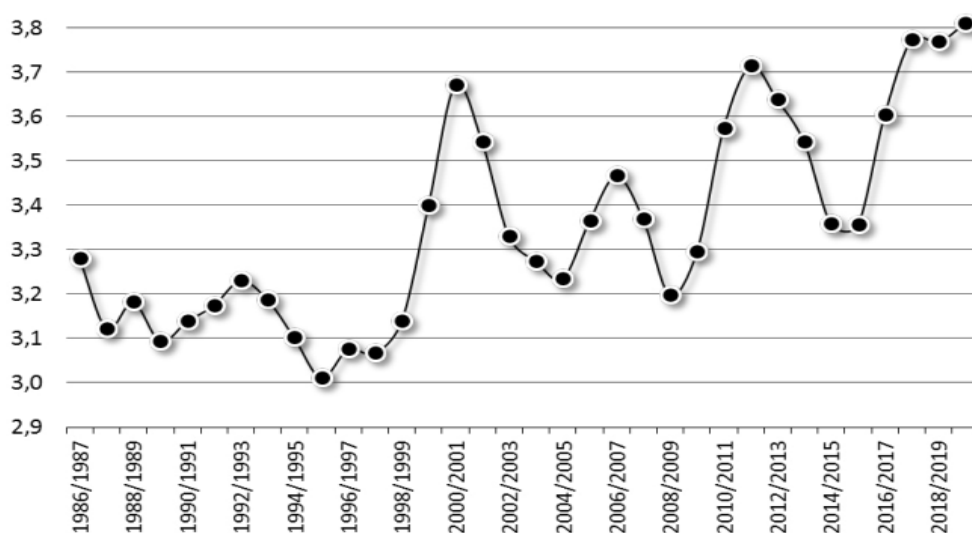


Fonte: Imagem adaptada pela autora com base em Hissa (2011) e dados de Silva; Silva (2012).

No primeiro ano do ciclo colhe-se a cana-planta com 12 ou 18 meses após a última colheita. No primeiro caso, tem-se o plantio logo após a colheita e no segundo, esperam-se alguns meses para que haja recuperação do solo ou mesmo o plantio de alguma outra cultura de rotação. Assim, em geral, a cana de 12 meses possui uma produtividade menor que a cana de 18 meses já que o solo permanece sempre cultivado, sendo em média 77 tc ha^{-1} para 12 meses e 113 tc ha^{-1} para a de 18 meses. Do segundo ao quinto ano tem-se a preparação das soqueiras. A primeira soca é colhida no segundo ano do ciclo e tem uma produtividade média de 90 tc ha^{-1} , que vai sendo reduzida a cada ano até chegar a 67 tc ha^{-1} ao chegar na quarta soca (ou no quinto ano do ciclo). Em geral, após o quinto corte ocorre a reforma do canavial (SEABRA, 2008). Porém, o relatório do censo sobre a cana, realizado pelo IAC (BRAGA JUNIOR et al., 2021), aponta que os canaviais não tem sofrido a renovação esperada, o que afeta negativamente a produtividade.

O EMC (estágio médio de corte) é um parâmetro monitorado pelo IAC que indica o nível de envelhecimento dos canaviais e quanto menor o EMC, mais jovens os canaviais. Na Figura 4 a seguir, é possível verificar que o EMC da safra 2018/19 foi o mais alto da série histórica, o que significa que a idade média dos canaviais aumentou. Segundo o IAC (BRAGA JUNIOR et al., 2021), existe uma correlação entre o EMC e a produtividade média: o aumento de um ano no EMC corresponde à uma perda de $8,3 \text{ tc}\cdot\text{ha}^{-1}$. Ou seja, o aumento verificado do EMC é um indicativo de que a produtividade deverá ser menor na safra subsequente. De fato, na safra 2015/16, 27,26% da cana colhida estava no quinto corte ou mais (CONAB, 2019a).

Figura 4 – Evolução do estágio médio de corte (EMC) por safra.



Fonte: Braga Junior et al., 2021.

Considerando os dados sobre a produtividade de cana (quantidade de cana produzida por área colhida) divulgados pelo CONAB (2021), na safra 2020/21 a Bahia obteve melhor produtividade com $88,56 \text{ tc}\cdot\text{ha}^{-1}$ colhido, enquanto São Paulo obteve uma produtividade média de $79,71 \text{ tc}\cdot\text{ha}^{-1}$. O rendimento médio obtido para a safra do Brasil como um todo foi de $75,96 \text{ tc}\cdot\text{ha}^{-1}$ colhido. É importante ressaltar que esses dados se referem à quantidade de cana total colhida dividida pela área colhida, ou seja, sem distinguir o estágio do canavial ou a variedade de cana - algumas propriedades podem estar no primeiro corte ou ainda colhendo a cana planta.

A quantidade de insumos a serem utilizados no canavial como pesticidas, herbicidas, cal, fertilizantes e outros, depende de diversos fatores como tipo de solo, variedade de cultivo, e estágio do canavial (cana planta, ou outros estágios de corte). De modo geral, o site da FAO aponta que a cana-de-açúcar não necessita de um solo específico para crescer, desde que haja profundidade de pelo menos um metro e pH entre 5 e 8,5 (ideal de 6,5), mas tem grandes exigências de nitrogênio (N, $100\text{-}200 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e potássio (K, $125\text{-}160 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e baixas

exigências de fosfato (P_2O_5 , 20-90 kg ha⁻¹) (FAO, [s.d.]). Por outro lado, alguns autores sugerem níveis bem mais baixos de uso de fertilizantes nos cultivos em solo brasileiro variando de 30 a 120 kg de N ha⁻¹ (ROSSETO; DIAS, 2005), conforme exibido na Tabela 1 a seguir. Da mesma forma, existem valores indicados para aplicação de fósforo, potássio e gesso ou cal, que variam de acordo com o tipo de solo e condições do canavial. Assim, para fins de análise é necessário considerar um valor médio e considerar estas variações na análise dos resultados.

Tabela 1 - Quantidade recomendada de Nitrogênio, Fósforo, Potássio e Gesso para plantação de cana.

Estágio	Produtividade esperada (tc ha ⁻¹)	Quantidade recomendada:			
		Nitrogênio (kg ha ⁻¹)			
Cana-planta	Indiferente	30 (plantio) + 30 a 60 (de 30 a 60 dias após plantio)			
Cana-soca	<60	60			
	60-80	80			
	80-100	100			
	>100	120			
		Fósforo como P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)			
		P resina (mg dm ⁻³):			
		0-6	7-15	16-40	>40
Cana¹	<100	180	100	60	40
	100-150	180	120	80	60
	>150	-	140	100	80
		2P resina (mg dm ⁻³):		>15	
Cana-soca	Indiferente	30		0	
		Potássio como K ₂ O (kg ha ⁻¹)			
		2K ⁺ (mmol dm ⁻³)			
		0-0,7	0,8-1,5	1,6-3,0	3,1-6,0
Cana¹	<100	100	80	40	40
	100-150	150	120	80	60
	>150	200	160	120	80
		2K ⁺ (mmol dm ⁻³)		1,6-3,0	>3,0
Cana-soca	<60	90		60	30
	60-80	110		80	50
	80-100	130		100	70

Estágio	Produtividade esperada (tc ha ⁻¹)	Quantidade recomendada:		
		Nitrogênio (kg ha ⁻¹)		
	>100	150	120	90
	Amostra de solo (20-40 cm)	Gesso a aplicar (kg ha ⁻¹)		
Cana¹	Ca<4mmol _c dcm ⁻³ e/ ou Al>40%	Gesso= argila (g kg ⁻¹) x 6		

Fonte: Elaborado pela autora com base em dados de RAIJ et al., 1996 apud Rosseto, Dias 2005.

¹Não é feita distinção entre cana-planta ou cana-soca;

²Quantidade do elemento ou íon medido no solo determina a quantidade de nutriente a ser adicionada.

A utilização de vinhaça, torta de filtro e da própria palha da cana pode reduzir ainda mais a quantidade de fertilizantes externos adicionados sendo uma prática adotada por muitas usinas para lidar com resíduos da indústria de etanol e açúcar de forma mais econômica e sustentável. Rosseto e Dias (2005) mencionam que a palha deixada sobre o solo pode ser uma fonte de alguns nutrientes para a cana, além de proteger o solo, porém, a mineralização depende de fatores como teor C/N da palhada, teor de lignina e polifenóis, tipo de solo, pH, teor de matéria orgânica, temperatura e umidade entre outros fatores, fazendo com que o aproveitamento do nitrogênio contido na palhada possa ser baixo a depender dessas condições. Os autores mencionam estudos de campo onde verificou-se que o aproveitamento pela cultura de cana foi de apenas 4% a 10% do nitrogênio contido na palhada. Ainda, a presença de palha no campo dificulta a aplicação de ureia, tanto por dificultar mecanicamente o contato desta com a água que ajudaria na sua absorção no solo, quanto pela presença da enzima urease que facilita sua hidrólise e perda por volatilização, podendo esta perda chegar a 60%. Já para o potássio, a transferência da palhada para o solo seria mais fácil pois ele não está ligado a componentes estruturais das plantas. Estima-se que a cada 10 toneladas de palha adicionada ao solo, a adição de K₂O pode ser reduzida em 40kg (Demattê, 2004 *apud* ROSSETO; DIAS, 2005). Mais informações sobre o aproveitamento dos resíduos serão discutidas no item 2.4 Resíduos da indústria de cana.

2.3. Produção de açúcar e etanol

O processamento da cana no Brasil se diferencia de outros países pela grande proporção de usinas que também são produtoras de cana. Na safra 2015/16 havia 367 unidades de produção ativas sendo cerca de 250 do tipo mistas, que produzem etanol e açúcar, em torno de 100 destilarias (produzem apenas etanol) e poucas usinas (produzem apenas açúcar). Em termos de

localização geográfica, a concentração de unidades de produção segue a distribuição da produção de cana, com São Paulo sendo o estado com maior número de unidades. A concentração geográfica é importante, pois reduz a necessidade de transporte da cana. Na safra 2015/16 a distância média percorrida no transporte da cana do ponto de colheita até a indústria foi de 25,11 km considerando todas as regiões do país. Nessa mesma safra, 44,85% da cana transportada (em massa) percorreu no máximo 20 km, 34,76% percorreu de 20 a 40 km e 20,40% da cana percorreu distâncias maiores que 40 km (CONAB, 2019a).

Cerca de 23,42% da cana é fornecida por produtores (cana produtor), segundo estimativa da Organização das Associações dos Produtores de Cana do Brasil (ORPLANA, 2019). Na categoria “Produtor” são incluídos o produtor básico, intermediário, integral, completo e produtor spot. É considerada cana da indústria (76,58%) aquela produzida em áreas da própria indústria (cana própria), de acionistas, arrendantes e parcerias. Na safra 2018/2019, existiam 15.049 produtores de cana no Brasil registrados no sistema ATR³, sendo que destes, 9.137 são associados ORPLANA. Dos produtores e parceiros associados ORPLANA, 91,9% se enquadram como pequenos produtores pela classificação adotada pela ORPLANA, com área até 162 ha e produção de até 12.500 toneladas de cana, mas a maior parte da produção veio de grandes produtores, com área maior que 1.300 ha e capacidade de produção de mais de 100.000 tc (vide Tabela 2 a seguir).

Tabela 2 - Estratificação dos produtores de cana associados à ORPLANA de acordo com dados da safra 2018/2019 por área média e capacidade de produção.

Produtor ou Parceiro	Área (A) (ha)	Capacidade (C) (tc)	N.º Produtores (un)	Produção total Safra 2018/19 (tc)
Pequeno	≤162	≤12.500	8.401	15.926.330
Médio	162 < A ≤ 650	12.500 < C ≤ 50.000	555	13.313.979
Médio grande	650 < A ≤ 1.300	50.000 < C ≤ 100.000	108	7.356.620
Grande	>1.300	>100.000	73	23.457.106
		Total ORPLANA ¹	9.137	60.054.035
		Total Brasil ²	15.049 ³	620.435.393 ²

Fonte: Elaborado pela autora com base em dados de: ¹ e 3ORPLANA (2019); ²CONAB (2019b).
³Considerando apenas produtores cadastrados no sistema ATR.

³ Sistema ATR é o sistema de padronização das informações da CONSECANA-SP e que reúne produtores da região Centro-Sul (ORPLANA, 2019).

Contudo, com base nos dados da ORPLANA não é possível estimar a área das propriedades em geral uma vez que os dados se referem apenas aos produtores independentes, isto é, aqueles que fornecem para as indústrias e não traz dado dos canaviais das indústrias. Assim, para estimar o tamanho das propriedades considerando as usinas, foi feita uma estimativa do tamanho das propriedades com base em dados do censo IAC (BRAGA JUNIOR et al., 2021) que coleta dados através de formulários preenchidos pelas próprias usinas, destilarias, cooperativas e associações. Utilizando o dado de área recenseada, em hectares, e o número de unidades recenseadas obteve-se uma área média por propriedade de 25 mil ha considerando todas as regiões do Brasil. Na região Centro-Sul a área média foi de 27.402 ha por unidade recenseada e na região Norte-Nordeste, foi de 14.045 ha por unidade recenseada (vide Tabela 3 a seguir).

Tabela 3 - Área média das propriedades recenseadas pelo IAC, considerando a safra 2018/19.

Estado	CONAB (ha)	A - Censo IAC (ha)	Proporção recenseada %	B - n° de unidades recenseadas	Área média por propriedade (ha) (A/B)
CENTRO-SUL	9.103.500	6.411.983	70	234	27.402
Espírito Santo	54.600	47.245	87	3	15.748
Goiás	1.100.800	640.171	58	23	27.834
Mato Grosso	267.000	166.402	62	5	33.280
Mato Grosso do Sul	792.200	611.696	77	18	33.983
Minas Gerais	984.600	609.536	62	28	21.769
Paraná	704.300	513.565	73	21	24.455
Rio de Janeiro	34.700	0	0	0	
Rio Grande do Sul	1.100	0	0	0	
São Paulo	5.164.200	3.823.369	74	136	28.113
NORTE-NORDESTE	991.800	407.309	41	29	14.045
Alagoas	321.200	123.359	38	8	15.420
Amazonas	4.900	0	0	0	
Bahia	48.400	37.386	77	3	12.462
Maranhão	41.900	31.755	76	3	10.585
Pará	17.900	15.812	88	1	15.812
Paraíba	134.800	62.145	46	5	12.429
Pernambuco	255.500	81.018	32	7	11.574
Piauí	20.900	0	0	0	

Estado	CONAB (ha)	A - Censo IAC (ha)	Proporção recenseada %	B - n° de unidades recenseadas	Área média por propriedade (ha) (A/B)
Rio Grande do Norte	58.600	25.788	44	1	25.788
Rondônia	2.500	0	0	0	
Sergipe	49.100	0	0	0	
Tocantins	36.100	30.048	83	1	30.048
BRASIL	10.095.300	6.819.292	68	263	25.929

Fonte: Adaptada pela autora com base nos dados do Censo IAC (Braga Junior et al., 2021).

A colheita da cana em áreas com inclinação menor que 12° e sem impedimentos físicos pode ser feita de forma mecanizada (LEAL; HERNANDES, 2020). Quando realizada de forma manual, ou com uso de máquinas, mas com a cana inteira, podem ser utilizadas pás carregadeiras para carregamento dos caminhões que realizarão o transporte da cana até a usina. No caso da colheita mecânica com a cana picada, é utilizada a colheitadeira e rodotrens que transportam em média 60 toneladas de cana picada (vide Figura 5 a seguir).

Figura 5 - Máquinas colhedoras de cana.



Fonte: Imagens à esquerda - André Silva, <https://www.youtube.com/watch?v=v2DuZCrh9jQ>, à direita - Caliandra do Serrado, retirada de Cardoso; Neves; Chagas, (2017).

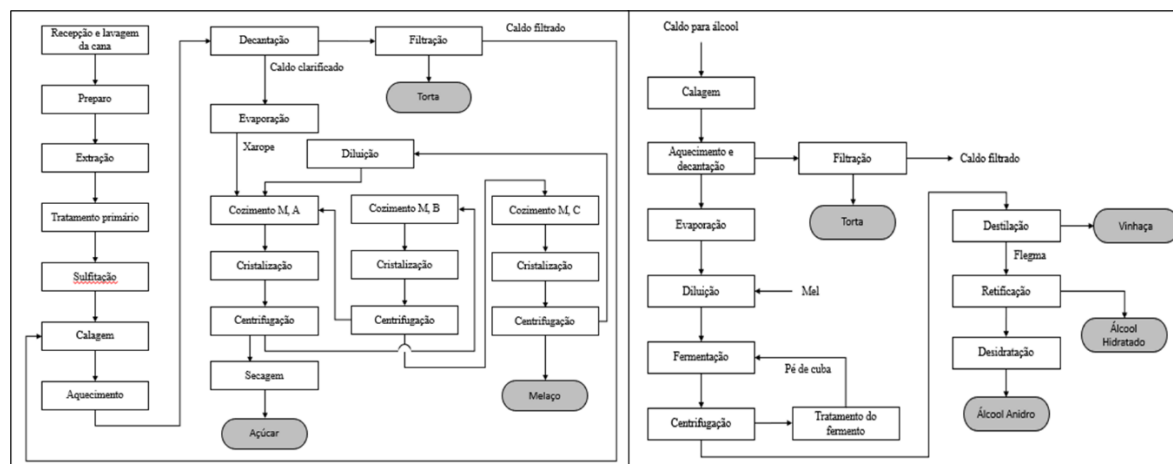
O transporte de cana até as usinas representa de 10% a 15% do custo total de produção da cana (CARDOSO; NEVES; CHAGAS, 2017). O consumo de diesel na etapa agrícola (operação de máquinas) é estimado entre 0,8 e 2,9 litros de diesel por tonelada de cana, de acordo com ferramentas como o GREET, GHGenius, BioGrace e VSB⁴ comparadas no trabalho realizado por Pereira e colaboradores (PEREIRA et al., 2019), sendo que na ferramenta VSB, foi considerado o consumo de 1,9 litros de diesel por tonelada de cana. Já no

⁴ **GREET** (Green House Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation) = ferramenta criada pelo *Argonne National Laboratory* (Estados Unidos); **GHGenius** = modelo desenvolvido pelo *Natural Resources* (Canadá); **BioGrace** = modelo mantido pelo *Institute for Energy and Environmental Research* (IFEU) e criado para atender ao EU-RED (*European Union Renewable – Energy Directive*) e FQD (*Fuel Quality Directive*) (União Européia); **VSB** = *Virtual Sugarcane Biorefinery*, ferramenta criada pelo CBTE e CNPEM (Brasil) (PEREIRA et al., 2019).

trabalho realizado por Seabra (2008), compilando dados do CTC das safras de 2005/06 e 2006/07, estimou-se um consumo de diesel de 230 litros ha^{-1} , incluindo as atividades agrícolas e aplicação de torta de filtro e vinhaça no campo, o que, considerando a produtividade da safra de 2006/07 (77,038 t ha^{-1}) (CONAB, 2021b), corresponde a 2,98 litros de diesel por tonelada de cana, condizente com os valores mencionados por Pereira e colaboradores (2019).

Ao chegar nas usinas a cana pode ser utilizada para produzir etanol ou açúcar ou ambos. A seguir, será abordado o processo genérico descrito por Seabra (2008) e ilustrado na Figura 6. De modo geral, a cana inteira passa pelos processos de moagem, lavagem, picadores e desfibradores que rompem suas células. Após essa etapa, ou quando a cana é recebida já picada, tem-se o processo de uniformização e envio para moenda após passagem por um eletroímã. Na moenda é feita a extração, ou separação do caldo e do bagaço (fibras da cana) que segue para a produção de energia. O caldo segue para o tratamento primário para eliminação de impurezas insolúveis como areia e argila e, em seguida, pelo tratamento químico (sulfitação e calagem) para ajuste de pH e coagulação ou precipitação de impurezas.

Figura 6 - Diagrama geral da produção de açúcar (à esquerda) e etanol (à direita).



Fonte: Adaptado de Seabra (2008).

Em seguida, o caldo tratado segue para aquecimento e decantação. O lodo resultante da decantação é filtrado e a torta residual pode ser retornada para o campo como fertilizante ou descartada. O caldo filtrado volta para a etapa de calagem. O caldo clarificado segue para a etapa de concentração em evaporadores de múltiplos efeitos dando origem ao xarope. O xarope é então enviado para a etapa de cozimento, cristalização e centrifugação que pode ser realizada mais de uma vez para melhor recuperação dos cristais de açúcar do mel. Após a etapa de centrifugação final o mel final ou melaço que pode ser enviado para produção de etanol. Os cristais de açúcar são secados e por fim ensacados para venda.

A produção do etanol pode ser feita da fermentação do caldo da cana ou de misturas de caldo e melaço. Assim, as primeiras etapas de preparo da cana, extração e tratamento primário são as mesmas usadas para o açúcar. As etapas de calagem, aquecimento, decantação e filtração também podem ser realizadas.

Após a evaporação é que o tratamento se diferencia, pois o caldo é diluído e misturado com o mel, dando origem ao mosto que é enviado para fermentação produzindo-se, então, o etanol. A levedura mais utilizada é a *Saccharomyces cerevisiae*. Após fermentação as leveduras são recuperadas e o vinho (mistura de etanol e água) segue para as colunas de destilação. Na destilação o álcool é recuperado como flegma e a vinhaça, ou produto de fundo, é um resíduo que pode ser aproveitado no canavial ou tratado e descartado.

Na etapa de retificação, a flegma é concentrada até 96° GL dando origem ao etanol hidratado. O etanol hidratado pode ser comercializado ou desidratado dando origem ao etanol anidro. Para essa desidratação, também realizada em colunas de destilação, é necessário a adição de um solvente, uma vez que o etanol hidratado é uma mistura azeotrópica. No Brasil, o solvente mais usado é o ciclohexano. Os voláteis da destilação dão origem ao álcool de segunda e os voláteis da desidratação podem ser reciclados ou também dar origem ao álcool de segunda. Do fundo da desidratação retira-se a flegmaça que pode ser reciclada ou descartada. Das bandejas próximas à entrada da flegma, retira-se o óleo fusel, que é comercializado, e o óleo alto que retorna para o processo.

2.4. Resíduos da indústria de cana

De modo geral, as variedades comerciais de cana visam a máxima produção de sacarose por hectare (SEABRA, 2008), sendo o bagaço ou fibra e a palha, apenas subprodutos do processo. Porém, em conjunto com a torta de filtro e a vinhaça, os resíduos gerados na indústria de cana chegam a um volume bastante significativo, tornando o seu aproveitamento ou destinação um critério importante para a viabilidade das usinas. Estima-se que apenas no Estado de São Paulo, onde a queima prévia da cana foi praticamente eliminada, exista cerca de 50 milhões de toneladas de palha (em base seca) disponível para uso (CARDOSO; NEVES; CHAGAS, 2017).

Em um estudo bastante abrangente sobre a utilização da palha de cana para geração de energia, denominado *Sugarcane Renewable Electricity* (SUCRE/LNBR/CNPEM) (LEAL; HERNANDES, 2020), verificou-se que dentre as impurezas vegetais presentes no carregamento da palha encontravam-se também raízes e pontas (parte superior) da cana,

juntamente com a palha seca e verde e até mesmo colmos. Na Figura 7, a seguir, mostramos os principais resíduos da indústria de cana, incluindo os citados pelo estudo mencionado.

Alguns resíduos da indústria da cana já tem o problema da destinação praticamente resolvido. O bagaço é uma importante fonte de energia para as usinas e para o SIN (Sistema Interligado Nacional). Só no Estado de São Paulo foram exportados cerca de 10 GWh de eletricidade para a rede na safra 2020/21 (SÃO PAULO, 2021) oriundos basicamente do bagaço da cana uma vez que a recuperação da palha ainda é pouco significativa (estimada em cerca de 10% da biomassa de cana usada para geração de energia (LEAL; HERNANDES, 2020).

Figura 7 – Imagens: 1 palha, 2 torta de filtro, 3 vinhaça, 4 topo, 5 raízes e 6 bagaço.



Fonte: Imagens 1, 4 e 5:– projeto SUCRE/LNBR/CNPEM (2020); Imagens 2, 3 e 6– Embrapa, disponível em < <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos-producao/processamento>>.

A levedura usada no processo de fermentação também é um resíduo quando não pode ser mais aproveitada, mas passou a ser considerada como um importante coproduto, assim como o melaço (SEABRA, 2008), devido, principalmente, ao seu alto teor de proteínas é utilizada para alimentação animal sendo até mesmo exportada, em sua maior parte, para países do sudeste asiático (SEABRA, 2008). A torta de filtro e a vinhaça apresentam ainda um desafio devido à grande quantidade gerada e as cinzas geradas nas caldeiras também constitui um resíduo importante da indústria (CGEE, 2012).

No caso da vinhaça, estima-se que sejam produzidos de 11 a 13 litros de vinhaça por litro de álcool produzido (SEABRA, 2008) e, embora possa ser usada como fertilizante no próprio canavial devido ao teor de potássio contido e outros nutrientes, existe um limite de aplicação que varia de acordo com critérios de qualidade do solo. No estado de São Paulo, as empresas devem apresentar anualmente um Plano de Aplicação de Vinhaça informando, dentre outras coisas, a quantidade a ser aplicada que deve ser calculada considerando o teor de potássio

no solo e na vinhaça (CETESB, 2006), mas um valor comumente utilizado é $140 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (SEABRA, 2008). Em 2020, a Cetesb publicou uma Decisão de Diretoria simplificando o processo de autorização para as empresas que seguissem os critérios definidos desde que a aplicação de vinhaça se limite a $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (CETESB, 2020).

Para a torta de filtro, estima-se uma produção de 3% a 4% da massa de cana moída e sua composição contém cerca de 85% de matéria orgânica, além de elementos como cálcio, nitrogênio, potássio e fósforo. Ela é aplicada no solo em quantidades que variam de 15 a 100 Mg ha^{-1} , dependendo da forma de aplicação. Mas o conteúdo de metais presentes na torta pode ser limitante para sua aplicação uma vez que constituem risco de contaminação dos lençóis freáticos (CGEE, 2012). Já Seabra (2008) considera uma produção de 6 a 8 kg de torta de filtro t^{-1} , após o tratamento do caldo, e uma aplicação de 5 t de torta ha^{-1} em 70% da área de plantio considerada no estudo.

2.4.1. Aproveitamento da palha da cana

O aproveitamento da palhada se tornou um tema de grande interesse desde que a queima prévia a colheita do canavial começou a ser abolida no Estado de São Paulo, maior produtor de cana nacional. O uso da palhada vem sendo investigado para a queima direta em caldeiras com geração de energia, de modo similar ao bagaço de cana já largamente utilizado, como matéria-prima para a fabricação de etanol de segunda geração, para fabricação do hidrochar, ou como cobertura vegetal, quando deixada diretamente no solo (LEAL; HERNANDES, 2020). Neste estudo será abordada a utilização da palha para produção de hidrochar como método alternativo e, para comparação, como cenários de base foram escolhidas as aplicações mais comuns, já utilizadas comercialmente por algumas indústrias: a queima direta e a aplicação no solo. Desta forma, não será abordada a fabricação de etanol de segunda geração.

A deposição da palha diretamente no solo tem efeitos benéficos já bastante conhecidos para o cultivo e o ecossistema local. Além disso, essa prática elimina a necessidade de transporte, armazenagem e destinação da palha, uma vez que a palha é removida e deixada no mesmo local da colheita. Assim, para que se possa considerar outros usos para a palha da cana-de-açúcar, é preciso avaliar o impacto dessa remoção sobre as áreas cultivadas que já adotam essa prática e se o benefício gerado pelas alternativas é capaz de justificar os novos usos propostos.

Durante 4 anos o projeto SUCRE/LNBR/CNPEM (LEAL; HERNANDES, 2020) avaliou o efeito de diferentes práticas de manejo da palha em solos arenosos e argilosos no interior de São Paulo, concluindo que a remoção da palha altera a qualidade do solo. No

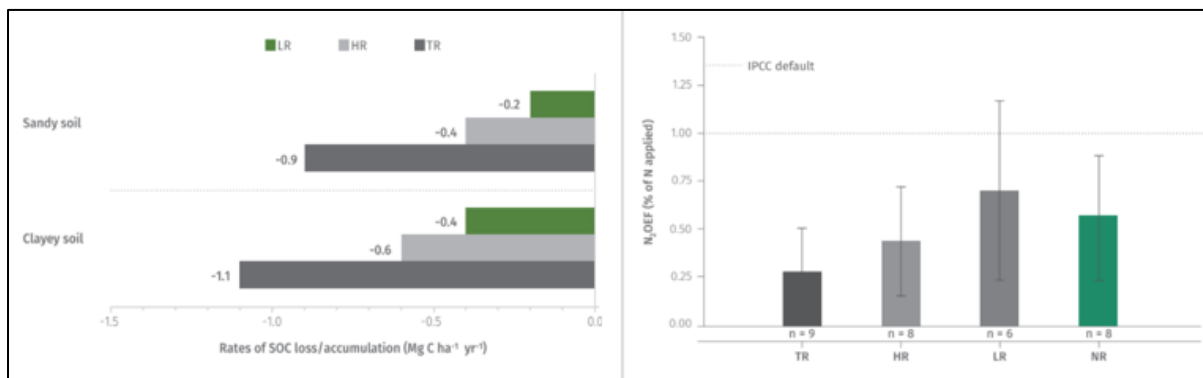
capítulo dedicado a analisar o sistema agrícola (*3.1 Agricultural Systems*), foram analisados os locais onde se adotou a remoção total da palha e verificou-se um aumento da compactação e erosão do solo, maior perda de nutrientes e outras alterações que reforçam a necessidade de se avaliar com cuidado o custo-benefício do uso da palha em outros processos. Assim, os autores concluem que a baixa remoção aliada à outras práticas conservacionistas devem ser combinadas “...para minimizar a compactação do solo e seus impactos negativos sobre rendimento da cana e outros serviços ecossistêmicos” (CASTIONI et al., 2020, p.29).

Após 21 experimentos de campo com diferentes idades de cultivo e condições edafoclimáticas, concluiu-se que não há um efeito único da remoção da palha sobre o rendimento do cultivo de cana, pois variações significativas foram observadas nos diferentes locais avaliados. Contudo, percebe-se uma tendência de diminuição no rendimento da plantação com o aumento da remoção da palha para três das quatro regiões avaliadas (Sul de Goiás, Oeste de São Paulo e Nordeste de São Paulo). No projeto mencionado, considerou-se como “sem remoção” o cenário onde se mantinha a cobertura com 15 Mg ha⁻¹ de palha seca e como “baixa remoção”, o cenário onde se deixava 10 Mg ha⁻¹ de palha no solo (CASTIONI et al., 2020).

No estudo realizado por Gonzaga et al. (2019 *apud* CASTIONI et al., 2020), com o objetivo de entender o impacto de diferentes técnicas de manejo da palha da cana-de-açúcar nas emissões de GEE em áreas de produção de cana do Estado de São Paulo, foi avaliado o impacto de diferentes taxas de remoção de palha de cana-de-açúcar no teor de carbono do solo (*soil organic carbon* ou SOC). O estudo utilizou dados experimentais em solos arenosos e argilosos e o teor de carbono foi medido na camada de 0 a 30 cm do solo. Os autores concluem que a remoção total da palha reduz o SOC em -0,9 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ (solo arenoso) e -1,1 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ (solo argiloso) (vide Figura 8 a seguir). Por outro lado, a adição de palha ao solo fez com que o teor de carbono retido aumentasse linearmente. Cerca de 19% e 25% do carbono adicionado como palha foi incorporado ao solo arenoso e argiloso, respectivamente.

Por fim, os autores avaliaram o efeito desses manejos sobre a emissão de metano e óxido nitroso, concluindo que não há efeito significativo do manejo da palha sobre as emissões de metano. As análises realizadas em campo, sugerem uma pequena taxa de consumo de metano pelo solo, que pode “...ser associada à ocorrência de solo profundo, bem drenado e intemperizado” (GONZAGA et al. 2019 *apud* CASTIONI et al., 2020). Quanto às emissões de óxido nitroso, pode-se notar uma redução na emissão de N₂O com o aumento da remoção da palha, embora os dados tenham apresentado grande variabilidade.

Figura 8 - Taxas de acumulação/perda de SOC no solo ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) à esquerda e fatores de emissão regionais para N_2O como percentual do N aplicado para os diferentes cenários de manejo de palha:



Fonte: (CASTIONI et al., 2020). TR (total removal), HR (high removal), LR (low removal) e NR (no removal).

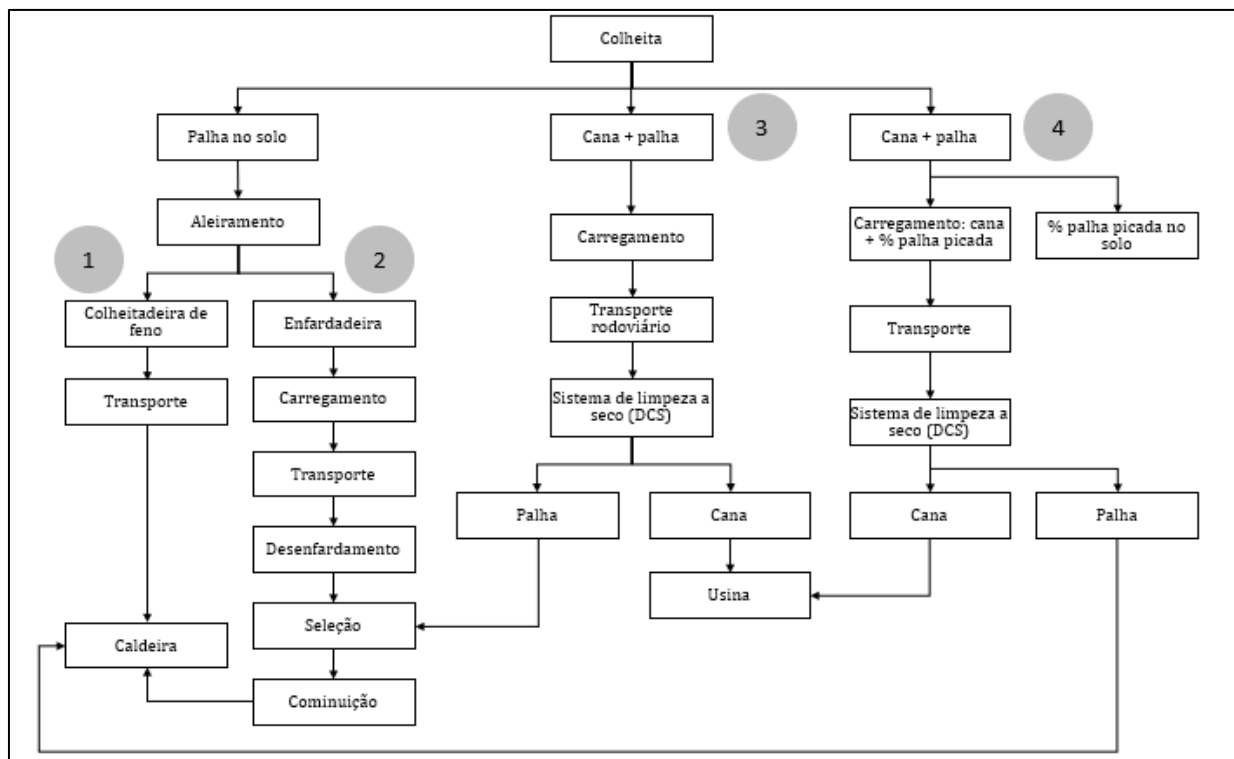
Alguns autores sugerem que se deixe pelo menos $7,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de matéria seca afim de preservar o solo e para se obter os efeitos benéficos da cobertura ou adubação verde (Manechini, Adhair Ricci_Júnior e Donzelli, 2005 *apud* CGEE, 2012), porém, o manejo do solo na presença de grandes quantidades de palha é bastante dificultado podendo, inclusive, ocasionar maior perda de uréia por volatilização (CGEE, 2012; ROSSETO; DIAS, 2005).

No estudo SUCRE/LNBR/CNPEN (FORCHEZATTO; NEVES; CARDOSO, 2020), também foram avaliadas diferentes rotas para recolhimento da palhada no campo e seu uso para geração de energia na usina e verificou-se que a colheita integral (rotas 3 ou 4 na Figura 9 a seguir), isto é, o corte e transporte da cana juntamente com a palhada é a rota que apresenta melhor custo-benefício. Apesar do maior volume a ser transportado, que aumenta o consumo de combustível em comparação com a opção de deixar toda a palha no solo, e da necessidade de a usina implementar uma etapa de seleção a seco (DCS, *dry cleaning system* na sigla em inglês) para separação da cana e da palha, a colheita integral mostrou ser mais vantajosa por trazer menos impurezas minerais já que a palha não entra em contato com solo e eliminação de etapas adicionais para colheita apenas da palha, como ocorre nas rota 1 e 2. As vantagens da colheita integral são reforçadas também por outros autores (Michelazzo, 2005; Rodrigues, Filho, 2005 *apud* CGEE, 2012).

A rota 1, colheita da palha deixada no campo após um período de secagem (em geral, 15 dias) e aleiramento, não é utilizada pelas usinas devido ao alto consumo de combustível e conteúdo de impurezas da palha colhida dessa forma. A equipe do SUCRE/LNBR/CNPEN ainda sugeriu uma quarta rota incluindo adição de um picador para palha na colheitadeira com o intuito de aumentar a densidade de carga, reduzindo assim os custos com transporte, e facilitar

a operação de separação na usina utilizando o DCS. A equipe do projeto construiu um protótipo para teste em campo e verificou que o novo arranjo (rota 4), aumenta a eficiência do sistema DCS em 67% quando comparada a rota 3 (colheita integral tradicional), apesar de aumentar um pouco as impurezas vegetais no carregamento, de 7% na rota 3 para 9% na rota 4 (FORCHEZATTO; NEVES; CARDOSO, 2020).

Figura 9 - Rotas para colheita da palha de cana, conforme avaliadas no projeto SUCRE/LNBR/CNPEM.



Fonte: Imagem adaptada de Castioni et al. (2020).

Além do custo adicional para recolhimento da palhada, uma questão importante é a definição de quanto de palha pode ser retirado sem comprometer a qualidade do solo. A equipe do projeto SUCRE/LNBR/CNPEM (CASTIONI et al., 2020) avaliou durante quatro anos, o efeito da remoção de diferentes quantidades de palha do solo em quatro tipos de solo diferentes, sendo dois do tipo argiloso e dois do tipo arenoso. As condições avaliadas foram “sem remoção” da palha (*no removal* ou NR) onde foi considerada a manutenção de 15 Mg de palha seca ha⁻¹, “baixa remoção” (*low removal* ou LR), com 10 Mg ha⁻¹, “alta remoção” (*high removal* ou HR), com 5 Mg ha⁻¹ de palha e “remoção total” (*total removal* ou TR), onde o solo é mantido sem palha. O estudo monitorou características físicas do solo: resistência à penetração, densidade, diâmetro médio agregado, macro e microporosidade; propriedades químicas: pH, potencial de acidez (H+Al), capacidade de troca catiônica (CEC), saturação

básica e macronutrientes (P, K, Ca e Mg); propriedades biológicas (diversidade de macrofauna, carbono de biomassa microbiana, atividade enzimática de β -glucosidase); efeitos de erosão, teor de carbono no solo (*soil organic carbon*, SOC), emissões de N_2O e CH_4 e efeitos sobre a produtividade da cana.

A conclusão do projeto é de que a alta remoção de palha piorou as condições do solo de forma clara, aumentando a compactação, o efeito erosivo, reduzindo a biodiversidade e o SOC⁵, com efeitos negativos mais acentuados em solo arenoso do que em solo argiloso. Por outro lado, a remoção de palha reduziu as emissões de N_2O uma vez que a própria palha é fonte de nitrogênio e, portanto, de emissões desse gás de efeito estufa. Com relação ao efeito sobre a produtividade, o estudo não é conclusivo e os autores finalizam a avaliação afirmando que “não existe uma única resposta para a remoção recomendada de palha no Centro-Sul do Brasil” (CASTIONI et al., 2020, p.37), uma vez que outras condições devem ser consideradas como clima, índice de chuvas, práticas agrícolas e idade da cana, principalmente no que se refere ao efeito da remoção de palha sobre a produtividade (CASTIONI et al., 2020).

2.4.2. Aproveitamento energético da palha

A palha de cana também pode ser usada para geração de energia nas usinas, assim como o bagaço é utilizado. A palha triturada e enfardada e seca, tem um poder calorífico de cerca de 16 MJ kg^{-1} (poder calorífico inferior) de acordo com estudo abrangente realizado pelo Centro de Tecnologia Canaveira (CTC) (LINERO e LAMÔNICA, 2005 *apud* SEABRA, 2008). Porém, para poder ser utilizada em caldeiras, devem ser consideradas suas características químicas, teor de cinzas e impurezas minerais, e teor de umidade. Na Tabela 4, a seguir, são exibidas as médias dos dados coletados em 3 usinas durante a realização do projeto SUCRE/LNBR/CNPEM (MANTELATTO et al., 2020), os valores default usados na ferramenta GREET (2020) e a média das informações compiladas por Seabra (2008) para comparação.

É possível verificar que o teor de umidade sofre grande variação a depender da forma de colheita da palha. Na rota 2 mencionada no item 2.4.1 deste trabalho (Figura 9) a palha é deixada no campo para secar e depois enfardada, de modo que o seu teor de umidade quando chega na

⁵ SOC (*Soil organic carbon*) foi usada pelo autores para denominar a quantidade de carbono detectada no solo por meio de um analisador de carbono (Carbon Analyzer LECO CN 628) em amostras colhidas até 30cm de profundidade (CASTIONI et al., 2020). A sigla SOC também, é comumente usado para denominar a matéria orgânica morta e raízes finas vivas ou mortas presentes no solo e que, pelo tamanho reduzido, não podem ser distinguidas do solo empiricamente (PAUSTIAN et al., 2006).

usina já é bem menor do que o da palha colhida pela rota 3 (colheita integral com DCS), que foi enviada para a usina junto com o bagaço. Por outro lado, o teor de carbono, hidrogênio e nitrogênio sofreu pouca variação entre as rotas e, segundo reportado no SUCRE/LNBR/CNPEM, é bastante próximo ao do próprio bagaço (MANTELATTO et al., 2020).

Tabela 4 - Composição imediata e elementar da palha de cana (diversos autores).

Composição imediata e análise elementar		Palha de cana		
Referências	Unidade de medida	(SEABRA, 2008) ¹	MACEDO (2007) ²	SUCRE/LNBR/CNPEM (MANTELATTO et al., 2020) ³
Teor de umidade	% (MS)	14,8	-	15% (enfardado) 49% (colheita integral/DCS)
Poder calorífico inferior	MJ/kg	16,1	-	-
Poder calorífico superior	MJ/kg	-	-	16,0-18,3
Teor de cinzas	% (MS)	7,9	-	4,5-10,5
Voláteis	% (MS)	78,1	-	-
Carbono fixo	% (MS)	14,1	-	-
C	% (MS)	43,99	-	38-42
H	% (MS)	5,80	-	5,5-7,0
N	% (MS)	0,52	-	0,5-0,6
O	% (MS)	40,85	-	-
S	% (MS)	0,09	-	0,12-0,20
Cl	% (MS)	0,20	-	0,20-0,40
K	% (MS)	-	1,25	-
P	% (MS)	-	0,03	-

MS = massa seca. Fonte: Tabela elaborada pela autora com base nas fontes:

¹Média das informações de diversos trabalhos compiladas por Seabra (2008);

²Macedo (2007) conforme mencionado na ferramenta GREET (ARGONNE NATIONAL LABORATORY, 2020), aba Inputs; alguns dados foram retirados do trabalho do Seabra. Nesta coluna mostramos os dados complementares apenas;

³Tabela 20 de Mantelatto et al. (2020) com dados médios de 3 usinas e considerando palha recolhida por colheita integral/DCS e enfardamento;

Outro aspecto importante é o armazenamento da palha que deve ocorrer de maneira apropriada afim de evitar incêndios. Em estudo realizado com palha de feno, foi verificado que a umidade apropriada para estocagem da palha é de no máximo 20% de umidade (em massa). Valores maiores propiciam a proliferação de bactérias que irão decompor a palha gerando calor e, este calor que pode chegar a 60°C, pode causar combustão espontânea. Outros critérios como quantidade de palha estocada, tamanho e densidade da pilha também devem ser considerados. Duas empresas possuem experiência com a estocagem de grande quantidade de palha enfardada no Brasil: GranBio e Raízen. Apenas a empresa GranBio consome cerca de 450 mil t de palha enfardada por ano, com uma área de estocagem de 28 ha e capacidade de armazenamento de 60 mil t, em fardos de 420 kg cada (MANTELATTO et al., 2020).

Além disso, outras questões operacionais devem ser esclarecidas com relação ao uso da palha para geração de energia como o teor de cinzas, a presença de cloro, alcalinos, enxofre e outras impurezas na palha de cana que aumentam a ocorrência de corrosão nas caldeiras e o teor de umidade. Em três usinas analisadas por Mantelatto et al. (2020), que empregavam a rota 2 (enfardamento – conforme visto na Figura 9), a umidade da palha pronta para queima variou de 10% a 15% (massa), melhorando as condições de queima ao ser misturada com o bagaço que tem entre 30% a 60% de umidade (massa). No entanto, como as usinas estão preparadas para operar na faixa de umidade do bagaço, ajustes no processo são necessários para que a utilização da palha não seja limitada. Ainda, caso se opte por utilizar a colheita integral da palha junto com a cana, o teor de umidade da palha tende a ser maior uma vez que ela não permanecerá no campo para secagem, podendo ficar em torno de 49% de umidade, muito mais próximo ao teor de umidade do bagaço (MANTELATTO et al., 2020).

A maior quantidade de cloro na palha, 10 vezes maior do que no bagaço (MANTELATTO et al., 2020), também é um item de atenção. Considerando uma mistura de bagaço e palha, com 50% de palha da cana, aumentamos a disponibilidade de biomassa para combustão em aproximadamente 50% porque a energia contida em toda palha é da mesma ordem de grandeza que a energia contida no bagaço. Além disso, considerando que não é necessário usar esta biomassa extra para gerar vapor pois a usina já é plenamente atendida pelo vapor gerado pelo bagaço, essa biomassa pode alimentar sistemas com turbinas de condensação mais eficientes que as de extração. Considerando sistemas com turbinas de condensação-extração a 90 bar e 520°C e o uso de bagaço e palha de cana, estima-se que seja possível obter cerca 140 kWh tc⁻¹ de eletricidade excedente (SEABRA, 2008), bastante superior à média de geração nacional de cerca de 53 kWh tc⁻¹ na safra 2019/20 (MERCANTE, 2020).

2.5. HTC como tratamento para os resíduos da indústria de cana

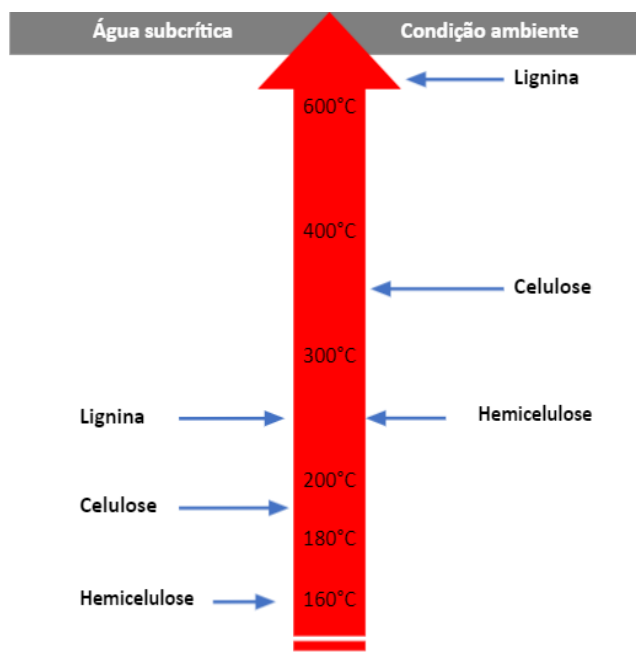
Neste trabalho propusemos a utilização do processo de carbonização hidrotérmica (HTC, na sigla em inglês) para tratamento da palha de cana. O HTC é um tratamento físico-químico onde a biomassa úmida é tratada a alta temperatura e pressão e que difere da pirólise, principalmente, por utilizar meio reacional aquoso. Porém, é possível encontrar trabalhos que se refiram ao HTC como “pirólise hidrotermal” (ALVARINHO, 1995). A escolha da palha de cana como matéria-prima para o HTC se justifica pela disponibilidade, visto que a redução da prática de queimadas na lavoura aumentou a disponibilidade da palha no campo como já mencionado neste trabalho. Ainda, há uma certa dificuldade de se aproveitar a palha para queima direta dado sua umidade, teor de cinzas e cloro, ao contrário do bagaço de cana que já é uma matéria-prima consolidada para a cogeração em usinas de açúcar e etanol.

O HTC é um processo conhecido desde pelo menos 1913, quando o químico alemão Bergius descreveu o experimento que possibilita simular o processo natural de formação de carvão (WANG et al., 2018) e reduzir o tempo de carbonização da biomassa que, na natureza leva milhares de anos, para apenas algumas horas. Já Alvarinho (1995), citando Mesinger (1980), menciona uma data anterior, 1850, quando C. B. Vignoles teria solicitado a patente sobre um processo de carbonização hidrotermal aplicada à turfa. Qualquer que seja a origem do processo, o fato é que nos últimos dez anos⁶, o HTC tem ganhado mais atenção por fornecer a possibilidade de tratar biomassa úmida, transformando-a em diferentes produtos como o carvão ativado, o carvão vapor, ou um condicionador de solo, além de também possibilitar a obtenção de moléculas orgânicas, como 5-hidroximetilfurfural, isoladas a partir da fase líquida resultante do tratamento e que servem de matéria-prima para obtenção de outros produtos (DE MENA PARDO et al., 2016).

De modo geral, no HTC a matéria-prima é aquecida a temperaturas na faixa de 180° C a 350°C, pressão de 2 a 6 MPa, em meio reacional aquoso, na condição subcrítica (HEIDARI et al., 2019). Em condição subcrítica a água age como um solvente com alta concentração dos íons hidrônio (H_3O^+ , ácido) e hidróxido (OH^- , básico), favorecendo reações dos compostos orgânicos catalisadas por meio ácido (WANG et al., 2018) e, com isso, facilitando a decomposição da hemicelulose, celulose e lignina (vide Figura 10 a seguir).

⁶ Ano em que foi anunciado o primeiro piloto em escala comercial com HTC pela empresa AVA-CO₂, na Alemanha (KLÄUSLI, 2010).

Figura 10 - Temperaturas de degradação da biomassa em condição ambiente versus condição subcrítica.



Fonte: Elaborado pela autora com base em dados de Wang et al. (2018) e Heidari et al. (2019).

Diversas reações ocorrem durante o processo de carbonização hidrotérmica e os mecanismos não são todos conhecidos. Porém, como a reação de hidrólise possui energia de ativação baixa⁷ presume-se que estas governem as reações. A desidratação e a descarboxilação são as reações responsáveis por reduzir as razões H/C e O/C do hidrochar e a descarboxilação também produz CO₂ e CO no processo (HEIDARI et al., 2019). Após a realização do processo de HTC, obtém-se uma fase sólida chamada de *hidrochar*⁸ que é, em geral, apontado como o principal produto do HTC, mas seu rendimento depende das condições de temperatura, pressão e tempo de residência, sendo a fase líquida (bio-óleo e água) e a fase gasosa, subprodutos do processo (HEIDARI et al., 2019). A fase gasosa é basicamente composta por CO₂ (70-90%) (WANG et al., 2018) e com pequenas quantidades de CO, CH₄ e H₂ (HEIDARI et al., 2019).

2.5.1. Parâmetros de processo e rendimento

Alguns trabalhos foram publicados relatando a carbonização hidrotermal do bagaço de cana (ALVARINHO, 1995; CHAI et al., 2019; CHEN; YE; SHEEN, 2012; IRYANI et al., 2017; PRASANMEDHA et al., 2021) e até mesmo considerando a realização do HTC do bagaço usando a vinhaça como água de processo (DOS SANTOS et al., 2022; FREGOLENTE et al.,

⁷ Energia de ativação é a energia mínima necessária para que ocorra a reação química.

⁸ Diferencia-se da fase sólida produto da pirólise, comumente chamada de *biochar*.

2018, 2019). Porém, até o momento da conclusão deste trabalho, nenhum trabalho experimental avaliou o uso de palha de cana como matéria-prima para o HTC. Assim, trabalhos considerando outros tipos de palha foram avaliados com o intuito de encontrar referências para os dados de rendimento de hidrochar, consumo energético e demais parâmetros necessários para este estudo.

Um dos trabalhos realizados com bagaço de cana, foi a tese de doutorado de (ALVARINHO, 1995) realizado no Instituto de Geociências da USP, comparando o carvão obtido a partir do HTC do capim, turfa e bagaço de cana. O experimento foi realizado em autoclave de 200°C a 300°C, com tempo de residência de 5, 15 e 45 minutos para o bagaço de cana, obtendo-se um rendimento de 43% em carvão (massa), 50,9% em carbono, obtendo-se um carbono de poder calorífico 16% superior ao bagaço de cana não tratado (PCS 5.086 kcal/kg). Alvarinho (1995) menciona que uma das vantagens do processo é remover boa parte das cinzas da biomassa por lixiviação durante o processo, pois estas podem escorificar causando problemas aos reatores em processos de carbonização a seco (como a pirólise), gaseificação da biomassa ou mesmo queima direta.

As características estruturais da biomassa (teor de celulose, hemicelulose e lignina) são fatores importantes na determinação das características do hidrochar. Ao comparar estudos que realizaram HTC com biomassa contendo diferentes concentrações de celulose, com outros estudos que realizaram HTC com a glucose ou sucrose dissolvidas ou facilmente dissolvíveis como substrato, Wang e colaboradores (2018) concluíram que as características do hidrochar obtido de diferentes concentrações de substratos (celulose, glucose ou sucrose), dependem fortemente da natureza do precursor (substância pura versus biomassa) e das condições de processo. Esta diferença se daria, pois, “a quebra da biomassa é diferente da decomposição de componentes isolados devido às fortes ligações entre os componentes, incluindo ligações covalentes e pontes de hidrogênio.” (WANG et al., 2018). De fato, o HTC precisa quebrar as ligações intermoleculares covalentes entre a celulose ou hemicelulose e a lignina para que as reações que dão origem ao hidrochar se iniciem. Foi reportado, por exemplo, que quanto maior o teor de celulose presente na biomassa menor o rendimento de hidrochar (Sevilla et al. 2009 *apud* Wang et al., 2018). O que se justifica pela maior solubilidade da celulose em condições subcríticas quando comparada à lignina como já mostrado na Figura 10. Em outro estudo, foi verificado que um alto teor de lignina na biomassa de partida, resulta em um hidrochar com características estruturais semelhantes ao material de origem (WANG et al., 2018), o que se deve à recalcitrância da lignina. Assim, é razoável esperar que biomassas com características estruturais semelhantes apresentem produtos semelhantes sob as mesmas condições de

processo. É claro que a comparação não elimina a necessidade de se realizar estudos experimentais, principalmente, considerando-se que a presença de minerais e metais pesados pode alterar o mecanismo de formação do hidrochar (WANG et al., 2018). No entanto, a comparação pode servir para uma avaliação preliminar despertando a atenção para novos materiais precursores como a palha da cana.

Portanto, considerando a composição da palha de milho e de cana (vide Tabela 5 a seguir) e considerando que a da cana de açúcar contém de 37-41,42% de celulose, 28-32,65% de hemicelulose e 22,82-26% de lignina (SEABRA, 2008) e, a palha de milho contém de 34,5-41,3% de celulose, 27,7-28,1% de hemicelulose e 17,8-22,1% de lignina (MACHADO et al., 2018), a palha de milho foi escolhida como “proxy” para a palha de cana neste estudo uma vez que vários estudos já foram realizados com a palha de milho e, portanto, podem suprir a necessidade de dados para uma primeira análise.

Tabela 5 - Composição da palha de cana-de-açúcar e de milho.

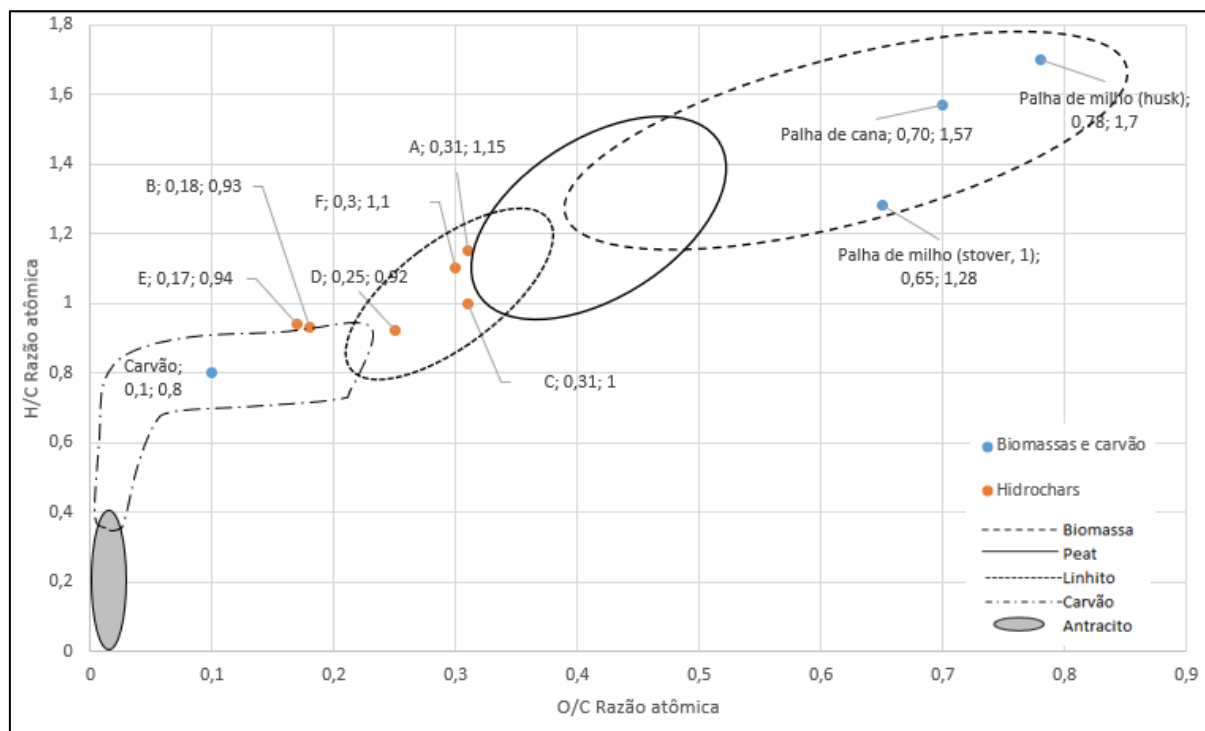
Matéria-prima	Composição				Referências
	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Cinzas (*b.s.)	
Palha de milho (<i>stover</i>)	34,5-41,3	27,7-28,1	17,8-22,1	5,6-7,8	Machado et al. (2018)
Palha de cana	41,42	32,65	22,82	3,11	Peláez Samaniego (2007) ²
Palha de cana	37	28	26	9	Saad e Gonçalves (2005) ²

*b.s. = base seca. Fonte: Tabela elaborado pela autora com base em: ¹Machado et al. (2018) e artigos citados por ²Seabra (2008).

No estudo realizado por Machado et al. (2018), foi avaliado o efeito da temperatura na carbonização hidrotermal da palha de milho que é, comumente, deixada no campo após a colheita. Os autores realizaram o HTC com a palha de milho em temperaturas de 175°C, 200°C, 225°C e 250°C, por 240 minutos, com razão biomassa:água de 1:10, em reator batelada com agitação e volume de 18,87 L e compararam os resultados com outros trabalhos similares com a palha de milho e mesmo com trabalhos que utilizaram outros precursores. Dentre as conclusões do estudo, os autores verificaram que a razão H/C e O/C diminuem com o aumento da temperatura, indicando maior carbonização. Porém, o tempo de residência também possui um papel importante, tendo um dos trabalhos analisados por Machado et al. (2018) obtido uma taxa de carbonização menor do que o resultado obtido pelos próprios autores, provavelmente, devido ao baixo tempo de residência (30 minutos). No diagrama de Van Krevelen exibido abaixo (Figura 11), é possível comparar cada hidrochar obtido com os valores comuns para um

carvão de origem fóssil (razão H/C=0,8 e O/C=0,1) (MINARET; DUTTA, 2016). Também foram plotadas as razões H/C e O/C para as biomassas de origem.

Figura 11 - Diagrama de Van Krevelen da palha de milho, palha de cana e hidrochar.



Fonte: Elaborado pela autora com base em trabalhos mencionados por: ¹Machado et al. (2018) e ²Minaret e Dutta (2016).

O Diagrama de Van Krevelen foi elaborado com base nos dados de análise elementar das biomassas e do hidrochar compilados pelos autores Seabra (2008), Mohammed et al. (2020), Minaret e Dutta (2016) e Machado et al. (2018). Nos artigos mencionados não foi detalhada a forma de cálculo para o Diagrama de Van Krevelen, assim, para garantir a comparação, as razões molares foram recalculadas com base nos teores de oxigênio, carbono e hidrogênio em percentual divulgados pelos artigos. Os valores percentuais de cada elemento foram divididos pelas respectivas massas molares e as razões necessárias (H/C e O/C) calculadas e plotadas no diagrama. Para a palha de cana foram considerados os dados já apresentados na Tabela 4 deste trabalho e baseados em Seabra (2008). Os dados calculados e utilizados neste trabalho são apresentados a seguir (vide Tabela 6).

É possível verificar que a razão O/C e H/C da palha de cana é intermediária entre a razão para a palha de milho (husk) reportada por Minaret e Dutta (2016) e a palha de milho (stover) reportada por Mullen et al. (2010 *apud* MACHADO et al., 2018) porém com maior razão H/C e percebe-se uma variação considerável mesmo entre palhas de milho, o que é esperado, uma vez que a biomassa é uma matriz complexa com características bastante variáveis. A

diferenciação entre “husk”, “silage” e “stover” foi feita pois a palha deixada no campo (*stover*) pode apresentar teor de umidade bastante diferente da palha que envolve a espiga de milho (*husk*) ou da palha triturada para ração animal (*silage*).

Tabela 6 - Razões molares calculadas para o Diagrama de Van Krevelen.

Item mencionado na Figura 11	Matéria-prima	O/C	H/C	Referência
Carvão	Carvão	0,1	0,8	J. Minaret e A. Dutta (2016)
Palha de milho (stover)	Palha de milho (stover)	0,65	1,28	C. A. Mullen et al (2010) ¹
Palha de milho (husk)	Palha de milho (husk)	0,78	1,7	J. Minaret e A. Dutta (2016)
Palha de cana	Palha de cana	0,70	1,57	J. Seabra (2008)
A	Hidrochar palha de milho (stover) (250°C, 240min)	0,31	1,15	N. T. Machado et al. (2018)
B	Hidrochar palha de milho (stover) (250°C, 240min)	0,18	0,93	Fuertes et al. (2010) ¹
C	Hidrochar palha de milho (silage) (220°C, 240min)	0,31	1	I. Oliveira, D. Blohse e H-G. Ramke (2013)
D	Hidrochar palha de milho (stover) (255°C, 30min)	0,25	0,92	Hoekman et al. (2013), 255°C, 30min
E	Hidrochar palha de milho (stover) (250°C, 240min)	0,17	0,94	Xiao et al. (2012) ¹
F	Hidrochar palha de milho (husk) (260°C, 15min)	0,3	1,1	J. Minaret e A. Dutta (2016), liquid HTC

Legenda de cores: Vermelho – dados calculados que diferem do que foi apresentado pelos autores. Fonte: Tabela elaborada pela autora com base em dados de: Minaret e Dutta (2016) e ¹trabalhos mencionados por Machado et al. (2018).

Já entre os produtos do HTC dessas palhas verificou-se que todos apresentaram baixas razões O/C e H/C indicando que o processo de carbonização ocorreu de forma satisfatória ficando os produtos obtidos nas regiões de linhito ou carvão. A influência de diferentes fatores como temperatura, tempo de residência, pH, taxa de aquecimento, razão biomassa:água e composição do material de partida, dificulta a comparação entre os trabalhos, mas é possível notar que melhores resultados de carbonização foram observados para experimentos que combinaram temperaturas mais altas e tempo de residência mais longos, como nos

experimentos B e E a 250°C e 240 minutos (Figura 11). No experimento F, mesmo sendo a temperatura mais alta (260°C) dentre os experimentos avaliados, o menor tempo de residência levou a uma razão H/C e O/C mais alta. Conforme reportado por Wang et al. (2018), após avaliarem diferentes trabalhos para entender o efeito de diferentes parâmetros no biochar, maiores tempos de residência aumentam a formação de intermediários reacionais e a polimerização, especialmente para materiais lignocelulósicos. Heidari et al. (2019) também ressaltaram a importância da temperatura e tempo de residência no resultado do HTC, destacando a temperatura como principal parâmetro do processo e o tempo de residência como determinante para o rendimento e teor de carbono do hidrochar.

Quanto ao rendimento de sólidos ao final do processo de HTC, os dados variaram de 25% a 52% (vide Tabela 7 a seguir) sendo bastante dependente da severidade do processo (HEIDARI et al., 2019; MACHADO et al., 2018; TU et al., 2019; WANG; WANG, 2019; WANG et al., 2018). A severidade do processo é um parâmetro comumente utilizado na análise de processos químicos e pode ser calculada conforme Equações 1 e 2, a seguir. Na equação, baseada na equação de Arrhenius, temos o tempo de residência (t) como fator pré-exponencial e a temperatura de reação (T) como variável (HEIDARI et al., 2019).

$$R_0 = t \cdot e^{[(T-100)/14,75]} \quad \text{Equação 1}$$

$$\text{Severidade (S)} = \log R_0 \quad \text{Equação 2}$$

Tabela 7 - Rendimento de hidrochar e condições de processo para HTC de palha de milho.

Condições de processo				Características hidrochar		S
Matéria-prima	T	T	Razão biomassa:água	Rendimento sólidos	HHV	
	(°C)	(min)	-	(%)	(MJ/kg)	
(1) Palha de milho (stover)	250	240	1:10	25,93	24,57	6,797
(2) Palha de milho (stover)	250	240	1:10	36	31,23	6,797
(3) Palha de milho (silage)	220	240	3:20	52,5	26,6	5,913
(4) Palha de milho (stover)	255	30	1:8	-	24,74	6,041
(5) Palha de milho (stover)	250	240	1:10	35,48	29,2	6,797

Condições de processo				Características hidrochar		S
Matéria-prima	T	T	Razão biomassa:água	Rendimento sólidos	HHV	
	(°C)	(min)	-	(%)	(MJ/kg)	
(6) Palha de milho (husk)	260	15	1:12	33,2	27,66	5,887

Fontes:

(1) N. T. Machado et al. (2018)

(2) Fuertes et al. (2010)¹

(3) I. Oliveira, D. Blohse e H-G. Ramke (2013)

(4) Hoekman et al. (2013)¹

(5) Xiao et al. (2012)¹

(6) J. Minaret e A. Dutta (2016), HTC líquida

¹Trabalhos mencionados por Machado et al. (2018)

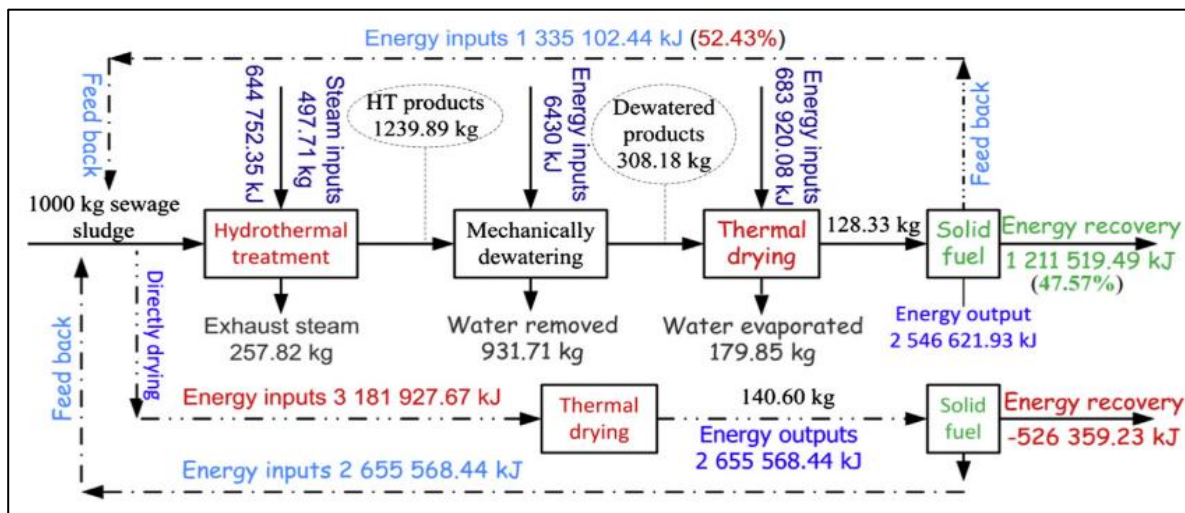
2.5.2. Processos unitários do HTC e consumo de energia

Uma das vantagens comumente citadas do HTC é possibilidade de tratar os resíduos orgânicos com alto teor de umidade, sem a necessidade de realizar a secagem da biomassa antes do tratamento térmico (WANG et al., 2018). Em estudo comparando o tratamento hidrotérmico do lodo de ETE (Estação de Tratamento de Efluentes) com e sem secagem do lodo (vide Figura 12 a seguir), Zhao et al. (2014) concluíram que é possível recuperar cerca de 1.211 MJ de energia do hidrochar obtido a partir do tratamento de 1 t de lodo de ETE (85,94% umidade), a 200°C e com tempo de residência de 30 min, enquanto na secagem direta a energia gasta no processo de secagem é maior do que a energia gerada com o combustível, não havendo, portanto, nenhum ganho líquido, mas um consumo energético de 526 MJ.

Isto é, devido à maior facilidade para desaguamento mecânico do hidrochar, a energia obtida no combustível sólido ao final do processo com HTC é maior do que a necessária para realizar todo o processo considerando as etapas de reação (HTC), desaguamento mecânico em filtro prensa e secagem por evaporação forçada. Mesmo considerando o pré-aquecimento do reator a cada batelada, a taxa de recuperação de energia é de cerca de 40%, indicando que o balanço energético do processo é favorável (ZHAO et al., 2014) e que ainda pode ser melhorado em condições de processo semi-contínuo ou contínuo que reduziria a necessidade de pré-aquecimento do reator. Outros autores mencionam ainda o caráter exotérmico das reações envolvidas no HTC (HEIDARI et al., 2019; WANG et al., 2018) e, embora, nenhum estudo tenha reportado a realização de HTC sem fornecimento de energia externa, esse caráter

majoritariamente exotérmico contribui para um balanço energético favorável (HEIDARI et al., 2019).

Figura 12 - Balanço de energia do processo de HTC e da combustão direta do lodo de ETE.



Fonte: Zhao et al. (2014).

O processo avaliado por Zhao et al. (2014) foi realizado em escala de bancada e o consumo energético do HTC foi calculado com base no balanço de energia considerando a energia necessária para aquecer o meio reacional até a temperatura de reação e a energia perdida na forma de vapor, além da energia requerida para desaguamento e secagem. Para o consumo energético do processo de desaguamento mecânico e secagem térmica, os autores consideraram o dado experimental de uma planta piloto que trata 24 toneladas por dia de lodo de ETE.

Em escala laboratorial alguns autores adicionam nitrogênio (gás inerte) (MACHADO et al., 2018) para garantir a pressurização do reator e a condição subcrítica, porém, em escala industrial é esperado que a reação de HTC ocorra com pressão autogerada (autógena) devido ao custo para pressurização (HEIDARI et al., 2019).

A realização de HTC em escala industrial requer que estratégias para reduzir o consumo de energia sejam aplicadas e, embora já existam empresas que realizem o HTC em escala industrial⁹, não foi reportada a realização do processo contínuo em grande escala, apenas em batelada ou semi-batelada. Um dos desafios para a realização do processo de forma contínua é a necessidade de bombear a biomassa para o interior do reator em alta pressão (HEIDARI et al., 2019).

⁹ Como as empresas Ingelia (<https://ingelia.com/?lang=en>), HTCycle (<https://htcycle.ag/>), por exemplo.

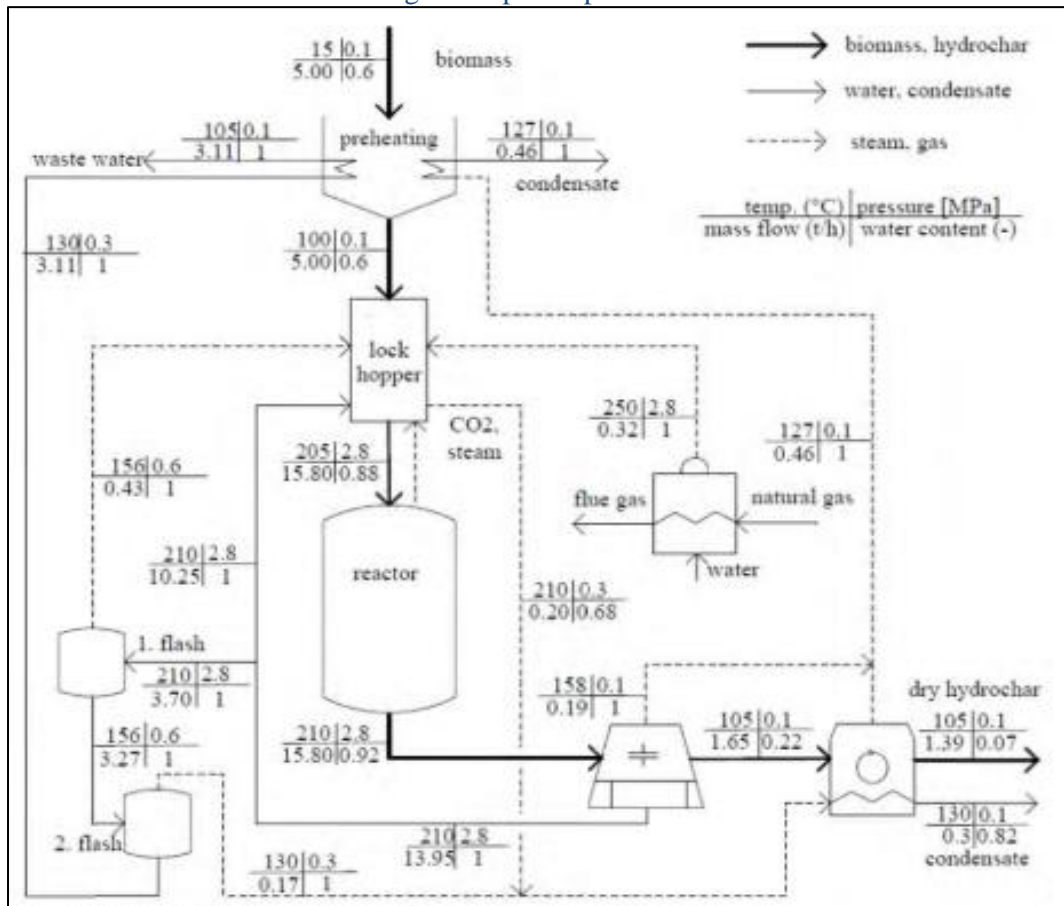
Outro desafio do HTC em larga escala é o aproveitamento, tratamento ou disposição da água de processo devido à grande quantidade de água utilizada e a presença de algumas substâncias potencialmente poluentes (FREGOLENTE et al., 2019).

Estudos mostram que o reciclo da água de processo pode favorecer o balanço energético do processo de HTC. Steman e Ziegler (2011) propõem o reciclo do vapor e da água pressurizada resultante do processo de HTC com o intuito de melhorar a eficiência energética (vide Figura 13 a seguir). Usando dados experimentais para o balanço de massa e energia (rendimento e calor de reação) os autores simularam o uso de um reator semi-contínuo. A biomassa pré-aquecida a 100°C sob pressão atmosférica com a água residual do segundo tanque de flash (veja Figura 13 a seguir) e gases residuais do processo, é alimentada no reator através de um *lock hopper*¹⁰. No *lock hopper* também é injetado o vapor do processo proveniente do primeiro tanque de flash (156°C e 0,6 MPa), água reciclada da prensa a pistão (210°C e 2,8 MPa) e vapor produzido por uma unidade a gás natural (250°C e 2,8 MPa) até atingir a razão biomassa:água de 1:7. Após o desaguamento na prensa até 22% de umidade, o hidrochar é seco até 7% de umidade com o vapor produzido no segundo tanque de flash (130°C e 0,3 MPa). O desaguamento mecânico é realizado a quente, na temperatura e pressão de processos, garantindo maior eficiência já que a menor tensão superficial, densidade e viscosidade da água quente facilitam o desaguamento, segundo os autores. Com este arranjo, foi necessário o uso de apenas 0,32 t h⁻¹ de vapor adicional (250°C e 2,8 MPa) o que, considerando a eficiência na geração de vapor (0,9), correspondeu a um consumo de 0,46 t h⁻¹ de gás natural. O processo simulado prevê o tratamento de 5 t h⁻¹ de biomassa (cavacos da madeira chamada de “beech wood” do gênero *Fagus L.*) com 60% de umidade e, considerando a energia elétrica necessária para a prensa, o processo proposto consumiu 4% da energia produzida na forma de hidrochar, metade da calculada por estudos anteriores. Por fim, os autores verificaram uma perda de energia de 5 a 20 kW dependendo do isolamento considerado no reator, o que, em escala industrial, corresponde a 0,2% da energia requerida pela planta, não representando, portanto, uma perda significativa (STEMANN; ZIEGLER, 2011).

No trabalho realizado por Heidari et al. (2021) os autores conseguiram determinar um modelo matemático para o HTC utilizando o COMSOL *Multiphysics* e considerando taxa de transferência de calor, modelo cinético e a estrutura porosa da biomassa. Quando essas condições são consideradas, o modelo desenvolvido pelos autores consegue estimar com precisão o consumo de energia do HTC, como é possível observar na imagem Figura 14 a seguir.

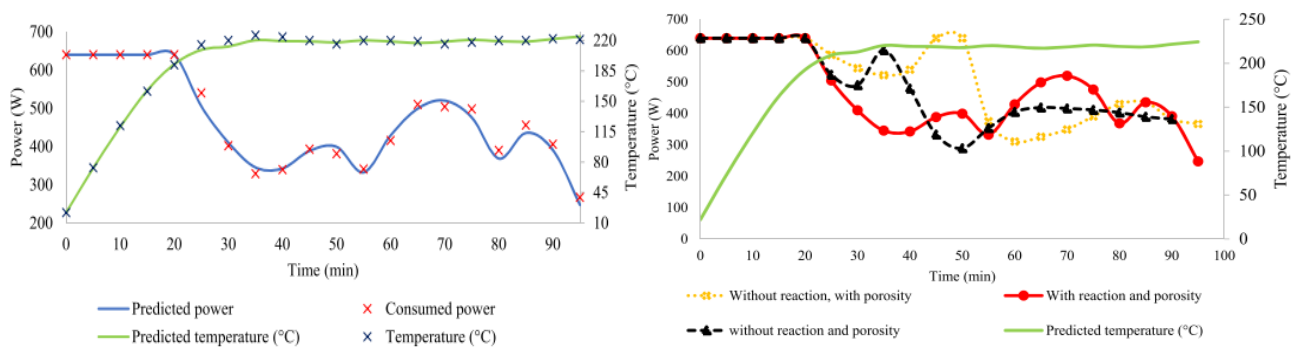
¹⁰ *Lock hopper* = esteira ou parafuso com vedação que introduz material sólido sob pressão.

Figura 13 - Arranjo proposto por Stemann e Ziegler (2011) para o HTC de beech wood chips em sistema semi-contínuo e com ciclos de água e vapor de processo¹¹.



Fonte: Stemann e Ziegler (2011)

Figura 14 – À esquerda: comparação entre resultados experimentais (pontos demarcados pelo "x" no gráfico) e resultados estimados pelo modelo matemático (linhas do gráfico). À direita: resultados de potência consumida (linhas pontilhadas) dados pelo modelo matemático considerando: o calor da reação e porosidade da biomassa (linha pontilhada vermelha), sem o calor da reação e com porosidade (linha pontilhada amarela), sem calor da reação e sem porosidade (linha pontilhada preta).



Fonte: Heidari et al. (2021).

¹¹ Consumo energético externo de 1,03 GJ/h (3,4% da energia do hidrochar).

No experimento realizado, um aquecedor com potência de 640 W foi utilizado em conjunto com um controlador, de modo que, quando a temperatura fosse maior que o *set point* (220°C) o aquecedor fosse desligado, garantindo assim o controle da energia fornecida. Assim, na Figura 14, é possível notar dois momentos bastante distintos: até cerca de 20 minutos (etapa 1), temos o aquecimento do meio reacional com fornecimento constante de 640 W. Aos 35 minutos chega-se à temperatura de reação de 220°C e a reação continua por mais 60 minutos (HEIDARI et al., 2021).

Na etapa de reação vê-se claramente a oscilação da potência fornecida, devido ao controle *on/off* utilizado por Heidari e colaboradores (2021). Já no gráfico da direita, é possível observar uma diferença entre a potência consumida no modelo que considera a reação e a porosidade da biomassa (linha pontilhada vermelha) e o modelo que não considera a reação (linha pontilhada amarela). No primeiro caso, vê-se que menos potência é consumida. Isso ocorre devido ao calor das reações exotérmicas, que contribuem para manter o aquecimento do meio reacional que perde energia, segundo os autores, principalmente por convecção do reator para o ambiente. Sabe-se que as reações iniciais do HTC são endotérmicas (hidrólise), porém, conforme as reações progredem, como a decomposição de monossacarídeos, tem-se o fornecimento de energia para o meio reacional. Ainda segundo Heidari et. al (2021), pela diferença dessas duas curvas, foi possível determinar que o calor de reação geral é de $-2.223 \text{ kJ kg}^{-1}$, valor condizente com o apontado por Cuvilas et al. (*apud* Heidari et al. 2021), de $-2.530 \text{ kJ kg}^{-1}$.

No trabalho apresentado por Wang et al. (2018), onde foi feita uma revisão sobre condições de processo, fundamentos e características físico-químicas do HTC e do hidrochar, os autores mencionam que uma taxa de aquecimento muito alta reduz o rendimento da reação e não favorece a formação do hidrochar. Após avaliar diversos trabalhos, os autores concluem que taxas de aquecimento mais baixas favorecem a formação do hidrochar enquanto taxas de aquecimento altas favorecem a geração de bio-óleo (liquefação). Ainda, taxas de aquecimento baixas favorecem a carbonização (menores razões O/C e H/C). Por exemplo, a mudança de uma taxa de 5°C min^{-1} para $140^\circ\text{C min}^{-1}$ fez com que o rendimento de hidrochar caísse de 19% para 9% para o processo de HTC com palha de milho (Zhang et al. *apud* Wang et al. 2018). Avaliando a Figura 14, elaborada por Heidari et al. (2021), vemos no início da reação que a temperatura era de cerca de 15°C e após 35 minutos, a temperatura é de 220°C , ou seja, a taxa de aquecimento foi de cerca de $5,9^\circ\text{C min}^{-1}$. Portanto, está na faixa de taxa de aquecimento que favorece a formação do hidrochar e carbonização.

2.6. Adição de hidrochar no solo e efeito sobre produtividade

Até o momento da conclusão deste estudo, não foram encontrados trabalhos tratando especificamente do efeito da adição de hidrochar ao solo, apenas sobre o biochar. Um dos benefícios citados na literatura sobre a adição de biochar ao solo é o aumento da produtividade (AGEGNEHU; SRIVASTAVA; BIRD, 2017). O biochar é um material similar ao hidrochar, porém obtido a partir da pirólise (carbonização em ausência de oxigênio) e é um composto também rico em carbono e cuja composição varia de acordo com a biomassa da qual se origina e condições de tratamento pelo qual é produzido, de forma similar ao hidrochar (WANG et al., 2018). Assim, os estudos sobre biochar foram avaliados e considerados aplicáveis ao caso do hidrochar, porém, com a ressalva de que estudos de campo são necessários para confirmar os resultados, principalmente, por serem sensíveis ao tipo de solo, clima, cultura avaliada e outros dados como veremos a seguir. Características como densidade de partículas, área superficial, distribuição de tamanhos de poros, pH, carbono e nitrogênio total, condutividade, teor de fósforo, capacidade de troca catiônica ou presença de cátions e elementos traço são parâmetros importantes para determinar o melhor biochar (ou hidrochar) para cada aplicação (AGEGNEHU; SRIVASTAVA; BIRD, 2017). Assim, combinando diferentes biomassas, com tipo de tratamento e severidade do processo é possível obter produtos com diferentes teores de carbono, nitrogênio, fósforo e outros nutrientes importantes para a agricultura. Alguns autores comparam o hidrochar com a terra preta de índio, bastante conhecida pela alta produtividade. Bento et al. (2021), compararam a composição química da terra preta de índio com o hidrochar obtido a partir do tratamento hidrotérmico da vinhaça, do bagaço de cana-de-açúcar e da mistura de ambos com e sem adição de ácido fosfórico. As substâncias do tipo húmicas extraídas do hidrochar apresentaram semelhança com as substâncias húmicas da terra preta de índio e tiveram efeito sobre o cultivo de milho, sendo o hidrochar oriundo do bagaço, o que apresentou substâncias do tipo húmicas mais parecidas com as substâncias húmicas da terra preta de índio. Não foram feitos testes com a palha da cana.

A adição do hidrochar ou biochar altera as características físicas e químicas do solo, em geral com efeito positivo sobre a produtividade. Agegnehu, Srivastava e Bird (2017) avaliaram 634 publicações que relatam pesquisas com o uso do biochar para melhoria da qualidade do solo de forma experimental em campo, laboratório ou em estufas. Alguns estudos avaliaram o efeito do biochar sozinho e outros em uma mistura com algum tipo de composto. Os autores mencionam, de forma geral, que a maioria dos trabalhos aborda experimentos realizados em países desenvolvidos, com fornos de pequena escala, testes em laboratórios ou estufas e

utilizando madeira e resíduo sólido urbano como matéria-prima. Há, portanto, a necessidade de realização de mais estudos de campo e com hidrochar produzidos por métodos mais modernos e em larga escala. Entretanto, avaliando os estudos publicados, os autores concluem que o efeito do biochar sobre a produtividade do solo está relacionado com sua capacidade de aumentar a quantidade de matéria orgânica no solo (*Soil Organic Matter*, SOM), a retenção de água devido à maior superfície (devido a maior porosidade) e presença de grupos químicos funcionais específicos, a troca de cátions, a estabilidade de agregados e a redução de compactação e da densidade do solo. Além disso, a adição de biochar aumenta o pH do solo, podendo ter um efeito benéfico para algumas culturas.

Em outro estudo abrangente, verificou-se novamente que o efeito sobre a produtividade varia de acordo com o tipo de solo e cultivo. Kong et al. (2014) avaliaram 12 estudos que tratam do efeito sobre a produtividade da adição de biochar no solo (vide Tabela 8 a seguir). Foram abrangidas culturas de trigo, banana, soja, arroz, feijão de corda, sorgo, milho, rabanete, fava e o desenvolvimento de vegetação natural e árvores em 8 tipos de solos diferentes e com biochar produzido a partir de madeira, casca de madeira e amendoim, lodo e resíduos de indústria de papel e cama de frango. Em dois dos trabalhos foi avaliado o desenvolvimento da vegetação em locais históricos de produção de carvão e comparada à vegetação adjacente onde não ocorreu depósito de biochar. Estes locais históricos são importantes para compreender o efeito a longo prazo, após mais de 100 anos da adição de biochar. No entanto, a adição de biochar não se deu de forma intencional ou controlada, de forma que situações desfavoráveis, com deposição em excesso de biochar, podem ser encontradas. Dos trabalhos apresentados, alguns avaliaram mais de um tipo de solo ou cultura. Em 5 trabalhos, foi verificado que a adição de biochar não teve efeito ou reduziu a produtividade, devido às mudanças no pH do solo (*overliming*) para culturas de trigo e soja em solos arenosos e vulcânicos, incluindo os locais históricos de preparação de carvão.

Dos trabalhos que obtiveram resultados favoráveis, três foram conduzidos no Brasil em solo do tipo Xanthic ferralsol e com cultivos de banana, arroz, sorgo e feijão de corda. A taxa de aplicação de biochar variou de 0,68 a 136,75 t.ha⁻¹ com aumento de 20% a 100% de produtividade pela aplicação de biochar sozinho e ainda melhores resultados quando da adição de biochar em conjunto com fertilizantes minerais. Na Tabela 8, a seguir, apresentamos os resultados dos trabalhos experimentais em solos brasileiros reportados por Kong et. al (2014) e que utilizaram apenas o hidrochar como condicionador de solo. Outros trabalhos investigam a adição de biochar em uma mistura com composto ou fertilizantes minerais, porém, para os fins deste trabalho será considerada apenas a adição do hidrochar.

Tabela 8 - Efeito da adição de biochar na produtividade de acordo com estudos realizados no Brasil. O biochar foi usado como proxy para o caso do hidrochar devido à falta de dados sobre este último.

Referência	Solo / Biomassa	Cultivo	Taxa aplicação (t ha ⁻¹)	Resultados
Glaser et al. (2002)	Xanthic ferralsol / Madeira florestal secundária	Arroz, feijão de corda	68	20% (arroz) e 50% (feijão de corda) de aumento na produtividade
			136,75	100% de aumento na produtividade
Steiner (2006)	Xanthic ferralsol / Madeira	Banana	11,25	Reduziu acidez do solo e aumentou obtenção de potássio

Fonte: Elaborado pela autora com dados conforme mencionados por Kong et al. (2014);

Em parte, devido à complexidade de se realizar estudos de campo sobre o efeito do hidrochar no solo, uma vez que a produtividade varia de acordo com as condições edafoclimáticas e espécie cultivada, existem poucos estudos práticos sobre o tema e até a conclusão deste trabalho, não encontramos estudos que tenham avaliado o efeito do hidrochar em plantações de cana-de-açúcar. Além disso, mais estudos são necessários para compreender a liberação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e metais no ambiente e seu potencial impacto (WANG; WANG, 2019). Para o nosso estudo foi considerado um ganho de produtividade de 20% no cultivo de cana-de-açúcar com a adição de hidrochar no solo. Devido à grande incerteza associada à essa premissa, uma análise de sensibilidade foi realizada para avaliar o efeito da produtividade sobre os cenários.

2.7. Considerações sobre a captura de carbono pela aplicação do hidrochar no solo

Diferentes autores mencionam a aplicação de biochar ou hidrochar no solo como uma alternativa para a captura de carbono, pois, ao aplicar o carbono na forma de hidrochar no solo ele permanece por muito mais tempo do que se fosse aplicado na forma de biomassa sem qualquer tratamento térmico (AGEGNEHU; SRIVASTAVA; BIRD, 2017). Kuzyakov, Bogomolova e Glaser (2014) acompanharam, durante 8,5 anos, a decomposição do carbono

presente no hidrochar por meio de marcação com C^{14} . Pela medição do $^{14}CO_2$ gerado, os autores conseguiram estimar a taxa de decomposição do hidrochar entre o quinto e o oitavo ano do experimento, chegando a uma taxa de $7 \times 10^{-4} \% \text{ dia}^{-1}$, ou seja, 2,5 vezes menor que a taxa de decomposição medida nos 3 primeiros anos do experimento, o que indica uma tendência de estabilização. Segundo os autores, isso equivaleria a um período de decomposição de 4000 anos em condições de campo, corroborando a hipótese de que o hidrochar contribui para a captura de carbono. Além disso, os autores acompanharam a geração de outras substâncias relacionadas ao hidrochar como lipídios neutros, glicolipídios, fosfolipídios, polissacarídeos e ácidos benzenopolicarboxílicos (BPCA). Com base na análise desses componentes, concluíram então que a estabilidade do hidrochar se deve à presença dos compostos aromáticos condensados, sendo o BPCA cerca de 87% do hidrochar inicialmente depositado com uma perda de apenas 7% ao longo de 3,5 anos. É importante frisar, contudo, que a eficiência energética do processo de carbonização hidrotérmica é fundamental para que haja a captura de carbono, pois, devido ao caráter energo-intensivo, o HTC é também uma fonte de emissão de gases de efeito estufa (GEE) quando utilizado combustível fóssil para alimentar o processo e, assim, o balanço energético é fundamental para garantir que haja de fato a captura de carbono.

Algumas estimativas apontam um potencial de emissões negativas pela aplicação de hidrochar no solo de 0,03 a 6,6 $GtCO_2e.ano^{-1}$ (JIA et al., 2019). Esse potencial de captura de carbono varia de acordo com a estabilidade do hidrochar aplicado no solo e reversibilidade do efeito de mitigação, pela saturação de carbono do solo e pela quantidade de biomassa disponível para carbonização considerados em cada trabalho.

A adição de hidrochar pode ainda reduzir a necessidade de aplicação de fertilizantes nitrogenados no solo reduzindo assim as emissões de N_2O . Ainda, segundo a metanálise realizada por Borchard et al. (2019) em 88 artigos revisados por pares, a aplicação de biochar no solo pode ter efeito sobre as emissões de N_2O . O biochar, produto da pirólise, teria efeito sobre os processos de nitrificação, desnitrificação e lixiviação do NO_3^- , interferindo nas emissões de N_2O do solo, mas os efeitos são mais ou menos acentuados em alguns tipos de solos e culturas, parecendo não ter efeito em cultivos perenes e gramíneas e ainda dependem do tipo de biomassa utilizada, temperatura do processo e tecnologia empregada: apenas um estudo considerando o HTC foi mencionado e neste estudo não se verificou qualquer efeito do hidrochar sobre as emissões de N_2O . Desta forma, estes efeitos não foram considerados no presente trabalho.

3. METODOLOGIA

3.1 Análise de ciclo de vida

Para avaliação e comparação dos cenários propostos, foi utilizada a metodologia de Análise de Ciclo de Vida (ACV) por meio da análise de impacto sobre as mudanças climáticas (emissões de GEE, GWP 100 anos) e balanço de energia e massa. Em análises de sistemas de biorrefinarias alguns problemas são bastante comuns. Ahlgren e colaboradores (2015) analisaram diversos trabalhos e metodologias relacionadas à ACV de biorrefinarias e elencaram seis principais problemas, dentre eles a alocação de impacto e de matéria-prima que consistem no problema de determinar quais produtos devem ter emissões alocadas (impacto), por exemplo, e como determinar o montante que deve ser alocado a cada produto. No caso de matéria-prima, de forma similar, também é complexa a determinação de quais impactos devem ser alocados nas matérias-primas utilizadas na biorrefinaria devido à diversidade de materiais. Por estes motivos, optamos por não realizar a ACV para um produto específico das rotas avaliadas, mas adotar a estratégia utilizada por Meisel e colaboradores (2019) que se baseia na análise dos processos como um todo. Uma vez que os impactos das diferentes rotas avaliadas não podem ser diretamente comparados, pois eles apresentam diferentes benefícios (geração de energia versus condicionamento de solo com captura de carbono), a estratégia adotada por Meisel et al. (2019) foi calcular os impactos de cada cenário proposto e de cenários de referência ou substitutos que tenham os mesmos benefícios. Assim, as diferenças entre os cenários propostos e respectivos cenários de referência, podem ser comparadas. Meisel et al. (2019) também investigaram a utilização do processo de HTC para valorização de lodo de ETE com aplicação no solo ou geração de energia, de forma que a utilização da mesma metodologia também permitirá a comparação dos resultados.

Nos cenários propostos Meisel et al. (2019) onde o lodo de ETE é tratado e aplicado no campo (uso agrícola) tem como benefícios: a) a disposição final do lodo de ETE, b) o rendimento das culturas onde o lodo foi aplicado como fertilizante e c) a energia excedente gerada pela planta de HTC. Para comparação, foi determinado um cenário de referência onde os mesmos benefícios são obtidos por práticas comuns: a) o lodo é incinerado, b) o rendimento das culturas é obtido pela adição de fertilizantes sintéticos e c) a energia é gerada por combustão. Assim, como ambos os cenários possuem benefícios similares, pode-se comparar seus impactos diretamente verificando se as emissões de GEE das rotas propostas é maior ou menor do que das rotas de referência. O mesmo exercício de definir cenários de referência e

comparar com o cenário proposto foi feito para as rotas com uso energético do lodo de ETE (uso energético). Por fim, os autores comparam, então, o uso agrícola e o uso energético do lodo nas rotas propostas, avaliando qual das rotas propostas apresentou maior ganho (“GHG savings”), concluindo que a o uso agrícola é mais vantajoso que o uso energético, pois apresenta um ganho maior com relação aos cenários de referência (MEISEL et al., 2019).

Para comparar o aproveitamento da palha da cana nas diferentes rotas apresentadas, além da metodologia utilizada por Meisel et al. (2019) optou-se por definir um indicador que possa representar os benefícios proporcionados pelos cenários avaliados que é a quantidade de emissões de GEE por MJ de etanol produzido ($tCO_2e MJ^{-1}$).

Para realização da ACV foi realizado um levantamento de dados de entrada e saída dos processos, eficiências de processo, eficiências de consumo e geração de energia, composição de materiais e produtos, sempre com base em dados obtidos de forma secundária, através de consulta à literatura disponível. O inventário de cada processo é apresentado no item 4.1 deste trabalho.

Na análise de impactos, os fatores de emissão de gases de efeito estufa utilizados foram os do IPCC (Painel Intergovernamental de Mudança do Clima, na sigla em inglês) (IPCC, 2006 e 2019) e, quando disponível, dados nacionais disponibilizados pelo Programa Brasileiro GHG Protocolo (PBGHG PROTOCOLO, 2022) e MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações) (MCTI, 2022), além de dados de literatura, especialmente para impacto da cadeia de produção. Para estimativa de emissões de GEE foi usado o critério de materialidade para simplificar a estimativa de emissões considerando apenas as fontes de emissão relevantes. Materialidade é um conceito que representa o efeito que erros individuais ou acumulados podem ter nos resultados do inventário de emissões, afetando, inclusive, a tomada de decisão a partir dos resultados obtidos (WRI/WBCSD, 2011). De forma quantitativa são considerados imateriais os desvios que representam até 5% das emissões contabilizadas para o escopo avaliado. Desta forma, é possível optar por excluir do inventário, fontes de emissão que sejam pouco significativas para as emissões, desde que a soma de todas as exclusões não ultrapasse o limite definido e, ainda, desde que isso não afete a tomada de decisão com base nos resultados. As emissões foram, então, calculadas a partir da equação 3, a seguir.

$$Emissão (tCO_2e) = Dado \times FE \times GWP \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

Dado = Dado de atividade. Consumo ou geração de materiais, energia e insumos.

FE = fator de emissão de GEE

GWP = Potencial de aquecimento global (Utilizado GWP 100 anos, AR5)

3.2. Descrição dos Cenários Avaliados

O primeiro e o segundo cenário considerados, se referem a práticas já usuais em usinas de cana no Brasil e, serão referidos como cenário 1 – uso da palha direto no solo e cenário 2 – uso da palha para cogeração. No cenário 1 foi considerado o uso da palha de cana-de-açúcar diretamente no solo como cobertura sem qualquer tratamento prévio. E no cenário de referência 2 foi avaliada a queima direta da palha em caldeiras, em mistura com o bagaço, para geração de eletricidade e vapor a serem usados nas próprias usinas de etanol.

A prática de deixar a palha no solo (cenário 1) já é comum nas fazendas de cana-de-açúcar no Brasil desde que se passou a substituir a técnica da queima da cana-de-açúcar anteriormente à colheita. O sistema mecanizado representa cerca de 96% das áreas cultivadas no Centro-Sul do Brasil (CONAB, 2019 *apud* FORCHEZATTO; NEVES; CARDOSO, 2020) e, assim, estima-se que, apenas na última década, de 10 a 30 Mg ha⁻¹ de palha foi depositada nos solos (Menandro et al., 2017 *apud* FORCHEZATTO; NEVES; CARDOSO, 2020). Segundo Carvalho et al. (2017, *apud* FORCHEZATTO; NEVES; CARDOSO, 2020), uma plantação de cana contém, em média, 8 a 30 toneladas de palha por hectare (base seca). Já segundo Menandro et al. (2017, *apud* FORCHEZATTO; NEVES; CARDOSO, 2020) a produção de palha seca por tonelada de cana seria de 12%, ou 120 kg de palha por tonelada de cana colhida mecanicamente e sem queima prévia. Este valor, considerando-se uma produtividade de 80 tc ha⁻¹ equivaleria a 9,6 t de palha ha⁻¹. Assim, para o cenário 1, foi considerado um valor intermediário entre os apresentados, ou seja, a deposição no solo de 15 Mg de palha ha⁻¹ (base seca) durante a colheita mecânica.

No cenário de referência 2, considerou-se o recolhimento e o uso de parte da palha para geração de eletricidade e vapor em usina de etanol. Parte da palha ainda é deixada no campo com o intuito de minimizar os impactos sobre o solo conforme recomendado no SUCRE/LNBR/CNPEM (CASTIONI et al., 2020). Porém, foi considerado que 50% da palha gerada, ou seja, 7,5 Mg de palha ha⁻¹, são colhidos por meio de colheita integral, isto é, o corte e transporte da cana juntamente com a palhada, conforme já discutido no item 2.4.1 deste trabalho. Em 2017, cerca de 54% das usinas de cana no Brasil, geraram eletricidade suficiente para exportar para o grid. Em média, são gerados 55,6 kWh de eletricidade por tonelada de cana, consumidos 22,2 kWh tc⁻¹ nas atividades da própria usina e exportados para a rede 33,4

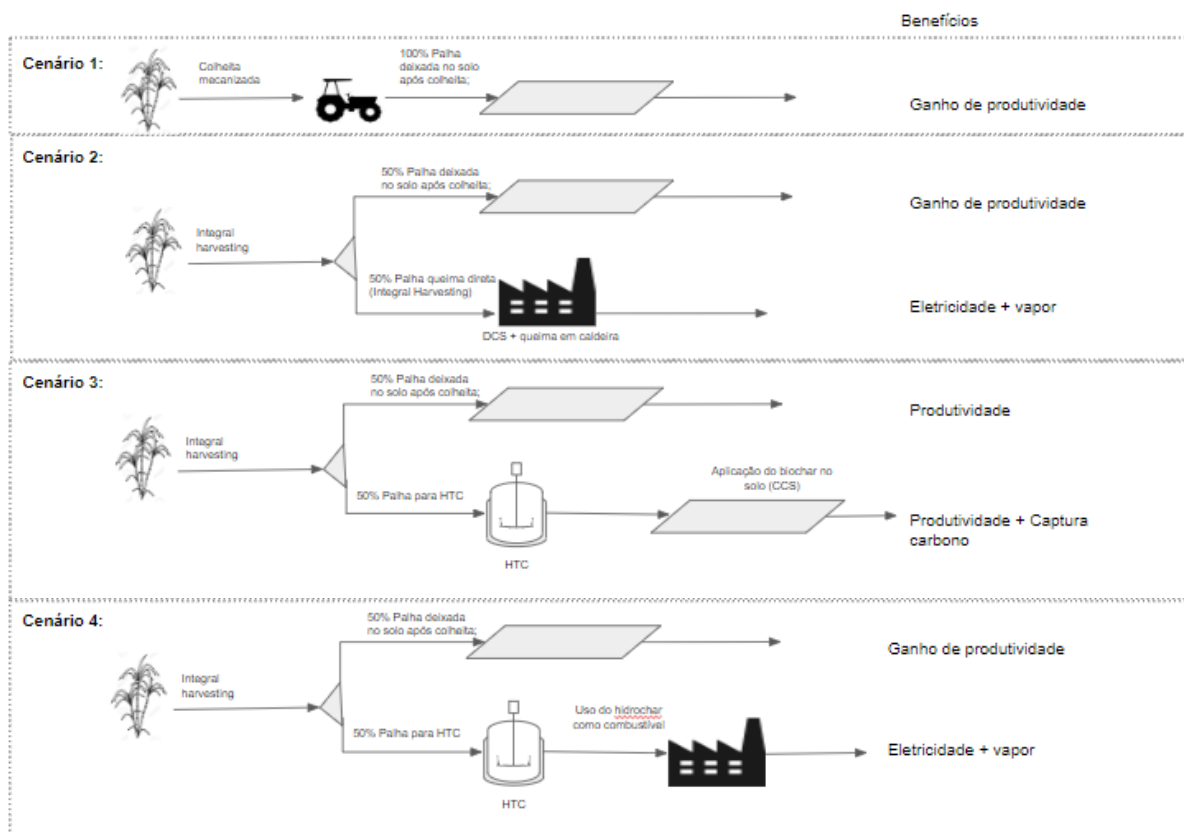
kWh tc^{-1} (UNICA, 2018 *apud* MANTELATTO et al., 2020). Assim, com o uso da palha, pretende-se aumentar a geração de eletricidade excedente da planta de etanol.

Nos cenários 3 e 4 foi avaliada a inserção do processo de carbonização hidrotérmica para tratamento da palha, mas com diferentes aplicações dos produtos. No cenário 3 avaliou-se o tratamento da palha com o HTC e utilização do hidrochar como condicionador de solo na própria plantação de cana. Este cenário é similar ao cenário 1, porém, são previstas etapas adicionais de transporte da palha até a planta de HTC na usina e depois de retorno do hidrochar até o campo para aplicação. Ainda, foi considerado o consumo de energia no próprio processo de HTC, visto que, mesmo com estratégias de recuperação de calor, o processo de HTC ainda exige energia para aquecimento e equipamentos auxiliares como o sistema para separação da palhada dos colmos (DCS – *Dry cleaning system*) e filtro prensa para desaguamento do hidrochar a 22% de umidade. No cenário 4 avaliou-se o tratamento da palha com HTC, porém com a queima do hidrochar em caldeira para geração de vapor e eletricidade. Assim, considerou-se uma etapa adicional de secagem do hidrochar até 7% de umidade para favorecer a queima.

A presença de componentes inorgânicos na biomassa leva a formação de cinzas e depósitos conhecidos como “fouling” e “slagging” podendo culminar na corrosão dos equipamentos. A palha de cana e impurezas que acabam sendo recolhidas, contém cloro, silício e potássio que, em condições de temperaturas moderadas a altas, podem ocasionar condições severas de depósito de cinzas e corrosão (Montgomery and Larsen, 2002). Atualmente, a queima da palha em caldeiras modernas ocorre, em média, em temperatura 510°C e pressão de 110 bar o que facilita a corrosão dos equipamentos. A palha da cana contém, em média, 0,2% de cloro (massa em base seca) e, nessas condições, as usinas limitam muito o uso da palha e seria muito vantajoso economicamente usá-la em maiores proporções caso se reduza a presença de agentes corrosivos. Após a lavagem a quente da palha, proposta no projeto SUCRE/LNBR/CNPEM (MANTELATTO et al., 2020), o teor de cloro na palha cai e seria possível, então, aumentar a quantidade de palha utilizada no processo de 10%, média utilizada atualmente, para cerca de 25% (base seca). Nessas condições, espera-se um aumento na geração de energia elétrica e na geração de vapor. Como o HTC ocorre em meio aquoso e altas temperaturas, é razoável considerar que o mesmo processo de lixiviação ocorra, possibilitando o uso de uma quantidade maior de palha nas caldeiras, portanto, é importante que estudos sejam realizados para verificar esta condição. No cenário 3, considerando o recolhimento de 50% da palha disponível, eficiência do sistema DCS de 40% (MANTELATTO et al., 2020), a razão

palha/bagaço utilizada na caldeira é de 64% (massa, base seca). Um diagrama resumo de todos os cenários avaliados é apresentado na Figura 15 a seguir.

Figura 15 - Diagrama dos cenários avaliados.



Fonte: Elaborado pela autora.

4. DISCUSSÃO E RESULTADOS

4.1. Inventário da ACV

Para cada etapa do ciclo de vida da produção de etanol, foram levantados os consumos de materiais, combustíveis e energia. Para comparação, os resultados dos dados do inventário foram agrupados em Atividades agrícolas, Transporte campo/usina, Produção de etanol e HTC da palha de cana, conforme adotado por Pereira et al. (2019) e apresentados ao longo dos próximos itens a seguir. Segundo os autores, as principais atividades emissoras de GEE no ciclo de vida do etanol são: uso de fertilizantes, consumo de diesel e gás natural considerando inclusive o impacto da fabricação destes insumos. Para a estimativa do inventário de entradas e saídas em cada cenário avaliado foram assumidas algumas premissas detalhadas em seguida.

4.1.1. Atividades agrícolas

4.1.1.1. Adição de nutrientes, calcário, herbicidas e pesticidas

Ao deixar a palha como cobertura vegetal no solo, estima-se a redução na necessidade de aplicação de fertilizantes, pois, o nitrogênio, potássio e outros componentes da palha podem ser incorporados novamente ao solo na decomposição do material. O mesmo ocorre com a aplicação de vinhaça e torta de filtro no solo. No caso do carbono, por exemplo, cerca de 19% e 25% do carbono adicionado como palha é incorporado ao solo arenoso e argiloso, respectivamente (CASTIONI et al., 2020). Segundo Rosseto e Dias (2005) o fornecimento de nutrientes a partir da palhada depende de fatores como a própria composição da palhada (relação C/N), o pH e teor de matéria orgânica do solo e clima local. Os autores mencionam que no caso do nitrogênio (N), embora a palhada adicione de 40 a 80 kg ha⁻¹ de N, apenas 4 a 10% dele pode ser aproveitado pela cana. Portanto, de forma conservadora, assumimos que 4% do N adicionado como palha é aproveitado. Já no caso do potássio, Dematê (2014, apud Rosseto e Dias, 2015) aponta que se pode deduzir 40 kg de K₂O para cada 10 t de palhada deixada no solo o que, considerando o teor de potássio (K) na palha de 1,25% (massa) (vide Tabela 4), corresponde a um aproveitamento de 13,28% do potássio presente na palha. Como para o fósforo (P), não foi encontrada essa relação na literatura, assumiu-se um aproveitamento similar ao do nitrogênio de 4%. Embora a redução na demanda de fertilizantes devido à adição de K, N e P por meio da palhada, não reduza as emissões por lixiviação, nitrificação ou

desnitrificação, já que a quantidade final de nutrientes adicionada ao solo foi a mesma em todos os cenários, pode-se notar um impacto nas emissões da cadeia de produção de fertilizantes.

Para o nitrogênio, no Cenário 1 (C1, onde a palha permanece no solo), considerou-se uma redução na quantidade de fertilizantes nitrogenados adicionados já que a palha contém nutrientes, em comparação ao dado de referência relatado por Pereira et al. (2019), passando de 1,23 kg de fertilizantes nitrogenados tc^{-1} (PEREIRA et al., 2019) para 1,19 kg tc^{-1} . Considerando ainda a quantidade de N já adicionada da vinhaça e da torta de filtro, respectivamente, 0,36 kg de nitrogênio (N) m^{-3} de vinhaça e 12,5 kg de N t^{-1} de torta (SEABRA, 2008), obteve-se finalmente, 0,776 kg de N tc^{-1} de fertilizantes nitrogenados adicionados, ou seja uma redução de cerca de 37% no consumo de fertilizantes nitrogenados sintéticos no C1 com relação ao relatado por Pereira et al. (2019). Já nos Cenários 2, 3 e 4 (recolhimento de 50% da palha e uso na caldeira – C2, uso da palha no HTC e hidrochar depositado no solo – C3, e HTC com hidrochar usado na caldeira – C4), como 50% da palha é recolhida, mais fertilizantes precisam ser adicionados com relação ao Cenário de base, de forma que há um aumento nas emissões de GEE da cadeia de produção de fertilizantes de cerca de 3%. Isto é, considerando toda a área de plantio de 10 mil ha, obtém-se então, uma emissão de 2.080,64 $tCO_2e\ ano^{-1}$ no C1, para 2.135,91 $tCO_2e\ ano^{-1}$ nos cenários 2 e 4 e 2.145,13 $tCO_2e\ ano^{-1}$ no C3.

Para o fósforo, no Cenário de base, considerou-se uma redução de cerca de 7% com relação ao dado de referência relatado por Pereira et al. (2019), passando de 0,14 kg de $P_2O_5\ t^{-1}$ de cana para 0,13 kg tc^{-1} . E nos Cenários 2, 3 e 4, novamente há um aumento com relação ao Cenário de base (C1), devido à retirada da palha, de forma que há um aumento nas emissões de GEE de cerca de 4% (de 224,67 $tCO_2e\ ano^{-1}$ no Cenário de base para 233,29 $tCO_2e\ ano^{-1}$ no Cenário 2).

Por fim, para o potássio, no Cenário de base, considerou-se um consumo de 0,56 kg de $K_2O\ tc^{-1}$, enquanto o dado de Pereira et al. (2019) considera 1,31 kg de $K_2O\ tc^{-1}$, ou seja, uma redução de cerca de 57%. Nos Cenário 2, 3 e 4, novamente há um aumento com relação ao Cenário de base, passando a um consumo de 0,935 kg de $K_2O\ tc^{-1}$, de forma que há um aumento nas emissões de GEE de cerca de 67% nos cenários 2, 3 e 4 com relação ao cenário 1. Vide as comparações na Tabela 9 a seguir:

A quantidade de vinhaça e torta de filtro aplicadas no solo foi obtida dividindo-se o total destes coprodutos gerados na etapa de produção de etanol pela área colhida (apresentada na Tabela 9 acima). Para determinação da quantidade de vinhaça e torta gerados foram consideradas as mesmas taxas de geração adotadas por Seabra (2008), sendo 11 l de vinhaça l^{-1} de etanol e 6 kg de torta tc^{-1} . Para demais insumos agrícolas (pesticidas, herbicidas, inseticidas

e calcário calcítico), assumiu-se que o seu uso nos cenários avaliados não é impactado pela remoção de palhada e foram considerados os mesmos valores informados no VSB e reportados por Pereira et al. (2019). Embora tenha sido apontado por alguns autores que o manejo de palha interfere no surgimento de pragas e pH do solo, os dados disponíveis não permitem inferir o impacto no uso de pesticidas, herbicidas, inseticidas e calcário (CASTIONI et al., 2020)

Tabela 9 - Inventário das Atividades Agrícolas para a ACV nos cenários avaliados e comparação com os dados de Pereira et al. (2019)

Atividade: Atividades agrícolas	Cenários: Unidades de medida	Pereira et al. (2019) (VSB)	Cenário 1 (Base)	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
N em fertilizantes sintéticos	kg tc-1	1,23E+00	7,76E-01	7,97E-01	7,94E-01	7,97E-01
P2O5 fertilizante	kg tc-1	1,40E-01	1,30E-01	1,35E-01	1,34E-01	1,35E-01
K2O fertilizante	kg tc-1	1,31E+00	5,60E-01	9,35E-01	8,73E-01	9,35E-01
Calcário calcítico (CaCO ₃)	kg tc-1	5,00E+00	5,00E+00	5,00E+00	5,00E+00	5,00E+00
Pesticidas, herbicidas e inseticidas	kg tc-1	1,67E-02	1,67E-02	1,67E-02	1,67E-02	1,67E-02
Ratoons	kg tc-1	4,41E+01	4,41E+01	4,41E+01	4,41E+01	4,41E+01
Vinhaça aplicada no solo* (Calculado)	m ³ ha-1 (100% da área)	0,00E+00	7,50E+01	7,50E+01	9,00E+01	7,50E+01
Torta de filtro aplicada no solo* (Calculado)	t (base seca) ha-1	0,00E+00	4,80E-01	4,80E-01	5,76E-01	4,80E-01
Quantidade de N adicionado torta e vinhaça* (Calculado)	kg N tc-1	0,00E+00	4,12E-01	4,12E-01	4,12E-01	4,12E-01
Diesel aplicação de torta de filtro e vinhaça*	L ha-1	0,00E+00	1,45E+00	1,45E+00	1,74E+00	1,45E+00
Diesel - Operações mecanizadas (Outros)	L tc-1	1,90E+00	2,54E+00	2,54E+00	2,12E+00	2,54E+00
Diesel - Operações mecanizadas (Colheita)	L tc-1	0,00E+00	1,84E+00	1,84E+00	1,84E+00	1,84E+00
Produtividade de cana	tc ha-1	8,00E+01	8,00E+01	8,00E+01	9,60E+01	8,00E+01
Queima de palha default	%	1,84E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cobertura vegetal (palha no solo)	t ha-1 (base seca)	0,00E+00	1,50E+01	7,50E+00	1,50E+01	7,50E+00
Quantidade de palha recolhida	t ha-1 (base seca)	0,00E+00	0,00E+00	7,50E+00	7,50E+00	7,50E+00
Impureza vegetal	%	0,00E+00	8,30E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Área colhida	ha ano-1	0,00E+00	1,00E+04	1,00E+04	1,00E+04	1,00E+04
Cana colhida (Calculado)	tc ano-1	0,00E+00	8,00E+05	8,00E+05	9,60E+05	8,00E+05

N.I. – Não informado. *No Cenário 3, o aumento de produtividade de cana implica em aumento da produção de vinhaça e torta de filtro, de modo que mais desses resíduos é aplicado no solo e aumenta-se também, o gasto de diesel na aplicação de vinhaça e torta.

Fonte: Tabela elaborada pela autora.

4.1.1.2. Diesel consumido nas operações agrícolas e colheita

O consumo de diesel nas atividades agrícolas e transporte da cana e da palha é um item fundamental para a ACV dos cenários avaliados, uma vez que as emissões do diesel nessas atividades tendem a ser significativas. Para os cenários avaliados, o consumo de diesel nas atividades agrícolas de colheita, preparo do solo e aplicação de vinhaça e torta de filtro, são mostrados na Tabela 9 já mencionada.

Quanto ao consumo de diesel nas atividades agrícolas sem o recolhimento da palha, existe grande variabilidade nos dados reportados. Pereira et al. (2019), mencionam um consumo de diesel na operação de maquinário agrícola que varia de 0,8 a 2,9 l de diesel tc^{-1} , conforme ferramenta adotada para a realização da ACV, sendo o consumo adotado pelo VSB de 1,9 l de diesel tc^{-1} . Para comparação, Seabra (2008), considera 9,1 l de diesel ha^{-1} nas operações agrícolas de cana soca e 132,3 l de diesel ha^{-1} para cana planta, o que, considerando a produtividade de 95 $tc\ ha^{-1}$ projetada por ele para 2020, equivale a 1,39 l de diesel tc^{-1} (para cana planta). Este valor é bem abaixo do informado pelo VSB para as mesmas operações (PEREIRA et al., 2019). A esse valor encontrado de Seabra (2008), deve-se adicionar o consumo da colhedora¹² (0,986 l de diesel tc^{-1}), carregadora (0,171 l de diesel tc^{-1}), reboque e transbordo da cana (0,395 l de diesel tc^{-1}) (SEABRA, 2008), chegando-se, aí sim, a um total de consumo de diesel de 2,94 l de diesel tc^{-1} , mais próximo do reportado pelo VSB (PEREIRA et al., 2019).

Já na ferramenta lançada pelo WRI (*World Resources Institute*) para cálculo de emissões do setor agrícola brasileiro (WRI; WBCSD, 2020), as emissões de consumo de diesel na cultura de cana são estimadas com base em dados de literatura que utilizam tempo de operação das máquinas (hora-máquina por hectare) para atividades de pré-implantação, implantação e manutenção do cultivo e volume de diesel consumido por tonelada de cana colhida para a atividade de colheita (litro por hectare). Com relação à colheita, o consumo utilizado pela ferramenta do WRI/WBCSD (2020), que é 1,84 l de diesel tc^{-1} (vide Tabela 10 a seguir) é mais conservador do que as demais referências. Para as demais operações mecanizadas, o total apresentado pela ferramenta do WRI é 10,17 horas-máquina ha^{-1} , o que, realizando as devidas conversões, equivale a 2,54 l de diesel tc^{-1} (considerando 20 l de diesel h^{-1} como consumo médio) (WRI; WBCSD, 2020). Este valor é bastante próximo do informado por Seabra (2008) como sendo o total de consumo nas operações e colheita e é 33,7% maior

¹² Valores reportados por Seabra (2008) para o cenário 2020.

do que o valor considerado por Pereira et al. (2019). No projeto SUCRE/LNBR/CNPEM (FORCHEZATTO; NEVES; CARDOSO, 2020), o consumo de diesel na colheita integral da cana variou de 0,88 a 1,26 l de diesel tc^{-1} a depender da velocidade de rotação do extrator. Sendo assim, para este trabalho foram adotados os valores mais conservadores, reportados pelo WRI/WBCSD (2020).

Tabela 10 - Consumos de diesel em operações com maquinário, colheita e total.

Referência	Colheita	Máquinas	Total
WRI/WBCSD, 2022	1,84 l tc^{-1}	2,54 l tc^{-1}	4,38 l tc^{-1}
Pereira et al., 2019 (VSB)	N.I.	1,90 l tc^{-1}	1,9 l tc^{-1}
Seabra, 2008	1,55 l tc^{-1}	1,39 l tc^{-1}	2,94 l tc^{-1}
SUCRE/LNBR/CNPEM*	0,88-1,26 l tc^{-1}	N.I.	0,88-1,26 l tc^{-1}

*(Forchezatto, Neves e Cardoso, 2020) N.I = Não informado. Fonte: Elaborado pela autora

4.1.1.3. Diesel consumido no transporte campo x usina

O consumo de diesel no transporte da cana até a usina e no transporte e aplicação de hidrochar no solo (Cenário 3) é informado de forma separada, na Tabela 11 a seguir, para comparação. Para a aplicação do hidrochar foi considerado o mesmo consumo médio de diesel considerado na aplicação de torta de filtro reportado por Seabra (2008), uma vez que o hidrochar pode ser aplicado diretamente no solo, de modo semelhante a torta.

Para a atividade de transporte da cana até a usina sem a palha recolhida (apenas os 5% considerados como impureza), a distância média percorrida (em km) entre a plantação de cana e a usina é o parâmetro reportado pelos autores para comparação de emissões e cenários. A taxa de consumo de diesel nessa atividade, por sua vez, depende da eficiência de consumo de combustível considerada, assim como capacidade de carga do veículo.

Tabela 11 - Consumo de diesel no transporte campo x usina nos cenários avaliados e comparação com Pereira et al. (2019)

Atividade	Cenários: Unidades de medida	Pereira et al. (2019) VSB	Cenário 1 (Base)	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Distância média de transporte da cana	km	2,73E+01	3,00E+01	3,00E+01	3,00E+01	3,00E+01
Diesel - Transporte campo/usina (Calculado)	L tc^{-1}	2,86E-01	6,28E-01	1,12E+00	1,10E+00	1,12E+00

Atividade	Cenários: Unidades de medida	Pereira et al. (2019) VSB	Cenário 1 (Base)	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Transporte campo/usina						
Diesel transporte e aplicação de hidrochar	L tc-1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,16E-00	0,00E+00

Fonte: Elaborado pela autora.

Pereira et al. (2019) reportaram distâncias que variaram de 19,3 km (GREET) a 27,3 km (VSB) mas não informaram o consumo de diesel considerado nessa etapa ou as premissas adotadas pelas ferramentas avaliadas. Seabra (2008) considerou distâncias de 20 a 30 km, considerando o uso de Treminhão/Rodotrem, com capacidade de carga de 45 a 58 tc e uma eficiência de consumo de combustível de 49 a 62 t.km l⁻¹ de diesel (valores para os cenários de 2002 e 2020, respectivamente). Desta forma, pode-se inferir que a eficiência considerada para o Rodotrem com capacidade de 58 t é de 1,07 km l⁻¹. Comparando este dado com a eficiência de consumo de combustível considerada na ferramenta do PBGHGP (Programa Brasileiro GHG Protocolo) para cálculo de inventários de emissão de GEE, cujo valor é 3,4 km l⁻¹ para caminhão pesado (PBGHG PROTOCOLO, 2022), verifica-se que o dado considerado pelo WRI/WBCSD (2020) é bem menos conservador, o que também pode se justificar por se tratar de dado genérico. No trabalho realizado por Brassolati et al. (2014), foram reportadas eficiências de consumo de combustível para Rodotrem que variam de 1,0 km l⁻¹ para transporte de cana inteira a 1,22 km l⁻¹ para transporte de cana picada. Neste trabalho adotou-se a média dos valores apresentados na literatura, considerando deste último trabalho apenas os dados do transporte de cana picada, chegando a eficiência de 1,59 km l⁻¹.

Quanto à distância, verifica-se que no projeto SUCRE/LNBR/CNPEM a distância média percorrida considerada no cenário de colheita integral foi de 35 km (FORCHEZATTO; NEVES; CARDOSO, 2020). Assim, adotou-se para este trabalho a distância de 30 km apontada por Seabra (2008) e que fica próxima das distâncias apontadas pelos demais trabalhos consultados. Nas estimativas foram considerados os trechos de ida e volta do caminhão multiplicando-se a distância por 2. De modo conservador, a eficiência de consumo e combustível foi considerada a mesma para ambos os trechos (caminhão cheio e vazio). O cálculo do consumo de diesel foi realizado então, conforme equação 4, a seguir:

$$Diesel = \frac{Q_{cana} \times Q_{palha} \times Dist}{Cap.Carga \times Ef} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

Diesel = Consumo de diesel em litros por tonelada de cana ($l\ tc^{-1}$)

Q_{cana} = Quantidade de cana colhida em tonelada por ano ($tc\ ano^{-1}$)

Q_{palha} = Quantidade de palha recolhida em tonelada por ano ($t\ ano^{-1}$)

Dist = Distância média percorrida no trajeto campo x usina (km)

Cap.Carga = Capacidade de carga do caminhão (Rodotrem) (t). Calculado com base na capacidade volumétrica do Rodotrem ($184\ m^3$) e densidade de carga que varia de $200\ kg$ quando carregado com palha a $300\ kg\ m^{-3}$ quando carregado sem palha (apenas impurezas), conforme reportado no “PalhaCalc”, ferramenta desenvolvida no âmbito do projeto SUCRE/LNBL/CNPEM (LNBR, 2022).

Ef = Eficiência de consumo de diesel do Rodotrem ($km\ l^{-1}$).

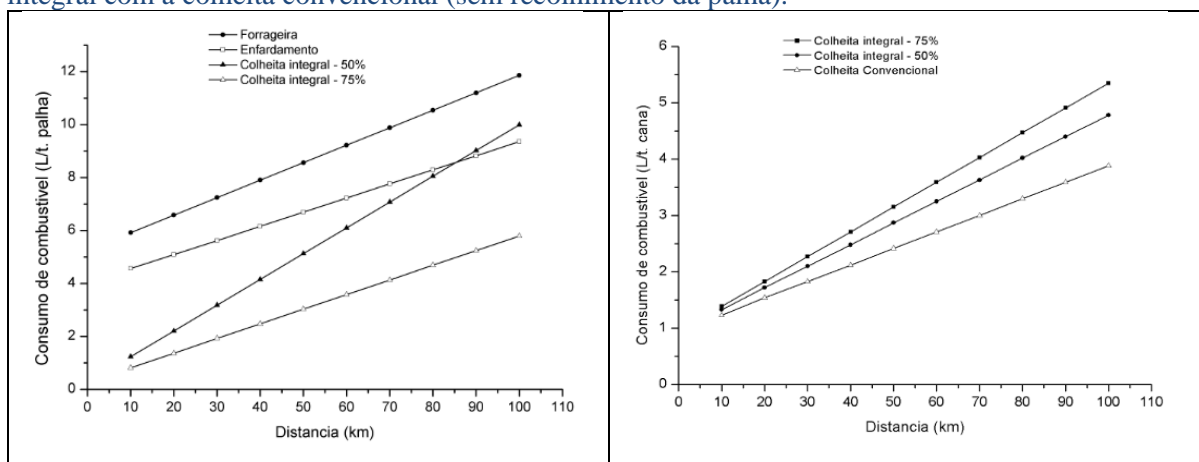
Considerando a colheita integral (recolhimento da palhada junto com a cana), espera-se um aumento no consumo de diesel nas operações da Fase Agrícola quando comparada a um cenário onde não há recolhimento da palhada devido à maior quantidade de carga a ser transportada e a menor densidade da carga quando da presença de palhada, resultando em um aumento do número de viagens (FORCHEZATTO; NEVES; CARDOSO, 2020). Segundo reportado por Forchezatto, Neves e Cardoso (2020), o aumento no consumo de combustível do cenário de colheita integral, com relação ao cenário convencional, varia de $+4,96$ a $+7,79\ l$ de diesel t^{-1} palha (base seca), quando se recolhe 2 ou 4 t de palha (base seca) ha^{-1} , respectivamente.

Carvalho (2015), avaliou diferentes rotas de recolhimento de palha de cana: a) colheita por enfardamento, b) colheita por recolhedora forrageira, c) colheita integral (colheita da palha em conjunto com a cana), todas considerando o recolhimento de 50% da palha disponível. E, para colheita integral (o item c) foi avaliado, também, o recolhimento de 75% da palha disponível. O autor concluiu então que, para raios de transporte para a usina até 80 km, considerando 50% de recolhimento de palha, a rota de recolhimento integral (colheita da palha juntamente com a cana) é a forma de transporte que apresenta menor consumo de combustível por quantidade de palha transportada, conforme podemos ver na Figura 16 a seguir.

Como podemos verificar o aumento do consumo de combustível nos cenários com colheita integral com relação ao cenário convencional (aquele onde a palha é deixada como cobertura no solo), depende da quantidade de palha recolhida. Carvalho (2015) reportou que para a distância de 30 km e recolhimento de 50% da palha disponível, há um aumento de 14,8% no consumo de diesel com relação ao cenário convencional. No cenário convencional, o consumo seria de cerca de $1,8\ l$ de diesel tc^{-1} , e no cenário com colheita integral de 50% da

palha, o consumo seria então, 2,07 l de diesel tc^{-1} . Estes valores foram mais conservadores do que os obtidos neste trabalho, considerando as premissas já relatadas: 0,628 l de diesel tc^{-1} colhida no cenário convencional (sem recolhimento de palha) e 1,12 l de diesel tc^{-1} colhida com colheita integral de 7,5 t de palha ha^{-1} (base seca). Assim, observa-se que algumas variações nas premissas resultam em grande diferença nos resultados.

Figura 16 - À esquerda: consumo de combustível em litros por tonelada de palha versus a distância de transporte até a usina para as 3 formas de recolhimento. À direita: consumo de combustível em litros por tonelada de cana colhida versus a distância de transporte até a usina, comparando-se a colheita integral com a colheita convencional (sem recolhimento da palha).



Fonte: Carvalho (2015).

4.1.1.4. Outros parâmetros

Outros parâmetros importantes para a estimativa das emissões da fase agrícola foram retirados da literatura conforme exposto a seguir. Com relação a colheita da cana de forma mecanizada versus a colheita manual, onde ocorre a queima da cana anterior a colheita, as ferramentas avaliadas por Pereira et al. (2019) consideram valores conservadores. Segundo os autores, a ferramenta GREET de 2015 considera 14% de colheita manual da cana, enquanto o BioGrace considerava 100% como *default*. No VSB o valor adotado foi de 18,4%. Já na ferramenta GHGenius, o valor default de colheita manual é 0%. Por simplificação, para este trabalho foi considerado 100% de colheita mecanizada, isto é, sem queima. Esta premissa se justifica pelo compromisso assumido pelas produtoras de cana no Estado de São Paulo de eliminar a prática de queimada. Segundo dados do Programa Etanol Mais Verde na safra 2020/2021 as áreas com queima autorizada foram 0,01 milhões de ha considerando uma área de colheita de 5,09 milhões de ha, ou seja, cerca de 0,19% (SÃO PAULO, 2021).

No trabalho de Pereira et al. (2019), utilizado como referência para comparação das emissões, não são mencionadas a área de colheita, quantidade de impureza vegetal considerada,

cobertura de palha no solo ou quantidade de cana colhida anualmente. Porém, estes dados são necessários para as estimativas. Assim, foram utilizados dados de outras referências. Para a quantidade de palha produzida, considerou-se o dado utilizado por Castioni et al. (2020) como sendo a quantidade de palha que é mantida no solo no cenário sem remoção da palhada, 15 t ha⁻¹ (base seca). A área foi determinada de modo arbitrário como sendo 10 mil ha de área de colheita, considerando-se um grande produtor. Este dado é condizente considerando-se a estimativa de área de grandes produtores em São Paulo, já demonstrada na Tabela 3 deste trabalho. A quantidade de impurezas colhidas junto com a cana foi considerada como sendo 8,3%, conforme considerado no projeto SUCRE/LNBR/CNPEM (FORCHEZATTO; NEVES; CARDOSO, 2020).

A produtividade de cana por hectare adotada para o cenário de base foi a mesma reportada por Pereira et al. (2019) para fins de comparação, 80 tc ha⁻¹. Como reportado em diversos trabalhos (AGEGNEHU; SRIVASTAVA; BIRD, 2017; KONG et al., 2014), é sabido que a aplicação de biochar ou hidrochar no solo pode acarretar aumento de produtividade em diversas culturas. Porém, como os dados reportados variam bastante a depender da cultura, do tipo de produto aplicado, das condições de aplicação e das condições edafológicas, optou-se por adotar um aumento conservador de 20% de produtividade no cenário 3 onde o hidrochar é aplicado no solo como fertilizante. Devido às incertezas, uma análise de sensibilidade desse parâmetro é apresentada a seguir no item 4.4 deste trabalho.

4.1.2. Produção de etanol e excedentes de eletricidade

Na etapa de produção foram contabilizados os insumos utilizados no processo considerando apenas a produção de etanol e cogeração de eletricidade conforme mostrados na Tabela 12 a seguir. Para ácido sulfúrico, cal, ciclohexano, ácido fosfórico, químicos inorgânicos e zeólitas, considerou-se as mesmas quantidades reportadas por Pereira et al. (2019) para fins de comparação. Isso foi feito para a produtividade de etanol a partir da cana, considerada como 85,2 l de etanol anidro tc⁻¹ Pereira et al. (2019). Segundo reportado por Forchezatto, Neves e Cardoso (2020), no cenário com colheita integral da palha junto a cana, há um decréscimo na extração de açúcar devido a maior presença de fibras, o que pode afetar a produtividade de etanol ou açúcar. Porém, como este efeito ainda não foi devidamente quantificado, optou-se por considerar a produtividade como sendo constante em todos os cenários.

Tabela 12 - Parâmetros da produção de etanol nos cenários avaliados e comparação com dados de Pereira et al. (2018).

Atividade	Cenários:	Pereira et al. (2019)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Produção de etanol	Unidades de medida	VSB	(Base)			
Ácido sulfúrico	g L-1 etanol	4,94E+00	4,94E+00	4,94E+00	4,94E+00	4,94E+00
Cal	g L-1 etanol	7,48E+00	7,48E+00	7,48E+00	7,48E+00	7,48E+00
Ciclohexano	g L-1 etanol	7,10E-01	7,10E-01	7,10E-01	7,10E-01	7,10E-01
Ácido fosfórico	g L-1 etanol	2,70E+00	2,70E+00	2,70E+00	2,70E+00	2,70E+00
Químicos inorgânicos	g L-1 etanol	4,40E-02	4,40E-02	4,40E-02	4,40E-02	4,40E-02
Zeólitas	g L-1 etanol	4,70E-02	4,70E-02	4,70E-02	4,70E-02	4,70E-02
Demanda de energia elétrica para processamento da cana, palha e etanol anidro*	kWh tc-1 (base úmida)	NI	3,00E+01	3,17E+01	3,14E+01	3,17E+01
Eletricidade excedente bagaço	kWh tc-1	NI	8,01E+01	8,01E+01	8,01E+01	8,01E+01
Eletricidade excedente da palha	kWh tc-1	0,00E+00	0,00E+00	5,11E+01	0,00E+00	0,00E+00
Eletricidade excedente do hidrochar	kWh tc-1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,06E+01
Eletricidade bruta do hidrochar	kWh tc-1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,22E+01
Produção de vinhaça	l vinhaça l-1 etanol	NI	1,10E+01	1,10E+01	1,10E+01	1,10E+01
Produção de torta de filtro	t torta (base seca) tc-1	NI	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
Produção de etanol anidro	l tc-1	8,52E+01	8,52E+01	8,52E+01	8,52E+01	8,52E+01

NI: Não informado. No trabalho de Pereira et al. (2019) não é mencionada a demanda de eletricidade ou excedentes produzidos. *A demanda de eletricidade na usina é maior nos cenários 2, 3 e 4 em comparação com o 1, pois há o tratamento da palha no DCS. Ainda, no cenário 3 tem-se uma intensidade de consumo menor que nos cenários 2 e 4, devido á maior produtividade. Fonte: Elaborado pela autora.

Quanto à demanda de energia da usina, foram encontrados os valores de 12 kWh tc⁻¹ para eletricidade consumida por equipamentos como motores elétricos, iluminação e outros, 16 kWh tc⁻¹ para acionamento de sistemas de preparo e moagem da cana, totalizando 28 kWh tc⁻¹ (FLAUSINIO, 2015). Já para energia térmica e produção apenas de etanol anidro, Flausinio (2015) considera um consumo de 500-580 kg de vapor tc⁻¹. Ensinas et al. (2007 *apud* CARVALHO, 2015) também reportou os mesmos valores para energia elétrica e mecânica. Seabra (2008) considerou que para 2020, o consumo de energia seria da ordem de 30 kWh tc⁻¹ considerando sistema de cogeração avançada, bastante próximo dos valores acima mencionados. Sampaio et al. (2020), apontaram consumo de eletricidade de 30 kWh tc⁻¹ tanto para o cenário base (colheita convencional) quanto para o cenário de colheita integral (palha +

cana), sendo que no cenário de colheita integral deve-se somar o consumo de energia do sistema de limpeza (DCS), que é 17,7 kWh t⁻¹ de palha (base seca). O consumo de vapor na planta considerada por Sampaio et al. (2020) seria de 500 kg de vapor tc⁻¹, considerando geração de açúcar e etanol (50% de cana para cada produto). Assim, neste trabalho foram considerados os valores reportados por Sampaio et al. (2020) que são mais conservadores.

Quanto ao excedente de eletricidade gerado pelas usinas, diversos fatores podem interferir neste resultado, como os produtos gerados (apenas etanol versus açúcar e etanol), pressão de operação das turbinas e eficiências do processo. Estes parâmetros podem ser avaliados através de uma simulação do processo, porém, tal simulação extrapola os objetivos deste estudo. Assim, optou-se por utilizar o valor reportado por Sampaio et al. (2020) de 80,1 kWh tc⁻¹ como sendo a eletricidade excedente produzida a partir do bagaço no cenário de base, considerando a colheita convencional da cana (sem recolhimento da palha) e cogeração em turbina de alta pressão a 65 bar e 485°C. A eficiência do sistema de cogeração foi obtida a partir dos dados de quantidade de biomassa processada e da quantidade de energia gerada conforme reportado na tabela 29 do projeto SUCRE/LNBR/CNPEM (vide equação 5, a seguir). No cenário de base onde apenas o bagaço é usado para geração de energia a eficiência da cogeração foi de 35%. Já no Cenário 2 onde há o uso da palha juntamente com o bagaço a eficiência obtida foi de 31,5% (Sampaio et al., 2020). Ambas as eficiências encontradas são maiores do que o esperado para um sistema de cogeração, que seria no máximo 30%. No entanto, tal valor se justifica, pois, os autores consideram 115 dias de operação fora da temporada de safra, quando a usina geraria apenas eletricidade, aumentando, assim, a eficiência geral do processo. A conta detalhada é apresentada no Anexo IV. As mesmas eficiências de cogeração foram adotadas nos Cenários 1 e 2 deste projeto, respectivamente.

$$Ef_{COG} = \frac{Energia_{Ger}}{Energia_B} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

Ef_{COG} = eficiência do sistema de cogeração (%)

$Energia_{Ger}$ = energia total gerada pelo sistema (GWh ano⁻¹)

$Energia_B$ = energia contida na biomassa processada (palha + bagaço) (GWh ano⁻¹)

No cenário de colheita integral (palha mais cana), a quantidade obtida de eletricidade excedente devido à queima da palha para geração de energia apresenta resultados diversos. Sampaio et al. (2020) chega a um excedente total de eletricidade (gerada do bagaço mais palha)

de 101,6 kWh tc⁻¹. Já Seabra (2008), no seu cenário 2020 com cogeração avançada (65-CEST(AT), ou, turbinas de condensação e extração a 65 bar) obtém a geração de 135,0 kWh tc⁻¹ como excedente, considerando a colheita integral de 40% de palha e queima junto com o bagaço. Ou seja, o excedente de eletricidade produzido a partir do bagaço mais a palha reportado por Seabra (2008) é 33% maior do que o valor reportado por Sampaio et al. (2020).

Partindo do valor reportado por Sampaio et al. (2020), de 101,6 kWh tc⁻¹, e subtraindo-se deste valor o excedente de eletricidade reportado no cenário de base, vemos que o incremento de eletricidade entre o cenário de base e o cenário de colheita integral foi de 21,5 kWh tc⁻¹, que é a eletricidade excedente obtida devido à utilização da palha para geração de energia. Já no trabalho reportado por Souza, Souza e Hernandez (2020), a eletricidade excedente produzida pela queima da palha com 15% de umidade seria de 0,8 MWh t⁻¹ de palha (CTC, 2015 *apud* SOUZA; SOUZA; HERNANDES, 2020) ou 75 kWh tc⁻¹, considerando-se 0,188 t de palha tc⁻¹. Assim, concluímos que o excedente obtido por Souza, Souza e Hernandez (2020), é 3,4 vezes maior, portanto, ao valor reportado por Sampaio et al. (2020).

Considerando a equação 6, a seguir, obtivemos uma geração de eletricidade excedente devido ao uso da palha de 51,1 kWh tc⁻¹. O valor obtido está 137% acima do valor reportado por Sampaio et al. (2020) e 32% abaixo do valor reportado por Souza, Souza e Hernandez (2020). Já quando avaliamos o total de eletricidade excedente (bagaço mais palha), temos que o valor obtido neste trabalho, 131 kWh tc⁻¹ (no Cenário 2), está 29% acima do valor reportado por Sampaio et al. (2020) e apenas 3% abaixo do valor reportado por Seabra (2008). Assim, conclui-se que os valores encontrados estão dentro da faixa de variação dos trabalhos utilizados como referência.

$$E_{palha} = \left(\frac{Ef_{DCS} \times LHV \times Q_{bs} \times Ef_{COG} \times Y_{PC} \times 10^3}{C_1} \right) - E_{DCS} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

E_{palha} = eletricidade excedente gerada a partir da palha (kWh tc⁻¹)

Ef_{DCS} = eficiência do sistema de limpeza a seco DCS (0,4)¹³

LHV = poder calorífico inferior da palha (MJ kg⁻¹)¹⁴

Q_{bs} = teor de sólidos da palha (1-teor de umidade, Adimensional)

C_1 = fator de conversão de MJ para MWh (3,6 MJ kWh⁻¹)

¹³ Sampaio et al. (2020)

¹⁴ Seabra (2009)

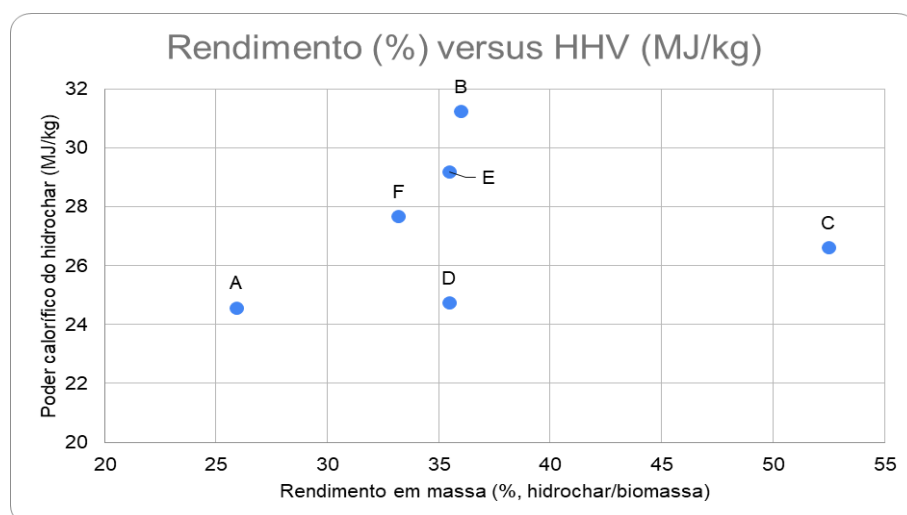
E_{fCOG} = eficiência do sistema de cogeração (vide equação 5, já mencionada)

Y_{PC} = relação entre quantidade de palha recolhida e quantidade de cana ($t \text{ palha } t^{-1} \text{ cana}$), no cenário 2 foi considerada a colheita de $0,0938 t \text{ palha } t^{-1}$.

E_{DCS} = eletricidade consumida pelo sistema DCS ($kWh t^{-1}$)

Quanto à eletricidade produzida a partir do uso do hidrochar como combustível junto ao bagaço (Cenário 4), o cálculo foi realizado com base no poder calorífico do hidrochar, eficiência do sistema de cogeração (vide equação 7, a seguir). Note que as eficiências do sistema de cogeração e sistema DCS foram consideradas as mesmas já mencionadas, pois, como o hidrochar pode ser peletizado e seco conforme necessidade do processo, assume-se que não haverá perdas de eficiência devido à sua incorporação junto ao bagaço. Esta medida é conservadora uma vez que se espera um aumento da eficiência em comparação com demais cenários, devido ao menor teor de cinzas e impurezas no hidrochar quando comparado à palha ou ao próprio bagaço. Ainda, para o Cenário 4, o melhor hidrochar para geração de energia é aquele que apresenta alto rendimento e alto poder calorífico. Assim, ao plotar um gráfico (vide Figura 17 a seguir) dessas duas variáveis para os produtos do HTC avaliados anteriormente, no item 2.5.1 deste trabalho, vemos que o produto B é o que apresenta melhor relação LHV (ou PCI – poder calorífico inferior) versus rendimento em massa de hidrochar por massa de biomassa tratada. Este produto B é o obtido por Fuertes et al. (2010) (vide Tabela 7, já apresentada), que apresentou rendimento de 36 g de hidrochar por 100g de biomassa e teores de carbono, hidrogênio e oxigênio de 67,8%, 5,3% e 16,2%, respectivamente.

Figura 17 - Gráfico do poder calorífico inferior do hidrochar versus rendimento em massa do processo de HTC.



Fonte: Elaborado pela autora com dados mencionados na tabela 7 deste trabalho.

O poder calorífico inferior (LHV) do hidrochar foi obtido a partir do poder calorífico superior (HHV) através de cálculos utilizando a equação do IPCC, Volume 2, capítulo 1 (GARG; KAZUNARI; PULLES, 2006) e representada na equação 7 a seguir:

$$LHV = HHV - 0,212H - 0,0245M - 0,008Y \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

LHV e HHV = poder calorífico inferior (LHV) e superior (HHV: 31,23 MJ kg⁻¹ de hidrochar)

H = percentual de hidrogênio (adimensional)

M = percentual de umidade (adimensional)

Y = percentual de oxigênio (adimensional)

Calculando-se então a quantidade de eletricidade gerada:

$$E_H = \left(\frac{E_{fCOG} \times LHV \times 10^3}{c_1} \right) \times Y_{Hid} \times Y_{PC} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

E_H = eletricidade gerada a partir do hidrochar (kWh tc⁻¹)

LHV = poder calorífico inferior do hidrochar (MJ kg⁻¹)

C₁ = fator de conversão de MJ para MWh

E_{fCOG} = eficiência da cogeração

Y_{Hid} = rendimento de hidrochar (t hidrochar t⁻¹ palha tratada)

Y_{PC} = relação entre quantidade de palha gerada e quantidade de cana (t palha tc⁻¹)

Desta forma, obteve-se uma geração de 92,2 kWh tc⁻¹ brutos a partir da queima do hidrochar (sem descontar eletricidade necessária para desaguar e peletizar o hidrochar, abordadas a seguir). Este valor é cerca de 15% maior do que o excedente de eletricidade produzido a partir do bagaço de cana reportado. Considerando a eletricidade consumida pelo processo de HTC (bomba, peletizador, filtro prensa e secador, sem considerar energia térmica do reator), temos um excedente de 90,6 kWh tc⁻¹ produzidos a partir do hidrochar.

4.1.3. Tratamento da palha de cana via HTC, balanços de massa e energia

Para o processo de tratamento hidrotérmico da palha de cana foi necessário utilizar dados de literatura de experimentos realizados com a palha de milho (*corn stover*). A escolha

da palha de milho se justifica pela ausência de estudos realizados com a palha de cana e pela similaridade estrutural da palha de milho com a palha de cana, conforme já discutido no item 2.5.1 deste trabalho. Os dados utilizados são apresentados na Tabela 13 a seguir.

Tabela 13 - Parâmetros do processo de HTC (apenas presente nos cenários 3 e 4).

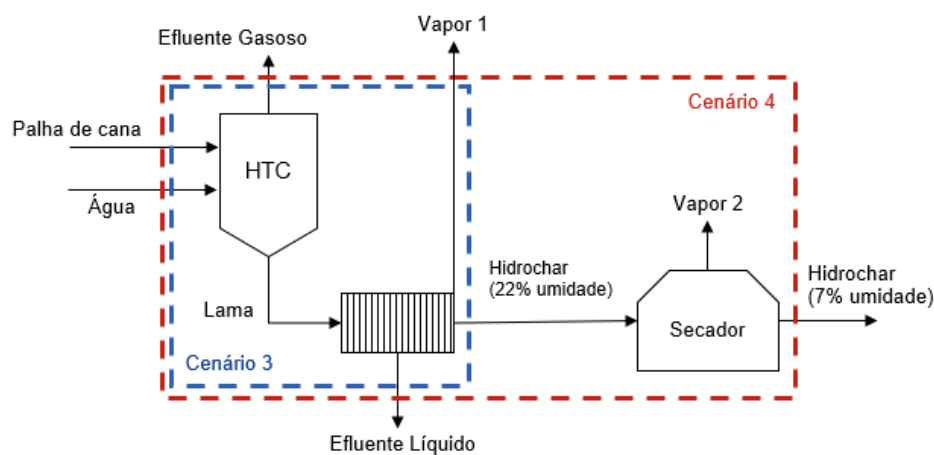
Atividade	Cenários:	Cenário 3	Cenário 4
HTC da palha de cana	Unidades de medida		
Quantidade palha usada no HTC	t palha ano-1 (base seca)	3,00E+04	3,00E+04
Quantidade de água usada no HTC (razão biomassa:água de 1:10, em massa)	t ano-1	3,00E+05	3,00E+05
Consumo de eletricidade na planta de HTC (Auxiliares)	kWh ano-1	5,93E+04	5,93E+04
Consumo de GN na planta de HTC (aquecimento)	m3 ano-1	1,54E+07	1,54E+07
Produção de efluente	t ano-1	2,83E+05	2,83E+05
Produção de gás (CO ₂ , CH ₄ e CO)	t ano-1	3,16E+04	3,16E+04
Produção de hidrochar	t ano-1 (base seca)	1,08E+04	1,08E+04
Consumo de energia do filtro prensa	MWh ano-1	5,42E+02	5,42E+02
Consumo de GN secador	m3 ano-1	0,00E+00	6,81E+04

Fonte: Elaborado pela autora.

Assim, optou-se por realizar as estimativas do processo de HTC considerando-se as condições de processo apresentadas por Fuertes et al. (2010) e as fronteiras para balanço e massa e energia conforme demonstrado na Figura 18 a seguir. Note que para o Cenário 3, onde o hidrochar é aplicado no solo, ele é desaguado mecanicamente até atingir 30% de umidade em filtro prensa nas mesmas condições de temperatura e pressão em que sai do processo e não passa pelo processo de secagem (consumo de gás natural – GN – no secador é igual a zero na Tabela 13 acima). Segundo Stemann e Ziegler (2011), o desaguamento a quente é favorecido devido a menor viscosidade da água, menor tensão superficial e densidade. Assim, ao passar pelo filtro prensa é esperado que o hidrochar contenha cerca de 30% de umidade (STEMANN; ZIEGLER, 2011) e, ao liberar a pressão do pistão após o desaguamento, ocorre a evaporação de certa quantidade de umidade resultando em um hidrochar de 22% de umidade e com temperatura de 105°C. Para este trabalho foram assumidas essas mesmas premissas e, a temperatura do vapor resultante do relaxamento de pressão após o desaguamento foi calculada de modo a equilibrar o balanço de energia. Já no Cenário 4, onde o hidrochar é usado para fins energéticos, considerou-se sua secagem até 7% de umidade e, posterior peletização para melhores condições de queima. Portanto há um consumo de gás natural no secador para o cenário 4 conforme pode ser visto na Tabela 13.

O processo de HTC se inicia com o aquecimento do meio reacional a 250°C atingindo pressão autógena de pelo menos 4 MPa, de modo a que o meio reacional permanece em condição subcrítica. O tempo de reação é de 240 minutos e, neste trabalho foi considerada a razão biomassa:água de 1:10 (em massa), conforme apontado por Fuertes et al. (2010). Sabe-se que o ideal é reduzir a quantidade de água de modo a otimizar o processo, pois quanto maior a quantidade de água de processo, maior o consumo de energia para aquecimento e desaguamento.

Figura 18 - Diagrama do processo de HTC e fronteiras do balanço de massa nos cenários 3 e 4.



Fonte: Elaborada pela autora.

Porém, é necessário avaliar essa otimização de modo a não comprometer a transferência de massa e energia¹⁵ no reator e, além disso, a água atua como meio reacional e solvente de modo que razões biomassa/água muito altas podem prejudicar a dissolução da biomassa, conforme apontado por Mosier et al. (*apud* FUERTES et al., 2010). Nas condições adotadas, o rendimento sólido (em base seca) é de 36% e o hidrochar obtido possui baixo teor de cinzas e baixo pH (pH=4,7 segundo Fuertes et al, 2010). A seguir é apresentado o balanço de massa do processo de HTC na Tabela 14.

Tabela 14 - Balanço de massa do processo de HTC da palha de cana.

Parâmetro	Unidade de medida	Cenário 3	Cenário 4
Entradas:	t/ano	330.000	330.000
(P) Palha de cana	t/ano	30.000	30.000

¹⁵ Transferência de massa é a transferência de moléculas ou espécies químicas de um meio a outro (sólido, líquido ou gasoso) e, no caso de um reator batelada com agitação, ocorre por meio de convecção forçada (misturador ou agitador). Transferência de energia é a troca de energia entre dois sistemas em temperaturas diferentes. No reator em batelada, a transferência de energia é facilitada pela agitação do meio, que é facilitada com a diminuição da razão biomassa/água.

Parâmetro	Unidade de medida	Cenário 3	Cenário 4
(A) Água	t/ano	300.000	300.000
Saídas:	t/ano	330.000	330.000
(H22) Hidrochar (22% umidade)	t/ano	12.272	
(H7) Hidrochar (7% umidade)	t/ano		11.612
(EL)Efluente líquido	t/ano	282.957	282.957
(V1) Vapor 1 (Relaxação no pistão do filtro prensa)	t/ano	3.155	3.155
(V2) Vapor 2 (Efluente do secador)	t/ano		659
(EG) Efluente gasoso do reator	t/ano	31.614	31.614

Fonte: tabela elaborada pela autora.

Para o balanço de massa do reator em batelada temos que a quantidade de massa dentro do reator é sempre constante. Assim, para obter os valores de cada corrente, consideraram-se as seguintes equações:

$$M_{in} = M_{out}$$

$$M_{PC} + M_A = M_{EG} + M_{EL} + M_{H7} + M_V$$

$$M_{PC} + M_A = M_{EG} + M_{EL} + M_{H22} + M_V \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

M_{in} e M_{out} = massas que entram e saem do reator;

M_{PC} = massa de palha de cana;

M_A = massa de água de processo;

M_{EG} e M_{EL} = massa de efluentes gasoso e líquido;

M_V = massa de vapor;

M_{H7} = massa de hidrochar com 7% de umidade;

M_{H22} = massa de hidrochar com 22% de umidade;

Em ambos os cenários 3 e 4 a quantidade de efluente líquido produzido representa cerca de 85,7% da massa inicial no reator. Assim, fica evidente que, conforme já mencionado por outros autores, é preciso haver reciclo e reutilização do efluente gerado de modo a minimizar a quantidade de efluente a ser tratada para disposição (FREGOLENTE et al., 2019). Embora a quantificação dessas estratégias para otimização do processo esteja além do objetivo deste trabalho, vale mencionar que a recirculação do efluente pode ainda reduzir o consumo energético do processo de HTC (LUCIAN; FIORI, 2017). Alguns estudos exploram também a

utilização do efluente do HTC em processos de biodigestão para geração de metano a ser usado como combustível (HEIDARI et al., 2020; WEBER; STADLBAUER, 2017).

No Cenário 4 uma etapa adicional de secagem térmica é necessária para levar o hidrochar a 7% de umidade, tornando-o melhor para uso energético. Neste estudo não foram considerados os tratamentos ou utilização dos efluentes líquido e gasoso (basicamente CO, CO₂ e CH₄) (MACHADO et al., 2018), assim como a remoção de nutrientes do efluente de processo como fósforo e potássio. No entanto tais iniciativas podem contribuir para a viabilização de uma planta industrial. A presença de CO₂ e CH₄ no efluente gasoso foram consideradas no balanço de emissões de gases de efeito estufa.

Quanto ao consumo energético do processo de HTC, utilizamos os dados fornecidos por Zhao et al. (2014) para estimativa do consumo de energia elétrica do filtro prensa e de gás natural do secador. Para o consumo de energia elétrica de equipamentos auxiliares (bomba e peletizador), foi utilizado o dado de potência informado por Lucian e Fiori (2017), conforme Tabela 15 a seguir, e considerou-se 1 hora de operação de cada equipamento por batelada. Considerou-se ainda que nenhum ligante é necessário para a peletização do hidrochar que já possui excelentes propriedades ligantes (FELIX; FARTHING; HOEKMAN, 2014).

Tabela 15 - Consumo de energia dos equipamentos auxiliares do processo de HTC.

Equipamento	Energia	Unidade de medida
Bomba ¹	318.600	kJ/batelada
Peletizador ¹	205.920	kJ/batelada
Filtro prensa ²	6,90	kJ/kg água removida
Secador (Gás natural) ²	3.802,72	kJ/kg água evaporada

Fonte: tabela elaborada pela autora com base em dados de ¹Lucian e Fiori (2017) e ²Zhao et al. (2014).

Além disso, para cálculo do consumo de energia dos equipamentos foi necessário calcular o número de bateladas por ano. Considerando que o reator pode operar 22 dias úteis por mês, 8 horas por dia e considerando o tempo de reação de 4 horas mais um *downtime* de cerca de 30% (inclusas paradas para manutenção, enchimento e esvaziamento do reator), chegamos à conclusão de que é possível realizar 407 bateladas por ano para processar as 330 mil toneladas de material (água e biomassa) por ano. Dividindo-se o total de material pela quantidade de bateladas, concluiu-se que seria necessário um reator com capacidade de processar 811 t por batelada. Considerando-se um *overhead* de 10% e a densidade da mistura similar à da água a 25°C (0,997 t m⁻³), chega-se a um reator de 893 m³. Como estes equipamentos usualmente possuem tamanhos padrão, optou-se por adotar o volume de 900 m³ para o reator.

Segundo Heidari et al. (2019) poucos estudam exploraram a transferência de calor durante o processo de HTC e quando realizado, simplificações são realizadas devido à dificuldade de se determinar os “...mecanismos dentro do reator durante o processo...”, assim como a variação das propriedades como densidade, porosidade e permeabilidade da biomassa. Em um trabalho posterior Heidari et al. (2021) realizam um estudo detalhado da transferência de calor no processo de HTC utilizando o software COMSOL e conseguem determinar um modelo conforme discutido no item 2.5.2 deste trabalho. No entanto, como o estudo detalhado da transferência de calor do processo ultrapassa os objetivos deste estudo, optou-se por adotar a simplificação explicada a seguir.

Para estimar o consumo de energia térmica no reator de HTC, foram consideradas duas etapas distintas: aquecimento do reator e reação. Conforme vimos no trabalho de Heidari et al. (2021), já abordado no item 2.5.2 deste trabalho (vide Figura 14), no início do processo tem-se um consumo de energia acentuado, porém constante, até que se atinge a temperatura de reação, no caso, de 220°C. A partir de 150°C a formação de hidrochar já ocorre, porém, quanto maior a temperatura, maior a dissolução dos componentes da biomassa e a ocorrência de reações de condensação que resultam em um hidrochar com menores razões O/C e H/C (melhor carbonização) (WANG et al., 2018). Sabe-se ainda que as reações iniciais, como a hidrólise, são endotérmicas, mas a temperaturas maiores, reações exotérmicas dominam liberando energia para o meio reacional, de modo que o HTC é descrito como um processo exotérmico de modo geral (HEIDARI et al., 2021). Por isso, na segunda etapa, de reação, o calor da reação deve ser considerado, pois, ele contribui para o aquecimento do sistema.

Assim, a quantidade de energia requerida para a etapa de aquecimento pode ser aproximada por meio da equação 10, a seguir, desconsiderando-se o calor de reação.

$$Q_1 = m \times cv \times \Delta T \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

Q = quantidade de energia (MJ ano⁻¹)

m = massa de água e biomassa no reator (t ano⁻¹)

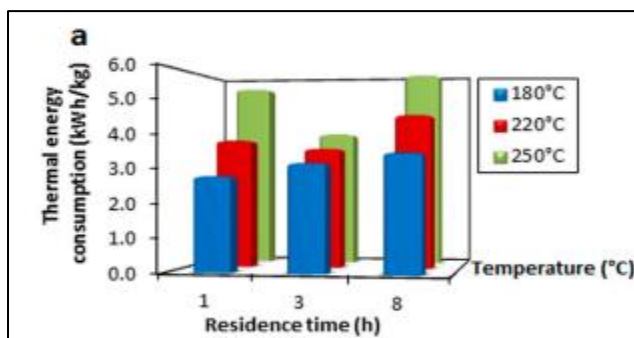
cv = capacidade calorífica a volume constante (kJ kg⁻¹K⁻¹)

ΔT = variação de Temperatura (T) (T final – T inicial, °C)

Para a segunda etapa, de reação a 250°C, optou-se por adotar os dados de consumo de energia térmica reportados por Lucian e Fiori (2017) a partir de estudos experimentais em planta piloto com resíduo orgânico (“composto fora de especificação”, como denominado pelos

autores). Em condições de 250°C e 3h de tempo de reação, os autores obtiveram um consumo de energia térmica no reator, de 4 kWh kg⁻¹ de hidrochar produzido (vide Figura 19 a seguir). Este valor já considera o calor de reação que, segundo os autores é -500 J g⁻¹ de biomassa seca (exotérmica) e uma razão biomassa:água de, aproximadamente, 1:14. Assim, considerando o rendimento em hidrochar de 59% informado pelos autores, é possível concluir que houve um consumo de 2,36 kWh kg⁻¹ biomassa seca processada.

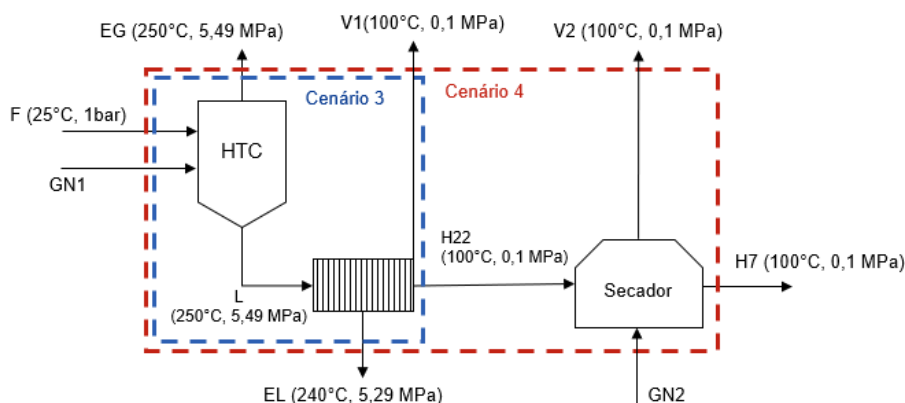
Figura 19 - Consumo específico de energia térmica no processo de HTC com composto fora de especificação.



Fonte: Lucian e Fiori (2017).

Desta forma, obteve-se um consumo de 10,36 MJ kg⁻¹ de palha de cana processada (base seca) na fase de aquecimento, e 8,49 MJ kg⁻¹ de palha de cana processada (base seca) na etapa de reação. Assim, tanto no Cenário 3 como no Cenário 4 o consumo de gás natural para aquecimento do reator seria de cerca de 512 m³ de gás natural por tonelada de biomassa no reator de HTC (base seca). A escolha do gás natural como fonte de energia, se deu para simplificação, porém, outros combustíveis podem ser avaliados futuramente, como, por exemplo, o biogás. A seguir, na Figura 20, as condições consideradas no balanço de energia.

Figura 20 - Diagrama do processo demonstrando o balanço de energia



Elaborado pela autora.

Em um reator em batelada o balanço de energia pode ser resumido pela equação 11 a seguir.

$$\Delta E = \Delta U + \Delta K + \Delta P = Q + W \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

ΔE = variação de energia do sistema

ΔU = variação de energia interna

ΔK = variação de energia cinética

ΔP = variação de energia potencial

Q = transferência de calor do ou para o sistema

W = trabalho realizado no sistema ou pelo sistema

Como o sistema é fechado não temos nenhum fluxo de entrada ou saída (trabalho de fluxo é nulo). Considerando-se que o sistema está em repouso, a energia cinética é nula, assim como a energia potencial (centro de gravidade não se altera). Por fim, temos que o volume do sistema é fixo (reator), portanto o trabalho mecânico também é nulo. Por simplificação, uma vez que o meio reacional está a altas temperaturas e, portanto, possui baixa viscosidade podemos desconsiderar também o trabalho de eixo (trabalho realizado pelo misturador). A energia interna do sistema pode ser definida como $\Delta H - \Delta(PV)$ (HIMMELBLAU; RIGGS, 2012). Assim, a equação se resume a:

$$\Delta H - V\Delta P = Q \quad \text{Equação 12}$$

Desta forma, é possível relacionar o calor transferido à entalpia de seus componentes e a variação de pressão (o volume é fixo). Como mencionado anteriormente, a energia térmica fornecida ao sistema foi estimada com base no trabalho experimental de Lucian e Fiori (2017). Assim, foi utilizada a entalpia da água, do vapor e a energia contida na biomassa e produtos (LHV), nas diferentes condições de temperatura e pressão do processo para realizar o balanço de energia apresentado na Tabela 16 a seguir. Podemos verificar que a energia obtida com o hidrochar ($3,87 \cdot 10^5$ e $3,66 \cdot 10^5$ GJ ano⁻¹, nos cenários 3 e 4 respectivamente) é menor que a energia necessária para operar o processo utilizando gás natural ($5,66 \cdot 10^5$ e $5,68 \cdot 10^5$ GJ ano⁻¹, nos cenários 3 e 4 respectivamente). Contudo, vale ressaltar que estratégias podem ser utilizadas para melhorar a eficiência energética do processo de HTC como o reciclo dos

efluentes do processo para pré-aquecimento das correntes de entrada e secagem térmica do hidrochar (cenário 4). Utilizando esse tipo de estratégia, Stemann e Ziegler (2011) chegaram à conclusão de que a energia externa necessária para o processo é apenas 4% da energia contida no hidrochar. Porém, os autores consideram uma razão biomassa/água seis vezes maior do que a considerada neste estudo, o que afeta consideravelmente o consumo de energia do processo uma vez que a quantidade de água a ser aquecida é significativamente menor.

O aproveitamento de efluentes do processo da indústria de etanol já em temperatura mais elevada, como a vinhaça, também pode contribuir para redução da energia externa requerida no processo de HTC (BENTO et al., 2021; DOS SANTOS et al., 2022) e mesmo a geração de biogás a partir do tratamento do efluente do HTC conforme abordado em outros trabalhos após a realização do HTC com lodo de ETE (MEISEL et al., 2019).

Tabela 16 - Balanço de energia do processo de HTC dos cenários 3 e 4.

Parâmetro	Unidade de medida	Cenário 3	Cenário 4
Entradas:	GJ/ano	1,08E+06	1,08E+06
(F) Feed (Palha de cana + Água)	GJ/ano	5,13E+05	5,13E+05
(GN1) Gás Natural Reator	GJ/ano	5,66E+05	5,66E+05
(GN2) Gás Natural Secador	GJ/ano	-	2,51E+03
Saídas:	GJ/ano	1,08E+06	1,08E+06
(H22) Hidrochar (22% umidade)	GJ/ano	3,87E+05	0,00E+00
(H7) Hidrochar (7% umidade)	GJ/ano	0,00E+00	3,66E+05
(V1) Vapor, 100°C e 0,1 MPa	GJ/ano	7,12E+03	7,12E+03
(EL) Efluente líquido, 240°C	GJ/ano	2,95E+05	2,95E+05
(V2) Vapor, 100°C e 0,1 Mpa	GJ/ano	0,00E+00	1,49E+03
(EG) Efluente gasoso, 250°C	GJ/ano	8,85E+04	8,85E+04
Perdas (Diferença entre Entradas e Saídas)	GJ/ano	3,01E+05	3,23E+05

Fonte: elaborado pela autora.

Ao avaliar o balanço de energia verificamos uma perda de 28% e 30% nos cenários 3 e 4 respectivamente. Essa diferença pode-se atribuir, em parte, às estimativas e aproximações realizadas, porém, em outros trabalhos foram reportadas perdas de energia de cerca de 40% (LUCIAN; FIORI, 2017). Podemos concluir, portanto, que o valor encontrado é compatível com o reportado na literatura. Quanto à pressão de operação do reator, esta deve ser sempre acima da pressão de saturação da água para a temperatura de reação, de modo a que o meio reacional permanece predominantemente na fase líquida. A água em condições subcríticas, de alta temperatura e pressão, se torna um excelente solvente com uma constante dielétrica similar à do etanol - um solvente orgânico bastante comum. Sua viscosidade cai drasticamente facilitando as transferências de massa e seu produto iônico aumenta, fazendo com que a água

aja como catalisadora de reações de hidrólise e decomposição de compostos orgânicos (MACHADO et al., 2018). A 250°C a pressão de saturação da água é 4 MPa. Considerando que há geração de gás dentro do reator ainda que pequena, espera-se que haja um aumento da pressão proporcional à quantidade de gás gerado. Assim, para este trabalho calculou-se uma sobrepressão de 14,88 bar, a partir dos dados reportados por Lucian e Fiori (2017) que utilizaram 10 bar de sobre pressão para temperatura de 220°C e 23 bar. Como a quantidade de gás gerado está diretamente relacionada à temperatura (MACHADO et al., 2018), foi possível, então, calcular a sobrepressão utilizando a equação 13, abaixo:

$$OP(250^{\circ}C) = OP(220^{\circ}C) \times \left(\frac{M_{gás,250^{\circ}C}}{M_{gás,220^{\circ}C}} \right) \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

$OP(250^{\circ}C)$ = sobrepressão (*overpressure*) a 250°C, (bar)

$OP(220^{\circ}C)$ = sobrepressão (*overpressure*) a 220°C, (bar)

$M_{gás, 250^{\circ}C}$ = massa de gás gerado dentro do reator a 250°C (g)

$M_{gás, 220^{\circ}C}$ = massa de gás gerado dentro do reator a 220°C (g)

Quanto à eficiência térmica do processo de HTC, obteve-se 68% de eficiência térmica no cenário 3 e 64% de eficiência térmica no cenário 4. Conforme esperado, a necessidade de secagem adicional do hidrochar no cenário 4 contribui para uma pequena perda de eficiência no processo quando comparado ao cenário 3. As eficiências foram calculadas conforme reportado por Lucian e Fiori (2017) (vide formula 14 abaixo), calculando-se a razão entre a quantidade de energia contida no hidrochar utilizando o poder calorífico superior (HHV) e a quantidade de energia térmica requerida pela planta ($Energia_{ETP}$). As eficiências obtidas neste estudo foram cerca de 10% mais baixas do que o reportado por Stiemann e Ziegler (2011), o que se justifica pelas diversas estratégias para recuperação de calor adotada pelos autores e que, por simplificação, não foram tratadas neste trabalho como a recirculação da água de processo e aproveitamento dos vapores gerados para pré-aquecer as correntes de entrada. Contudo, para o sucesso de um processo em escala industrial, medidas como as mencionadas para reduzir o consumo externo de energia, assim como a otimização da razão água:biomassa, que também afeta o consumo de energia, devem obrigatoriamente ser consideradas.

$$Eficiência\ térmica = \frac{Energia_{Hidrochar,HHV}}{Energia_{ETP}} \quad \text{Equação 14}$$

Embora reações exotérmicas e endotérmicas ocorram dentro do reator, os dados sobre calor de reação variam bastante. Stemann e Ziegler (2011), obtiveram o calor de reação de *poplar wood* de modo experimental (210°C, 4h de reação e razão biomassa:água de 1:7) e obtiveram um valor de -500 kJ/kg (reação exotérmica), com uma incerteza de 30%. Já Heidari et al. (2021) reporta um valor de -2223 kJ/kg trabalhando com *pinewood* (220°C, 1h de reação e razão biomassa:água de 1:5). Assim, podemos concluir que o estudo experimental com a biomassa avaliada é fundamental para determinar o consumo energético do processo de forma precisa levando-se em consideração o calor de reação e toda a complexidade das reações envolvidas

4.2. Considerações sobre fatores de emissão e remoção

Segundo Pereira et al. (2019), que avaliaram diferentes ferramentas para ACV do etanol, os fatores de emissões do ciclo de vida do diesel podem variar de 81,6 a 116,4 gCO₂e MJ⁻¹ de combustível utilizado (considerando produção e combustão do diesel). No VSB, que utilizou dados da base de dados Ecoinvent v.2.2, segundo mencionado pelos autores, a combustão do diesel representou 55% do impacto associado a esse combustível, sendo, portanto, os demais 45% referentes à produção do diesel. Esse dado difere significativamente de outras referências como o GHGenius, também mencionado pelos autores, onde 75% do impacto do diesel está associado a sua combustão (uso direto). Ainda, em Seabra (2008), o uso direto do diesel representa 84% das emissões (20,20 gC MJ⁻¹), enquanto as emissões da produção, considerando extração, transporte e processamento do diesel representam apenas 16% do impacto total do diesel (3,87 gC MJ⁻¹). Neste trabalho, para a emissão da combustão do diesel puro, foi adotado o valor informado no IPCC Guidelines (2006) e, para obter o fator da cadeia de produção do diesel, subtraiu-se este valor do fator de emissão apontado pelo VSB, que já engloba cadeia de produção mais combustão do diesel (PEREIRA et al., 2019).

Todos os fatores de emissão, remoção e de conversão utilizados são apresentados no Anexo II deste trabalho. Em geral foram utilizados fatores de emissão do IPCC (2006) e quando aplicável, atualizações o IPCC (2019). Também foram empregados dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2021)¹⁶ e da ferramenta do Programa Brasileiro GHG Protocol versão 2022.0.1 (PBGHG PROTOCOLO, 2022). Para o cálculo dos créditos referentes a energia excedente gerada foram utilizados fatores de projetos de MDL (Mecanismo de

¹⁶ Poder calorífico e densidade dos combustíveis são valores que não costumam ser atualizados de um ano para o outro.

Desenvolvimento Limpo) de acordo com a metodologia AM Tool 07 versão 07.0 (UNFCCC, 2018). Desta forma, assume-se que a eletricidade produzida na usina de etanol está deslocando a eletricidade que é produzida pelo SIN considerando-se a energia produzida pelas usinas em operação (margem de operação) e, também, considerando-se as últimas usinas construídas (margem de construção) (MCTI, 2022). Também foi contabilizado o crédito referente à substituição da gasolina pelo etanol produzido em cada cenário, considerando-se que cada litro de etanol substitui 0,7 litros de gasolina (PBGHGP PROTOCOLO, 2022). Este último foi estimado apenas para conhecimento, visto que a ACV realizada é *cradle-to-gate* e, portanto o uso do combustível não é considerado. Ainda, foram consideradas as composições dos combustíveis nacionais (média anual) de 27% de etanol na gasolina e 11% de biodiesel no diesel (PBGHG PROTOCOLO, 2022).

Para estimativa da remoção de carbono através da incorporação do hidrochar ao solo no cenário 3, considerou-se uma perda de 6% do carbono contido no hidrochar, conforme já detalhado no item 2.7 deste trabalho (KUZYAKOV; BOGOMOLOVA; GLASER, 2014). Os autores avaliaram durante 8,5 anos a decomposição do carbono oriundo do biochar no solo em condições controladas e concluíram que nos primeiros três anos há uma decomposição mais acentuada, estabilizando-se a uma taxa de 0,0007% de C ao dia (KUZYAKOV; BOGOMOLOVA; GLASER, 2014). Desta forma estimamos a perda de carbono de forma conservadora, ressaltando que essa característica é afetada pela qualidade do hidrochar (carbonização ou razão H/C e O/C, umidade, basicamente).

4.3. Avaliação das emissões e remoções de GEE e indicadores

As emissões de GEE obtidas em cada cenário é resumida na Tabela 17 a seguir, onde também são comparados aos resultados reportados por Pereira et al. (2019). As emissões são apresentadas por macro etapa: atividades agrícolas, transporte campo x usina, produção de etanol e processo de HTC. Também foi calculado o crédito referente ao excedente de eletricidade produzido e este valor é considerado no cálculo das emissões líquidas para comparação com os resultados do GHGenius que também consideram este crédito. Por fim, é apresentada a emissão sem considerar o crédito de eletricidade. Em cinza claro, na intersecção entre cada cenário (colunas) e os resultados de cada ferramenta avaliada por Pereira et al. (2019) (linhas), GHGenius, GREET, BioGrace e VSB, é apresentada a diferença entre as emissões obtidas neste estudo e os valores reportados pelas ferramentas. Por exemplo, podemos ver que no Cenário 1, as emissões devido às atividades agrícolas (16,69 gCO_{2e} MJ⁻¹ de etanol)

foram 43% menores que as emissões reportadas no GHGenius (29,01 gCO₂e MJ⁻¹ de etanol) e 36% maiores do que as reportadas no GREET (12,3 gCO₂e MJ⁻¹ de etanol).

Tabela 17 - Resultados de emissões de GEE dos cenários avaliados e comparação com dados reportados por Pereira et al. (2019)*.

Atividades	Unidade de medida	*Pereira	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Atividades agrícolas total	gCO ₂ e/MJ etanol		16,69	14,96	14,08	14,96
GHGenius	gCO ₂ e/MJ etanol	29,1	-43%	-49%	-52%	-49%
GREET	gCO ₂ e/MJ etanol	12,3	36%	22%	14%	22%
BioGrace	gCO ₂ e/MJ etanol	13,6	23%	10%	4%	10%
VSB	gCO ₂ e/MJ etanol	14,7	14%	2%	-4%	2%
Transporte campo x usina	gCO ₂ e/MJ etanol		0,86	1,53	4,47	1,53
GHGenius	gCO ₂ e/MJ etanol	2,3	-63%	-33%	94%	-33%
GREET	gCO ₂ e/MJ etanol	1,1	-22%	39%	306%	39%
BioGrace	gCO ₂ e/MJ etanol	1	-14%	53%	347%	53%
VSB	gCO ₂ e/MJ etanol	1,1	-22%	39%	306%	39%
Produção de etanol	gCO ₂ e/MJ etanol		3,69	5,19	3,69	3,81
GHGenius	gCO ₂ e/MJ etanol	5,8	-36%	-10%	-36%	-34%
GREET	gCO ₂ e/MJ etanol	2,3	60%	126%	60%	66%
BioGrace	gCO ₂ e/MJ etanol	0,9	310%	477%	310%	323%
VSB	gCO ₂ e/MJ etanol	0,7	427%	642%	427%	444%
Créditos (Eletricidade)	gCO ₂ e/MJ etanol		(13,73)	(26,59)	(13,73)	(29,26)
GHGenius	gCO ₂ e/MJ etanol	-4,3	219%	518%	219%	580%
GREET	gCO ₂ e/MJ etanol	0				
BioGrace	gCO ₂ e/MJ etanol	0				
VSB	gCO ₂ e/MJ etanol	0				
Impacto líquido (com crédito da eletricidade)	gCO ₂ e/MJ etanol		7,51	(4,91)	8,50	(8,96)
GHGenius	gCO ₂ e/MJ etanol	32,9	-77%	-115%	-74%	-127%
GREET	gCO ₂ e/MJ etanol	15,7	-52%	-131%	-46%	-157%
BioGrace	gCO ₂ e/MJ etanol	15,5	-52%	-132%	-45%	-158%
VSB	gCO ₂ e/MJ etanol	16,5	-54%	-130%	-48%	-154%
Impacto (sem créditos)	gCO ₂ e/MJ etanol		21,24	21,68	55,56	60,39
GHGenius	gCO ₂ e/MJ etanol	37,2	-43%	-42%	49%	62%
GREET	gCO ₂ e/MJ etanol	15,7	35%	38%	254%	285%
BioGrace	gCO ₂ e/MJ etanol	15,5	37%	40%	258%	290%
VSB	gCO ₂ e/MJ etanol	16,5	29%	31%	237%	266%
Processo de HTC	gCO ₂ e/MJ etanol		-	-	33,33	40,09

Fonte: Elaborado pela autora.

Com relação as emissões das atividades agrícolas, vemos que os resultados obtidos ficaram dentro da faixa apresentada pelas ferramentas de cálculo que vai de 12,3 – 29,1 gCO₂e MJ⁻¹ de etanol (PEREIRA et al., 2019), variando de 14,08 a 16,69 gCO₂e MJ⁻¹ de etanol. Este resultado é esperado uma vez que as variáveis avaliadas nos 4 cenários não afetam de forma significativa a fase agrícola. Apesar de haver redução na utilização de fertilizantes devido à maior deposição de palha (cenário 1), vinhaça e torta e, conseqüentemente, uma redução nas emissões relacionadas aos fertilizantes (cadeia de produção), há, por outro lado, um aumento de emissão devido à decomposição dessa palhada. De forma similar, há um aumento na produtividade (cenário 3) devido ao uso do hidrochar como fertilizante, porém, também há um aumento no consumo de diesel devido ao transporte desse hidrochar até o campo. Neste estudo não foram estimadas as emissões devido à mudança no uso do solo que podem ser consideradas nas ferramentas BioGrace e GHGenius (PEREIRA et al., 2019). Porém, como estas emissões dependem fortemente do modelo adotado e o objetivo deste estudo é realizar uma análise comparativa dos cenários propostos, tal exclusão não irá prejudicar a avaliação. Contudo, ressalta-se a importância de se considerar tais mudanças em estudos cujo objetivo seja determinar a pegada de carbono dos processos ou produtos de biorrefinarias, visto que LUC pode ter um efeito significativo no ciclo de vida destes produtos.

Na etapa de transporte da cana ou cana mais palha do campo até a usina, os resultados também ficaram dentro da faixa esperada pelas ferramentas de referência de 1 a 2,3 gCO₂e MJ⁻¹ de etanol (PEREIRA et al., 2019), exceto pelo cenário 1 cuja emissão foi de apenas 0,86 gCO₂e MJ⁻¹ de etanol. É esperado que o consumo de combustível no transporte campo x usina aumente nos cenários 2, 3 e 4 com relação ao cenário 1 visto que a palha passa a ser recolhida e transportada junto com a cana. Ao aumentar a quantidade de palha transportada, menor será a densidade de carga no caminhão (em kg m⁻³) (LNBR, 2022), fazendo com haja um aumento no número de viagens necessárias e, conseqüentemente, no consumo de combustível.

Para a produção do etanol utilizou-se uma produtividade fixa de 85,2 l tc⁻¹ (PEREIRA et al., 2019) que é ligeiramente menor que a utilizada por Seabra (2008), 92,3 l tc⁻¹ (cenário 2020 com cogeração avançada). Porém, espera-se que a maior presença de palhada processada junto com o bagaço afete o rendimento da extração de açúcares uma vez que o Pol do bagaço é mantido e a quantidade de fibras é aumentada, reduzindo assim a produção de etanol (LNBR, 2022). No entanto, tal efeito ainda não foi quantificado e, por isso, não é considerado neste estudo. Assim, obteve-se emissões que variaram de 3,69 (cenários 2 e 3) a 5,19 (cenário 2) gCO₂e MJ⁻¹ de etanol. Estes valores estão situados dentro da faixa encontrada nas ferramentas, 0,7-5,8 gCO₂e MJ⁻¹ de etanol (PEREIRA et al., 2019), porém mais próximos do valor superior,

sinalizando uma estimativa mais conservadora. A maior emissão no cenário 2, com relação aos demais, se deve à queima da palha em caldeira junto com o bagaço (cerca de 29% das emissões da etapa de produção de etanol no cenário 2). No cenário 4, onde há queima do hidrochar para geração e energia, também se nota um pequeno aumento na emissão, porém, menos significativo já que tanto o fator de emissão quanto a quantidade de material queimado é menor que no cenário 2.

Quanto à atribuição de créditos aos coprodutos gerados na produção de etanol, optou-se por considerar apenas aqueles referentes à eletricidade excedente gerada a partir do bagaço (todos os cenários), palha (cenário 2) e hidrochar (cenário 4), aplicando-se o fator de projetos de MDL, já detalhado no item 4.2 deste trabalho. No entanto, nota-se que o crédito atribuído pela ferramenta GHGenius, $-4,3 \text{ gCO}_2\text{e MJ}^{-1}$ de etanol (PEREIRA et al., 2019), é bastante discrepante daqueles obtidos nos cenários avaliados, que variaram de $-29,26$ a $-13,73 \text{ gCO}_2\text{e MJ}^{-1}$ de etanol. Assim, o impacto líquido (com créditos), também é bastante discrepante dos resultados apresentados por Pereira et al. (2019). Já o resultado bruto (sem créditos), nos cenários 1 e 2 (sem o HTC) ficaram dentro da faixa apresentada pelas ferramentas de $15,5$ a $37,2 \text{ gCO}_2\text{e MJ}^{-1}$ de etanol (PEREIRA et al., 2019).

Avaliando-se o impacto bruto, ainda na Tabela 17, já exibida, pode-se notar que o cenário 3 (produção de hidrochar para uso no solo) apresenta impacto (em emissão de CO_2e por MJ de etanol) cerca de 3 vezes maior que as emissões dos cenários 1 e 2. Da mesma forma, o cenário 4 (uso do hidrochar para gerar energia) apresenta emissões cerca de 3 vezes maior que os cenários 1 e 2. Corroborando mais uma vez a afirmação de que o processo de HTC deve ser otimizado a fim de que seja favorável do ponto de vista energético e de impactos ambientais.

No cenário 3, onde há a aplicação do hidrochar no solo como fertilizante, espera-se que haja também uma captura de carbono devido ao aumento do teor de carbono no solo. A biomassa ao passar pelo processo de HTC sofre o processo de carbonização e, o carbono lábil, é transformado através das reações químicas em moléculas com maior recalcitrância. Kuzyakov, Bogomolova e Glaser (2014), após avaliarem a permanência do biochar no solo durante 8 anos, avaliaram que as moléculas aromáticas são as mais estáveis e, portanto, biochar ou hidrochar com maior quantidade desse tipo de molécula tendem a ser mais estáveis. O que faz sentido se avaliarmos o diagrama de Van Krevelen (vide Figura 11, já apresentada neste trabalho), uma vez que quanto maior a presença de condensados aromáticos, também é menor a razão H/C e O/C. Após os 8,5 anos de avaliação os autores concluíram que apenas 6% do carbono inicial se perdia na forma de CO_2e , após o quinto ano, a taxa de decomposição era de menos de 0,3% por ano e decrescente. Desta forma, pode-se admitir que é possível realizar a

captura de carbono pela adição de hidrochar ou biochar no solo, considerando-se a qualidade dos produtos (teor de aromáticos, por exemplo) e a saturação de cada tipo de solo. Assim, considerando-se a perda de 6% de carbono e, admitindo-se que o solo ainda não se encontra saturado de carbono, estima-se uma remoção de 18.429 tCO₂e ano⁻¹ com a adição do hidrochar da palha de cana. Mesmo assim, devido a grande quantidade de energia consumida no processo de HTC, o processo como um todo emite mais GEE do que captura, considerando-se as emissões de todas as etapas (agrícola, transporte campo x usina, produção de etanol e HTC) e créditos da eletricidade excedente e captura de carbono pela adição do hidrochar ao solo. Considerando-se todas estas etapas, o resultado é uma emissão de 31,75 gCO₂e MJ⁻¹ de etanol, 43% menor do que a emissão bruta (sem considerar créditos e captura de carbono).

Por fim, realizou-se ainda uma avaliação dos cenários com HTC usando a metodologia adotada por Meisel et al. (2014) em que os cenários propostos são comparados com outros onde os mesmos benefícios são gerados por meios convencionais (cenários de referência). Assim, ainda que os cenários propostos tenham objetivos diferentes (cenário 3, uso do hidrochar como fertilizantes e cenário 4, uso do hidrochar como combustível) e, por isso, não possam ser diretamente comparados, o ganho ou a perda de eficiência proporcionados por estes cenários propostos com relação aos cenários de referência, estes sim, podem ser comparados. Assim, é possível determinar qual a melhor aplicação do hidrochar. O primeiro passo nesse caso, é definir quais os benefícios proporcionados por cada cenário proposto e qual seria o cenário de referência equivalente. Na Tabela 18, a seguir, foram elencados os benefícios gerados, exceto pela captura de carbono que pode ser proporcionada pelo uso do hidrochar no cenário 3. Tal captura também poderia ser realizada no cenário de referência através de projeto de reflorestamento, por exemplo, porém isso não alteraria o balanço de emissões avaliado aqui, apesar de impactar nos custos do cenário de referência, o que, contudo, vai além do escopo avaliado neste trabalho.

Para o cenário de referência C3, que deve proporcionar os mesmos benefícios do cenário proposto 3 (ou C3), o aumento de produtividade assumido pela adição do hidrochar no solo é equalizado através da aquisição de 16 tc ha⁻¹ externamente. Para determinar o impacto dessa aquisição, utilizou-se o indicador obtido do cenário 1, de 45 tCO₂e tc⁻¹ que já engloba a produção da cana (fase agrícola), transporte e processamento na usina. Uma vez que a quantidade de cana tratada no cenário de referência C3 é a mesma que o cenário 3, podemos assumir então que o cenário de referência C3 já proporciona a mesma quantidade de energia excedente que o cenário C3.

Tabela 18 - Benefícios gerados pelos cenários avaliados (3 e 4) e respectivos cenários de referência.

Comparação dos benefícios dos cenários avaliados e respectivos substitutos		
Uso agrícola	Cenários proposto C3	Cenário de referência C3
Benefícios	C3 - HTC da palha; hidrochar no solo	Colheita convencional e aquisição de cana para equalizar produtividade
Produtividade	Produtividade 96t/ha com uso reduzido de fertilizantes	Produtividade 80t/ha com uso convencional de fertilizantes. Aquisição de 16 tc/ha ou $1,6 \cdot 10^5$ tc ano ⁻¹ .
Disposição resíduo	Tratamento de 7,5 t palha por HTC e 7,5 t palha no solo	Disposição de 15 t de palha/ha no solo
Eletricidade excedente	Geração de excedente de 76,9 GWh/ano (Bagaço)	Geração de excedente de 76,9 GWh/ano (Bagaço)
Uso energético	Cenários proposto C4	Cenário de referência C4
Benefícios	C4 - HTC da palha; hidrochar para cogeração	Colheita integral e geração de energia adicional da palha + grid
Produtividade	Produtividade 80t/há	Produtividade 80t/ha
Disposição resíduo	Tratamento de 7,5 t palha por HTC e 7,5 t palha no solo	Tratamento de 7,5 t palha por cogeração e 7,5 t palha no solo
Eletricidade excedente	Geração de excedente de 136,55 GWh/ano (Bagaço + hidrochar)	Geração de excedente de 124,08 GWh/ano (Bagaço + palha) + 12,47 GWh/ano do grid

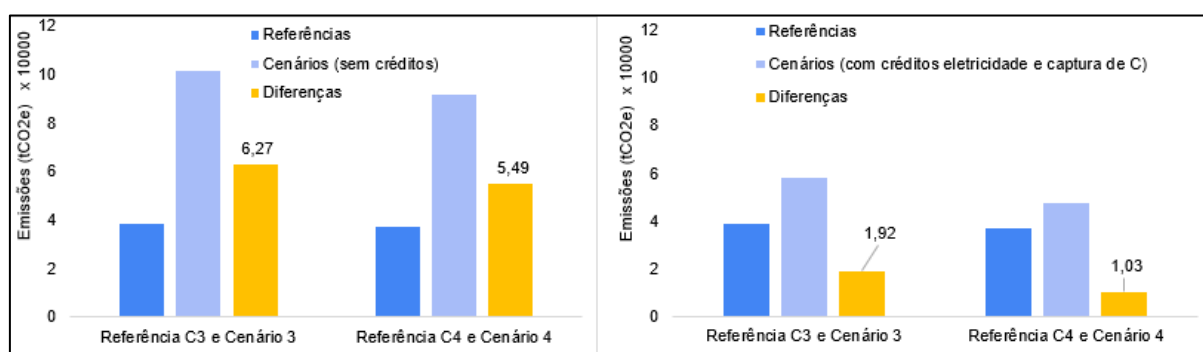
Fonte: Elaborada pela autora.

Já no cenário de referência C4, que deve corresponder aos benefícios proporcionados pelo cenário proposto C4, é necessário considerar que parte da energia excedente seria suprida pelo SIN, cerca de 12,47 GWh ano⁻¹. Isso porque, a geração de energia excedente utilizando-se apenas o bagaço e a palha é menor do que o obtido pelo uso do bagaço mais hidrochar. Ainda, cabe lembrar que não foi considerado neste estudo o impacto da redução no teor de cinzas, cloro e alcalinos na eficiência do sistema de cogeração. Como a palha possui 10 vezes mais cloro que o bagaço e 2 a 4 vezes mais enxofre, espera-se uma maior ocorrência de incrustações e corrosão quando se utiliza a palha para queima direta junto ao bagaço (MANTELATTO et al., 2020). Porém, espera-se que, como o hidrochar passa pelo processo de HTC que remove boa parte dessas impurezas, ele possa ser utilizado em caldeira com maiores pressões e, portanto, gerando mais energia do que a gerada a partir da palha e do bagaço sem tratamento prévio. No entanto, estudos adicionais seriam necessários para avaliar este impacto sobre a eficiência do sistema de cogeração.

Utilizando-se estas premissas, conseguiu-se então determinar as emissões dos cenários de referência e comparar com os cenários propostos como pode ser visto, a seguir, na Figura

21. Podemos verificar, então, pelas barras amarelas, que em ambos os cenários propostos, não houve benefício com relação aos cenários de referência, considerando-se as emissões de GEE já que a diferença foi positiva, ou seja, houve aumento de emissões no cenário proposto. Ainda, pode-se verificar que o cenário 4 é o que apresenta melhor resultado, comparando-se com o cenário 3, já que o aumento das emissões é menor. O cenário 4 apresentou um aumento de emissões com relação ao seu cenário de referência, 13% menor do que o aumento verificado no cenário 3.

Figura 21 - Avaliação comparativa entre cenários propostos (3 e 4) e cenários de referência, com e sem a inclusão de créditos de carbono devido à geração de eletricidade e captura de carbono no solo.



Fonte: Elaborado pela autora.

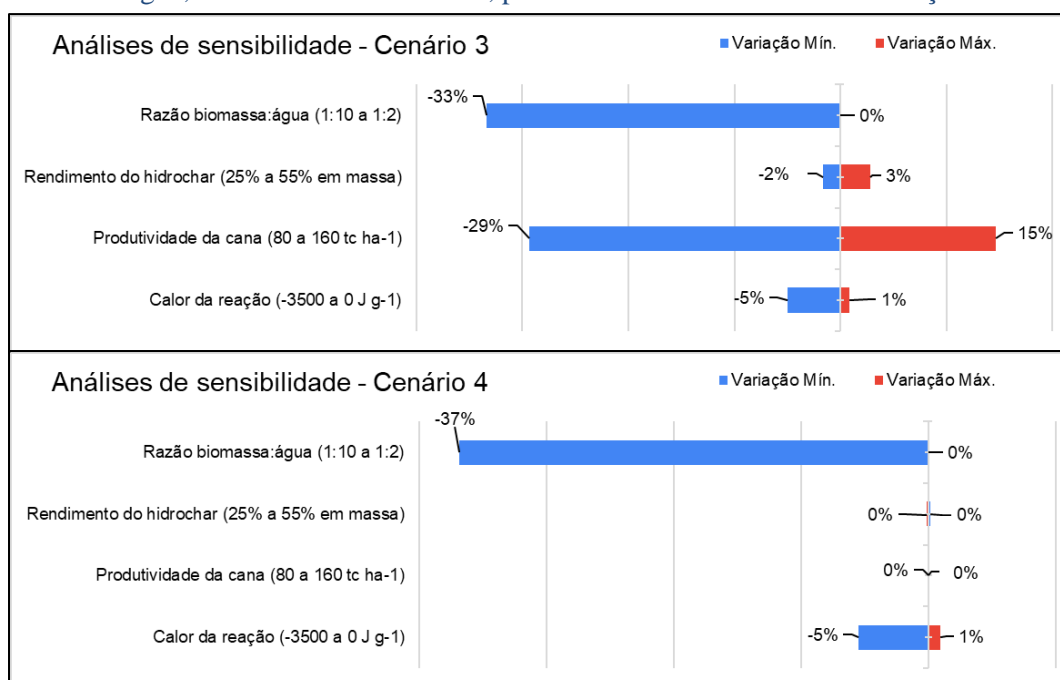
Já quando consideramos a geração de créditos devido à exportação de energia para o SIN e a captura de carbono no solo, a diferença entre os cenários 3 e 4 se acentua e o cenário 4 passa a ter um aumento de emissões com relação ao seu cenário base, 46% menor do que o aumento do cenário 3. Assim, pode-se afirmar que o uso energético do hidrochar proporciona maiores vantagens que o uso no solo. Porém, ainda assim, as emissões do cenário de referência são menores do que do cenário proposto, de modo que nesta análise, pode-se concluir que o processo de HTC não agrega benefícios do ponto de vista de emissões de GEE. Contudo, cabe ressaltar que podem ser exploradas melhorias de processo para reduzir o consumo de energia no HTC de modo a torná-lo mais vantajoso.

4.4. Análises de sensibilidade

Em todo estudo de avaliação de ciclo de vida ou análise de impactos, algumas premissas devem ser assumidas para a possibilitar a realização do estudo. Assim, é necessário realizar uma análise de sensibilidade para avaliar a confiabilidade dos resultados com relação à variação dessas premissas. Neste estudo, optou-se por avaliar: a variação do calor de reação que ocorre no HTC (S1), o aumento da produtividade devido à adição de hidrochar no solo, no cenário 3

(S2), a variação no rendimento do hidrochar (S3) e a variação da razão biomassa:água no reator de HTC (S4). Estes parâmetros foram escolhidos por apresentarem grande incerteza devido à escassez de estudos experimentais com a palha de cana e o respectivo hidrochar. Os resultados resumidos são apresentados na Figura 22, a seguir. É possível verificar que a razão biomassa:água afeta de forma significativa os resultados tanto do cenário 3 quanto do 4. E no cenário 3, a produtividade de cana também afeta fortemente o resultado.

Figura 22 - Resultados das análises de sensibilidade dos cenários 3 e 4 os parâmetros: razão biomassa:água, rendimento do hidrochar, produtividade de cana e calor de reação no HTC.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nos estudos onde foi determinado o calor de reação do processo de HTC, observou-se uma variação de -500 J g^{-1} de biomassa seca (madeira de *poplar*. Reação exotérmica e dado determinado em calorímetro, com 30% de incerteza) (STEMANN; ZIEGLER, 2011) a -3470 J g^{-1} de biomassa seca (madeira umbila - *Pterocarpus angolensis*. Reação exotérmica a 180°C por 350 min) (CUVILAS; KANTARELIS; YANG, 2015). No trabalho de Cuvillas, Kantarelis e Yang (2015) é interessante observar que o calor de reação aumenta consideravelmente com a adição de ácido ao meio reacional, de -3470 J g^{-1} de biomassa seca (com água como solvente) a -8690 J g^{-1} de biomassa seca (0,1 Molar de ácido sulfúrico - H_2SO_4 , como solvente). Assim, avaliou-se a variação do calor de reação de 0 a -3500 J g^{-1} de biomassa seca (vide Tabela 19 abaixo).

Tabela 19 - Análise de sensibilidade do calor de reação e impacto no consumo de gás natural (GN) para aquecimento do reator.

DeltaHR (J/g), x	Consumo GN reação (m3/ano), f(x)	Variação %	Emissões C3 (tCO2e)	Variação %	Emissões C4 (tCO2e)	Variação %
0	7,33E+06	6%	102.364,47	1%	92.794,08	1%
-500	6,92E+06	0%	101.522,15	0%	91.951,37	0%
-1000	6,51E+06	-6%	100.679,83	-1%	91.108,65	-1%
-2000	5,70E+06	-18%	98.995,20	-2%	89.423,22	-3%
-2500	5,29E+06	-24%	98.152,88	-3%	88.580,51	-4%
-3000	4,88E+06	-29%	97.310,56	-4%	87.737,79	-5%
-3500	4,47E+06	-35%	96.468,25	-5%	86.895,08	-5%

Fonte: Elaborado pela autora. A linha cinza traz os valores considerados neste trabalho.

Ao variar o calor de reação de -500 a -3500 J d-1 de biomassa seca, temos uma redução de 35% no consumo de gás natural para aquecimento do reator. Caso o calor de reação seja considerado nulo, temos um aumento de 6% no consumo de gás natural. Podemos verificar, no entanto, que o impacto do calor de reação nas emissões totais dos cenários 3 e 4 avaliados, é baixo. No cenário 3 haveria uma redução de apenas 5% nas emissões totais caso o calor de reação fosse -3500 J g-1 de biomassa seca e, no cenário 4, essa diferença seria de 5,5%. Nota-se que o impacto é ligeiramente menor no cenário 3 e isso se deve a menor representatividade das emissões do processo de HTC nas emissões totais do cenário 3 em comparação à representatividade do HTC nas emissões do cenário 4 - o HTC representa 60% das emissões no cenário 3 e 66% das emissões no cenário 4). Assim, embora a avaliação do calor de reação seja importante para se determinar o consumo de energia do processo, nota-se que no caso avaliado, o impacto pode não ser significativo. Cabe ressaltar que, devido à baixa razão biomassa/água, o impacto do calor de reação na redução do consumo de gás natural para aquecimento é menor uma vez que a maior parte do calor é gasto para aquecimento da água. Com relações biomassa/água maiores, espera-se que o impacto do calor de reação se acentue no balanço energético e de emissões totais, passando então, a ser um parâmetro mais relevante.

Outro parâmetro bastante importante para o processo e que também possui grandes incertezas associadas é o aumento da produtividade provocado pela adição de hidrochar no solo. Como mencionado no item 2.6 deste trabalho, poucos estudos exploram o efeito do hidrochar sobre a produtividade e, até o momento de conclusão deste trabalho, não encontramos nenhum estudo experimental em cultivo de cana no Brasil com hidrochar produzido a partir da palha da cana. Assim, optou-se por avaliar a sensibilidade do modelo a

uma variação de incremento de produtividade de 0 a 100%, isto é, com a produtividade variando de 80 a 160 t ha⁻¹. Na Tabela 20, a seguir, é apresentado o resultado da análise de sensibilidade do modelo ao aumento na produtividade de cana no cenário 3 e o efeito na intensidade de emissões geral e em cada macro etapa do processo (indicador avaliado em gCO₂e MJ⁻¹ de etanol¹⁷). Pode-se verificar que um aumento de 100% da produtividade (para 160 t ha⁻¹) implicaria em uma redução de 29% na intensidade total de emissões, que passaria de 55,56 gCO₂e/MJ para 39,28 GCO₂e/MJ.

Tabela 20 - Análise de sensibilidade para a variação do aumento de produção devido a adição de hidrochar no solo e efeito sobre as emissões.

Produtividade (t ha ⁻¹)	Total Emissões (gCO ₂ e/MJ)	Atividades agrícolas (gCO ₂ e/MJ)	Transporte campo x usina (gCO ₂ e/MJ)	Produção de etanol (gCO ₂ e/MJ)	Processo HTC (gCO ₂ e/MJ)	Varição HTC (%)
80	63,72	14,96	5,08	3,69	39,99	20%
96,00	55,56	14,08	4,47	3,69	33,33	0%
107	51,37	13,63	4,16	3,69	29,90	-10%
133	44,23	12,87	3,61	3,69	24,06	-28%
160	39,28	12,35	3,24	3,69	20,00	-40%

Fonte: Elaborado pela autora. Emissões em gCO₂e por MJ de etanol produzido (com base no LHV do etanol). Em cinza estão os dados considerados no estudo.

Podemos verificar ainda que na etapa de produção de etanol não há alteração na intensidade de emissões com o aumento da produtividade. Este efeito é esperado uma vez que o indicador usado reflete tanto o aumento de emissões devido a maior quantidade de cana processada, quanto o aumento na produção de etanol (um anula o outro). Já nas demais etapas é possível verificar que existem variações significativas, sendo que, no processo de HTC é onde se verifica a maior variação na intensidade de emissão que cai cerca de 40% ao se aumentar a produtividade de cana para 160 t ha⁻¹. Isso se verifica porque as emissões do processo de HTC não aumentam de forma linear com o aumento da produtividade de cana uma vez que as emissões desta etapa são mais fortemente influenciadas pela quantidade de água do processo que determina o consumo e emissões - 52% das emissões da etapa de HTC, no cenário 3, se devem ao consumo de gás natural usado no aquecimento do reator. Embora ainda exista muita incerteza com relação ao quanto se consegue aumentar a produtividade com a adição de hidrochar ao solo, espera-se que tal efeito, se confirmado, tende a ser duradouro, ou seja, não se limite ao ano do estudo em questão e pode trazer ainda cobenefícios como: o aumento da capacidade do solo de reter água, fornecimento de nutrientes e aumento da porosidade com

¹⁷ O denominador é calculado com base na quantidade de etanol produzido e LHV do etanol.

favorecimento de proliferação de microrganismos benéficos (AGEGNEHU; SRIVASTAVA; BIRD, 2017). A adição de hidrochar ao solo, de modo similar ao biochar, pode ter um efeito econômico imediato sobre a produtividade em solos mais pobres (AGEGNEHU; SRIVASTAVA; BIRD, 2017), além disso, o uso de resíduos agrícolas não oferece competição com outros usos do solo e evita que os resíduos sejam dispostos em aterro ou queimados, evitando a poluição.

O rendimento de hidrochar obtido a partir do HTC depende principalmente, da temperatura e do tempo de reação (parâmetros que determinam a severidade da reação conforme já discutido no item 2.5.1 deste trabalho). Mas, depende também, da composição da biomassa a ser tratada. Assim, como não encontramos estudo com a palha de cana de açúcar até o momento da conclusão desta dissertação, optou-se por utilizar o dado de rendimento da palha de milho, que apresenta composição (ter de celulose, hemicelulose e lignina) semelhantes a palha de cana. Os estudos avaliados neste trabalho, apresentaram um rendimento de hidrochar de 25,9% a 52,5% (vide Tabela 7) (massa de hidrochar sobre a massa de biomassa seca). Assim, realizou-se uma análise de sensibilidade para rendimentos de 25% a 55%, conforme demonstrado na Tabela 21 a seguir.

Tabela 21 - Análise de sensibilidade dos resultados à variação do rendimento em sólidos do HTC.

Análise de sensibilidade			Cenário 3 (C3) (tCO ₂ e/ano)			Cenário 4 (C4) (tCO ₂ e/ano)		
Rendimento o sólido (%)	Hidrochar C3 (22% u) (GJ/ano)	Hidrochar C4 (7% u) (GJ/ano)	Emissões totais C3	Transporte campo x usina	Processo HTC	Emissões totais C4	Transporte campo x usina	Processo HTC
25	2,69E+05	2,54E+05	9,99E+04	6,51E+03	6,09E+04	9,19E+04	2,33E+03	6,10E+04
30	3,22E+05	3,05E+05	1,01E+05	7,26E+03	6,09E+04	9,19E+04	2,33E+03	6,10E+04
36	3,87E+05	3,66E+05	1,02E+05	8,16E+03	6,09E+04	9,20E+04	2,33E+03	6,11E+04
40	4,30E+05	4,07E+05	1,02E+05	8,77E+03	6,09E+04	9,20E+04	2,33E+03	6,11E+04
45	4,84E+05	4,58E+05	1,03E+05	9,52E+03	6,09E+04	9,20E+04	2,33E+03	6,11E+04
50	5,37E+05	5,08E+05	1,04E+05	1,03E+04	6,09E+04	9,21E+04	2,33E+03	6,11E+04
55	5,91E+05	5,59E+05	1,04E+05	1,10E+04	6,09E+04	9,21E+04	2,33E+03	6,11E+04

Fonte: Elaborado pela autora. Em cinza estão os dados considerados neste estudo.

No cenário 3, onde o hidrochar é levado para uso como fertilizante no campo, espera-se que o aumento do rendimento de hidrochar aumente, também, o consumo de diesel utilizado no transporte até o campo. Podemos verificar que, de fato, ao aumentar o rendimento para 55% de hidrochar, verifica-se um aumento de 35% nas emissões do Transporte campo x usina (de 8.164 tCO₂e ano⁻¹ para 11018 tCO₂e ano⁻¹), porém, isso reflete em apenas 2,8% de aumento

nas emissões totais em comparação com o cenário onde o rendimento sólido é apenas 36% devido a baixa representatividade das emissões de transporte nas emissões totais.

Já a quantidade de energia (GJ/ano) contida no hidrochar aumenta de forma significativa: ao passar de 36% para 55% de rendimento em sólidos no HTC. A quantidade de energia disponível no hidrochar (baseada no LHV) passa de $3,66 \cdot 10^5$ para $5,59 \cdot 10^5$ GJ ano⁻¹ no cenário 4 – um aumento percentual de cerca de 53%, similar ao verificado no cenário 3. Assim concluímos que o modelo utilizado é pouco sensível a variações no rendimento do hidrochar para estimativas de emissões de GEE, mas bastante sensível para estimativas de energia obtida.

Por fim, avaliou-se o efeito da razão biomassa:água nos cenários avaliados. A água age como solvente no processo de HTC e, portanto, uma alteração nessa razão terá efeitos sobre as reações e, conseqüentemente, sobre as propriedades dos produtos obtidos. Contudo, para esta análise de sensibilidade avaliamos apenas o efeito sobre o consumo energético, uma vez que, para avaliar o efeito sobre as características dos produtos, seria necessário realizar um estudo experimental. Assim, avaliou-se o efeito da alteração da razão biomassa/água de: 0,1 (ou 1:10), 0,2 (ou 1:5) e 0,5 (ou 1:2) sobre o consumo energético do processo conforme exibido na Tabela 22 a seguir.

Tabela 22 - Análise de sensibilidade da variação da razão biomassa:água.

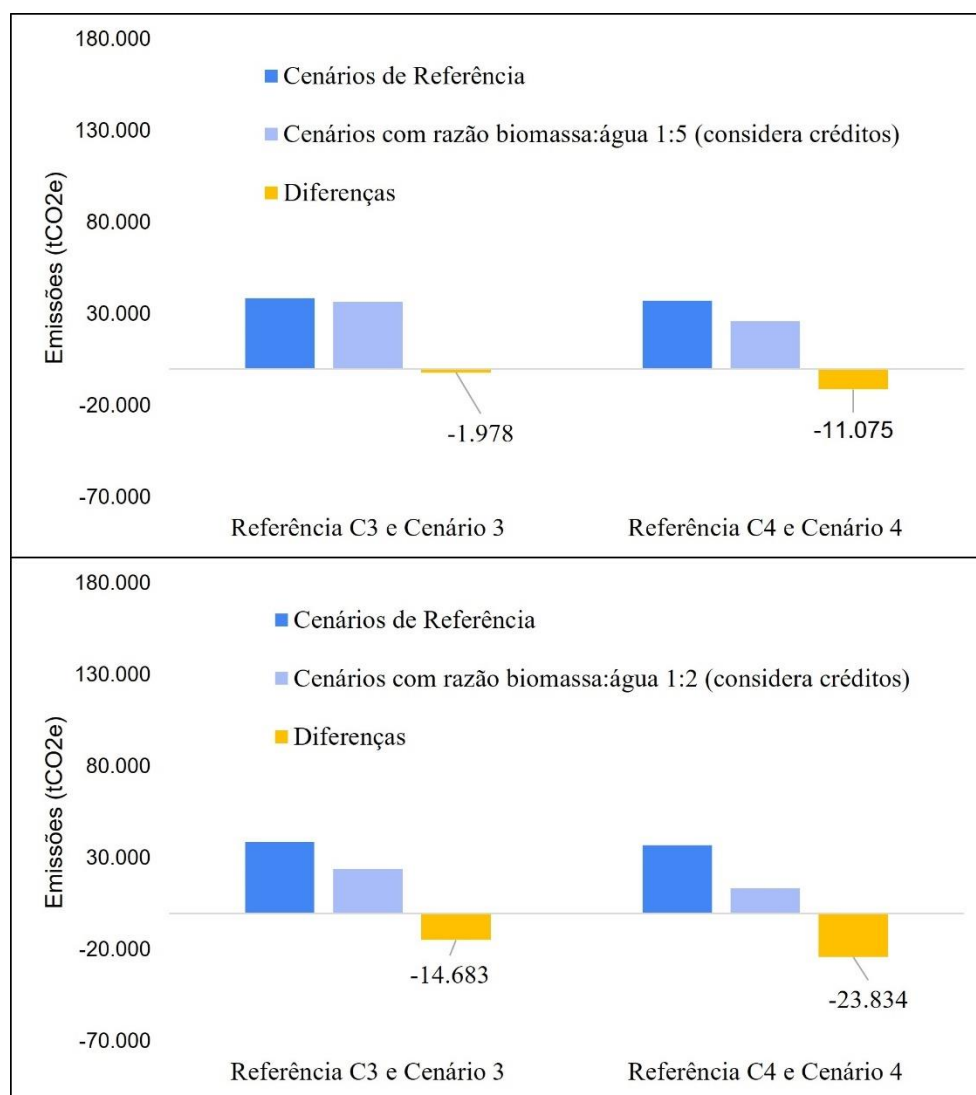
Biomassa/água (massa)	Consumo energia aquecimento (MJ ano ⁻¹)	Consumo energia reação (MJ ano ⁻¹)	Eficiência térmica C3 (%)	Eficiência térmica C4 (%)
0,1	3,11E+08	2,55E+08	68%	64%
0,2	1,70E+08	2,55E+08	90%	85%
0,5	8,48E+07	2,55E+08	113%	106%

Fonte: Elaborado pela autora

Podemos verificar que a razão biomassa água é determinante para a eficiência térmica do processo de HTC, considerando-se a eficiência conforme descrito no item 4.1.3 já mencionado neste trabalho. Ao se alterar a razão biomassa:água de 1:10 para 1:2, obtemos uma redução de 73% no consumo de energia para aquecimento do meio reacional até a temperatura de operação. Devido à limitação do modelo utilizado, onde a quantidade de energia necessária para a etapa de reação é calculada com base em dados secundários, a quantidade de energia necessária para a etapa de reação permanece a mesma. Porém, espera-se que haja um decréscimo nessa etapa também, ainda que menos significativo, uma vez que menos energia seria necessária para manter aquecida uma massa menor de água no meio reacional.

Verifica-se ainda, que com uma razão biomassa:água de 1:2, o processo passa a gerar mais energia na forma de hidrochar (HHV) do que a energia térmica consumida para a realização do HTC, obtendo-se uma eficiência de 113% no cenário 3 e 106% no cenário 4. Além disso, as emissões do cenário 3 sofreriam uma redução de 81% com a razão biomassa:água 1:2 em comparação com a mesma razão sendo 1:10. Já no cenário 4 essa redução seria de 88%. Com a redução da razão biomassa:água, ambos os cenários 3 e 4 passam a ficar um pouco melhores com relação aos cenários de referência (tradicionais) que produzem os mesmos benefícios, como pode ser vista na Figura 23 a seguir. Porém, o cenário 4 (uso energético) continuar a ser significativamente mais vantajoso do que o cenário 3 (aplicação do hidrochar no solo) para utilização da palha de cana com o HTC.

Figura 23 – Emissões nos cenários C3 e C4, respectivas referências e diferenças entre cada cenário e sua referência (em amarelo). Acima: emissões com razão biomassa:água de 1:5. Abaixo: emissões com razão biomassa:água de 1:2.



Fonte: Elaborado pela autora.

A otimização da razão biomassa:água é, portanto, crucial para a eficiência energética do processo. Porém, deve-se buscar otimizá-la de modo a garantir a ocorrência de reações de hidrólise e, conseqüentemente, a carbonização, favorecidas pela maior quantidade de água, assim como o aumento da área superficial e volume de poros do hidrochar. Ao mesmo tempo, deve-se buscar o rendimento otimizado de hidrochar, por sua vez, favorecido por uma menor quantidade de água (HEIDARI et al., 2019). Por fim, outro ponto importante para se buscar a otimização da razão biomassa:água é a diminuição no volume necessário para o reator que tem potencial para reduzir significativamente o custo de implantação do processo, além da menor necessidade de tratamento de efluentes.

Por fim, pode-se concluir que os resultados em emissões de GEE e consumo de energia deste estudo são válidos apenas para a razão biomassa:água e ganho de produtividade considerados nas análises, visto que ambos os parâmetros, quando variados, influem significativamente, nos resultados como pode ser verificado na análise de sensibilidade. Assim, é fundamental a realização de estudos de campo que avaliem o efeito da adição do hidrochar no solo no cultivo de cana e a otimização do processo de HTC.

5. CONCLUSÕES

Após a avaliação do ciclo de vida das diferentes rotas de utilização da palha de cana, no cenário 1 como cobertura vegetal no solo, no cenário 2 para cogeração na usina de etanol, no cenário 3 para uso como fertilizante após transformação em hidrochar e, no cenário 4 para geração de energia na forma de hidrochar, verificou-se que os cenários com utilização do processo de HTC apresentam, em geral, maior intensidade de emissões de GEE quando comparados aos demais cenários. Isso se deve, maioritariamente, ao uso de gás natural para aquecimento do meio reacional até a temperatura de reação do HTC. Portanto, buscar alternativas para aumentar a eficiência do processo, como reciclo de água do processo para pré-aquecimento das correntes de entrada, reaproveitamento do vapor gerado no processo e outras estratégias, são fundamentais para haja benefício em termos de emissões de GEE e energéticos nos cenários onde o HTC é considerado. Em todo caso, após as análises de sensibilidade, verificou-se que a otimização da razão biomassa:água também é um ponto-chave para tornar o processo de HTC mais atraente do ponto de vista energético e também para que haja mitigação das emissões de GEE.

Comparando-se os cenários 3 e 4 (C3 e C4), verifica-se que há uma diferença significativa entre o uso do hidrochar para uso como fertilizante (C3) ou para uso energético (C4) em termos de emissões de GEE. Considerando todas as condições padrão (razão biomassa:água de 1:10, rendimento de 36% de hidrochar), ambos C3 e C4, apresentam emissões maiores que os respectivos cenários base. Porém, o cenário 4 apresentou um incremento menor nas emissões com relação ao cenário de referência do que o C3. O incremento no C4 foi 14% menor que o incremento das emissões do cenário 3. Este resultado é condizente com o encontrado por Meisel et al. (2019) ao avaliar a valorização do lodo de estação de tratamento de efluentes por meio do HTC e uso energético ou agrícola do hidrochar. Os autores concluem que, apenas a adoção de estratégias adicionais como a digestão anaeróbica do efluente do HTC, podem torná-lo mais vantajoso do que os cenários de referência do ponto de vista de emissões de GEE (MEISEL et al., 2019).

Por outro lado, se for possível a otimização da razão biomassa:água no processo de HTC digamos, utilizar uma razão de 1:5 ou mesmo 1:2, os cenários propostos passam a ser mais interessantes do que os cenários de referência e pode-se dizer que é possível ocorrer mitigação das emissões de GEE pelo uso do hidrochar, conforme visto na Figura 23. Neste caso, o uso energético do hidrochar (C4) apresenta potenciais de mitigação de GEE significativamente maiores do que o cenário 3, onde o hidrochar é aplicado no solo. Neste caso,

justificar-se-ia então, a utilização da técnica de HTC para tratamento da palha de cana e uso do hidrochar como combustível. Há que se ressaltar aqui, que neste estudo, não foram avaliados os ganhos de eficiência no sistema de cogeração devido a remoção de cinzas, cloro e alcalinos da palha após o processo de HTC.

O HTC é uma tecnologia ainda pouco explorada no Brasil e que ainda conta com poucos pilotos em tamanho industrial a nível mundial, embora tenha ganhado cada vez mais atenção nos últimos dez anos (DOS SANTOS et al., 2022). No Brasil, já são encontrados estudos de HTC utilizando bagaço de cana e vinhaça, porém, não para a palha de cana (ALVARINHO, 1995; BENTO et al., 2021; DOS SANTOS et al., 2022; FREGOLENTE et al., 2018, 2019). Assim, este estudo visa contribuir também para fechar esse gap. Se considerada a gama de aplicações de seus produtos (sólidos, líquidos, gasosos) e possibilidade de obtenção de substâncias orgânicas além do hidrochar (como o 5-hidroximetilfurfural, por exemplo) e a abundância de matéria orgânica residual disponível, podemos concluir que o HTC é uma técnica que pode trazer vantagens para as indústrias, desde que se considere a otimização energética do processo de HTC e o reaproveitamento de resíduos e efluentes. do processo

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros recomendam-se os seguintes tópicos:

- a. **Análise do berço ao túmulo:** neste trabalho optou-se por limitar a ACV até a usina (do berço ao portão) e às emissões de GEE, porém, sabe-se que na etapa de uso do etanol há uma redução de emissões devido a substituição da gasolina e outros impactos precisam ser considerados como, por exemplo, emissões atmosféricas, para água, solo e impactos sócioeconômicos. Da mesma forma, pode-se avaliar o impacto da substituição de outros materiais pelo hidrochar, como o carvão de usinas termoelétricas. Para capturar esses outros impactos, a ACV do berço-ao-túmulo e com demais impactos seria fundamental.
- b. **Realização de um estudo experimental de HTC com palha de cana:** é necessária a realização do estudo experimental para validação dos resultados obtidos por meio do uso da palha de milho como proxy. Além disso, pode-se utilizar o estudo experimental para determinar o calor de reação, otimizar a razão biomassa:água, tempo de reação, rendimento de hidrochar e outras condições de processo necessárias para otimizá-lo.
- c. **Estratégias para otimização do processo do ponto de vista energético:** tanto a adoção de medidas como reciclo da água de processo, utilização de efluentes da usina de etanol e vapor excedente para pré-aquecimento das correntes de entrada, recuperação de calor do processo de HTC em tanques de flash, ou mesmo outras opções de processo, como uso de sistemas contínuos ou semi-contínuos, ao invés de batelada, podem trazer ganhos de eficiência energética ao processo de HTC e necessitam de avaliação.
- d. **Avaliar outras aplicações do hidrochar:** o hidrochar é um material rico em carbono, cuja porosidade, área superficial e outras características podem ser ajustadas de acordo com as condições de processo e uso ou não de reagentes ou catalisadores (ácido sulfúrico, por exemplo). Assim, é possível a aplicação do hidrochar para outros fins de maior valor agregado como suporte de catalisadores ou carvão ativado (HEIDARI et al., 2019).
- e. **Avaliar impacto na eficiência do sistema de cogeração do uso de hidrochar concomitante ao bagaço:** sabemos que o hidrochar possui menor teor de cinzas, cloro e alcalinos quando comparado à palha de cana e que isso pode

afetar a eficiência do sistema de cogeração. Porém, um estudo experimental é necessário para quantificar esse impacto. Pode-se também avaliar o uso do hidrochar com 22% ou mesmo 50% de umidade para cogeração visto que o bagaço possui umidade similar, eliminando-se assim, uma etapa do processo. Também, seria oportuno refazer nossos balanços de energia, incluindo cogeração de eletricidade e calor quando se utiliza GN para aquecimento no processo HTC e, mesmo, substituir o GN por biomassa como fonte de calor e eletricidade.

- f. **Avaliação de viabilidade econômica de uma planta de HTC com palha de cana:** além da otimização energética do processo, também é necessário avaliar o uso do processo de HTC sob a ótica econômica e, considerando as diferentes aplicações do hidrochar obtido, a fim de verificar sua viabilidade econômica.
- g. **Criação de uma base de dados sobre HTC de diferentes biomassas e desenvolvimento de modelo:** o Brasil possui uma grande variedade de biomassa residual que poderia ser aproveitada para geração de produtos pelo HTC, como os resíduos do milho que vem sendo empregado para geração de etanol no Brasil. Mas, como já mencionamos, a grande variedade de biomassas disponível constitui um desafio, pois, suas características estruturais influenciam diretamente nos produtos obtidos. Assim, a criação de uma base de dados com informações de características das biomassas, condições de processo e produtos obtidos, permitiria otimizar a avaliação prévia de novos processos/produtos. Além de facilitar o desenvolvimento de modelos matemáticos preditivos reduzindo o custo e tempo para projetos futuros.
- h. **Determinar impacto e durabilidade do hidrochar no solo:** verificamos que há pouca literatura a respeito do efeito do hidrochar no solo e sob diferentes culturas. As diversas variáveis envolvidas, como clima, tipo de solo, condições de cultivo e outras características, fazem com que seja necessário um estudo experimental que avalie o efeito do hidrochar obtido a partir da palha de cana no solo e para diferentes culturas. De maneira similar, também é importante avaliar a permanência do hidrochar em diferentes tipos de solo e sob diferentes condições de clima e uso do solo, com o intuito de validar sua aplicabilidade em projetos de captura de carbono.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGEGNEHU, G.; SRIVASTAVA, A. K.; BIRD, M. I. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. **Applied Soil Ecology**, v. 119, n. October 2016, p. 156–170, 2017.

AHLGREN, S. et al. Review of methodological choices in LCA of biorefinery systems - key issues and recommendations. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 9, n. 5, p. 606–619, set. 2015.

ALVARINHO, S. B. **Processo hidrotermal de obtenção de carvão a partir de biomassas de alta umidade (capim, turfa e bagaço de cana)**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 1995.

ALVIM, J. C. et al. Biorrefinarias: Conceitos, classificação, matérias primas e produtos. **J. Bioen. Food Sci. Journal of Bioenergy and Food Science. Macapá**, v. 013, n. 3, p. 61–7761, 2014.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **GREET 2020. The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies Model**. Disponível em: <<https://greet.es.anl.gov/index.php>>.

BENTO, L. R. et al. Hydrochar obtained with by-products from the sugarcane industry: Molecular features and effects of extracts on maize seed germination. **Journal of Environmental Management**, v. 281, p. 111878, mar. 2021.

BORCHARD, N. et al. Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: A meta-analysis. **Sci Total Environ.**, v. 651, n. February, p. 2354–2364, 2019.

BRAGA JUNIOR, R. L. DO C. et al. **Censo Varietal IAC de Cana-de-açúcar no Brasil - Safra 2018/10 e na Região Centro-Sul - Safra 2019/20**Série Tecnologia APTA. **Boletim Técnico IAC, 225**. Campinas: [s.n.].

BRASSOLATI, T. F. Z. et al. Estudo de viabilidade da mudança do transporte de cana-de-açúcar de treminhão para rodotrem. **7o Ecaeco**, n. 2o Seminário Internacional de Integração e Desenvolvimento Regional, p. 14, 2014.

CAPDEVILLE, G. DE. **Construindo um caminho para a bioeconomia**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/23372178/artigo---construindo-um-caminho>>.

para-a-bioeconomia>. Acesso em: 14 jun. 2020.

CARDOSO, T. DE F.; NEVES, J. M.; CHAGAS, M. F. Lei da Balança. Uma avaliação nos custos de produção da cana-de-açúcar e de recolhimento da palha. **Boletim CTBE / CNPEM**, v. 2, p. 7, 2017.

CARVALHO, D. J. **Geração de Bioeletricidade em Usina Sucroalcooleira Utilizando Bagaço, Palha de Cana e Sorgo Biomassa**. Campinas: UNICAMP, 2015.

CASTIONI, G. A. F. et al. Agricultural systems. In: LEAL, M. R. L. V.; HERNANDES, T. A. D. (Eds.). . **SUCRE - Sugarcane Renewable Electricity**. 1a. ed. Campinas: Sugarcane Renewable Electricity (SUCRE) Project Brazilian Biorenewables National Laboratory (LNBR) Brazilian Center for Research in Energy and Materials (CNPEM), 2020. p. 25–37.

CETESB. **Vinhaça - Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola - P4.231**. São Paulo: [s.n.].

CETESB. **DECISÃO DE DIRETORIA Nº 023/2020/P, de 16 de março de 2020**. São Paulo: [s.n.].

CGEE, C. FOR S. S. AND M. **Sustainability of sugarcane bioenergy**. Brasília, DF: [s.n.].

CHAI, X. et al. A hydrothermal-carbonization process for simultaneously production of sugars, graphene quantum dots, and porous carbon from sugarcane bagasse. **Bioresource Technology**, v. 282, p. 142–147, jun. 2019.

CHEN, W.-H.; YE, S.-C.; SHEEN, H.-K. Hydrothermal carbonization of sugarcane bagasse via wet torrefaction in association with microwave heating. **Bioresource Technology**, v. 118, p. 195–203, ago. 2012.

CONAB. **Perfil do Setor do Açúcar e do Etanol no Brasil. Edição para a Safra 2015/16**. Brasília, DF: [s.n.].

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar. V.6 N.1 - Safra 2019/20 - Primeiro Levantamento**. Brasília, DF: [s.n.].

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar. V.7 N.3 - Safra 2020/21 - Terceiro levantamento**. [s.l: s.n.].

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar. V.7 N.4 - Safra 2020/21 -**

Quarto levantamento. [s.l.: s.n.].

CONAB. **Série Histórica da Cana-de-açúcar - Agrícola. Arquivo em Excel.** Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>>. Acesso em: 7 jul. 2021b.

CUVILAS, C.; KANTARELIS, E.; YANG, W. The Impact of a Mild Sub-Critical Hydrothermal Carbonization Pretreatment on Umbila Wood. A Mass and Energy Balance Perspective. **Energies**, v. 8, n. 3, p. 2165–2175, 19 mar. 2015.

DE MENA PARDO, B. et al. **Industrial Scale Hydrothermal Carbonization: new applications for wet biomass waste.** Bremerhaven (Germany): ttz Bremerhaven, 2016.

DOS SANTOS, J. V. et al. Hydrothermal carbonization of sugarcane industry by-products and process water reuse: structural, morphological, and fuel properties of hydrochars. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 12, n. 1, p. 153–161, 2022.

EPE. Relatório Síntese Balanço Energético Nacional 2021. **Balanço nacional de energia**, p. 77, 2021.

FAO. **Land & Water. Databases & Software. Sugarcane.** Disponível em: <<http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/sugarcane/en/>>. Acesso em: 5 jul. 2021.

FELIX, L.; FARTHING, W.; HOEKMAN, S. K. **Research and development to prepare and characterize robust coal/biomass mixtures for direct co-feeding into gasification systems.** Pittsburgh, PA, and Morgantown, WV (United States): [s.n.].

FLAUSINIO, B. DE F. P. G. **Produção de energia elétrica a partir do aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar gerado no setor sucroalcooleiro de Minas Gerais.** [s.l.] UFMG, 2015.

FORCHEZATTO, D. DE O.; NEVES, J. L. M.; CARDOSO, T. DE F. Agronomic routes for straw recovery. In: LEAL, M. R. L. V.; HERNANDES, T. A. D. (Eds.). **SUCRE - Sugarcane Renewable Electricity**. 1a. ed. Campinas: Sugarcane Renewable Electricity (SUCRE) Project Brazilian Biorenewables National Laboratory (LNBR) Brazilian Center for Research in Energy and Materials (CNPEM), 2020. p. 38–59.

FREGOLENTE, L. G. et al. Toxicity evaluation of process water from hydrothermal carbonization of sugarcane industry by-products. **Environ Science and Pollution Research**, n. 26, p. 27579–27589,

2018.

FREGOLENTE, L. G. et al. Toxicity evaluation of process water from hydrothermal carbonization of sugarcane industry by-products. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 27, p. 27579–27589, 29 set. 2019.

FUERTE, A. B. et al. Chemical and structural properties of carbonaceous products obtained by pyrolysis and hydrothermal carbonisation of corn stover. **Australian Journal of Soil Research**, v. 48, n. 7, p. 618–626, 2010.

GARG, A.; KAZUNARI, K.; PULLES, T. V.2 Introduction. In: EGGLESTON, S. et al. (Eds.). . **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, V.2: Energy**. Hayama, Japão: e Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006. p. 29.

GOMES, C. **Censo nacional de variedades de cana realizado pelo IAC reforça redução da concentração varietal**. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/noticiasdetalhes.php?id=1261>>. Acesso em: 5 jul. 2021.

HEIDARI, M. et al. A review of the current knowledge and challenges of hydrothermal carbonization for biomass conversion. **Journal of the Energy Institute**, v. 92, n. 6, p. 1779–1799, 2019.

HEIDARI, M. et al. Numerical Comparison of a Combined Hydrothermal Carbonization and Anaerobic Digestion System with Direct Combustion of Biomass for Power Production. **Processes**, v. 8, n. 1, p. 43, 1 jan. 2020.

HEIDARI, M. et al. Development of a mathematical model for hydrothermal carbonization of biomass: Comparison of experimental measurements with model predictions. **Energy**, v. 214, p. 119020, 2021.

HIMMELBLAU, D. M.; RIGGS, J. B. **Basic principles and calculations in Chemical Engineering**. 8th. ed. [s.l.] FT Press, 2012.

IPCC. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme**. Hayama, Japão: IGES, 2006.

IPCC. **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama, Japão: IPCC Switzerland, 2019.

IRYANI, D. A. et al. Characterization and Production of Solid Biofuel from Sugarcane Bagasse by Hydrothermal Carbonization. **Waste and Biomass Valorization**, v. 8, n. 6, p. 1941–1951, 20 set. 2017.

JIA, G. et al. Land–climate interactions. In: P.R. SHUKLA, J. SKEA, E. CALVO BUENDIA, V. MASSON-DELMOTTE, H.-O. P.; D.C. ROBERTS, P. ZHAI, R. SLADE, S. CONNORS, R. VAN DIEMEN, M. FERRAT, E. HAUGHEY, S. LUZ, S. NEOGI, M. PATHAK, J. PETZOLD, J. PORTUGAL PEREIRA, P. VYAS, E. HUNTLEY, K. KISSICK, M, BELKACEMI, J. M. (Eds.). . **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. [s.l.] IPCC, 2019. p. 131–248.

JUNGMEIER, G. et al. The possible role of biorefineries in a bioeconomy- activities of IEA bioenergy task 42 “Biorefining”. **Conference proceedings of the 21st European biomass conference**, 2013.

KLÄUSLI, T. M. AVA-CO2 Introduces the First Industrial-Size Hydrothermal Carbonisation (HTC) Plant in the World. **Business Wire**, out. 2010.

KLINK, Amyr. Cem dias entre céu e mar. Editora Schwarcz Ltda., 32ª edição, 2001.

KONG, S. H. et al. Biochar from oil palm biomass: A review of its potential and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 729–739, 2014.

KUZYAKOV, Y.; BOGOMOLOVA, I.; GLASER, B. Soil Biology & Biochemistry Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific C14 analysis. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 70, p. 229–236, 2014.

LEAL, M. R. L. V.; HERNANDES, T. A. D. **SUCRE - Sugarcane Renewable Electricity**. Campinas: [s.n.].

LNBR. **Premissas da Palha Calc**. [s.l: s.n.].

LOPES, M. A. **O Brasil na Bioeconomia**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/3382121/artigo---o-brasil-na-bioeconomia>>. Acesso em: 14 jun. 2020.

LUCIAN, M.; FIORI, L. Hydrothermal carbonization of waste biomass: Process design, modeling, energy efficiency and cost analysis. **Energies**, v. 10, n. 2, 2017.

- MACHADO, N. T. et al. Process analysis of hydrothermal carbonization of corn Stover with subcritical H₂O. **Journal of Supercritical Fluids**, v. 136, n. September 2017, p. 110–122, 2018.
- MANTELATTO, P. E. et al. Industrial Processing. In: LEAL, M. R. L. V.; HERNANDES, T. A. D. (Eds.). . **SUCRE - Sugarcane Renewable Electricity**. 1a. ed. Campinas: Sugarcane Renewable Electricity (SUCRE) Project Brazilian Biorenewables National Laboratory (LNBR) Brazilian Center for Research in Energy and Materials (CNPEM), 2020. p. 60–93.
- MCTI. **Fatores de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil - Ano Base 2022**. Brasília, DF: [s.n.].
- MEISEL, K. et al. Comparative life cycle assessment of HTC concepts valorizing sewage sludge for energetic and agricultural use. **Energies**, v. 12, n. 5, p. 1–16, 2019.
- MERCANTE, A. L. P. **Geração de bioeletricidade, através do bagaço e da palha da cana-de-açúcar**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2020.
- MINARET, J.; DUTTA, A. Comparison of liquid and vapor hydrothermal carbonization of corn husk for the use as a solid fuel. **Bioresource Technology**, v. 200, p. 804–811, jan. 2016.
- MOHAMMED, I. S. et al. Investigating the effect of processing parameters on the products of hydrothermal carbonization of corn stover. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 12, 2020.
- Montgomery M., Larsen, O.H. *Field test corrosion experiments in Denmark with biomass fuels Part 2: Co-firing of straw and coal*. *Materials and Corrosion*, 2002; 53(3): 185-194.
- NACHILUK, K. **Cana-de-açúcar: produção e processamento em 2019**. Disponível em: <<http://www.iaea.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=14767>>. Acesso em: 5 jul. 2021.
- ORPLANA. **Perfil Segmentado do Produtor de Cana Safra 2018/2019**. [s.l: s.n.].
- PAUSTIAN, K. et al. V. 4 Introduction. In: H.S., E. et al. (Eds.). . **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use**. Hayama, Japão: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006. p. 21.
- PBGHG PROTOCOLO. **Ferramenta de cálculo do PBGHG 2022.xlsx**PBGHG Protocolo, , 2022.
- PEREIRA, L. G. et al. Comparison of biofuel life-cycle GHG emissions assessment tools : The case

studies of ethanol produced from sugarcane , corn , and wheat. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 110, n. March, p. 1–12, 2019.

PRASANAMEDHA, G. et al. Enhanced adsorptive removal of sulfamethoxazole from water using biochar derived from hydrothermal carbonization of sugarcane bagasse. **Journal of Hazardous Materials**, v. 407, p. 124825, abr. 2021.

ROSSETO, R.; DIAS, F. L. F. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar: indagações e reflexões. **Informações Agronômicas**, v. 110, p. 6–11, 2005.

SAMPAIO, I. L. DE M. et al. Assessments and tests from case studies. In: LEAL, M. R. L. V.; HERNANDES, T. A. D. (Eds.). . **SUCRE - Sugarcane Renewable Electricity**. Campinas: Sugarcane Renewable Electricity (SUCRE) Project Brazilian Biorenewables National Laboratory (LNBR) Brazilian Center for Research in Energy and Materials (CNPEM), 2020. p. 102–109.

SÃO PAULO. **Decreto Estadual N. 47.700, de 11 de março de 2003. Regulamenta a Lei nº 11.241, de 19 de setembro de 2002, que dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas.** BrasilD.O.E. V. 113, Fasc. 48, Seção I, p.3-5, , 2003.

SÃO PAULO. **Protocolo Agroambiental Etanol Mais Verde. Resultados do ciclo 2020.** São Paulo: [s.n.].

SEABRA, J. E. A. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil.** [s.l: s.n.].

SILVA, J. P. N. DA; SILVA, M. R. N. DA. **Noções da Cultura de cana-de-açúcar.** Inhumas: [s.n.].

SILVA, F. S. G. et al. **Avaliação experimental e panorama da cana energia na cadeia produtiva sucroenergética: caracterização e identificação de potencialidades.** 8a Jornada Científica e Tecnológica da FATEC de Botucatu. **Anais...**Botucatu: FATEC Botucatu, 2019

SOUZA, A. M.; SOUZA, N. R. D. DE; HERNANDES, T. A. D. Country level environmental and social impacts. In: LEAL, M. R. L. V.; HERNANDES, T. A. D. (Eds.). . **SUCRE - Sugarcane Renewable Electricity**. Campinas: Sugarcane Renewable Electricity (SUCRE) Project Brazilian Biorenewables National Laboratory (LNBR) Brazilian Center for Research in Energy and Materials (CNPEM), 2020. p. 129–133.

STEMANN, J.; ZIEGLER, F. **Assessment of the energetic efficiency of a continuously operating plant for hydrothermal carbonisation of biomass**. Bioenergy Technology (BE). **Anais...Linkoping**, Sweden: 2011

TU, R. et al. Improvement of corn stover fuel properties via hydrothermal carbonization combined with surfactant. **Biotechnology for Biofuels**, v. 12, n. 1, p. 1–19, 2019.

UNFCCC. **Tool07: Tool to calculate the emission factor for an electricity system. Version 7.0**. [s.l: s.n.].

UNICA. **Protocolo Agroambiental**. Disponível em: <<https://unica.com.br/iniciativas/protocolo-agroambiental/>>. Acesso em: 6 jul. 2021.

USDA. Sugar : World Markets and Trade Sugar Production Up Globally in 2021 / 22 , Stable in the United States and Mexico More Than Offset Decline in Brazil Shipments. n. May, 2021.

WANG, J.; WANG, S. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 1002–1022, 2019.

WANG, T. et al. A review of the hydrothermal carbonization of biomass waste for hydrochar formation: Process conditions, fundamentals, and physicochemical properties. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, n. February, p. 223–247, 2018.

WEBER, B.; STADLBAUER, E. A. Sustainable paths for managing solid and liquid waste from distilleries and breweries. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p. 38–48, 2017.

WRI/WBCSD. **Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard**. [s.l.] World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2011.

WRI; WBCSD. **GHG Protocol Agricultural Guidance - Ferramenta para o Brasil.xlsm**WRI/WBCSD, , 2020.

ZHAO, P. et al. Energy recycling from sewage sludge by producing solid biofuel with hydrothermal carbonization. **Energy Conversion and Management**, v. 78, p. 815–821, 2014.

ANEXOS

ANEXO I - Parâmetros dos processos:

Atividade	Cenários:	VSB*	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Atividades agrícolas	Unidades de medida					
N em fertilizantes sintéticos	kg tc-1	1,23E+00	7,76E-01	7,97E-01	8,00E-01	7,97E-01
P2O5 fertilizante	kg tc-1	1,40E-01	1,30E-01	1,35E-01	1,36E-01	1,35E-01
K2O fertilizante	kg tc-1	1,31E+00	5,60E-01	9,35E-01	9,98E-01	9,35E-01
Calcário calcítico (CaCO3)	kg tc-1	5,00E+00	5,00E+00	5,00E+00	5,00E+00	5,00E+00
Pesticidas, herbicidas e inseticidas	kg tc-1	1,67E-02	1,67E-02	1,67E-02	1,67E-02	1,67E-02
Ratoons	kg tc-1	4,41E+01	4,41E+01	4,41E+01	4,41E+01	4,41E+01
Vinhaça aplicada no solo (Calculado)	m ³ ha-1 (100% da área)	N.I.	7,50E+01	7,50E+01	9,00E+01	7,50E+01
Torta de filtro aplicada no solo (Calculado)	t (base seca) ha-1	N.I.	4,80E-01	4,80E-01	5,76E-01	4,80E-01
Quantidade de N adicionado torta e vinhaça (Calculado)	kg N tc-1	N.I.	4,12E-01	4,12E-01	4,12E-01	4,12E-01
Diesel aplicação de torta de filtro e vinhaça	L ha-1	N.I.	1,45E+00	1,45E+00	1,74E+00	1,45E+00
Diesel - Operações mecanizadas (Outros)	L tc-1	1,90E+00	2,54E+00	2,54E+00	2,12E+00	2,54E+00
Diesel - Operações mecanizadas (Colheita)	L tc-1	N.I.	1,84E+00	1,84E+00	1,84E+00	1,84E+00
Produtividade de cana	t ha-1	8,00E+01	8,00E+01	8,00E+01	9,60E+01	8,00E+01
Queima de palha <i>default</i>	%	1,84E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cobertura vegetal (palha no solo)	t ha-1 (base seca)	N.I.	1,50E+01	7,50E+00	7,50E+00	7,50E+00
Quantidade de palha recolhida	t ha-1 (base seca)	N.I.	0,00E+00	7,50E+00	7,50E+00	7,50E+00
Impureza vegetal	%	N.I.	8,30E+00			
Área colhida	ha ano-1	N.I.	1,00E+04	1,00E+04	1,00E+04	1,00E+04
Cana colhida (Calculado)	tc ano-1	N.I.	8,00E+05	8,00E+05	9,60E+05	8,00E+05
Transporte campo/usina	Unidades de medida					
Distância média de transporte da cana	km	2,73E+01	3,00E+01	3,00E+01	3,00E+01	3,00E+01
Diesel - Transporte campo/usina (Calculado)	L tc-1	2,86E-01	6,28E-01	1,12E+00	1,10E+00	1,12E+00
Diesel transporte e aplicação de hidrochar	L tc-1		0,00E+00	0,00E+00	2,16E+00	0,00E+00
Produção de etanol	Unidades de medida					
Ácido sulfúrico	g L-1 etanol	4,94E+00	4,94E+00	4,94E+00	4,94E+00	4,94E+00
Cal	g L-1 etanol	7,48E+00	7,48E+00	7,48E+00	7,48E+00	7,48E+00
Ciclohexano	g L-1 etanol	7,10E-01	7,10E-01	7,10E-01	7,10E-01	7,10E-01
Ácido fosfórico	g L-1 etanol	2,70E+00	2,70E+00	2,70E+00	2,70E+00	2,70E+00
Químicos inorgânicos	g L-1 etanol	4,40E-02	4,40E-02	4,40E-02	4,40E-02	4,40E-02
Zeólitas	g L-1 etanol	4,70E-02	4,70E-02	4,70E-02	4,70E-02	4,70E-02
Demanda de energia elétrica para processamento da cana, palha e etanol anidro	kWh tc-1 (base úmida)	N.I.	3,00E+01	3,17E+01	3,14E+01	3,17E+01
Eletricidade excedente bagaço	kWh tc-1	N.I.	8,01E+01	8,01E+01	8,01E+01	8,01E+01

Atividade	Cenários:	VSB*	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Atividades agrícolas	Unidades de medida					
Eletricidade excedente da palha	kWh tc-1	N.I.	0,00E+00	51,06	0,00E+00	0,00E+00
Eletricidade excedente do hidrochar	kWh tc-1		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,06E+01
Eletricidade bruta do hidrochar	kWh tc-1		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,22E+01
Produção de vinhaça	L vinhaça L-1 etanol	N.I.	1,10E+01	1,10E+01	1,10E+01	1,10E+01
Produção de torta de filtro	t torta (base seca) tc-1	N.I.	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
Produção de etanol anidro	L tc-1	8,52E+01	8,52E+01	8,52E+01	8,52E+01	8,52E+01
HTC da palha de cana	Unidades de medida					
Quantidade palha usada no HTC	t palha ano-1 (base seca)				3,00E+04	3,00E+04
Quantidade de água usada no HTC	t ano-1				3,00E+05	3,00E+05
Consumo de eletricidade na planta de HTC (Auxiliares)	kWh ano-1				5,93E+04	5,93E+04
Consumo de GN na planta de HTC (aquecimento)	m3 ano-1				1,54E+07	1,54E+07
Produção de efluente	t ano-1				2,83E+05	2,83E+05
Produção de gás (CO ₂ , CH ₄ e CO)	t ano-1				3,16E+04	3,16E+04
Produção de hidrochar	t ano-1 (base seca)				1,08E+04	1,08E+04
Consumo de energia do filtro prensa	MWh ano-1				5,42E+02	5,42E+02
Consumo de GN secador	m3 ano-1				0,00E+00	6,81E+04

*Dados do VSB retirados de Pereira et al. (2019)

NI = Não informado

ANEXO II - Fatores de emissão

Fatores de emissão e outros dados para conversão			
Valor	Unidade de medida	Descrição	Referência
0,016	kgN ₂ O-N (kgN input)-1	EF1 for N additions from synthetic fertilisers, organic amendments and crop residues, and N mineralised from mineral soil as a result of loss of soil carbon ¹ [kg N ₂ O-N (kg N)-1]. Disaggregated: Synthetic fertiliser inputs ⁽⁵⁾ in wet climates	IPCC 2019 V4 Ch11 Table 11. (Updated)
0,010	kg N ₂ O-N (kg NH ₃ -N + NO _x -N volatilised)-1	EF4 [N volatilisation and redeposition] ¹ , kg N ₂ O-N (kg NH ₃ -N + NO _x -N volatilised)-1	IPCC 2019 V4 Ch11 Table 11.3 (Updated)
0,011	kgN ₂ O-N (kgN leaching/runoff)-1	EF5 [leaching/runoff] ² , kg N ₂ O-N (kg N leaching/runoff)-1	IPCC 2019 V4 Ch11 Table 11.3 (Updated)
0,110	(kg NH ₃ -N + NO _x -N) (kgN applied)-1	FracGASF [Volatilisation from synthetic fertiliser] ³ , (kg NH ₃ -N + NO _x -N) (kgN applied)-1	IPCC 2019 V4 Ch11 Table 11.3 (Updated)
0,210	(kg NH ₃ -N + NO _x -N) (kgN applied or deposited)-1	FracGASM [Volatilisation from all organic N fertilisers applied, and dung and urine deposited by grazing animals] ⁴ , (kg NH ₃ -N + NO _x -N) (kgN applied or deposited)-1	IPCC 2019 V4 Ch11 Table 11.3 (Updated)
0,240	kg N (kg N additions or deposition by grazing animals)-1	FracLEACH-(H) [N losses by leaching/runoff in wet climates] ⁵ , kg N (kg N additions or deposition by grazing animals)-1	IPCC 2019 V4 Ch11 Table 11.3 (Updated)
74100	kgCO ₂ /TJ	EFCO ₂ Gas / Diesel oil, mobile combustion	IPCC V2 Ch3 Table 3.2.1
3,9	kgCH ₄ /TJ	EFCH ₄ Gas / Diesel oil, mobile combustion	IPCC V2 Ch3 Table 3.2.2
3,9	kgN ₂ O/TJ	EFN ₂ O Gas / Diesel oil, mobile combustion	IPCC V2 Ch3 Table 3.2.2
10100	kcal/kg	NCV diesel	BEN 2020
840	kg/m ³	Densidade Diesel	BEN 2020
69300	kgCO ₂ /TJ	EFCO ₂ Gasoline	IPCC V2 Ch3, table 3.2.1

Fatores de emissão e outros dados para conversão			
Valor	Unidade de medida	Descrição	Referência
25	kgCH ₄ /TJ	EFCH ₄ Gasoline, Motor Gasoline –Oxidation Catalyst ©	IPCC V2 Ch3 Table 3.2.2
8	kgN ₂ O/TJ	EFN ₂ O Gasoline, Motor Gasoline –Oxidation Catalyst ©	IPCC V2 Ch3 Table 3.2.2
10400	kcal/kg	NCV gasolina pura	BEN 2020
742	kg/m ³	Densidade gasolina pura	BEN 2020
11,00%	%	Fração de biodiesel no diesel, média em 2021	PBGHGP v.2021.0.1, aba Fatores Variáveis, Sessão 2
27,00%	%	Fração de etanol na gasolina	PBGHGP v.2021.0.1, aba Fatores Variáveis, Sessão 2
70800	kgCO ₂ biogenico/TJ	EFCO ₂ Biodiesel	IPCC V2 Ch2, table 2.2
3	kgCH ₄ /TJ	EFCH ₄ Biodiesel	IPCC V2 Ch2, table 2.2
0,6	kgN ₂ O/TJ	EFN ₂ O Biodiesel	IPCC V2 Ch2, table 2.2
9000	kcal/kg	NCV biodiesel	BEN 2020
880	kg/m ³	Densidade Biodiesel	BEN 2020
0,70	L gasolina/L etanol	Razão entre eficiências etanol/gasolina (km/L) para automóveis flex	PBGHGP v.2021.0.1, aba Fatores de Emissão, Tabela 8. Consumo médio de combustível por tipo de frota
0,2	Adimensional	Razão below ground to above ground biomass	IPCC 2006
1,526	kgCO ₂ biogenico/Litro	EFCO ₂ Etanol anidro	PBGHGP v.2021.0.1, aba Fatores de Emissão, Tabela 4. Fatores de emissão por utilização biocombustível em fontes móveis
0,00022	kgCH ₄ /Litro	EFCH ₄ Etanol anidro	PBGHGP v.2021.0.1, aba Fatores de Emissão, Tabela 4. Fatores de emissão por utilização biocombustível em fontes móveis

Fatores de emissão e outros dados para conversão			
Valor	Unidade de medida	Descrição	Referência
1,3E-05	kgN2O/Litro	EFN2O Etanol anidro	PBGHGP v.2021.0.1, aba Fatores de Emissão, Tabela 4. Fatores de emissão por utilização biocombustível em fontes móveis
6750	kcal/kg	NCV Álcool anidro	BEN 2020
791	kg/m3	Densidade Álcool anidro	BEN 2020
6300	kcal/kg	NCV Álcool hidratado	BEN 2020
809	kg/m3	Densidade Álcool hidratado	BEN 2020
56100	kgCO2/TJ	EFCO2 Gás Natural, Energy	PBGHGP v.2021.0.1, aba Fatores de Emissão, Tabela 1. Fatores de emissão por utilização de combustíveis fósseis
1	kgCH4/TJ	EFCH4 Gás Natural, Energy	PBGHGP v.2021.0.1, aba Fatores de Emissão, Tabela 1. Fatores de emissão por utilização de combustíveis fósseis
0,1	kgN2O/TJ	EFN2O Gás Natural, Energy	PBGHGP v.2021.0.1, aba Fatores de Emissão, Tabela 1. Fatores de emissão por utilização de combustíveis fósseis
8800	kcal/m³	NCV Gás natural seco	BEN 2021
0,74	kg/m3	Densidade Gás natural seco	BEN 2021
8,9	GJ/t bagaço	NCV Bagaço de cana	PBGHGP v.2021.0.1, aba Fatores de Emissão, Tabela 2. Fatores de emissão por utilização de biomassa como combustível
1000	kg/t	Densidade Bagaço	PBGHGP v.2021.0.1, aba Fatores de Emissão, Tabela 2. Fatores de emissão por utilização de biomassa como combustível
100000	kgCO2 biogenico/TJ	EFCO2 Bagaço (Other Primary Solid Biomass, IPCC)	PBGHGP v.2021.0.1, aba Fatores de Emissão, Tabela 2. Fatores de emissão por utilização de biomassa como combustível
30	kgCH4/TJ	EFCH4 Bagaço (Other Primary Solid Biomass, Energia, IPCC)	PBGHGP v.2021.0.1, aba Fatores de Emissão, Tabela 2. Fatores de emissão por utilização de biomassa como combustível

Fatores de emissão e outros dados para conversão			
Valor	Unidade de medida	Descrição	Referência
4	kgN2O/TJ	EFN2O Bagaço (Other Primary Solid Biomass, Energia, IPCC)	PBGHGP v.2021.0.1, aba Fatores de Emissão, Tabela 2. Fatores de emissão por utilização de biomassa como combustível
4184	J kcal-1	Fator de conversão	
3,6	MJ kWh-1	Fator de conversão	
0,43971	tCO2/t CaCO3	Fator de emissão do uso de CaCO3	IPCC, 2006. V.3 Ch.2 Table 2.1
0,1264	tCO2e/MWh	Fator médio do SIN em 2021	PBGHGP v.2022.1.1, aba Fatores Variáveis, Sessão 2
0,054	tCO2e/MWh	Fator da margem de construção, Médio anual	MCTIC, Despacho 2021
0,599	tCO2e/MWh	Fator da margem de operação, Médio anual	MCTIC, Despacho 2021
0,500	%	WOM	Project 4057 : Bagasse based Cogeneration Project - Satish Sugar Limited
0,500	%	WBM	Project 4057 : Bagasse based Cogeneration Project - Satish Sugar Limited
0,3263	tCO2e/MWh	Fator combinado MDL	UNFCCC, Tool 7.0, v.7, item 6.6.1

Outros Fatores de Emissão

Fatores de emissão da cadeia de produção				
Valor	Unidade de medida	Descrição	Referência	Observação
81,6	gCO2e/MJ	Fator de emissão da produção + combustão do diesel	Pereira et al. 2019	Produção + combustão. VSB
75,2	gCO2e/MJ	Fator de emissão da combustão do diesel segundo o IPCC	IPCC, 2006	
3,35	kgCO2e/kg N	Fator de emissão produção fertilizantes nitrogenados	Pereira et al. 2019	Produção
12,35	kgCO2e/kg produto	Fator de emissão da produção e transporte de pesticidas, herbicidas e inseticidas	WRI, 2019 (Metodologia do GHG Protocol da Agricultura), pág. 22, Tabela 7.	
131,6	gCO2e/kg input	Fator de emissão produção + uso do calcário calcítico	Pereira et al. 2019	Produção e uso
2,16	kgCO2e/kg P2O5	Fator de emissão produção fosfato	Pereira et al. 2019	Produção
0,55	kgCO2e/kg K2O	Fator de emissão produção K2O	Pereira et al. 2019	Produção

Fatores de emissão da cadeia de produção				
Valor	Unidade de medida	Descrição	Referência	Observação
8,67	tCO2/t CaO	Cal	Calculado por estequiometria a partir do fator de CaCO3 do IPCC	
2,55	kgCO2/kg	Ciclohexano	Open LCA, EF secondary data 2.0_202202	
1,08	kgCO2/kg	Ácido fosfórico	Open LCA, EF secondary data 2.0_202202	
0,65	kgCO2/kg	Químicos inorgânicos	Open LCA, EF secondary data 2.0_202202	
3,58	kgCO2/kg	Zeólitas	Open LCA, EF secondary data 2.0_202202	
0,21	kgCO2/kg	Ácido sulfúrico	Open LCA, EF secondary data 2.0_202202	

Cenário 2

Cenário 2	Item/Atividade	tCO2/ano	tCO2Biogenico/ano	tCH4/ano	tN2O/ano	tCO2e/ano	Obs.	Representatividade
Atividades Agrícolas	Adição de palha no solo (aeróbica) (CO2 biogênico e N2O) e N da vinhaça e torta (N2O)	-	120.981,67	-	-	11,97	3.173,25 Decomposição aeróbica	13,93%
	Aplicação de fertilizantes nitrogenados	-	-	-	-	19,78	Emissão direta e emissão indireta por volatilização e lixiviação/escoamento	23,01%
	Cadeia produção: Fertilizantes nitrogenados	2.135,91	-	-	-	-	2.135,91	9,38%
	Cadeia produção: Pesticidas, herbicidas e inseticidas	165,00	-	-	-	-	165,00	0,72%
	Aplicação de calcário calcítico	1.758,84	-	-	-	-	1.758,84	7,72%
	Cadeia produção: Calcário calcítico	526,40	-	-	-	-	526,40	2,31%
	Cadeia produção: Fosfato (P2O5)	233,29	-	-	-	-	233,29	1,02%
	Cadeia produção: Potássio (K2O)	411,42	-	-	-	-	411,42	1,81%
	Consumo de diesel nas operações mecanizadas e colheita	8.207,53	904,80	0,47	0,44	-	8.337,20	36,61%
Cadeia de produção: Diesel	791,18	-	-	-	-	791,18	3,47%	
						22.773,66	kgCO2e/TC 2,85E+01	
Transporte do campo a usina	Consumo de diesel no transporte campo x usina	2.095,46	231,01	0,12	0,11	-	2.128,57	91,33%
	Cadeia de produção: Diesel	202,00	-	-	-	-	202,00	8,67%
						2.330,57	kgCO2e/TC 2,91E+00	
Indústria de Etanol	Consumo de insumos	4.826,19	-	-	-	-	4.826,19	61,07%
	Demanda de eletricidade (Autoprodução)	-	-	-	-	-	-	0,00%
	Queima do bagaço	-	41.485,39	12,45	1,66	-	788,22	9,97%
	Queima da palha	-	120.412,50	36,12	4,82	-	2.287,84	28,95%
						7.902,25	kgCO2e/TC 9,88E+00	
Créditos	Eletricidade excedente (Crédito)	(40.482,46)	-	-	-	-	(40.482,46)	33,55%
	Etanol anidro (Crédito, gasolina)	(77.566,41)	84.445,94	(15,61)	(8,21)	-	(80.179,73)	66,45%
						(120.662,19)		
							7.475,99	kgCO2e/TC
							33.006,47	41,26

Cenário 3

Cenário 3: (50% da palha é recolhida, Colheita Integral e HTC, Hidrochar para uranazala)

Cenário 3	Item/Atividade	tCO2/ann	tCO2Biogénico/ann	tCH4/ann	tN2O/ann	tCO2e/ann	Obs.	Representatividade	
Atividade Agrícola	Adição de palha nazala (aeróbica) (CO2 biogénico e N2O) e H do vinhaço e torta (N2O)	-	169.374,33	-	16,51	4.376,40	Decomposição aeróbica	17%	
	Aplicação de fertilizante nitrogenado	-	-	-	23,63	6.262,25	Emissão direta e emissão indireta por volatilização e lixiviação/ferocamento	24%	
	Cadeia produção: Fertilizante nitrogenado	2.126,70	-	-	-	2.126,70		8%	
	Cadeia produção: Particidas, herbicidas e inseticidas	165,00	-	-	-	165,00		1%	
	Aplicação de calcário calcítico	1.758,84	-	-	-	1.758,84		7%	
	Cadeia produção: Calcário calcítico	526,40	-	-	-	526,40		2%	
	Cadeia produção: Farfeta (P205)	231,86	-	-	-	231,86		1%	
	Cadeia produção: Patária (K2O)	383,93	-	-	-	383,93		1%	
	Consumo de diózel na operação mecanizada e colheita	8.896,72	980,78	0,51	0,48	9.037,28		35%	
Cadeia de produção: Diózel	857,62	-	-	-	857,62	kgCO2e/TO	3%		
Transporte da campo e urina	Consumo de diózel no transporte campo: urina	2.478,63	273,25	0,14	0,13	2.517,79		31%	
	Consumo de diózel no transporte do biochar	4.862,07	536,00	0,28	0,26	4.938,89		60%	
	Cadeia de produção: Diózel	707,62	-	-	-	707,62	kgCO2e/TO	9%	
Indústria de Etanol	Consumo de insumo	5.791,42	-	-	-	5.791,42		86%	
	Demanda de eletricidade (Autoprodução)	-	-	-	-	-		0%	
	Queima da bagaça	-	49.782,47	14,93	1,99	945,87		14%	
	Queima da palha	0	0	0	0	-	kgCO2e/TO	0%	
Processo HTC	Demanda de eletricidade	76,06	-	-	-	76,06		0,1%	
	Gás natural HTC	31.729,71	-	0,57	0,06	31.760,53		52,2%	
	Efluente qazara	16.116,18	-	462,20	-	29.057,69		47,7%	
Créditor	Eletricidade excedente (Crédito)	(25.088,16)	0	0	0	(25.088,16)		21%	
	Etanol anidro (Crédito, qazalina)	(93.079,69)	101.335,13	(18,73)	(9,85)	(96.215,67)		79%	
	Aumento da C nazala, em tCO2 biogénico (considerando perda de 6%)*		(18.429,02)	0	0	-			
							(121.303,84)		
*Perda reportada por Kuzakov, Y., Baqmalava, I., e Glaser, B. (2014) após 8,5 anos da hidrochar nazala.							Total com crédito (eletricidade excedente)	76.433,99	kgCO2e/TO
							Total com crédito	101.522,15	105,75
							Total com crédito eletricidade e captura de C	58.004,97	

Cenário 4

Cenário 4: (50% de palha e recolhida, Colheita Integral e HTC, Hidrochar para energia)

Cenário 4	Item/Atividade	tCO2/ann	tCO2Biosgenic/ann	tCH4/ann	tN2O/ann	tCO2e/ann	Obr.	Representatividade
Atividade Agrícola	Adição de palha na zela (aeróbica) (CO2 bioquímica e N2O) e N da vinhaça e torta (N2O)	-	120.981,67	-	11,97	3.173,25	Decomposição aeróbica	14%
	Aplicação de fertilizante nitrogenado	-	-	-	19,78	5.241,15	Emissão direta e emissão indireta por volatilização e lixiviação/forçamento	23%
	Cadeia produção: Fertilizante nitrogenado	2.135,91	-	-	-	2.135,91		9%
	Cadeia produção: Fungicida, herbicida e inseticida	165,00	-	-	-	165,00		1%
	Aplicação de calcário calcítico	1.758,84	-	-	-	1.758,84		8%
	Cadeia produção: Calcário calcítico	526,40	-	-	-	526,40		2%
	Cadeia produção: Farfeta (P205)	233,29	-	-	-	233,29		1%
	Cadeia produção: Patáxia (K2O)	411,42	-	-	-	411,42		2%
	Consumo de diesel na operação mecanizada e colheita	8.207,53	904,80	0,47	0,44	8.337,20		37%
	Cadeia de produção: Diesel	791,18	-	-	-	791,18	kgCO2e/TC	3%
Transporte da campo e usina	Consumo de diesel no transporte campo x usina	2.095,46	231,01	0,12	0,11	2.128,57		9%
	Consumo de diesel no transporte da biochar	-	-	-	-	-		0%
	Cadeia de produção: Diesel	202,00	-	-	-	202,00	kgCO2e/TC	9%
Indústria de Etanol	Consumo de insumo	4.826,19	-	-	-	4.826,19		83%
	Demanda de eletricidade (Autoprodução)	-	-	-	-	-		0%
	Queima da bagaça	-	41.485,39	12,45	1,66	788,22		14%
	Queima da biochar	-	9.612,00	2,88	0,38	182,63	kgCO2e/TC	3%
Processo HTC	Demanda de eletricidade	76,06	-	-	-	76,06		0,1%
	Gás natural HTC	31.729,71	-	0,57	0,06	31.760,53		52,0%
	Gás natural recedat m3 ana-1	15.361.331,86	140,76	-	0,06	155,82		0,3%
	Efluente gasoso m3 ana-1	68.147,31	16.116,18	-	462,20	29.057,69		47,6%
Créditos	Eletricidade excedente (Crédito)	(44.551,19)	-	-	-	(44.551,19)		36%
	Etanol anidro (Crédito, parafina)	(77.566,41)	(123.578,38)	(15,61)	(8,21)	(80.179,73)		64%
						(124.730,92)		
Total com créditos (eletricidade excedente)						47.400,18	kgCO2e/TC	
Total com créditos						91.951,37	114,94	

ANEXO IV – Cálculo da eficiência de cogeração

Cálculos da eficiência de cogeração utilizando dados do SUCRE, Capítulo 3.5 (SAMPAIO et al., 2020).

		Cenário base	Colheita Integral
Demanda de eletricidade total	GWh/ano	129,10	139,50
Excedente de eletricidade	GWh/ano	320,40	406,30
Total	GWh/ano	449,50	545,80
Quantidade de cana colhida (p.103 Base)	Mtc/ano	4,00	4,00
Quantidade de palha colhida (Tabela 29, p.104)	kt palha/ano	-	100,00
Razão bagaço/cana (Seabra, 2008)	t bagaço/tc	0,13	0,13
Energia bruta cana	GWh/ano	1.285,56	1.285,56
Energia bruta palha	GWh/ano	-	445,97
Eficiência	%	35,0%	31,5%