

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA



**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DO ETANOL PRODUZIDO EM UMA
DESTILARIA AUTÔNOMA**

Giulia Silva Theodoro

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de
Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos

Orientadora: Prof^ª. Dr.^ª Alice Medeiros de Lima

São Carlos – 2020

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 14 de dezembro de 2020, perante a seguinte banca:

Professora Orientadora: Profa. Dra. Alice Medeiros de Lima, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar).

Professora da Disciplina: Profa. Dra. Paula Rúbia Ferreira Rosa, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar).

Convidado: Engenheiro MSc. Marcos Vieira, Gerente de Operações na Pentagro Soluções Tecnológicas.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Rose e José e aos meus irmãos, Henrique e Victor, por todo o apoio durante a caminhada até aqui. Sem todo o amor, carinho e confiança que temos um pelo outro, tenho certeza que não estaria onde estou hoje. A mulher que sou hoje, traz um pouquinho de cada um de vocês.

Às minhas amigas de infância, Amanda Alcântara e Maria Luiza Buriham, por me ajudarem sempre que precisei e estarem aqui para tudo. Vocês sabem todo o amor e carinho que tenho pelas duas.

Quero agradecer, também, a minha família de São Carlos: Julia Cruvinel, Sarah Bernardes, Vinicius Neves, Julia Baratella, Carol Yasui, Gustavo Gonçalves e Leonardo Reis. Só a gente sabe tudo que vivemos juntos durante esses anos de faculdade e todo o carinho que carregamos um pelo outro.

Agradeço à Danielle Otani por todos esses anos de amizade e apoio até aqui. Tenho a sorte de ter uma pessoa tão especial e cheia de luz como amiga e me acompanhando em cada nova fase. Obrigada por tanto.

Por fim, quero agradecer muito a minha orientadora, professora Alice. Nesses poucos meses trabalhando juntas, reconheci uma grande profissional, que sempre com muita dedicação e paciência, me ajudou a passar por essa tão importante fase final na graduação.

RESUMO

As decorrentes mudanças climáticas que acompanham, desde o início, o desenvolvimento do setor industrial mundial, confirmam a necessidade da busca por alternativas que mitiguem o impacto ambiental. Atualmente, entre todas as categorias ambientais que demandam uma preocupação, uma das principais é a de emissão de poluentes no ar que, ano a ano, influencia o aquecimento global e, conseqüentemente, a vida no planeta, podendo a longo prazo, trazer impactos irreversíveis. No Brasil, o setor sucroalcooleiro tem papel fundamental na produção interna bruta do país, sendo o maior produtor de cana de açúcar do mundo e o segundo maior de etanol. O trabalho proposto teve como objetivo avaliar o impacto do ciclo de vida do etanol nas etapas de cultivo, colheita, transporte e fabricação do produto em uma destilaria autônoma, priorizando impactos decorrentes da liberação de gases poluentes no ar. Com isso, calculou-se, com apoio da literatura e com os dados cedidos pela Pentagro Soluções Tecnológicas, as avaliações de impactos do ciclo de vida do etanol comparando-se as etapas entre si e, em seguida, comparando o cenário atual da fabricação com cenários alternativos para essa etapa. Com os resultados obtidos, avaliou-se as etapas entre si em dois momentos: considerando apenas a categoria de aquecimento global, principal foco do trabalho, e considerando diversas outras categorias como acidificação, enriquecimento de nutrientes, toxicidade humana e da água, entre outras. O intuito era demonstrar o quanto cada etapa do ciclo de vida influenciava no valor total do impacto ambiental no âmbito do aquecimento global e como há diversas possibilidades de categorização na análise de ciclo de vida de um produto e como se comportava o do etanol. Por fim, com base na comparação entre os cenários para etapa de fabricação com foco no aquecimento global, levantou-se possibilidades de diminuir o impacto das emissões de gás carbônico com alternativas que são consideradas promissoras para o setor e que devem ser estudadas mais a fundo e incluídas em todos os aspectos da realidade de cada destilaria para definir o seu custo benefício, demonstrando que o tema de análise de ciclo de vida deve ser considerado um fator para a tomada de decisão em relação a um produto específico.

ABSTRACT

The resulting climate changes which have accompanied, since the beginning, the development of the global industrial sector, confirm the need to search for alternatives that mitigate the environmental impact. Currently, among all the environmental categories that demand a concern, one of the main ones is the emission of pollutants in the air, which, year after year, influences global warming and, consequently, life on the planet, which may bring irreversible impacts in the long term. In Brazil, the cane and alcohol sector have a fundamental role in the country's gross domestic production, being the largest producer of sugar cane in the world and the second largest in ethanol. The work aimed to evaluate the impact of the ethanol life cycle on the stages of cultivation, harvest, transport and manufacture of the product in an autonomous distillery, prioritizing the impacts resulting from the release of polluting gases into the air. From that, it was calculated with the support of the literature and with the data provided by Pentagro Soluções Tecnológicas, as impact assessments of the life cycle of ethanol, comparing the stages with each other and then comparing the current scenario of manufacturing with alternative scenarios for this step. With the results obtained, the stages were evaluated in two stages: considering only one category of global warming, the main focus of the work, and considering several other categories such as acidification, nutrient enrichment, human and water toxicity, among others. The aim was to demonstrate how much each stage of the life cycle influenced the total value of the environmental impact in the context of global warming and how various possibilities of categorization in the analysis of a product's life cycle and how ethanol behaved. Finally, based on the comparison between the scenarios for the manufacturing stage with a focus on global warming, there are potential possibilities to reduce the impact of carbon dioxide with alternatives that are considered promising for the sector and that should be studied further and included in all aspects of the reality of each distillery to define its cost benefit, demonstrating that the theme of life cycle analysis should be considered a factor for decision making in relation to a specific product.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição do cultivo de cana-de-açúcar por região.....	11
Figura 2 - Produção de etanol a partir da cana de açúcar por região.....	11
Figura 3 - Processo de Produção padrão de Etanol em uma destilaria.....	12
Figura 4 - Método simplificado de fermentação batelada alimentada com reciclo.....	16
Figura 5 - Processo padrão de destilação para formação do etanol.....	17
Figura 6 - Fluxograma Geral “Berço ao Túmulo” de um Produto.....	21
Figura 7 - Etapas da Análise do Ciclo de Vida.....	22
Figura 8 - Fluxo geral de entrada e saída de um processo.....	24
Figura 9 - Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida	25
Figura 10 – Etapas do ciclo de vida e a fronteira do sistema para o trabalho.....	27
Figura 11 - Avaliação de Impacto com o Método IPCC 2013 GWP 20a	45
Figura 12 - Valores para produção de 1m ³ de etanol hidratado.....	47
Figura 13 - Avaliação de Impacto CML 2001	48
Figura 14 - Comparação Cenários Etapa Caldeira	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Impactos ocasionados pelo processo de obtenção de Etanol.....	19
Tabela 2 - Exemplos de Softwares utilizados em ACV.	26
Tabela 3 - Inventário para o Cultivo e Manejo da Cana.....	30
Tabela 4 – Inventário para a etapa Colheita da Cana	31
Tabela 5 - Inventário para a etapa de Transporte	32
Tabela 6 - Informações Gerais da Fabricação	33
Tabela 7 - Inventário – Limpeza da Cana e Extração do Caldo	34
Tabela 8 - Inventário Geração de Energia	35
Tabela 9 - Inventário Tratamento químico do Caldo.....	36
Tabela 10 - Inventário Evaporação.....	37
Tabela 11 – Inventário Fermentação	38
Tabela 12 - Inventário Destilação e Desidratação	39
Tabela 13 - Levantamento de possíveis insumos utilizados - Fabricação	40
Tabela 14 – Cenário 1 da fabricação de Etanol – Mudança na umidade do Bagaço.....	42
Tabela 15 - Cenário 2 da fabricação de Etanol – Mudança para pellet	43

Sumário

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVO.....	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1 Indústria Sucroalcooleira no Brasil.....	10
3.1.1. Panorama econômico atual da cana de açúcar e etanol.....	10
3.1.2. Processo geral de produção de Etanol na Destilaria Autônoma	12
3.1.2.1. Recepção e Limpeza da Cana.....	13
3.1.2.2. Extração do Caldo	13
3.1.2.3. Tratamento do Caldo.....	14
3.1.2.4. Evaporação	15
3.1.2.5. Fermentação	15
3.1.2.6. Destilação	17
3.1.2.7. Desidratação	17
3.1.3 Impacto ambiental do processo de produção de Etanol	18
3.2 Conceito e Aplicação de Análise de Ciclo de Vida (ACV).....	20
3.2.1. Conceito de ACV.....	20
3.2.2. Aspectos normativos da ACV no Brasil	21
3.2.3. Etapas da ACV.....	22
3.2.3.1. Definição de Objetivo e Escopo.....	23
3.2.3.2. Análise de Inventário	23
3.2.3.3. Avaliação de Impacto.....	24
3.2.3.4. Interpretação de Resultados	25
3.3 Softwares de apoio para a ACV	25
4. MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1. Objetivo e Escopo.....	27
4.2. Análise do Inventário.....	29
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1. Avaliação de Impacto – Comparação entre Etapas	44
5.2. Avaliação de Impacto – Comparação entre os cenários da etapa fabricação	50
6. CONCLUSÃO	54
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
8. APÊNDICE.....	60

1. INTRODUÇÃO

No início do século XX, o Brasil, com o intuito de reduzir uma crise no setor açucareiro e sua dependência na importação de petróleo, realizou ações para introduzir a produção de etanol, dando início, oficialmente, a comercialização desse produto no país. Contudo, apenas com a criação do Programa Nacional do Álcool, em 1975, houve um maior investimento no produto com planejamentos a curto e longo prazo visando o mercado interno e externo (Nova Cana, 2014).

O setor sucroalcooleiro, atualmente, apresenta uma importância com alta relevância na economia nacional, sendo o país um dos grandes produtores mundiais de etanol e açúcar. O etanol, também chamado de álcool etílico, pode ser utilizado em diversos setores, mas sua produção apresenta como principal finalidade a utilização como combustível. Contudo, com um processo que oferece riscos de altos impactos negativos no ambiente, há uma séria preocupação a curto e longo prazo em relação a essa cadeia produtiva.

O meio ambiente, durante muito tempo, sofreu com a priorização do crescimento econômico pela sociedade, que visava apenas o aumento da produtividade, independente das consequências. Com isso, sem o zelo pela qualidade ambiental, é visto um estopim de problemas ambientais como contaminações de rios, altas porcentagens de poluições no ar, desmatamentos desenfreados, vazamentos de produtos químicos e descartes incorretos de lixos (POTT & ESTRELA, 2017).

No momento atual, com o aumento da conscientização ambiental, tornou-se indispensável buscar por alternativas que visam alinhar os processos de produção com a mitigação de seus impactos no ambiente. Diante de anos em que a destruição ambiental não foi considerada relevante e apenas uma consequência do crescimento e desenvolvimento industrial, hoje essas alternativas são vistas não apenas para prevenir um impacto, mas também para tentar remediar o que o ambiente já sofreu diante de decisões da sociedade durante diversas décadas (POTT & ESTRELA, 2017).

2. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é avaliar o desempenho ambiental nas etapas de colheita, cultivo, transporte e fabricação de etanol, utilizando uma análise de ciclo de vida com a série da norma ABNT NBR ISO 14040, com o intuito de se comparar as etapas entre si e, em seguida, avaliar especificamente a etapa de fabricação, comparando-a com cenários levantados como alternativas para a diminuição da pegada de carbono que colaborem com a mitigação de emissões dos gases poluentes no ar ocasionadas durante a cadeia produtiva do etanol.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Indústria Sucroalcooleira no Brasil

3.1.1. Panorama econômico atual da cana de açúcar e etanol

Atualmente, o Brasil possui 414 usinas em funcionamento no setor sucroalcooleiro, cujo região Sudeste destaca-se apresentando 224 dessas usinas em seu território, representando, aproximadamente, 54,1% do total. Para esse setor, classifica-se as usinas em três categorias: as mistas, cujo produtos finais são açúcar e etanol, as destilarias autônomas, que produzem somente etanol, e as específicas para produção de açúcar, esta última sendo pouco comum no país. As destilarias autônomas, atualmente, representam aproximadamente 25,12% do total, sendo 104 em funcionamento.(Nova Cana, 2020).

Nas indústrias sucroalcooleiras, a principal matéria prima utilizada é a cana de açúcar, tendo o Brasil como o seu maior produtor mundial. A expectativa de produção de cana na safra desse ano, no país, de acordo com a Conab (2020), é de aproximadamente 642 milhões toneladas, com redução pequena de 0,1% ao ser comparada com a safra anterior, plantadas em uma área de 8.409.819 hectares. A Figura 1, a seguir, demonstra a distribuição do cultivo dessa matéria prima por região do Brasil para a safra 2020/2021.

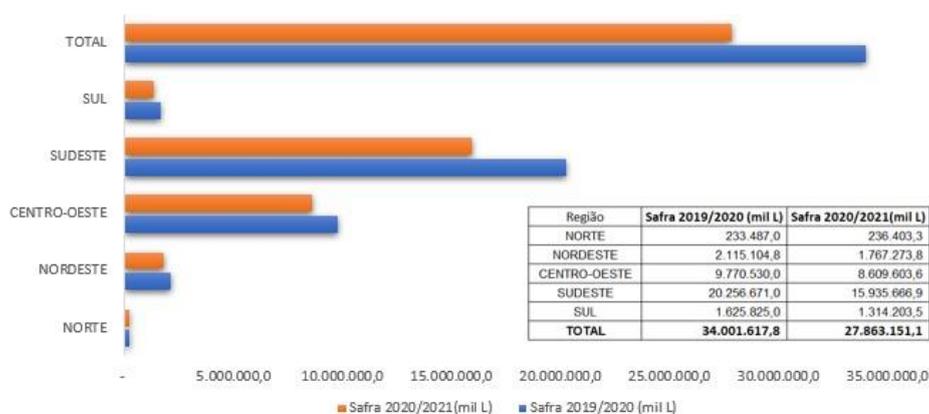
Figura 1 – Distribuição do cultivo de cana-de-açúcar por região.



Fonte: Dados Retirados do Relatório Conab (2020)

O cultivo da cana ocorre de maneira sazonal, dependendo do clima da região e apresenta, como pode ser visto na Figura 1, a região Sudeste como seu maior produtor no país. Para a safra de 2020/2021, pelo fato de o setor ter sido afetado pela pandemia e ter apresentado uma queda de consumo interno do etanol, a utilização dessa matéria prima terá como foco a produção de açúcar, ocorrendo uma inversão em relação à safra anterior, em que a produção do etanol vinha crescendo e era tida como um melhor custo benefício (CONAB, 2020). Com isso, o setor apresenta uma estimativa, para a próxima safra, de produção de etanol a partir da cana de, aproximadamente, 27,9 bilhões de litros, com redução de 21,8% em relação à safra anterior, a qual totalizou 34 bilhões de litros (CONAB, 2020). Na Figura 2, é possível observar o comportamento da produção de etanol, por região, nesse período.

Figura 2 - Produção de etanol a partir da cana de açúcar por região.



Fonte: Dados Retirados do Relatório Conab (2020)

O processo de obtenção de etanol nas indústrias gera dois principais tipos de produto, além de subprodutos durante as etapas. O primeiro tipo, o etanol hidratado, é o etanol comum vendido comercialmente nos postos de gasolina; enquanto o etanol anidro é o produto misturado à gasolina, além de ser encontrado em cosméticos, bebidas alcoólicas e produtos de limpeza. A diferença entre os dois é a porcentagem de etanol puro em sua composição, com o etanol hidratado possuindo em torno de 95,1 a 96% de pureza (o restante de sua composição é a água) em massa, enquanto o etanol anidro apresenta uma pureza em massa de 99% a 99,5%. (Nova Cana, 2020).

As etapas de produção dentro do setor sucroalcooleiro se diferem dependendo do tipo de planta em que se ocorre o processo. Com isso, será detalhado o processo de produção de uma destilaria autônoma, por ser a categoria utilizada no trabalho apresentado.

3.1.2. Processo geral de produção de Etanol na Destilaria Autônoma

A destilaria autônoma, como dito anteriormente, é uma das categorias de usinas do setor sucroalcooleiro, que apresenta como seu produto principal final apenas o etanol. A Figura 3 demonstra as etapas principais do processo de obtenção desse produto na destilaria autônoma convencional.

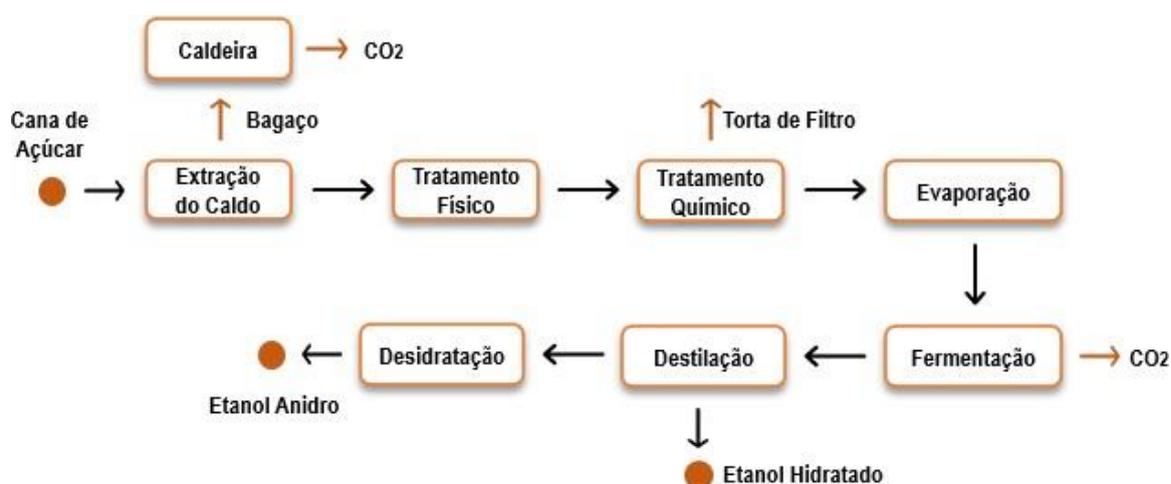


Figura 3 - Processo de Produção padrão de Etanol em uma destilaria.

Fonte: Acervo Pessoal

O processo visa, como pode ser notado na Figura 3, a produção dos dois tipos de etanol, o hidratado e o anidro. A produção do etanol hidratado corresponde, aproximadamente, 65% do etanol total nas destilarias, enquanto o anidro representa os 45% restantes (Conab, 2020). Esses valores são uma estimativa padrão das produções, podendo se alterar de acordo com o objetivo de cada destilaria. Nos tópicos abaixo, serão retratadas as etapas do processo.

3.1.2.1. Recepção e Limpeza da Cana

A colheita da cana ocorre em sua maturação, que se dá de 12 a 18 meses de cultivo com influência da região e da época em que se é plantada, e pode ser feita de maneira manual, em que se colhe a cana inteira, ou mecanizada, em que a cana é picada durante o processo. Para avaliar essa matéria prima colhida, utiliza-se no setor alguns indicadores de qualidade, como o seu teor de sacarose, sua pureza, porcentagem de fibra e tempo de queima e corte (Nova Cana, 2020).

Na destilaria, recebe-se a cana transportada, por caminhões, nas mesas de alimentação e, no primeiro momento, ocorre a retirada de uma amostra (com intuito de se avaliar qualidade) e a pesagem da matéria prima. A etapa seguinte tem dependência com o tipo de tecnologia empregada durante a colheita, pois caso a cana tenha sido resultante de colheita manual, é necessário que a mesma seja embebida em água para retirada de impurezas e materiais como terra, folhas e rochas; enquanto que para a cana colhida de maneira mecanizada, utiliza-se a lavagem a seco, o qual consiste em jatos de ar, pelo maior risco da perda de açúcar durante o processo de limpeza.

3.1.2.2. Extração do Caldo

Com a realização da recepção e limpeza da cana na destilaria, inicia-se o preparo para extração do caldo da matéria prima. A cana é transportada, em esteiras, para os picadores e, em seguida, para desfibradores, com o intuito de aumentar a abertura das fibras em, no mínimo, 82% para moendas e 88% para difusores, para que se tenha uma eficiência maior na próxima etapa.

A moagem, etapa seguinte, é o método padrão para a extração do caldo, em que consiste esmagar a cana desfibrada no equipamento (normalmente apresenta-se de 5 a 6 ternos, com cada um formado por 4 rolos compressores), com uma eficiência, em média, de 97% de extração de líquido (Nova Cana, 2020). Nessa fase do processo, obtém-se também o bagaço da cana, de alto teor calorífico, o qual é transportado por esteiras para as caldeiras e reaproveitado para geração de energia térmica e elétrica utilizadas no processo.

3.1.2.3. Tratamento do Caldo

O caldo, extraído durante a passagem pelas moendas é formado, majoritariamente pela sacarose, porém pelo fato de apresentar impurezas em sua composição, se torna necessário um tratamento desse líquido para se obter posteriormente um produto de maior qualidade. A primeira etapa, um tratamento físico, consiste em utilizar peneiras rotativas, para remover sólidos insolúveis, como areia e fragmentos do bagaço, chamado de bagacilho. (FONSECA, 2014).

A próxima etapa do processo baseia-se em um tratamento químico que visa a neutralização do pH do caldo (evitando o risco de decomposição da sacarose) e a retirada de partículas finas, que não foram eliminadas durante as etapas anteriores, além das impurezas coloidais e solúveis do caldo. Para isso, o tratamento inicia-se com a adição de ácido fosfórico em um reator a uma temperatura de 70°C e, com isso, a reação ocorrida dentro no reator, conhecida como calagem, ajuda a neutralizar o pH do caldo e forma o fosfato de cálcio, que ao sedimentar arrasta o material coloidal junto a ele. Em seguida, adiciona-se o hidróxido de cálcio ao caldo e aumenta-se a temperatura para 105°C, sendo enviado para o balão flash. (TONON FILHO, 2013).

O próximo equipamento da etapa é o balão flash, cujo objetivo é retirar os gases não condensáveis, que são prejudiciais para as seguintes etapas. Ele opera a pressão atmosférica e, após a remoção dos gases, diminui a temperatura para 98°C. Em seguida, o caldo é levado para o decantador, e com a adição de um polímero floculante, permanece no equipamento entre 40 minutos e 2,5 horas para que ocorra a remoção das impurezas que restaram dos tratamentos anteriores. Para concluir a etapa, o caldo passa pelos hidrociclones, para remover por centrifugação partículas de menor tamanho. Após o processo, obtém-se o caldo clarificado, o qual é levado para os evaporadores, e o iodo

formado no fundo do decantador, que passa por um processo de filtração em um tambor rotativo ou mesas desaguadores (filtros prensa) para recuperar o máximo possível de açúcar desse material. O sólido separado durante a filtração é chamado de torta de filtro, que é transportada para a lavoura para ser utilizada como fertilizante (LOPES; GABRIEL; BORGES, 2011).

3.1.2.4. Evaporação

De acordo com Fonseca (2014), o caldo clarificado, nesse momento do processo, apresenta uma concentração de 14° a 16° Brix, dependendo da quantidade da cana recebida, o que representa a fração mássica de sólidos solúveis na mistura. Visando uma maior eficiência no processo, é necessário que esse caldo seja tratado, para que se seja possível alcançar um grau alcóolico considerado ideal durante a fermentação. Para isso, o produto é transportado para um evaporador com o objetivo de se aumentar essa concentração para valores próximos a 18° a 22° Brix. e é esterilizado passando pelo processo chamado pasteurização, em que é aquecido a 130°C, por um período de 30 minutos, e depois resfriado para cerca de 32°C. O produto dessa etapa é chamado de mosto, que é encaminhado para o fermentador (LOPES; GABRIEL; BORGES, 2011).

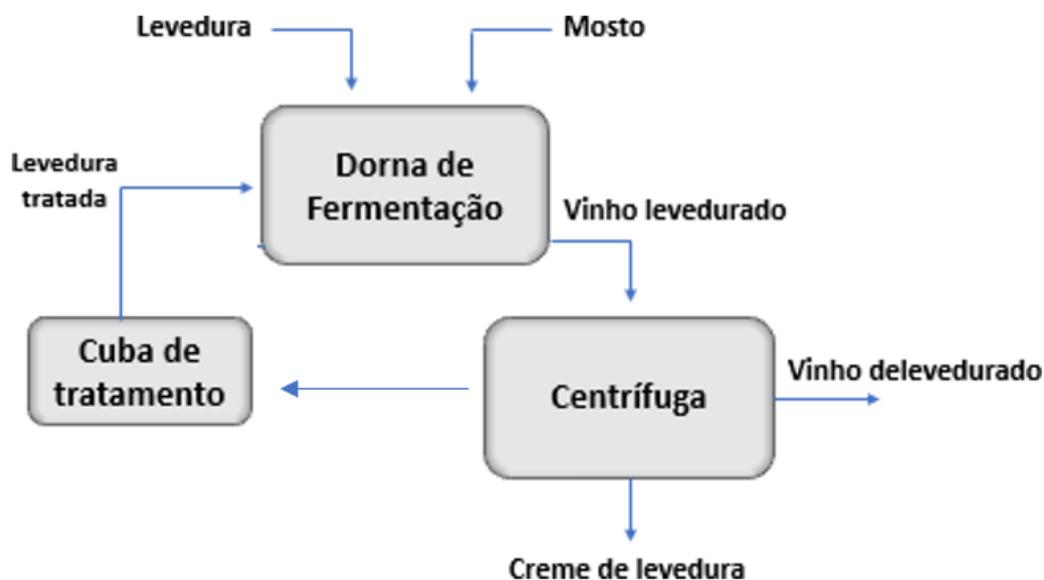
3.1.2.5. Fermentação

A próxima etapa para a produção do etanol é a fermentação, um processo biológico em que ocorre diversas reações parciais com a atuação de leveduras como catalisadores. No procedimento, é necessária a atenção redobrada com fatores que podem interferir de maneira significativa no rendimento, como a temperatura, pH, concentração alcoólica, qualidade da matéria prima, presença de aditivos químicos, entre outros. De acordo com Tonon (2013), para a fermentação alcoólica, a qual apresenta uma eficiência em torno de 90% quando ocorre de maneira correta, serão detalhados dois métodos utilizados: a fermentação por batelada alimentada e a fermentação contínua.

O processo mais usual é o que ocorre em batelada alimentada e se inicia com a adição dos microrganismos (levedura *Saccharomyces cerevisiae*) na dorna de fermentação e, em seguida, inclusão do mosto para ser fermentado. Após um período de, em média, 8 horas, o produto do fermentador, chamado de vinho levedurado, é transportado para a centrífuga, para que se faça uma separação de fases. Na centrifugação, obtém-se o produto chamado vinho delevedurado, que será enviado para destilação. (TONON, 2013).

Para o processo de batelada alimentada, pode-se utilizar o método incluindo reciclo, processo esse chamado de Melle-Boinot. Nele, ocorre o tratamento da levedura para que se tenha uma reutilização desse microrganismo no fermentador enquanto ocorre a fermentação. A figura 4, a seguir, demonstra o método de fermentação batelada alimentada, utilizando reciclo.

Figura 4 - Método simplificado de fermentação batelada alimentada com reciclo.



Fonte: Acervo Pessoal

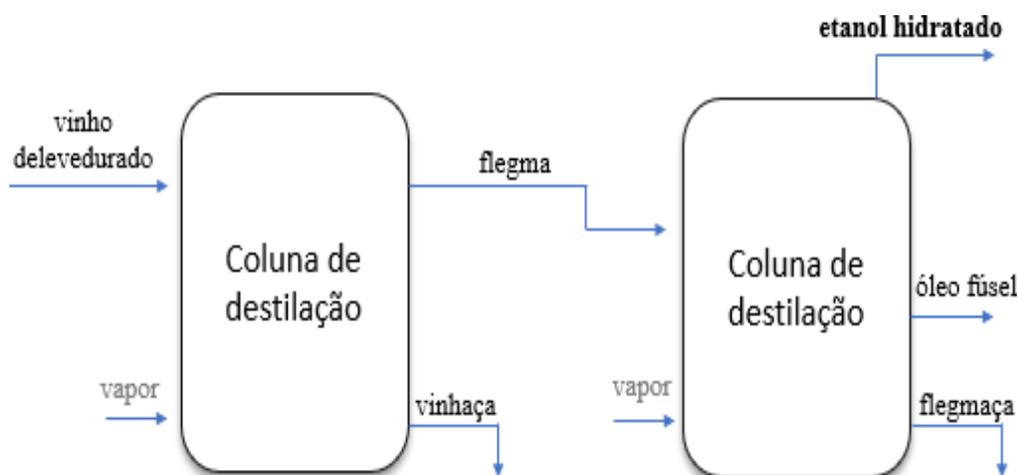
O segundo método, a fermentação contínua, ocorre de maneira semelhante ao de batelada alimentada, exceto pelo fato de o processo manter uma vazão de alimentação contínua e constante durante todo o período de tempo. As vantagens desse método é o aumento da produtividade do processo, pela redução de tempo morto, maior facilidade de

operação e um vinho levedurado uniforme. Contudo, é necessário um alto investimento inicial, além de ser mais susceptível às contaminações e riscos de formação de espuma e microrganismos nas tubulações (TONON, 2013).

3.1.2.6. Destilação

A coluna de destilação é um equipamento cilíndrico que apresenta compartimentos internos, como bandejas ou pratos, para que ocorra o contato entre uma mistura, colocada na parte superior, e o vapor que sobe pela parte inferior, com o objetivo de, pela diferença de volatilidade das substâncias, fazer a separação dessa mistura. No processo de produção de etanol, o vinho levedurado, com um teor alcoólico entre 8° a 12° GL, alimenta a primeira coluna pela parte superior, como pode ser visto na Figura 5. Com isso, ele entra em contato com o vapor, ocorre a separação e se obtém a vinhaça, a qual sai pela parte inferior da coluna A, e o flegma (líquido e vapor), que é levada para a coluna seguinte

Figura 5 - Processo padrão de destilação para formação do etanol.



Fonte: Acervo Pessoal

Na segunda coluna, o flegma entra em contato com vapor e obtêm-se o etanol hidratado, um dos produtos finais da destilaria. Durante o processo de destilação, pode-se notar, a partir da Figura 5, que há formação de subprodutos, como a vinhaça, reutilizada como pré-aquecimento, através de um trocador de calor, do vinho levedurado que alimenta a coluna e que pode ser utilizada na produção de biogás, fertirrigação; flegmaça, que contém teor alcóólico abaixo de 0,02% e o óleo fúsel, composto por álcoois de cadeia longa (Dias, 2008).

3.1.2.7. Desidratação

Para se obter o etanol desidratado utilizado em misturas com gasolina, conhecido como etanol anidro, é necessário passar pela etapa de desidratação. Para essa etapa do processo, há alguns métodos mais usuais utilizados como a destilação azeotrópica heterogênea, a destilação extrativa e a adsorção em peneiras moleculares (Dias, 2008).

A destilação azeotrópica heterogênea utiliza um terceiro componente, sendo o mais usual atualmente o cicloexano, como um componente de arraste na mistura etanol-água. Nesse processo alimenta-se a coluna azeotrópica com o agente de arraste e o etanol hidratado, obtendo-se o etanol anidro e um azeótropo que quando decantado forma duas fases líquidas. Com isso, a fase que apresenta alta porcentagem de cicloexano é reutilizada na coluna e a outra fase é levada para uma coluna de recuperação de água (Dias, 2008).

Na destilação extrativa, também chamada de destilação azeotrópica homogênea, utiliza-se um solvente com ponto de ebulição superior a um dos componentes da mistura a ser separada e, diferente do primeiro método de destilação detalhado acima, esse processo não forma duas fases líquidas. O solvente mais utilizado nesse método é o monoetilenoglicol (MEG), que arrasta a água, enquanto o etanol é obtido mais puro no topo da coluna extrativa. Além dessa primeira coluna, utiliza-se uma de recuperação para o solvente ser reutilizado no processo.

De acordo com Dias (2008), a adsorção de peneiras moleculares, último método de desidratação citado, é um processo que ocorre com um leito de zeólitas adsorvendo a água encontrada no etanol hidratado, utilizando, para isso, as peneiras moleculares. As principais vantagens desse processo é a alta qualidade do etanol anidro e não apresentar risco de contaminação por utilização de solvente. Contudo, é ainda pouco utilizado no Brasil pelo alto custo de investimento inicial, já que há a necessidade de importar as zeólitas que são usadas nesse processo.

3.1.3 Impacto ambiental do processo de produção de Etanol

O etanol é um produto de grande valor e potencial para a economia brasileira, sendo o país o 2º maior produtor do mundo, perdendo apenas para os Estados Unidos. Contudo, o seu processo de produção desencadeia, em aspectos ambientais, um impacto negativo e, por isso, há a necessidade de analisar e estudar esse desempenho ambiental. No Brasil, as operações na indústria são regulamentadas e regidas por normas e leis ambientais que apresentam o objetivo de diminuir os efeitos prejudiciais das etapas do processo. Entretanto, atualmente, o crescimento da consciência ambiental faz com que constantemente se analise e busque ainda mais novas alternativas e oportunidades que colaborem com uma produção mais sustentável (MACHADO & SILVA, 2010).

Na geração de etanol, principais fatores que ocasionam impactos negativos são as emissões de gases, liberação de efluentes no ambiente, utilização desenfreada de água e outros recursos naturais, e o uso incorreto de resíduos e subprodutos. Na Tabela 1 são descritos alguns impactos importantes durante todo o ciclo de produção.

Tabela 1 - Impactos ocasionados pelo processo de obtenção de Etanol.

Etapa	Aspecto Ambiental	Ação	Impacto no Ambiente
Colheita Manual	Emissão de Gases	Queimadas para facilitar o corte	Poluição do ar
Lavagem	Consumo de água	Lavagem da Cana	Esgotamento dos recursos naturais
Lavagem	Efluentes	Despejo da Vinhaça	Contaminação do solo
Moagem	Consumo de água	Utilizada nos ternos	Esgotamento dos recursos naturais
Caldeira	Emissão de Gases	Geração de energia utilizando bagaço	Poluição do ar
Caldeira	Emissão de Partículas	Geração de cinzas na queima do bagaço	Poluição do ar
Tratamento do Caldo	Resíduos sólidos	Torta de Filtro	Contaminação do solo
Fermentação	Emissão de Gases	Emissão de CO ₂ gerado nas dornas	Poluição do ar
Destilaria	Efluentes	Solução de água/soda para limpeza da coluna	Contaminação da água
Destilaria	Consumo de água	Perda de água no resfriamento	Esgotamento dos recursos naturais
Destilaria	Efluentes	Despejo da Vinhaça	Contaminação da água
Desidratação	Efluentes	Resíduo do solvente utilizado na desidratação	Contaminação da água

Fonte: Adaptado de Leonardo (2012)

Há alguns casos detalhados acima que existe a possibilidade e oportunidade de reutilização no processo e na usina, o que colabora com o desempenho ambiental. É o caso da torta de filtro, a qual é utilizada como fertilizante e, também, da vinhaça, em que é utilizada para aquecer o caldo no tratamento do caldo e também o vinho, antes de entrar na coluna de destilação; além da possibilidade de ser utilizada como na fertilização do solo e na produção do biogás. É importante ressaltar que, durante todo o processo, há a geração de outros resíduos e subprodutos além dos descritos acima, que se não destinados de maneira consciente, afetarão o ambiente.

A poluição do ar diante da emissão de gases é uma consequência recorrente durante o processo. Contudo, a alta emissão de gás carbônico ocorre principalmente em duas etapas principais do procedimento: na queima do bagaço na caldeira e na fermentação do vinho, descritas na Tabela 1. A avaliação do impacto dessa emissão do gás carbônico durante o processo, em uma destilaria, será feita no trabalho

3.2 Conceito e Aplicação de Análise de Ciclo de Vida (ACV)

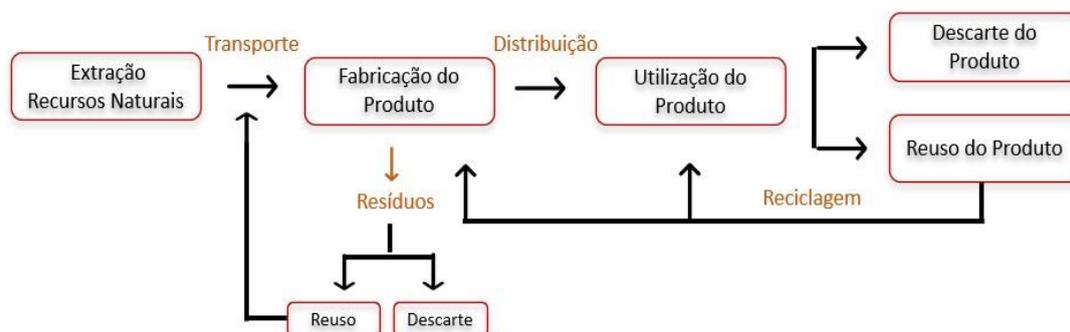
3.2.1. Conceito de ACV

A Análise de Ciclo de Vida (ACV) surgiu na década de 1960 em meio a um aumento da conscientização da sociedade em avaliar e mensurar o impacto ambiental diante de qualquer tipo de ação feita pelo ser humano (ABNT,2009). Segundo Chehebe (1997 apud MAZUR, 2011), todo tipo de produto, independente de qual material é formado ou qual o seu processo de produção, provoca, em aspectos ambientais, algum impacto.

O ciclo de vida de um produto manufaturado abrange todas as etapas desde a extração dos recursos naturais até o momento em que o mesmo é descartado (em alguns casos, pode ser reutilizado ou reciclado), passando por todos os sistemas de produção intermediárias como fabricação (processo industrial para a formação desse produto), distribuição e uso. Com isso, a análise de todas essas etapas, com sua abordagem sendo conhecido como do “berço ao túmulo”, oferece oportunidades de se avaliar melhorias para o processo em si. Contudo, cada análise apresenta um objetivo diferente e por isso, além da abordagem geral, é possível a escolha de partes do ciclo de vida como análise, como o estudo da extração de recursos naturais até sua etapa de fabricação, chamada de

“berço ao portão”. Na Figura 6, é possível observar o ciclo de vida, de maneira geral, de um produto manufaturado.

Figura 6 - Fluxograma Geral “Berço ao Túmulo” de um Produto



Fonte: Acervo Pessoal.

Atualmente, diante do aumento significativo de estudos sobre impacto ambiental e suas consequências à curto e longo prazo, a Análise de Ciclo de Vida oferece vantagens em sua utilização pelo fato de ser aplicada para diversas finalidades, como para a melhoria e desenvolvimento de um produto ou serviço em específico, para a seleção de indicadores que possam oferecer um melhor entendimento de desempenho ambiental, para uma análise aprofundada para gerenciamento das matérias primas críticas, as quais são caracterizadas por serem cruciais às bases industriais e que levantam uma preocupação por seu uso frequente, além da criação de planejamentos estratégicos com definição de prioridades nas indústrias e organizações (ABNT,2009).

3.2.2. Aspectos normativos da ACV no Brasil

Com o aumento dos estudos referentes ao ciclo de vida de produtos e serviços por causa do fomento de se conhecer o desempenho e seu efeito no ambiente, notou-se a importância em padronizar a metodologia e introduzir normas para que as análises fossem feitas utilizando esse padrão. A normatização, no Brasil, iniciou-se com o lançamento da ABNT NBR ISO 14040, em 2001, divulgada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas e destinada a gestão ambiental (ABNT,2009).

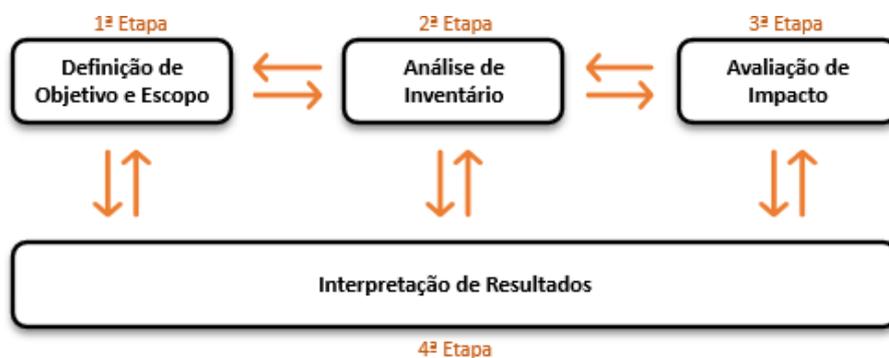
Atualmente, no país, as duas normas que regulam a ACV são a ABNT NBR ISO 14040:2009 (Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estruturas) e ABNT NBR ISO 14044:2009 (Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações) e, em conjunto, formam a metodologia do estudo.

3.2.3. Etapas da ACV

De acordo com Silva (2006 *apud* GRISOLI, 2011), os estudos de ACV apresentam a praticidade de serem aplicados a diferentes sistemas, de maneira versátil e produtiva, pelo fato de poderem retratar vários objetivos em sua análise. Contudo, é necessário ficar atento em relação a organização de dados que será utilizada, a qual dependendo do sistema a ser analisado, pode trazer incertezas e, conseqüentemente, afetar a qualidade dos resultados obtidos (NUMATA JUNIOR & UGAYA, 2016).

Em linhas gerais, a ACV de um produto ou serviço apresenta uma estrutura definida para que a metodologia de análise seja utilizada para gerar resultados claros e realistas. A norma da série ISO 14040 é composta por quatro etapas que oferecem: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação de resultado. A Figura 7 apresenta as etapas da Análise de Ciclo de Vida da atual norma da ABNT.

Figura 7 - Etapas da Análise do Ciclo de Vida.



Fonte: Adaptado de ABNT (2009)

De acordo com a Figura 7, as etapas do estudo apresentam um fluxo nas duas direções, ou seja, estão interligadas e, durante o processo de construção da análise como um todo, podem ser alteradas para que estejam alinhadas entre si.

3.2.3.1. Definição de Objetivo e Escopo

A definição de objetivo e escopo para a Análise de Ciclo de Vida representa a etapa qualitativa do estudo, definindo sua precisão. Segundo Mazur (2011), para que seja concluída a definição de objetivos, deve-se ter, de maneira clara, as razões para qual o estudo está sendo feito, as aplicações que serão utilizadas e o seu público-alvo definido.

Na análise, o escopo representa o conjunto de características que serão aplicadas, ou seja, definem-se parâmetros como a função (sistema a ser analisado) e sua unidade funcional, as fronteiras do sistema, os critérios e hipóteses que serão utilizadas durante o estudo, além de se explicitar categorias para se avaliar o impacto produzido durante o processo (ABNT, 2009).

De acordo com Assis (2009), a unidade funcional representa a referência de unidade de medida para as entradas e saídas quantificadas no inventário, enquanto as fronteiras definem quais etapas dos processos devem ser incluídas na análise do ciclo de vida, sendo fundamental as mesmas estarem alinhadas com o objetivo do estudo. Com isso, para se definir as fronteiras de maneira proveitosa para a análise, é necessário considerar a aplicação pretendida para esse estudo, as restrições em relação aos dados coletados e as hipóteses levantadas (MAZUR, 2011).

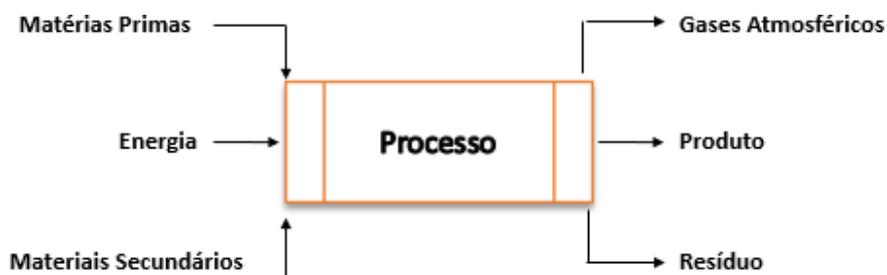
A importância de uma boa criação de escopo, recai sobre a definição de dimensão e profundidade do estudo. Com isso, é fundamental avaliar quais unidades do processo devem ser incluídas para que se tenha a melhor qualidade de informações para a análise (MAZUR,2011).

3.2.3.2. Análise de Inventário

O inventário de ciclo de vida (ICV) de um produto ou sistema é a coleta de informações dos fluxos de massa e energia que entram e saem durante o processo, considerando as fronteiras definidas no escopo (IBICT, 2016 *apud* SOARES,2018). A etapa de análise de inventário, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), ocorre de maneira iterativa, à medida que se vai coletando dados e se aprofundando sobre o sistema, é possível ocorrer alterações no procedimento, sempre

mantendo como prioridade a coerência com o objetivo da análise. Na Figura 8 observa-se o fluxo de entrada e saída de um processo geral.

Figura 8 - Fluxo geral de entrada e saída de um processo.



Fonte: Acervo Pessoal.

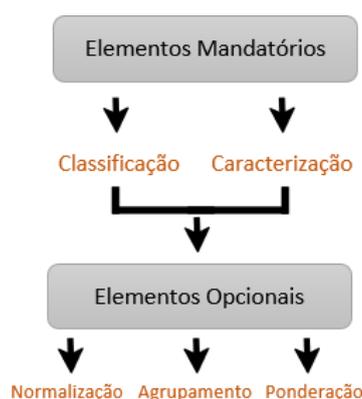
É importante que, durante a coleta de dados, se faça um levantamento dos critérios para tomada de decisão de quais variáveis devem ser utilizadas no estudo e que os dados escolhidos estejam relacionados com a unidade funcional decidido no escopo (TAKEDA, 2008).

De acordo com Mazur (2011), para se obter um inventário completo, é imprescindível que seja feita uma validação e correlação de dados, para diminuir os riscos de qualidade, uma alocação de fluxos quando o sistema apresenta mais de um produto (com uma porcentagem sendo utilizada na reciclagem) e o refinamento das fronteiras caso seja necessário.

3.2.3.3. Avaliação de Impacto

Na terceira etapa de análise de ciclo de vida, o principal objetivo é avaliar os impactos potenciais que o processo pode oferecer utilizando os dados do inventário, tendo como prioridade os aspectos ambientais, mas podendo considerar impactos na sociedade de maneira direta e a curto prazo, como na saúde. Para que se tenha uma análise consistente, inclui-se alguns elementos durante essa etapa, sendo alguns obrigatórios e outros opcionais. Na Figura 9 é possível observar os elementos para construção da avaliação.

Figura 9 - Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida



Fonte: Acervo Pessoal.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), os elementos chamados mandatórios são a classificação por categoria das entradas e saídas do sistema a partir dos impactos encontrados e a caracterização, ou seja, a quantificação dos indicadores separados por categoria, para encontrar um perfil de avaliação de impacto. Já os elementos opcionais, que podem ser utilizados após ser feita a etapa principal, foram divididos em normalização, em que se calcula os indicadores utilizando alguma referência específica; o agrupamento, o qual as categorias são separadas em escalas diferentes e a ponderação, o qual se inclui um maior peso no resultado de um tipo de impacto em específico.

3.2.3.4. Interpretação de Resultados

Na última etapa da Análise de Ciclo de Vida, ocorre a interpretação dos resultados obtidos nas fases anteriores. De acordo com a Associação de Normas Técnicas (2009), os resultados devem ser coerentes com os objetivos da análise e serem apresentados de forma clara para que sejam devidamente compreendidos, trazendo, assim, uma reflexão crítica sobre o estudo.

3.3. Softwares de apoio para a ACV

Com o aumento da utilização de Análises de Ciclo de Vida, houve o desenvolvimento de softwares com o intuito de auxiliar no desenvolvimento desse estudo, facilitando no gerenciamento de dados utilizados.

Os softwares, de maneira geral, apresentam a praticidade de realização dos cálculos de massa e de energia, além de facilitar a manipulação da variada quantidade de parâmetros que pode ser encontrada em uma análise específica de determinado produto ou sistema. Na Tabela 2 são apresentados exemplos de alguns desses softwares utilizados como apoio para a Análise de Ciclo de vida.

Tabela 2 - Exemplos de Softwares utilizados em ACV.

Software	País de Origem	Website
GaBi	Alemanha	http://www.gabi-software.com/brazil/index/
Eco-it	Holanda	https://www.ecoinvent.org/partners/ecodesign-tools/ecodesign-tools.html
SimaPro	Holanda	https://simapro.com/
OpenLCA	Alemanha	http://www.openlca.org/
BEES	Estados Unidos	https://www.nist.gov/services-resources/software/bees
EIO-LCA	Estados Unidos	http://www.eiolca.net/
Athena	Canada	http://www.athenasmi.org/
GREET	Estados Unidos	https://greet.es.anl.gov/

Fonte: Acervo Pessoal.

Para a escolha do software para o estudo, deve-se levar em consideração alguns aspectos como disponibilidade (há algumas opções pagas e outras gratuitas), um banco de dados com uma grande variedade de informações e a possibilidade de edição desses dados caso seja necessário para determinado assunto (SFEIR, 2013). O software escolhido, para esse trabalho, foi o SimaPro® Versão Demo (uso autorizado por 30 dias).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do trabalho estrutura-se na utilização de um estudo de Análise de Ciclo de vida, normatizada pela ISO 14040 da Associação Brasileira de Normas Técnicas. Como visto, essa norma divide-se em quatro principais etapas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação de resultado.

4.1. Objetivo e Escopo

Para o trabalho, o objetivo da Análise de Ciclo de Vida da produção de etanol na destilaria é avaliar o desempenho ambiental associado as etapas escolhidas desse produto diante dos resultados obtidos, com um foco nas emissões dos gases responsáveis pelo aquecimento global, colaborando com alternativas que possam mitigar esses impactos no âmbito ambiental. O escopo desse estudo foi criado a partir das características da cadeia produtiva e dos seus produtos finais, além da disponibilidade de informações quantitativas do processo de fabricação analisado. O modelo do processo produtivo utilizado neste trabalho foi construído utilizando-se o Simulador Pentagro®, e representa uma usina padrão do estado de São Paulo, e foi cedido para uso neste trabalho pela Pentagro Soluções Tecnológicas. Foi definido para o trabalho um período de 200 dias e descrita uma unidade funcional de 1041,67 ton/h de cana com um fluxo de produção total de etanol de 73,06 ton/h. O diagrama de fluxo do processo é mostrado do Apêndice 1.

Como já descrito no tópico de revisão bibliográfica, o processo de ciclo de vida do etanol obtido a partir da cana de açúcar inicia-se no plantio da matéria prima, passando pelas etapas intermediárias como a colheita, fabricação do etanol, distribuição e finaliza na etapa de uso (caso não haja a etapa de reciclagem no sistema). Para análise desse trabalho, de acordo com o objetivo definido, foram escolhidas as etapas de cultivo até fabricação como fronteiras do processo, definindo um estudo do “berço ao portão”. Na Figura 10 destacam-se as etapas que foram analisadas nessa abordagem.

Figura 10 – Etapas do ciclo de vida e a fronteira do sistema para o trabalho.



Fonte: Acervo Pessoal.

Inicialmente, seria feito a análise apenas da etapa de fabricação do etanol, principal foco desse trabalho, pelo fato de ter sido disponibilizadas todas as informações de dados sobre a matéria prima utilizada, sobre o processo em si e o produto final no modelo da planta construído com o Simulador Pentagro®. A escolha de se incluir as etapas de cultivo, colheita e transporte na análise desse trabalho ocorreu pelo fato de querer resultados quantitativos para demonstrar que são etapas relevantes quando analisamos a questão ambiental. Com isso, utilizou-se a informação principal da destilaria simulada para relacionar as outras etapas: a quantidade de cana de açúcar utilizada na fabricação do etanol. Portanto, foram utilizadas para análise as etapas de cultivo, colheita, transporte e fabricação. As partes de todo o processo são citadas abaixo:

- Cultivo,
- Colheita da cana,
- Transporte cana até a Destilaria,
- Limpeza da Cana e Extração do Caldo,
- Cogeração na Caldeira,
- Tratamento Físico e Químico,
- Evaporação,
- Fermentação,
- Destilação e Desidratação.

Para a definição de valores para os inventários nas etapas de cultivo e colheita, utilizou-se a informação coletada da destilaria, em que o fluxo de entrada de cana é de 1041,67 ton/h, como dito anteriormente. Com isso, definiu-se, para o trabalho, uma fabricação ocorrendo durante 24 horas por dia em 200 dias e, diante disso, foi feito o cálculo da quantidade de cana cultivada e colhida, além da quantidade de área envolvida nesse cultivo. Além disso, foram utilizadas informações da literatura para cálculo de insumos como fertilizantes, herbicidas, inseticidas, quantidade média de combustível utilizado durante as etapas pelo maquinário, quantidade de vinhaça durante a fertirrigação, entre outros. No tópico de Análise de Inventário, será descrito os valores utilizados de acordo com a literatura usada como referência.

Para a etapa de colheita, foi definido analisar o método de colheita mecanizada, pois de acordo com o Instituto de Economia Agrícola (2020) este método representa cerca de 95,3% do tipo de colheita no Estado de São Paulo desde a safra 2018/2019.

Considerando que, o Estado de São Paulo, é o principal produtor de cana no Brasil, a atuação para erradicar a colheita manual e, conseqüentemente, a queima da matéria prima se torna um fator relevante na diminuição do impacto ambiental dessa etapa, quando focamos na emissão de poluentes no ar.

Para a etapa de transporte da cana até a destilaria, utilizou-se da literatura para encontrar o valor médio de distância entre a fazenda e a destilaria, quantidade de cana por caminhão e o valor de consumo de combustível por quilômetro. Os valores e referências serão descritas no tópico seguinte. Na etapa de fabricação serão consideradas os fluxos de entrada de matéria prima, água e fluxos de saída de emissões para o ar, resíduos, efluentes, subprodutos e produtos, para se analisar o desempenho. Além disso, foram calculados, de acordo com as informações da literatura a quantidade de alguns insumos químicos durante essa etapa do processo, para complementação da análise no software.

4.2. Análise do Inventário

A análise do inventário foi feita utilizando as informações da literatura e dados coletados, com a utilização do software SimaPro® como apoio. Para o trabalho, foi decidido analisar o inventário de duas formas: (i) comparando-se as etapas da fronteira do sistema e, (ii) fazendo uma comparação de um possível cenário com o cenário atual na etapa de fabricação. O intuito da primeira análise é demonstrar a relevância, em aspecto ambiental, de cada etapa analisada quando comparadas entre si, enquanto a segunda análise tem como objetivo avaliar alternativas que influenciem os resultados da etapa de fabricação, considerando apenas o foco no meio ambiente.

Na etapa de cultivo, utilizando-se as informações definidas e explicitadas no tópico anterior, foi utilizado uma base de dados com referência na base Agri-footprint da biblioteca do SimaPro®, com a opção de modelo feita para o cultivo brasileiro, considerando a produção de sementes, utilização de pesticidas, fertilizantes e herbicidas, uso de energia para o transporte durante as práticas de manejo no campo (não considerando o possível transporte de tortas de filtro e vinhaça reutilizadas da destilaria) e uso de diesel para equipamentos utilizados durante transporte desses insumos, plantio, fertirrigação e manejo do cultivo durante o período. Os fluxos de saída consideram emissões do campo para o ar, além de mudança direta do uso da terra devido ao uso de produtos químicos e desmatamento do solo. Na Tabela 3 são descritas essas informações

do inventário destinadas para 1 hectare, com a média de 80 ton de cana produzida (os valores de cálculo para a produção total podem ser encontrados no Apêndice 2).

Tabela 3 - Inventário para o Cultivo e Manejo da Cana.

Cultivo e Manejo			
Entradas - Balanço de Massa e Energia			Referência utilizada
Quantidade de cana de açúcar para fabricação na destilaria em 24h/dia por 200 dias (ton)	5.000.000	-	fluxo de entrada na destilaria
Produtividade média cana 1º e 2º corte (ton/ha)	80	-	Nova Cana (2020)
Área Total Considerada (ha)	62500	-	-
fator eficiência de sementes (ha cana/ha sem)	7	-	Macedo & Seabra & Silva (2008)
Inseticidas kg/ há	0,21	388MJ/ha	Boddey et al (2008) apud DIAZ (2011))
Herbicidas (glifosato e atrazina) kg/há	3,41	481,8MJ/ha	
Fertilizantes com nitrogênio kg/há	60,48	57,6MJ/ha	
Fertilizantes com potássio kg/ há	88,53	488MJ/ha	
Calcário kg/ha.ano	391,47	520,5MJ/ha	
Fertilizantes com fósforo kg/há	17,07	6,2MJ/ha	
Uso de Vinhaça fertirrigação (m³/ha)	192	715MJ/ha	
Diesel Equipamentos (L/ha)	105	35MJ/L	
Infraestrutura Básica (m²)	0,02	-	Base de Dados Agri-footprint
Saídas - Balanço de Massa e Energia			Referência utilizada
Emissões CO2 - Fertilizante com Nitrogênio (kg/kg fert.)	0,61	-	Boddey et al (2008) apud DIAZ (2011))
Emissões CO2 - Fertilizante com Potássio (kg/kg fert.)	0,34	-	
Emissões de CO2 - Fertilizante com Fósforo (kg/kg fert.)	0,17	-	
Emissão CO2 pelo Fertilizante com Cal (kg/kg cal.)	0,75	-	
Emissões CO2 - Inseticidas e Herbicidas (kg/GJ)	73,3	-	
Emissões CH4 - Inseticidas e Herbicidas (kg/GJ)	0,003	-	
Emissões de N20 - Inseticidas e Herbicidas (kg/GJ)	0,0006	-	
Emissão CO2 Diesel (kg/GJ)	74,1	-	
Emissões de N20 Diesel (kg/GJ)	0,0006	-	
Emissão de Ch4 Diesel (kg/GJ)	0,003	-	
Emissão de N20 pela vinhaça (kg/há)	0,331	-	
Emissão de CH4 pela vinhaça (kg/há)	3,627	-	
Emissão de Amônia por uso de Fertilizante (kg/ha)	11,4	-	
Resíduos no solo pelos Herbicidas - Glifosato (kg/ha)	0,245	-	
Resíduos no solo pelos Herbicidas - Atrazina (kg/ha)	0,145	-	
Resíduos na água pelo uso de fertilizante - Nitrato (kg/ha)	0,001664	-	
Resíduos na água pelo uso de fertilizante - Fósforo (kg/ha)	1,45067E-05	-	
Resíduos na água pelo uso de fertilizante - Glifosato (kg/ha)	5,14844E-07	-	

Fonte: Acervo Pessoal

Para a fase de colheita mecanizada da cana, considerou-se o valor definido de cana colhido para produção total na destilaria, quantidade de combustível utilizado no maquinário para essa atividade, mas desconsiderando da análise a mão de obra humana (muito relevante quando feito um estudo econômico e social). Com isso, calculou-se quantidade de poluentes liberados no ar durante a colheita, utilizando as referências da primeira etapa e o apoio da base de dados, modelada para a realidade brasileira. A tabela 4 descreve os valores utilizados com suas respectivas referências e unidades da literatura. No Apêndice, é demonstrado o valor calculado para a produção total dessa etapa.

Tabela 4 – Inventário para a etapa Colheita da Cana

Colheita Mecanizada			
Entradas - Balanço de Massa e Energia			Referência utilizada
Quantidade de cana de açúcar para fabricação na destilaria em 24h/dia por 200 dias (ton)	5000000	-	fluxo de entrada na destilaria
Produtividade média cana 1º e 2º corte (ton/ha)	80	-	Nova Cana (2020)
Área Considerada (ha)	62500	-	-
Diesel para equipamentos durante a Colheita (L/ha)	90	35MJ/L	Boddey et al (2008) apud DIAZ (2011)
Saídas - Balanço de Massa e Energia			Referência utilizada
Emissões CO ₂ - Diesel (kg/GJ)	74,1	-	IPCC (2006) apud DIAZ (2011)
Emissões N ₂ O - Diesel (kg/GJ)	0,0006	-	
Emissões CH ₄ - Diesel (kg/GJ)	0,003	-	

Fonte: Acervo Pessoal

Para a etapa de transporte de cana, utilizou-se informações médias da literatura para o cálculo das informações principais e o apoio do banco de dados que foi construído para a realidade brasileira do setor. Para o cálculo da quantidade de combustível consumido, considerou a quantidade de ida e volta até a destilaria para transportar toda a cana utilizada na fabricação no período dos 200 dias para se calcular o valor de emissão de gases poluentes. Com isso, a tabela 5 detalha os dados considerados fundamentais para a etapa de transporte, conforme encontrado na literatura. No Apêndice 2, os valores tabelados demonstram o transporte total da cana produzida.

Tabela 5 - Inventário para a etapa de Transporte

Transporte para a Destilaria			
Entradas - Balanço de Massa e Energia			Referência utilizada
Quantidade de cana de açúcar para fabricação na destilaria em 24h/dia por 200 dias (ton)	5000000	-	fluxo de entrada na destilaria
Produtividade média cana 1º e 2º corte (ton/ha)	80	-	Nova Cana (2020)
Área Considerada (ha)	62500	-	-
Distância média - destilaria (km)	30		Macedo & Seabra & Silva (2008) apud DIAZ (2011)
Quantidade de cana por Caminhão (ton)	27	-	
Diesel Transporte até Destilaria (km/L) – Carregado	3	-	
Diesel Transporte até Destilaria (km/L) – Descarregado	5	-	
Quantidade de cargas necessárias por hectare	2,96	-	-
Diesel utilizado em 1 carga ida e volta - Destilaria (L)	16	35MJ/L	DIAZ (2011)
Saídas - Balanço de Massa e Energia			Referência utilizada
Emissões CO2 - Diesel (kg/GJ)	0,0741	-	IPCC (2006) apud DIAZ (2011)
Emissões N2O- Diesel (kg/GJ)	0,0006	-	
Emissões CH4 - Diesel (kg/GJ)	0,003	-	

Fonte: Acervo Pessoal

Em relação aos inventários definidos para as três primeiras etapas do trabalho, é importante salientar que outros fatores poderiam ser utilizados na análise, como pequenas porcentagens de outros gases durante o consumo de insumos (o foco dado foi nos principais e com maior liberação: gás carbônico, monóxido de carbono, metano e gases compostos de nitrogênio), cálculo da mão de obra empregada, especificação da infraestrutura da fazenda, outros possíveis herbicidas, inseticidas e fertilizantes menos utilizados, além de outras atividades e emissões menores que acontecem nas etapas. Contudo, levando em conta que o foco do trabalho foi a questão ambiental e alguns fatores que não foram considerados trariam um relevante impacto para questão social e econômica, foi considerado que as informações utilizadas trariam um valor consistente da realidade de impacto dessas etapas em relação ao ambiente.

Para a fase de fabricação, inicia-se a atividade com a chegada da cana na planta, a qual será analisada funcionando 24 horas por dia em um período de 200 dias, como dito anteriormente. O conjunto de dados inclui informações como pureza da cana, eficiência de etapa, temperatura e pressão, média de produção e exportação de energia, quantidade de água captada, liberação de poluentes e resíduos, entre outros. Como o principal objetivo do trabalho é a busca pelo impacto das emissões no ar, alguns poluentes que não influenciavam de maneira significativa esse aspecto, foram desconsiderados. Para a análise, utilizou-se as informações coletadas da destilaria e teve como referência, no software, o banco de dados Ecoinvent, um dos mais consistentes e completos para análise de ciclo de vida de um produto. A tabela 6 consiste nas informações gerais da etapa de fabricação (Os valores totais calculados para os parâmetros podem ser vistos no Apêndice 2).

Tabela 6 - Informações Gerais da Fabricação

Fabricação Etanol		
Produção		
Quantidade total de cana necessária para a destilaria em funcionamento por 24h por dia em um período de 200 dias (ton)	5000000	
Quantidade de horas totais (h)	4800	
Produção de Etanol Total produzido no período (ton)	10551922	
Informações Gerais		<i>Referência utilizada</i>
Produção Etanol Anidro (ton/h)	1096,343	Dados Destilaria Simulador Pentagro®
Produção Etanol Hidratado (ton/h)	1101,974	
Eficiência Industrial (%)	84,92	
Produção de Energia (MW)	88,754	
Exportação de Energia (MW)	60,629	
Eficiência Industrial (%)	84,92	
Consumo Vapor de Escape (kg/ton cana)	426,35	
Consumo Vapor Direto (kg/ton cana)	465,96	
Captação de Água (m ³ /ton cana)	1,096	

Fonte: Acervo Pessoal

A primeira e segunda etapa, limpeza e extração do caldo, é composta pelo equipamento de limpeza a seco, moendas, reator de inversão, com entrada principal para a cana e água

nas moendas e saída principal o caldo, palha seca e bagaço. A Tabela 7 abaixo demonstra essa etapa com suas principais informações.

Tabela 7 - Inventário – Limpeza da Cana e Extração do Caldo

Etapa de Limpeza			<i>Referência utilizada</i>
Entrada de Cana na Limpeza (ton/h)	1041,667	259,19kJ/kg	Dados Destilaria Simulador Pentagro®
Pureza (%)	87,5		
ART (ton/h)	161,33		
POL (%)	14,21		
T (°C)	30		
P (bar)	1		
Sujeira (%)	0,01		
Fibra	0,1322		
Caldo	0,8578		
Saída da Palha limpa (ton/h)	16		
Etapa de Extração			<i>Referência utilizada</i>
Entrada Cana Limpa (ton/h)	1007,4	197,25kJ/kg	Dados Destilaria Simulador Pentagro®
Pureza (%)	0,006		
T (°C)	30		
P (bar)	1		
Sujeira	0,006		
Fibra	0,121		
Caldo	0,873		
Entrada Água (m³/h)	220,024	-	
Saída Caldo (m³/h)	910,31	-	
Saída Bagaço (ton/h)	257,41	-	
Perda Bagaço %	3,624	-	

Fonte: Acervo Pessoal

A etapa de Cogeração na Caldeira é uma etapa muito relevante para o trabalho, pelo fato da liberação de gases da combustão com a queima do bagaço. As informações do inventário são apresentadas abaixo. Os valores totais calculados das emissões de poluentes na etapa podem ser vistos no Apêndice 2

Tabela 8 - Inventário Geração de Energia

Etapa Caldeira - Geração de Energia			<i>Referência utilizada</i>
Quantidade de Caldeiras	2	-	Dados Destilaria Simulador Pentagro®
Pressão das Caldeiras (bar)	65	-	
Temperatura das Caldeiras (°C)	484,69	-	
Entrada Bagaço + Palha (ton/h)	117,274	270,92 kJ/kg	
Teor da Fibra (%)	44,4	-	
Pureza Bagaço (%)	70	-	
% base úmida	49,44	-	
POL (%)	1,697291		
Produção Vapor (ton/h)	515,58	-	
Entrada Água (ton/h)	247,57	-	
Sujeira bagaço (%)	3,725	-	
Saída de Cinzas (ton/h)	0,611	-	
Saída de Gases da combustão (ton/h)	627,4	12463,81KJ/kg	
% CO2 no Gás de Combustão	16,58		
% N2 no Gás de Combustão	62,21		
% O2 no Gás de Combustão	4,897		
% CO no Gás de Combustão	0,025		
% Água no Gás de Combustão	16,288		

Acervo Pessoal

As etapas seguintes são a de tratamento físico e químico do caldo. A coleta de dados descrita na Tabela 9 abaixo, refere-se ao inventário do tratamento químico, em que o processo se inicia em um reator de calagem, passando por outros principais equipamentos do processo com balão flash, decantador, filtros e diluidor.

Tabela 9 - Inventário Tratamento químico do Caldo

Etapa Tratamento Químico de Caldo			Referência utilizada
Entrada do caldo no reator de Calagem (ton/h)	968,69	203,21 kJ/kg	Dados Destilaria Simulador Pentagro®
T (°C)	30,85		
P (bar)	5		
Energia utilizada (MW)	0,21		
Saída do caldo no reator de Calagem (ton/h)	1114,36	238,01 kJ/kg	
Caldo saída do reator (%)	0,994		
Pureza Saída do Reator (%)	0,877		
Entrada no Balão Flash (ton/h)	1114,36	501,5 kJ/kg	
P (bar)	3,5		
T (°C)	105		
Quantidade de Decantador	3		
Volume do Decantador (m³)	500		
Entrada no Decantador (ton/h)	1102	477,2 kJ/kg	
P (bar)	0,95		
T (°C)	98,54		
Saída do Decantador (ton/h)	990,16	376,76 kJ/kg	
Bagaço para Entrada Centrífuga (ton/h)	2,083 ton/h		
Quantidade de tambor rotativo	4		
Volume do tambor rotativo (m³)	35		
Entrada para Tambor Rotativo (com Bagaço) (ton/h)	117,26	1312,73 kJ/kg	
Fibra	0,008		
Caldo da Entrada	0,931		
Brix	0,171		
Saída do tambor rotativo (ton/h)	138,51	561,95 kJ/kg	
Caldo da Saída	0,981		
Brix	0,131		
Saída caldo filtrado (ton/h)	138,5	473 kJ/kg	
Saída torta de filtro (ton/h)	16,52	-	

Fonte: Acervo Pessoal.

A etapa de evaporação é composta por dois pré evaporadores e um evaporador. No inventário, serão relatadas informações sobre o caldo, vapor de escape e vapor vegetal utilizados nesse processo. O inventário da evaporação, quando focado no aspecto de emissão de gases do efeito estufa, não apresenta influencia no desempenho.

Tabela 10 - Inventário Evaporação

Etapa de Evaporação			Referência utilizada
Entrada Caldo Tratado Pré Evaporador 1º efeito(ton/h)	570,16	441,84 kJ/g	Dados Destilaria Simulador Pentagro®
Entrada Vapor de escape pré evaporador (ton/h)	135,96	-	
T (°C) Caldo Tratado	115	-	
P (bar)	3	-	
Saída Vapor vegetal 1º efeito (ton/h)	131,99	-	
Entrada Caldo Tratado 2º Pré Evaporador 1º efeito(ton/h)	420	357,3 kJ/kg	
Produção Vapor de escape pré evaporador (ton/h)	159,65	-	
T (°C) Caldo Tratado	93,3	-	
P (bar)	3	-	
Saída Vapor vegetal 2º efeito (ton/h)	140	-	
Entrada Caldo Tratado Evaporador(ton/h)	289,99	436,3 kJ/Kg	
T (°C) Caldo Tratado	117,49	-	
P (bar)	1,8	-	
Entrada Vapor vegetal 1º efeito (ton/h)	35,568	-	
Saída Vapor vegetal 2º efeito (ton/h)	39,105	-	

Fonte: Acervo Pessoal

A etapa seguinte, etapa de Fermentação, é considerada uma das etapas fundamentais de análise de desempenho ambiental com foco em gases poluentes emitidos. No inventário com a coleta de dados da destilaria, há informações sobre a coluna de absorção para recuperação de etanol e o tratamento de levedura, em que se passa por um tanque diluidor, centrífuga e um secador. A Tabela 11 a seguir, descreve as principais informações do processo. Os valores totais calculados das emissões de poluentes na etapa podem ser vistos no Apêndice 2.

Tabela 11 – Inventário Fermentação

Etapa de Fermentação			Referência utilizada
Entrada Fermentador (ton/h)	726,48	116,74 kJ/kg	Dados Destilaria Simulador Pentagro®
Caldo na Entrada (ton/h)	289,99		
P (bar)	5		
T (°C)	32		
Água Fermentador (ton/h)	162,57	-	
Entrada na Coluna de Absorção (ton/h)	68,79	7093,9 kJ/kg	
Saída Coluna de Absorção (ton/h)	67,55	7039 kJ/kg	
% CO2 Saída Coluna	0,9979		
% Etanol Saída Coluna	0,0021		
Perda Fermentação (ton/h)	8,866	-	
Levedura Seca (Pós tratamento) (ton/h)	1,1	-	
% Fermento	0,9957	-	
% Sujeira	0,0043	-	

Fonte: Acervo Pessoal

As duas últimas etapas do processo de fabricação são utilizadas para produzir o etanol nas condições esperadas. Com isso, a etapa de destilação passa por colunas em que se utiliza vapor vegetal para a separação da mistura. O vinho, que vem da fermentação, é separado em três partes pelo modelo utilizado no trabalho e cada parte passa pelo mesmo processo: são enviados para a primeira coluna (A), segunda coluna (B) e no processo há uma coluna de regeneração do vinho/vinhaça. Nas duas colunas, com a utilização do vapor e reutilização da vinhaça como energia, ocorre o processo para geração do etanol hidratado.

O etanol hidratado é dividido em duas correntes, em que uma parte é utilizada para produção do etanol hidratado, com a outra parte sendo destinada a coluna (C), com um volume de 500m³/dia, utiliza-se vapor vegetal para separação do etanol da água, produzindo, assim, o etanol anidro. A tabela 12 abaixo, descreve as informações coletadas na destilaria para o inventário das últimas etapas do processo de fabricação.

Tabela 12 - Inventário Destilação e Desidratação

Etapa Destilação e Desidratação		Referência utilizada
Entrada na Coluna A (1)	269,89	Dados Destilaria Simulador Pentagro®
Saída para Coluna B (1)	48,018	
Entrada na Coluna A (2)	199,8	
Saída para Coluna B (2)	66,83	
Entrada na Coluna A (3)	375,67	
Vinhaça (ton/h)	475,2	
% Etanol	0,0005	
% Fermento na Vinhaça	0,0621	
Vinhaça Concentrada (tratamento) (ton/h)	21,666	
Brix	0,2	
Flegmaça Produzida (ton/h)	144,95	
% Perda destilação	0,322	
Entrada Coluna C (1)	35,54	
Entrada Coluna C (2)	215,8	
Saída Anidro (m ³ /h)	45,681	
Saída Hidratado	45,843	
Etanol Total Produzido (m ³ /h)	91,524	
T (°C)	25	
P (bar)	1	

Fonte: Acervo Pessoal

Com a coleta feita na destilaria, os inventários foram criados com as informações sobre os processos ocorridos durante a fabricação. Para complementar a análise, buscou-se, na literatura e no banco de dados da ferramenta utilizada com um processo de fabricação com parâmetros próximos ao retratado acima, alguns valores médios de possíveis insumos que podem ser utilizados na destilaria, utilizando a Tabela 1 do Tópico de Referências Bibliográficas para colaborar com a busca, e que pode influencia na análise de ciclo de vida. A complementação foi feita com o intuito de levantar o quanto influenciaria em emissões de poluentes para água, solo e saúde humana (para efeito de comparação com as etapas anteriores nessas categorias) pelo fato de a emissão do ar que é o foco do trabalho estar disponibilizada com a realidade dos dados coletados na destilaria. Com isso, a tabela 13 abaixo demonstra as informações, por quilo de etanol hidratado produzido, que podem influenciar a análise em aspecto ambiental

(desconsiderando possíveis valores de liberações de gases do efeito estufa, mantendo para essa categoria apenas os valores principais coletados e descritos anteriormente). Os valores totais de cada insumo para a produção de etanol podem ser vistos no Apêndice 2.

Tabela 13 - Levantamento de possíveis insumos utilizados - Fabricação

Etapa	Insumo	Valor	Referência
Tratamento água (captura e reciclo) (kg)	Ácido acético	0,00086	Bases de dados Ecoinvent
Tratamento água (captura e reciclo) (kg)	Cloreto de Cálcio	0,0028	
Tratamento água (captura e reciclo) (kg)	Sulfato de Alumínio	0,038	
Tratamento água (captura e reciclo) (kg)	Sulfato de Sódio	0,388	
Tratamento água (captura e reciclo) (kg)	Formaldeído	0,085	
Tratamento água + Moagem + Tratamento Caldo + Evaporação + Fermentação + Destilação (kg)	Soda Caustica	4	
Tratamento do Caldo (kg)	Parafina	0,017	
Tratamento do Caldo (kg)	Ácido Fosfórico	1,37	
Tratamento do Caldo (kg)	Cal	0,00367	
Fermentação (kg)	Ácido Sulfúrico	3,1	

Fonte: Acervo Pessoal

Com a avaliação de impacto das fases incluídas na fronteira do sistema e a comparação entre as etapas avaliadas, foi feita uma nova avaliação de impacto com o foco na fabricação. Para se determinar alternativas para possíveis cenários que pudessem influenciar as emissões de gases poluentes durante a fabricação do etanol, foi considerado dois grandes focos no processo: a queima do bagaço nas caldeiras para geração de energia e a fermentação do caldo. A etapa de queima do bagaço libera por hora 627,04 toneladas

de gases por caldeira, na etapa de moagem do modelo de simulação utilizado no trabalho, apresentando em sua composição CO₂, N₂, água, oxigênio e CO, como pode ser visto na Tabela 8. Já a etapa de fermentação apresenta liberação de gases de 67,55 toneladas por hora, com sua composição formada majoritariamente por CO₂ e uma pequena porcentagem de etanol, como relatado na Tabela 11. Com uma busca na literatura para alternativas que mitigassem a pegada de carbono equivalente, definida como uma medida de emissão de carbono na atmosfera, decidiu-se focar na etapa da caldeira, com possibilidades de mudança de características da biomassa e transformação da mesma em um novo produto.

Diante dos valores e resultados obtidos, foi feita mudança no cenário atual, para efeito de comparação. Com isso, a análise de impacto trará um cenário atual, baseando-se na coleta de dados da destilaria para se aproximar da realidade da mesma, e o cenário 1 e cenário 2, com alternativas com a premissa de influenciar no aspecto de emissão de poluentes para o ar.

Para a construção do cenário 1, considerou alteração em duas propriedades diretamente ligadas a eficiência da cogeração da biomassa: a umidade e a POL, porcentagem de massa de sacarose aparente. Com isso, decidiu incluir a variação da POL com a umidade a 49% e a 47%. O primeiro valor tem como intuito manter próximo ao da destilaria, enquanto que o segundo valor foi considerado, de acordo com Lima (2020) uma possibilidade de ponto ótimo na produção de vapor. Para o cálculo do poder calorífico, utilizou-se a equação de Hugot apud Silva (2020).

$$\text{Poder Calorífico} = 4600 - 12 * \%POL - 46 * \% \text{umidade} \quad (1)$$

Foram considerados 4 situações para o cenário, os valores calculados são encontrados no Apêndice 3. A tabela 14 abaixo demonstra as principais informações e suas referências.

Tabela 14 – Cenário 1 da fabricação de Etanol – Mudança na umidade do Bagaço

Mudança Umidade e POL			
Etapa Caldeira - Geração de Energia Cenário 1			<i>Referência utilizada</i>
Quantidade de Caldeiras	2	-	Dados Destilateria Simulador Pentagro®
Pressão das Caldeiras (bar)	65	-	
Temperatura das Caldeiras (°C)	484,69	-	
Entrada Bagaço	117,274	-	
% umidade (1)	49	2334Kcal/kg	SILVA & LIMA (2020)
POL (%) (1)	1		
% umidade (2)	49	2325,6Kcal/kg	
% POL (2)	1.7		
% umidade (3)	47	2426Kcal/kg	
% POL (3)	1		
% umidade (4)	47	2417,6Kcal/kg	
% POL (4)	1.7		
Entrada Vapor (ton/h)	515,58	-	Dados Destilateria
Entrada Água (ton/h)	247,57	-	

Fonte: Acervo Pessoal

O cenário 2 retratou a alternativa de pelletização do bagaço da cana, o que consiste na compactação da biomassa através de uma pressão aplicada pelo equipamento, resultando em um produto com diâmetro de 6 a 12mm e que traz como principal diferença volume homogêneo mais compacto e a diminuição da umidade do composto para um total de 11%, considerando valor de 50% de umidade para o cenário atual, para ser enviado para a queima. A ideia de trazer o produto fabricado do bagaço, se deu pelo levantamento de pesquisas feitas sobre o mesmo e a possibilidade de ganho de mercado nos próximos anos. Utilizando dados da literatura sobre essa alternativa, foram feitos cálculos relevando a realidade encontrada no cenário atual considerando a etapa a qual traria a mudança, ou seja, a etapa de geração de bioeletricidade a partir da biomassa. A tabela 6 abaixo descreve as informações utilizadas para a avaliação feita para esse processo.

Tabela 15 - Cenário 2 da fabricação de Etanol – Mudança para pellet

Pelletização do bagaço			
Etapa Caldeira - Geração de Energia Cenário 2			Referência utilizada
Inclusão de Equipamento	Forno rotativo	-	
Inclusão de Equipamento	Pelletizadora	-	
Quantidade de Caldeiras	2	-	Dados Destilatória Simulador Pentagro®
Pressão das Caldeiras (bar)	65	-	
Temperatura das Caldeiras (°C)	484,69	-	
Entrada Pellet	117,274	-	
umidade	11%	16,5MJ/kg	Almeida (2015)
Teor de Cinzas	0,7		
Diâmetro (mm)	10		
Densidade à granel (kg/m³)	600		
Carbono Fixo (%)	14		
Entrada Vapor (ton/h)	515,58		Dados Destilatória
Entrada Água (ton/h)	247,57		

Fonte: Acervo Pessoal

Para efeito de comparação, utilizou-se a equação de IPCC 2013 para cálculo da emissão de CO₂ equivalente, considerando a mudança da umidade para calcular a quantidade equivalente necessária para se consumir a mesma energia produzida durante a queima do bagaço original, utilizando um fator de emissão calculado pelo método que também foi utilizado no software Simapro para as etapas anteriores. A equação abaixo se refere a etapa de queima nas caldeiras e seu cálculo é descrito no Apêndice 3.

$$GEE_{queima} = P \times P_{biomassa} \times E_f \times F_{Eq} \quad (2)$$

P = Produtividade da Cana de Açúcar (ton cana/ha.ano)

P_{biomassa} = Produtividade da biomassa (kg biomassa/ton cana)

E_f = Eficiência da Queima

F_{eq} = Fator de Emissão da queima da biomassa (kgCo₂eq/kg biomassa)

Os resultados das avaliações de impacto das etapas da fronteira do sistema escolhida, utilizando o software Simapro como apoio, e dos cenários descritos comparados entre si são discutidos no tópico abaixo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No trabalho, desenvolveu-se a partir de seu objetivo, escopo e inventário, o estudo para se analisar etapas do cultivo, colheita, transporte e fabricação do ciclo de vida do etanol. Como descrito no tópico anterior, a análise do inventário foi feita em duas fases: avaliando o impacto das quatro etapas no sistema comparando uma à outra, com o intuito de demonstrar a influência de cada uma delas no todo, e o impacto da etapa de fabricação comparando o cenário atual com possíveis mudanças em alguns parâmetros que influenciam de maneira significativa o desempenho ambiental da fase.

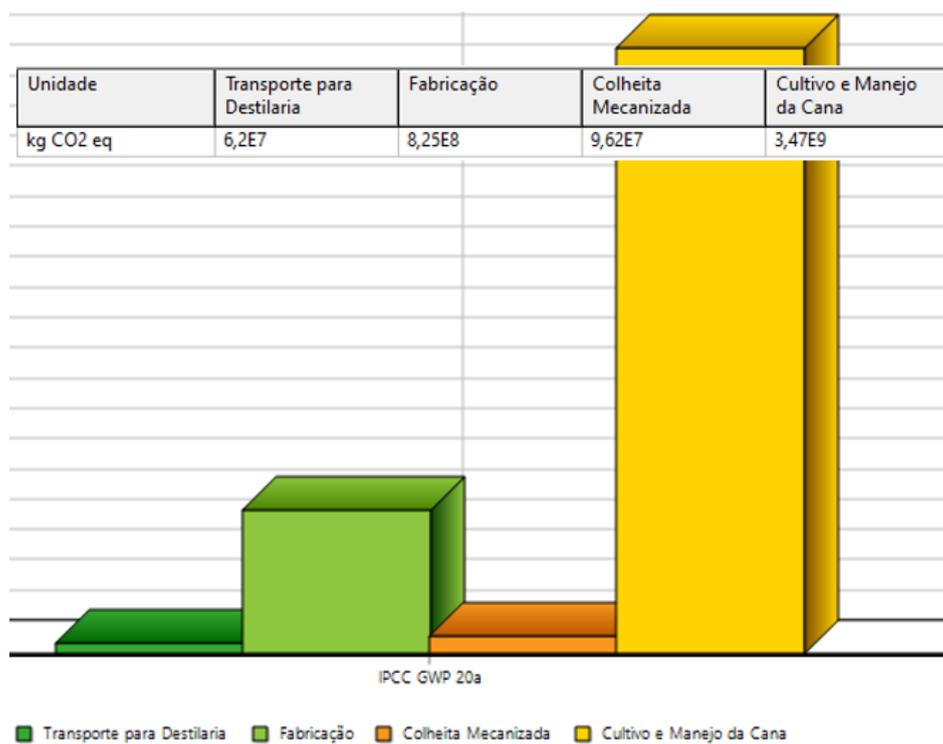
5.1. Avaliação de Impacto – Comparação entre Etapas

Conforme descrito no tópico anterior, utilizou-se dados da literatura para definir parâmetros para as etapas de colheita, cultivo e transporte, considerando o fator de entrada na etapa de fabricação e, com o uso do software SimaPro, definiu-se os métodos utilizados para a avaliação. Para a escolha, foi necessário considerar métodos que ofertassem as categorias em aspectos globais, pelo fato de não haver um método priorizando a realidade do país. Além disso, é necessário escolher o nível de avaliação do impacto, podendo ser midpoint ou endpoint. O nível midpoint analisa informações incluídas em categorias de acordo com suas características e de maneira mais específica, sendo um bom indicador de impacto em potencial, porém não representam consequências finais do desempenho ambiental. Já o nível endpoint, apresenta uma modelagem mais macro em categorias, mas oferta consequências consideradas danos finais para cada uma delas (PIEKARSKI et al, 2012)

A primeira avaliação foi feita pelo método IPCC 2013 GWP 20a, um método global desenvolvido pelo Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas, que apresenta como única categoria caracterizando as emissões gasosas com o potencial de aquecimento global em 20 anos, proporcionado a pegada de carbono. Como o trabalho apresenta o foco

para a pegada de carbono, iniciou-se as avaliações com a utilização desse método, definido como valores as informações de quantidade total de cana cultivada, área do cultivo, cana transportada e etanol produzido para o período determinado. O resultado pode ser visto na Figura 11 abaixo.

Figura 11 - Avaliação de Impacto com o Método IPCC 2013 GWP 20a



Fonte: Acervo Pessoal.

A partir da Figura 11, nota-se a relevância das etapas na avaliação feita. Com os resultados obtidos para essa categoria, é possível afirmar que cada etapa apresenta uma considerável influência quando analisamos a fronteira do sistema como um todo. A ideia de calcular valores da literatura para as etapas pré fabricação era demonstrar que as mesmas também apresentam fatores que influenciam essa liberação de CO₂. Como pode ser visto, a etapa de cultivo e manejo, com valor de $3,4 \times 10^9 \text{kg C}$, é o principal influenciador de emissão no ciclo de vida do produto. Contudo, na etapa considera-se que a emissão de CO₂ liberada pela cultura é praticamente “anulada” pelo sequestro de carbono feito pela cultura seguinte, o qual é utilizada na fotossíntese. Independente dessa situação, é sempre importante considerar alternativa que faça esse valor diminuir sempre que possível. Para a etapa, o fator determinante para a emissão de CO₂ no ar é o uso de

cal, herbicidas e inseticidas, além do combustível fóssil queimado pela maquinaria utilizada. A busca por alternativas que diminuam a utilização desses insumos que apresentam uma alta taxa de liberação de gases poluentes são vistas como uma maneira de colaborar com a diminuição da pegada de carbono no ciclo de vida. No inventário do cultivo de cana de açúcar, incluiu-se a utilização da fertirrigação, um processo que além de utilizar um subproduto da destilaria, colabora com a diminuição de fertilizantes utilizados no cultivo, e, conseqüentemente, com a diminuição de CO₂, pelo fato desse subproduto da destilaria não apresentar emissão relevante desse gás. Além da vinhaça, é possível a utilização da torta de filtro, que apresenta grandes benefícios no período de inverno com seu alto teor de umidade e de fósforo colaborando na brotação da matéria prima.

De acordo com Donke (2016), o sequestro de carbono no cultivo tem sua variação de acordo com a prática agrícola adotada para o solo cultivado. Com isso, quando há um melhor manejo, com uso de fertirrigação, rotação de culturas (técnica agrícola que alterna culturas nessa mesma área) e plantio direto (técnica de semeadura para diminuir degradação do solo), há um favorecimento no estoque do carbono pela cultura no campo.

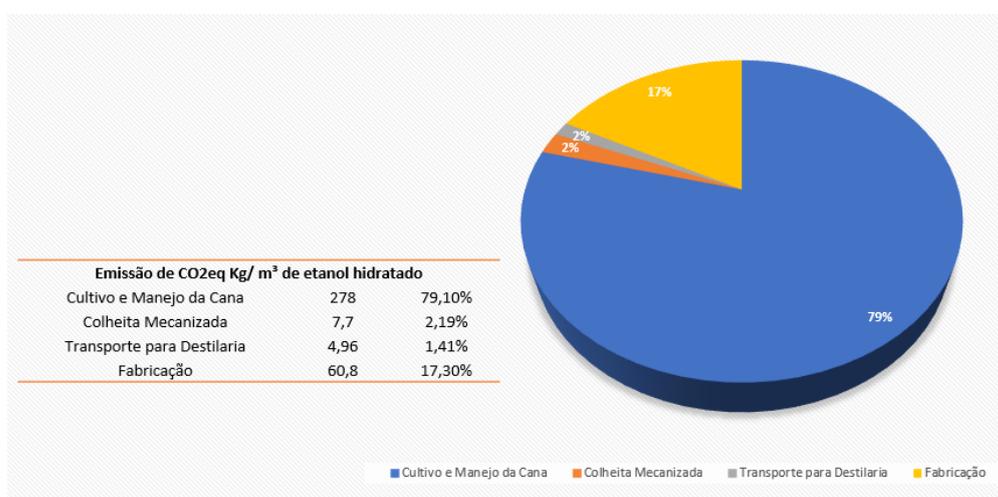
Para a etapa de colheita, com valor encontrado de $9,6 \times 10^7$ kg CO₂eq, o fator determinante foi a queima de combustíveis utilizando o maquinário para colher a cana. A etapa de colheita diminui significativamente o seu impacto quando se decide utilizar o método mecanizado, já que a queima da cana feita na abordagem manual, afetaria significativamente a emissão dos gases poluentes no ar. Para a etapa de transporte, com $6,2 \times 10^7$ kg CO₂eq, o fator de liberação de gases no ar é a queima dos combustíveis fósseis utilizados para transportar todas as cargas de cana até a destilaria, valor esse que é proporcional a distância entre a fazenda e a destilaria.

A fabricação, com um valor encontrado de $8,28 \times 10^8$ kg CO₂eq, pode ser vista como uma etapa determinante para emissão de gases poluentes no ar e, considerando que na etapa de colheita há o fator de sequestro de carbono para a fotossíntese que ajuda a equilibrar a emissão, buscar alternativas para o processo em si de fabricação de etanol é importante. Na etapa, esse valor de emissão vem de uma alta queima de combustível, sendo o principal fator de emissão, para produção de energia e de uma fermentação dentro do seu processo. Como esperado, a etapa de cogeração representa o maior ofensor nessa categoria para a etapa, com valor obtido de 5×10^8 kg CO₂eq, representando cerca de

60,4% do valor total. No próximo tópico, será discutido um pouco mais detalhado alternativas que apresentam como objetivo a mitigação dos gases de combustão.

A análise acima se refere a valores encontrados para uma avaliação de impacto do produto quando consideramos o tempo de 24 horas por um período de 200 dias. Para efeito de comparação com a literatura, foi feito o estudo considerando a produção de 1m³ de etanol hidratado. Os valores e a influência de cada etapa no ciclo, podem ser vistos na figura 12 abaixo.

Figura 12 - Valores para produção de 1m³ de etanol hidratado



Fonte: Acervo Pessoal

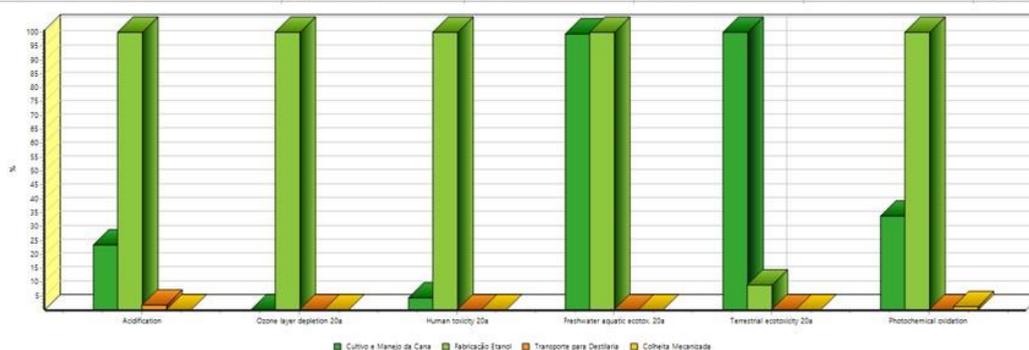
Com os parâmetros definidos para produção 1m³ de etanol hidratado, pode-se comparar os valores com a literatura, com sistemas próximos a realidade do inventário do trabalho, com o intuito de se confirmar a consistência dos resultados obtidos. De acordo com o resultado, obteve-se um total de 351,46Kg CO2eq, sendo avaliado dentro do esperado, de acordo com valores da literatura de 417kg CO2eq no trabalho de Donke (2016) e 330KgCO2eq calculado por Macedo (2008).

Por fim, decidiu-se utilizar um outro método para demonstrar algumas outras categorias importantes que são impactadas com a vida útil do produto. Para isso, utilizou-se o método CML 2001 Midpoint / World, um método também global de midpoint, o qual apresenta as categorias de aquecimento global, depleção de ozônio, acidificação, enriquecimento de nutrientes, formação de ozônio foto químico, toxicidade humana,

ecotoxicidade e consumo de recursos (Mendes, 2013). A figura 13 abaixo, relata os valores encontrados para algumas categorias consideradas relevantes para demonstrar.

Figura 13 - Avaliação de Impacto CML 2001

Categoria de impacto	Unidade	Cultivo e Manejo da Cana	Fabricação Etanol	Transporte para Destilaria	Colheita Mecanizada
Acidification	kg SO2 eq	8E4	3,41E5	6,25E3	x
Ozone layer depletion 20a	kg CFC-11 eq	x	7,03	x	x
Human toxicity 20a	kg 1,4-DB eq	1,55E6	3,69E7	x	x
Freshwater aquatic ecotox. 20a	kg 1,4-DB eq	2,51E7	1,41E5	x	x
Terrestrial ecotoxicity 20a	kg 1,4-DB eq	4,9E5	4,32E4	x	x
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	1,09E5	3,2E5	406	3,54E3



Fonte: Acervo Pessoal.

Na figura 13, é possível ver que há categorias com impactos relevantes, além do aquecimento global, nas etapas da fronteira. A ideia com a segunda avaliação de impacto é demonstrar que há outras categorias, ainda no aspecto ambiental, que devem ser discutidas dentro de determinado ciclo de vida. No caso descrito acima, é importante ressaltar que para a etapa de fabricação, com o intuito de verificar outras etapas que poderiam sofrer influência da mesma, foi feito um levantamento de insumos utilizados na fabricação, de acordo com a literatura. Por isso, os valores demonstrados acima não trazem valores da realidade da destilaria do trabalho como da primeira avaliação, mas demonstra impactos que ela certamente tem influência.

A categoria de acidificação é uma das categorias que ajudam a dimensionar os efeitos das emissões de gases poluentes. Relacionada com gases causadores da chuva ácida, como SO₂, NH₃ e NO_x, que podem reagir com vapor de água formando ácidos, a acidificação tem como determinante as etapas de fabricação e cultivo. Na etapa de fabricação, insumos utilizados para o tratamento da água e para colaborar com as reações na fermentação são os principais fatores para essa categoria. No cultivo da cana, a

quantidade de fertilizantes utilizados aumento a liberação de gases compostos de nitrogênio, causando esse impacto. Já a categoria de depleção da camada de ozônio considerada no período de 20anos, com a unidade de CFC-11eq, mostra, pelo resultado da avaliação, que não apresenta relevantes impactos para as etapas pré-fabricação a longo prazo, apenas considerando a etapa de fabricação. Porém, comparando com outras categorias, a depleção de ozônio acaba sendo a menos preocupante, com valores muito a baixo das outras.

A etapa de toxicidade à saúde humana, também vista a longo prazo para 20 anos, com uma unidade de kg DBeq (quilogramas equivalentes ao Diclorobenzeno), mede a acumulação de compostos químicos a partir da inalação de gases (SOARES, 2018). De acordo com os resultados obtidos, nota-se que a etapa de fabricação e de cultivo se sobressaem na categoria. Para a fabricação, diversos produtos utilizados durante tratamento de água, durante a queima de bagaço e a fermentação determinam o perigo para a saúde humana. Para o cultivo, o valor vem principalmente da utilização de inseticidas, pesticidas e herbicidas que, durante o manejo da cultura, liberam esses gases que podem comprometer a saúde.

Além da categoria de toxicidade à saúde humana, relata-se as categorias de toxicidade em água doce e ao solo, com a mesma unidade de kg DBeq, pelo fato de se referirem ao problema de liberação dos compostos químicos, dessa vez na água e no solo. A toxicidade de água doce, diante dos resultados obtidos, também tem grande influência das etapas de cultivo e de fabricação, apresentando valores próximos de $2,51 \times 10^7$ kgDbeq e $2,53 \times 10^7$ kgDbeq, respectivamente. Para a etapa de cultivo, o impacto relaciona-se com a liberação de pesticidas e inseticidas durante a etapa para controle de pragas, afetando de maneira significativa essa categoria. Acompanhando o mesmo perfil da categoria anterior, a toxicidade do solo considera compostos químicos utilizados como agressores, sendo a etapa do cultivo com $4,9 \times 10^5$ kgDbeq a que determina o maior impacto. O desempenho alto dessa etapa na categoria de toxicidade é representado pelo alto uso de inseticidas e pesticidas utilizado na cultura da cana. Para a etapa de fabricação, os valores apresentados são impactos diretos da utilização de compostos químicos utilizados no tratamento da água, tratamento do caldo e limpeza de equipamentos.

A última categoria avaliada foi a de oxidação fotoquímica o qual relata o impacto de poluentes secundários pela queima de combustíveis e solventes. Como pode ser visto

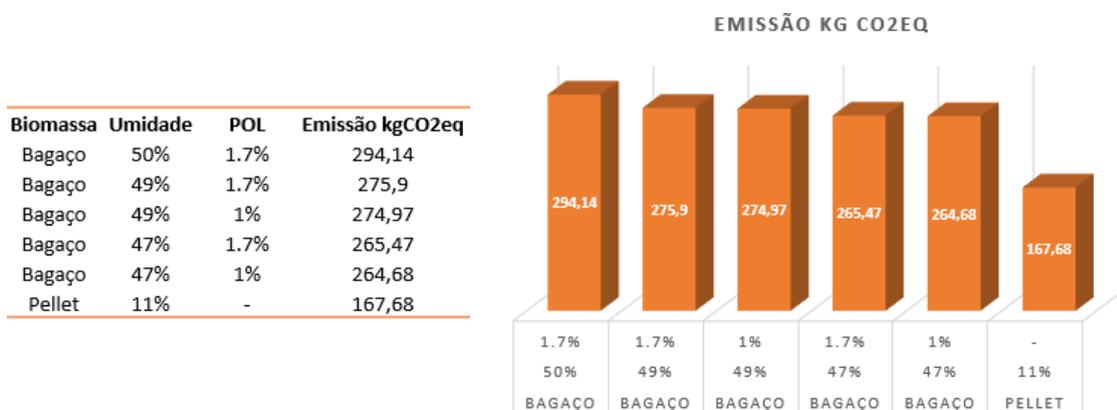
na figura 12, todas as etapas apresentam valores relevantes para a categoria, com unidade de kg C2H2eq, pelo fato da queima de combustível fazer parte de todas as etapas. A etapa de fabricação apresenta o pior desempenho, o qual é influenciado pela etapa de queima nas caldeiras e utilização de solventes químicos durante o processo.

Nesse contexto, é importante lembrar que para a etapa de fabricação, foram adicionados valores dos insumos utilizados durante o processo, como compostos utilizados no tratamento de água, no tratamento do caldo ou para colaborar com etapas como a fermentação. Com isso, não se pode definir como valores da realidade da destilaria do trabalho, como pôde ser feito para a avaliação anterior, porém a ideia era trazer as categorias com valores consistentes retirados da literatura para descrever outros impactos relacionados ao processo e seus maiores ofensores.

5.2. Avaliação de Impacto – Comparação entre os cenários da etapa fabricação

Como relatado no tópico de Materiais e Métodos, foi feita uma segunda análise com o intuito de trazer alternativas focadas em colaborar com a diminuição de pegada de carbono na etapa de fabricação. Com isso, de acordo com materiais encontrados na literatura junto ao cenário considerado atual da fabricação, incluiu-se dois cenários para efeito comparativo, com opções que podem trazer algum benefício em aspectos ambientais. A Figura 14 abaixo relata os resultados encontrados, utilizando a abordagem IPCC 2013, que, como já dito, traz a categoria de liberação de CO2.

Figura 14 - Comparação Cenários Etapa Caldeira



Fonte: Acervo Pessoal.

O cenário 1 retrata a alteração em duas das principais propriedades do bagaço relacionadas ao seu poder calorífico: a umidade e a porcentagem de massa de sacarose. Estas são diretamente relacionadas a eficiência térmica do processo e, conseqüentemente, a produção de energia na caldeira. Diante do resultado obtido, é possível confirmar que a diminuição da umidade e da porcentagem de massa de sacarose (POL) colaboram com a diminuição do gás carbônico equivalente.

A umidade, como já dito anteriormente, apresenta um protagonismo quando se levanta as possibilidades de redução de pegada de carbono na caldeira. De acordo com o estudo feito por OLIVEIRA (2016), uma alternativa para melhorar a eficiência da retirada da água durante a moagem é a inclusão de camisa perfurada no último terno da moenda. Essa abordagem, colabora ainda com a redução de perda de açúcar e permite maiores taxas de embebição, ou seja, inclusão de água ou caldo para melhorar a eficiência de extração de sacarose. O estudo trouxe vantagens no resultado como a diminuição de 1% a 3% de umidade na biomassa, colaborando com a preservação da tubulação e economia do combustível da caldeira. Com isso, definiu-se incluir a umidade de 49%, trabalhando com a porcentagem de sacarose aparente com valor de 1% e 1.7% para analisar os resultados. Com a avaliação de impacto para pegada de carbono, podemos notar que a redução de 1% de umidade traz uma significativa redução em relação ao cenário atual, reduzindo em média 6,6 % de CO₂eq por unidade de área. Contudo, para a alternativa levantada, é necessário um estudo de custo benefício quando se considera a parte econômica na avaliação, pelo fato de ser necessário a mudança do último terno. Para o estudo de OLIVEIRA (2016), o valor de investimento para essa mudança foi pago pelo aumento da eficiência da caldeira e, com isso, da geração e venda de energia excedente.

De acordo com SILVA (2020) caldeiras tradicionais apresentarem uma recomendação limite, sendo 47% de umidade um valor possível de ponto ótimo para a linha entre eficiência energética e custo com a secagem da biomassa. Com isso, os valores para o 47% foram incluídos para efeito de comparação diante do estudo feito, considerando como sistema adicional uma secagem com gases exaustores da própria caldeira, com um aumento de eficiência relatado no estudo. Com isso, incluiu o valor de 47% de umidade abordando o teor de sacarose também em dois valores, 1.7% (como é o do cenário atual) e com 1%. Quando se compara as alternativas com a mesma umidade, mas com um POL diferente, não se encontra uma diferença alta por unidade na produção

de gás carbônico equivalente, entretanto considerando a realidade da destilaria com alta produção de bagaço, haverá um impacto no valor total liberado durante um período de tempo mais longo. Em relação ao primeiro cenário, quando comparamos os valores, têm-se uma redução em torno de 10,7% do CO₂eq, afetando significativamente a liberação quando considera o processo funcionando para produzir o valor equivalente de etanol do trabalho.

Quando se compara o impacto do cenário atual com o cenário 2, pode ser visto uma relevante diminuição nas emissões de gás carbônico para o ar a partir da avaliação de impacto da Figura 14, consistindo em uma diminuição de 43% do inicial. A ideia de se levantar tal alternativa para a etapa de queima das caldeiras ocorreu pelas vantagens relatadas com a utilização desse método, como um relevante aumento do poder calorífico da biomassa utilizada e, conseqüentemente, uma maior energia por menor volume. Com isso, há a possibilidade de diminuir a quantidade utilizada da biomassa para gerar a mesma quantidade de vapor e energia reutilizada durante o processo. Além disso, oferece outras vantagens como um controle maior do processo de queima, por apresentar uma homogeneidade na densidade de cada pellet, evitando possíveis aumentos exacerbados de temperatura; uma maior durabilidade das característica quando necessário o estoque do material por um longo período de tempo e a possibilidade de comercialização do excedente, pelo fato de ser necessário um volume menor para geração da energia utilizada na destilaria, em comparação ao bagaço. Outro fator considerado relevante na fabricação de pellets é o seu baixo teor de cinzas comparado com a da biomassa bruta. As cinzas são compostas por ferro, sódio, cálcio, magnésio, entre outros que diminuem o poder calorífico do produto e, ainda, causa problemas como corrosão no equipamento (ALMEIDA, 2015).

A pelletização se torna uma opção que deve ser analisada mais a fundo quando o fator de desempenho ambiental é visto como um dos objetivos para mudança. Entretanto, é necessário avaliar alguns fatores para que seja considerada realmente uma opção viável para determinada destilaria. O principal fator é a análise da eficiência da caldeira utilizada com um produto feito da biomassa com uma diferença tão alta de umidade. Outro fator que deve ser considerado é a inclusão no sistema dos equipamentos e processos necessários para produzir o pellet. O processo necessita de um forno rotativo para iniciar o processo de diminuição de umidade e, logo após a moagem, há a adição da pelletizadora, equipamento que fica em rotação que comprime a biomassa para os furos,

que devem ter seu tamanho definido de acordo com o diâmetro escolhido, com a formação dos pellets homogêneos. Além disso, é necessário o acompanhamento das tubulações até caldeiras, pelo fato de uma biomassa apresentando um teor baixo de umidade pode acarretar em incrustações no equipamento.

O aumento da quantidade energética demandada para o processo também deve ser considerado para se avaliar o benefício de se utilizar esse produto. O tambor rotativo, que é utilizado para secar o bagaço e diminuir sua umidade, apresenta em média 310Kwh/t, os maiores valores de consumo nesse sistema. Além disso, esse valor pode se alterar dependendo do valor de umidade escolhido para a fabricação do pellet, pelo fato de ser necessário o aumento do calor no sistema. Já a pelletizadora apresenta um valor médio de consumo de 40Kwh/t, bem abaixo por não apresentar, nessa etapa, a necessidade de se trabalhar em condições altas de temperatura (Almeida 2015).

Por fim, diante da possibilidade de crescimento da produção de pellets como opção em utilizar a biomassa produzida como subproduto no processo de moagem, houve desenvolvimento de uma norma internacional com parâmetros para manter a qualidade do produto, a ISO 17225-6/2014, utilizada para pellets produzidos a partir de biomassas não lenhosas (Almeida, 2015). A opção em diminuição da umidade do bagaço e formação dos pellets, vem se tornando uma possibilidade também para a realidade brasileira, considerando a opção de venda do excedente. Com isso, algumas empresas, atualmente, buscam aprofundar o conhecimento e estudo no produto, pelo fato de ser visto como uma promissora alternativa para o setor (Raizen, 2020).

Para o cenário 1 e cenário 2, foram utilizadas mudanças nas propriedades para se calcular o poder calorífico da biomassa, considerando, as outras propriedades equivalentes com os estudos da literatura e a utilização do equacionamento da abordagem IPCC para cálculo de emissões de poluentes. Contudo, quando consideramos todo o sistema envolvido e todos os parâmetros que podem influenciar os resultados de alguma forma, nota-se o quanto essa análise é abrangente. O intuito da discussão foi oferecer algumas percepções de mudanças no cenário que pudessem interferir diretamente com o objetivo do trabalho, a busca pela diminuição da pegada de carbono. Por isso, quando se torna necessário olhar para o todo, incluindo também a funcionalidade do processo e os aspectos econômicos, torna-se fundamental um estudo de caso com o material escolhido considerando as condições e variações dos parâmetros do processo, para que se obtenha valores direcionados a realidade da destilaria.

6. CONCLUSÃO

Através da metodologia proposta, analisou-se o impacto ambiental do etanol desde o seu cultivo até sua fabricação. Com a análise feita, utilizando a literatura e bancos de dados de apoio do software SimaPro, os resultados obtidos para a emissão de CO₂eq em cada etapa do trabalho, demonstram que implementação de alternativas para o processo como utilização de subprodutos no cultivo diminuindo uso de fertilizantes e a mudança de abordagem da colheita, são fatores determinantes para diminuição da emissão nesse ciclo de vida. Além disso, com os dados avaliados para a etapa de fabricação, as alternativas levantadas podem ser vistas como opções para o processo e devem ser estudadas mais a fundo, pelo fato de serem promissoras na mitigação da pegada de carbono.

Nesse contexto, destaca-se que a Análise de Ciclo de Vida de um produto é, de fato, uma avaliação fundamental para tomadas de decisões, pelo fato de ter a possibilidade de se estudar não só os impactos ambientais, mas também impactos econômicos e sociais relacionados ao produto. Por isso, é possível entender o porquê vem crescendo, nos últimos anos, de maneira acelerada a quantidade de estudos relacionados a esse tipo de análise.

Por fim, para trabalhos futuros sobre o tema abordado, sugere-se a busca por um estudo de caso detalhado em relação as alternativas com variações da umidade do bagaço e a produção de pellet, considerando diversas opções de parâmetros para as características principais do material e, também, considerando o aspecto econômico para o estudo, com o intuito de se analisar, com maiores detalhes, a viabilidade levantada no trabalho dessas alternativas na destilaria.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas . (2009). NBR ISO 14044: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Operações. Rio de Janeiro: Brasil.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: Brasil.
- ALBARELLI, J. Q. (2013). Produção de Açúcar e etanol de primeira e segunda geração: Simulação, integração energética e análise econômica. Campinas: Universidade de Campinas.
- ALMEIDA, L. (2015). Pelletização do Bagaço de Cana de Açúcar: Estudo das propriedades do produto e rendimento do processo. Ponta Grossa: Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- ALMEIDA, S. R., L, S. V., & B, T. G. (2014). Avaliação de impactos ambientais do processo de produção de etanol utilizando método derivado da Matriz de Leopold. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental - REGET: Universidade Federal de Santa Maria.
- ANAND, C., & AMOR, B. (2017). Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. Elsevier: Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- ARAÚJO, F. (2020). Avaliação Técnico-Econômica de uma destilária autônoma de Etanol. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- AS, L., OLIVEIRA, C., MARQUES, L., & SILVA, L. (2012). Usina de álcool: Impactos ambientais negativos e medidas para produção mais limpa. Presidente Prudente: Universidade do Oeste Paulista.
- ASSIS, B. (2009). Avaliação do ciclo de vida do produto como ferramenta para o desenvolvimento sustentável. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora.
- BOTTON, V., & FOGAÇA, D. (2017). Análise de ciclo de vida com auxílio de software: Estudo quantitativo em uma indústria de nutrição animal no Brasil. Ponta Grossa: VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção.
- BRONDANI, M. (2014). Avaliação do ciclo de vida (ACV) da produção de bioetanol hidratado em pequena escala: abrangência agrícola e industrial. Santa Maria: Dissertação de Mestrado em Engenharia de Processos - Universidade Federal de Santa Maria.
- CAMPOLINA, J., SIGRIST, C., & MORIS, V. (2015). Uma revisão de literatura sobre softwares utilizados em estudos de Avaliação de Ciclo de Vida. Universidade

Federal de Santa Maria: Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental.

- CAVALETT, O. C., CUNHA, M. P., JUNQUEIRA, T. L., DIAS, M. O., MANTELATTO, T. F., MANTELATTO, P. E., . . . BONONI, A. (2011). Environmental and Economic Assessment of Bioethanol, Sugar and Bioelectricity Production from Sugarcane. Campinas: Universidade Federal de Campinas.
- CLAUDINO, E., & TALAMINI, E. (2013). Análise do ciclo de vida (ACV) aplicada ao agronegócio – Uma revisão de literatura. Campina Grande: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. (2020). Acompanhamento da Safra Brasileira - Cana de Açúcar. Brasília.
- DIAS, M. (2008). Simulação do processo de produção de etanol a partir do açúcar e do bagaço, visando a integração do processo e a maximização da produção de energia e excedentes do bagaço. Campinas: Universidade Estadual de Campinas.
- DIAS, M. (2011). Desenvolvimento e otimização de processos de produção de etanol de primeira e segunda geração e eletricidade a partir da cana-de-açúcar. Campinas: Universidade Federal de Campinas.
- DIAZ, M. (2011). Análise do Ciclo de Vida do Etanol Brasileiro Visando à Certificação Ambiental . Rio de Janeiro: Departamento Engenharia Mecânica PUC - RJ.
- DONKE, A. (2016). Avaliação de desempenho ambiental e energético da produção de etanol de cana, milho e sorgo em uma unidade integrada, segundo a abordagem do ciclo de vida. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- FERREIRA, J. (2014). Análise de Ciclo de Vida de Produtos. Portugal: Instituto Politécnico de Viseu.
- FINNVEDEN, G., HAUSCHILD, M., EKVALL, T., & GUINEE, J. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. (Elsevier, Ed.) Environmental Management: Journal of Environmental Management.
- FONSECA, G. (2012). Modelagem e Simulação de uma destilaria autônoma de produção de etanol de primeira geração (E1G). São Carlos: Universidade Federal de São Carlos.
- FUNES, R. (2016). Avaliação do Ciclo de Vida e Pegada de Carbono da reciclagem de CO₂ em um sistema de produção de etanol de cana de açúcar. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- GRISOLI, R. (2011). Comparação das Emissões de Gases de Efeito Estufa no ciclo de vida do etanol de cana de açúcar no Brasil e os critérios da diretiva europeia para energias renováveis. São Paulo: Universidade de São Paulo - USP.

- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2020). Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Em Estatística da Produção Agrícola. Brasília.
- Instituto de Economia Agrícola. (7 de Julho de 2020). Colheita Mecanizada da Cana-de-açúcar Atinge 95,3% das Áreas Produtivas do Estado de São Paulo na Safra Agrícola 2018/19. Acesso em 20 de Outubro de 2020, disponível em Secretaria de Agricultura e Abastecimento: <http://www.iea.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=14825>
- IPCC. (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. National Greenhouse Gas Inventories Programme.
- IPCC. (2013). Climate Change. New York, USA: The Physical Science Basis.
- LEONARDO, AS; et al. (2012). Usina de Alcool: Impactos ambientais negativos e medidas para produção mais limpa. Presidente Prudente, 149 - 156.
- LOPES, C. H., GABRIEL, A. V., & BORGES, M. T. (2011). Produção de Etanol a partir da cana de açúcar. Em Tecnologia de produção de Etanol. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos.
- LUEDEMANN, G., SACCARO JUNIOR, N., & COELHO FILHO, O. (2016). A avaliação do ciclo de vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.
- MACEDO, I., SEABRE, J., & SILVA, G. (2008). Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. Biomass & Bioenergy , 582 - 595.
- MACHADO, A., & SILVA, J. (2010). Estratégia empresarial e práticas: Estratégia empresarial e práticas. Revista Brasileira de Gestão de Negócios, 405 - 424.
- MAZUR, F. (2011). Avaliação do Ciclo de Vida do Produto: Uma ferramenta de Gestão Ambiental. Ponta Grossa: Universidade Federal Tecnológica do Paraná.
- MENDES, N. (2013). Métodos e Modelo de Caracterização para a avaliação de impacto do ciclo de vida: análises e subsídios para aplicação no brasil. São Carlos: Universidade de São Paulo.
- Nova Cana. (27 de Agosto de 2014). Contextualização histórica do etanol. Acesso em 10 de Outubro de 2020, disponível em Nova Cana: <https://www.novacana.com/estudos/contextualizacao-historica-do-etanol-120913>
- Nova Cana. (2020). As usinas de Açúcar e Etanol do Brasil. Acesso em 14 de Setembro de 2020, disponível em Nova Cana: https://www.novacana.com/usinas_brasil
- NOVA CANA. (2020). Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas. Acesso em 14 de Setembro de 2020, disponível em

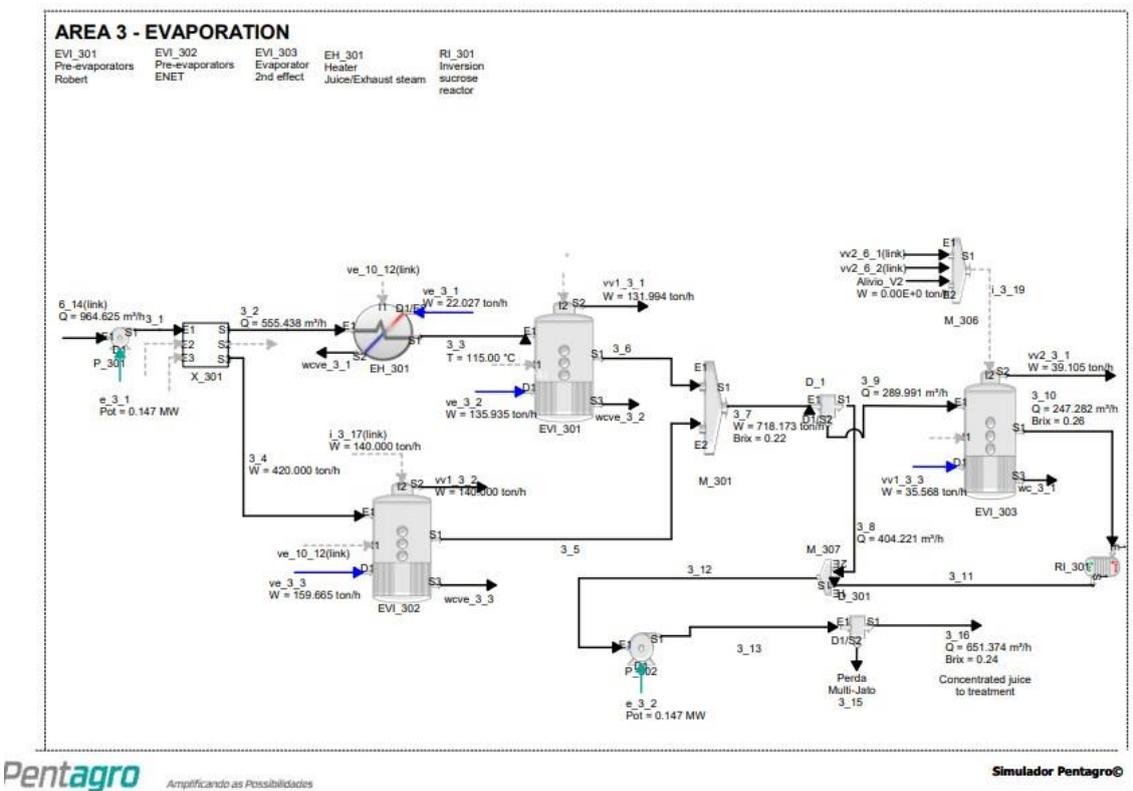
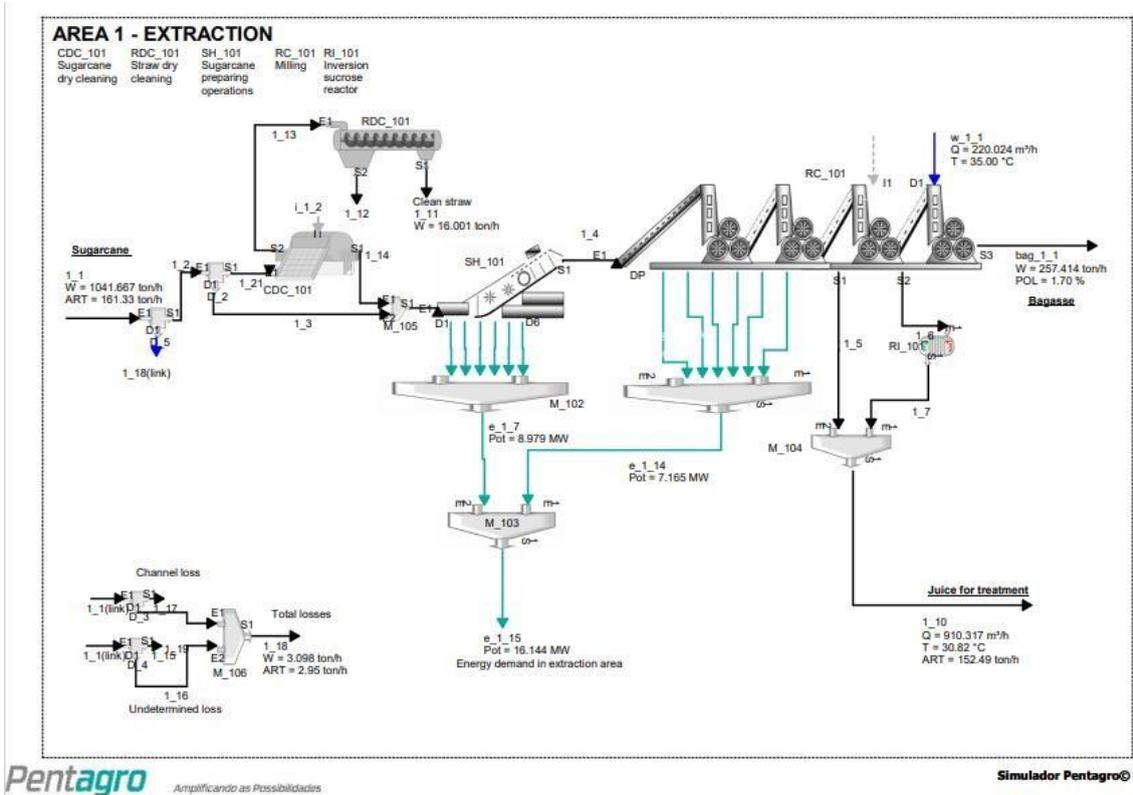
<https://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar#recepcao-preparo-moagem>

- NUMATA JUNIOR, F., & UGAYA, C. (2016). How to take dynamic data in life cycle inventory from brasilian sucargane ethanol. Paraná: Universidade Federal do Paraná.
- OLIVEIRA, C. (2016). Tecnologia de Moagem de Cana - Aperfeiçoamento com o uso de rolos de alta capacidade de drenagem. Sertãozinho: Universidade Federal de São Carlos.
- PIEKARSK, C., LUZ, L., ZOCHE, L., & FRANCISCO, A. (2010). Métodos de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida: Uma discussão para adoção de Métodos nas especificidades brasileiras. *Revista Gestão Industrial*, 222 - 240.
- POTT, C., & ESTRELA, C. (2017). Histórico ambiental: desastres ambientais e o despertar de um novo pensamento. Rio Grande do Sul: Universidade Federal de Pelotas.
- RAIZEN. (15 de Junho de 2020). Raizen. Acesso em 15 de Novembro de 2020, disponível em Relatório Anual 2019/2020: <https://www.raizen.com.br/relatorioanual/1920/pdf/raizen-RA20192020-pt.pdf>
- REBELATO, M., MADALENO, L., & RODRIGUES, A. (2016). Analysis of the environmental performance of the sugar energy plants located in the Hydrographic Basin of the River Mogi Guaçu. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 579 - 591.
- SCARPARI, M. (2002). Modelos para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar Modelos Para a Previsão da Produtividade da Cana-de-Açúcar (*Saccharum spp.*) através de parâmetros climáticos. Piracicaba: São Paulo.
- SFEIR, T. (2013). Avaliação do Ciclo de Vida da produção de pellets de madeira utilizando o software livre OpenLCA. Paraná: Universidade Federal do Paraná.
- SILVA, R., & LIMA, F. (2020). Estudo do impacto do teor de umidade do bagaço de cana-de-açúcar em sistemas de cogeração. *Revista Geama - Ciências Ambientais e Biotecnologia* , 25 - 33.
- SOARES, E. (2018). Análise de Ciclo de Vida de Processo/Produto em Usina de Álcool da Região Centro-Oeste do Brasil usando Software GABI. Goiânia: Instituto Federal de Ciencia e Tecnologia de Goiás.
- SUMIKAWA, V. (2019). Avaliação da produção de etanol em usinas flex de cana de açúcar e milho. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos.
- TAKEDA, A. (2008). Levantamento de Métodos de Avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV) e análise comparativa dos métodos mais utilizados. São Carlos: Universidade de São Paulo.

- TONON FILHO, R. (2013). Modelagem e simulação em plantas de etanol: uma abordagem técnico-econômica. . São Carlos: Universidade Federal de São Carlos.
- WILLERS, C., RODRIGUES, L., & SILVA, C. (Junho). Life cycle assessment in Brazil: a research in the major national bases scientific. Bahia: Editora Cubo.

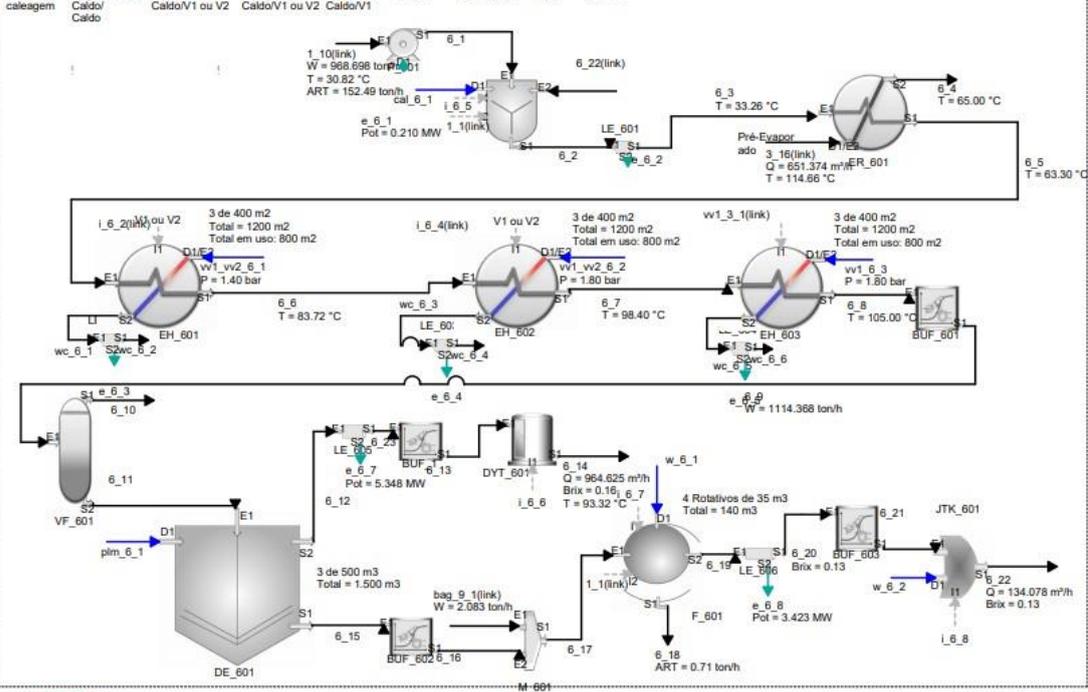
8. APÊNDICE

- Fluxogramas Destilaria



AREA 6 - JUICE TREATMENT

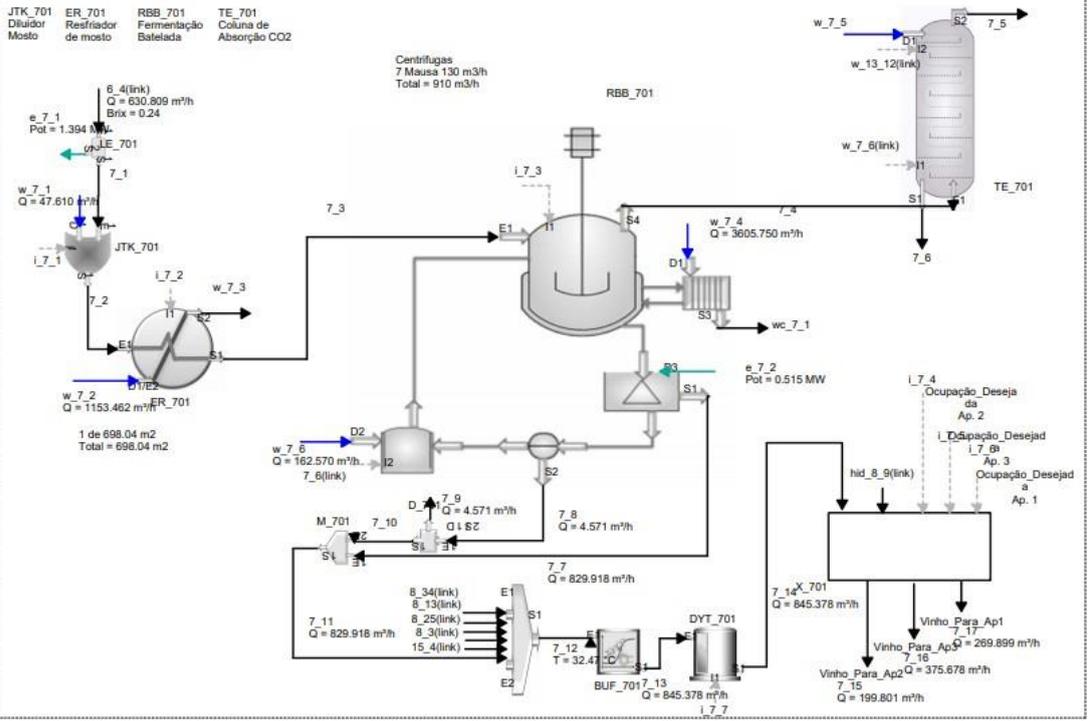
(DISTILLERY)



Pentagro Amplificando as Possibilidades

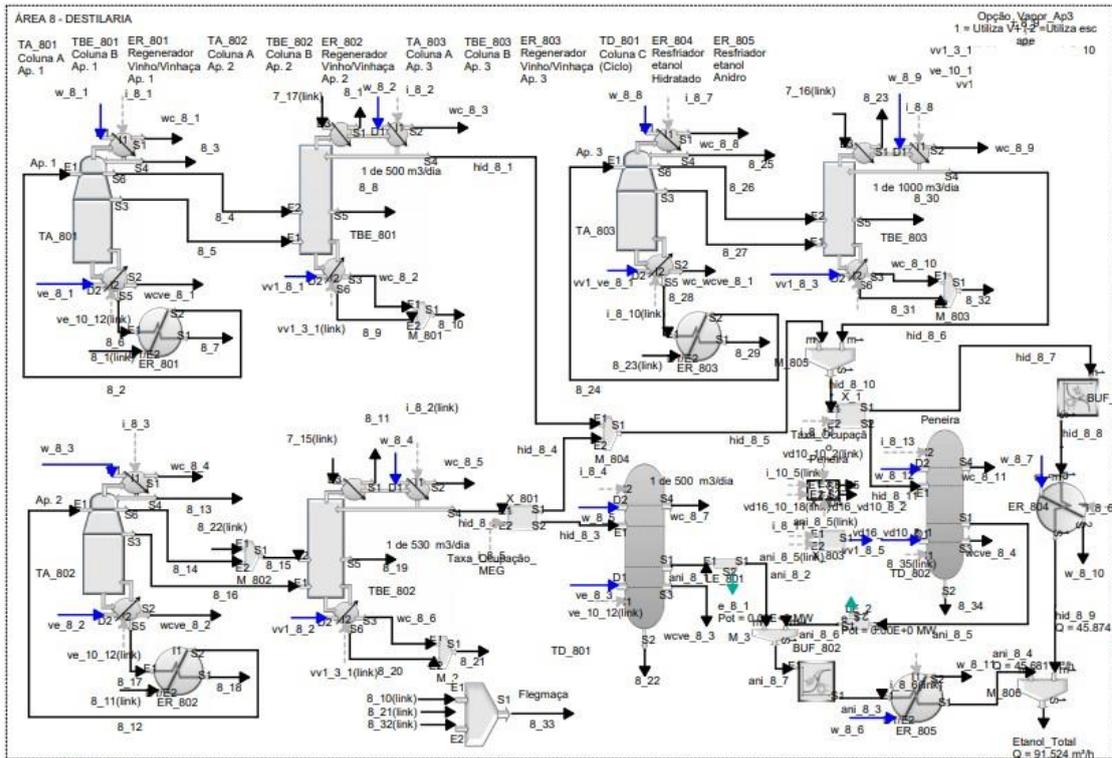
Simulador Pentagro®

AREA 7 - FERMENTAÇÃO



Pentagro Amplificando as Possibilidades

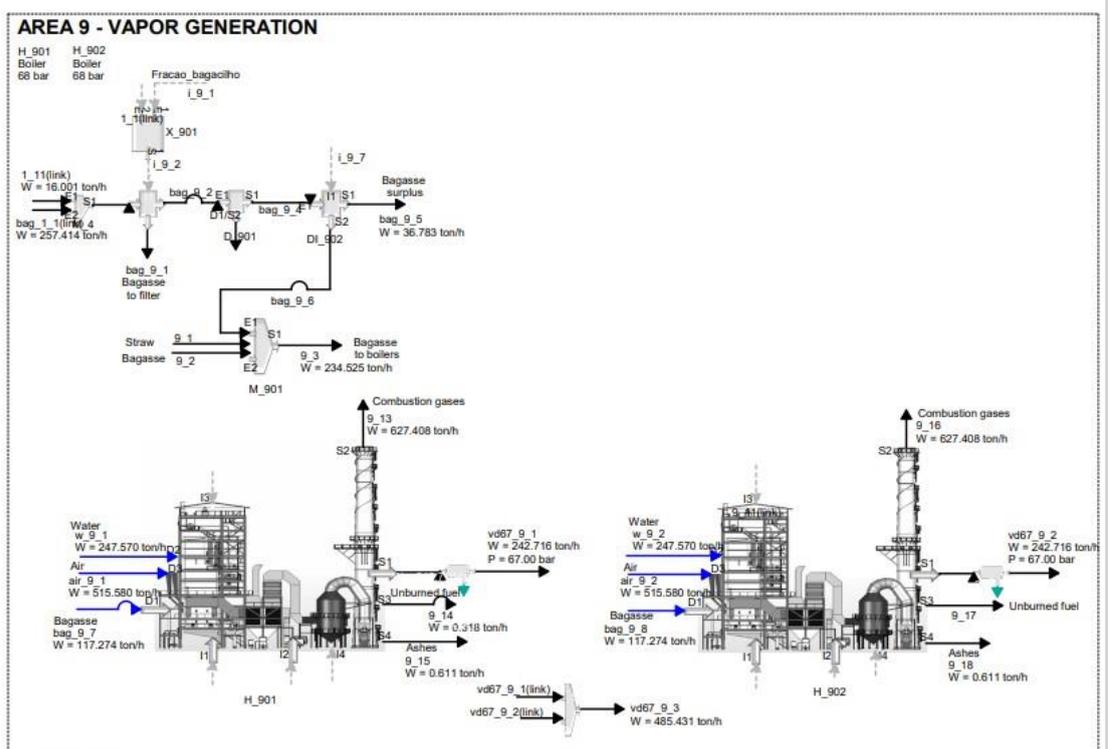
Simulador Pentagro®



Pentagro

Amplificando as Possibilidades

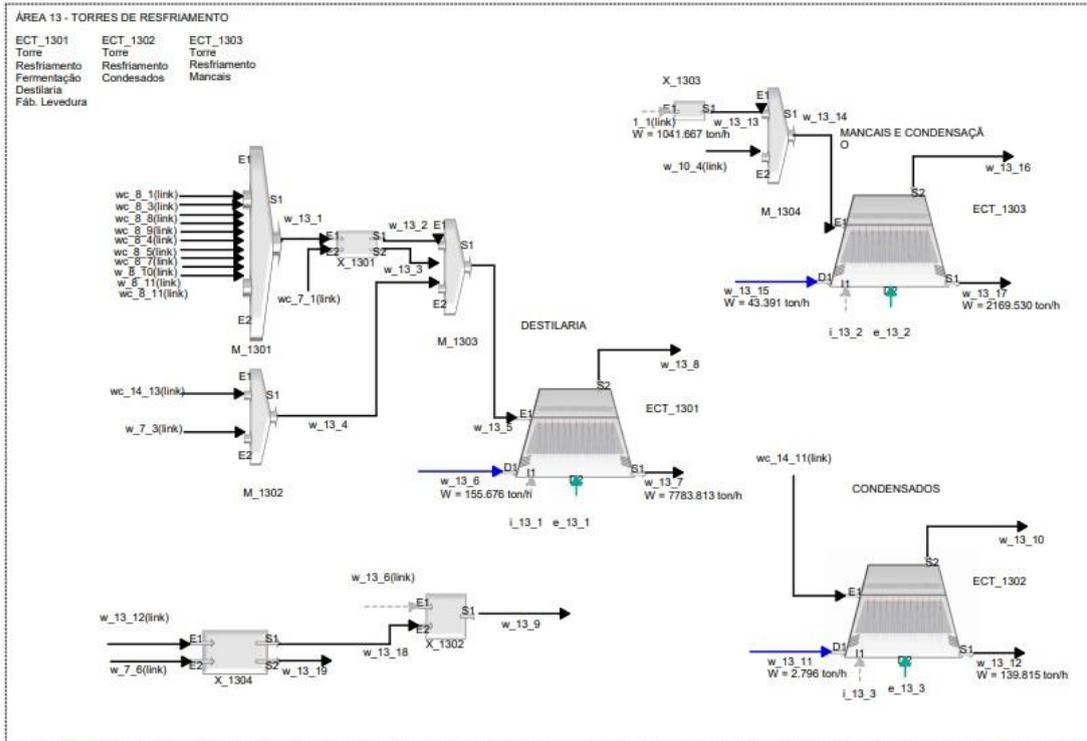
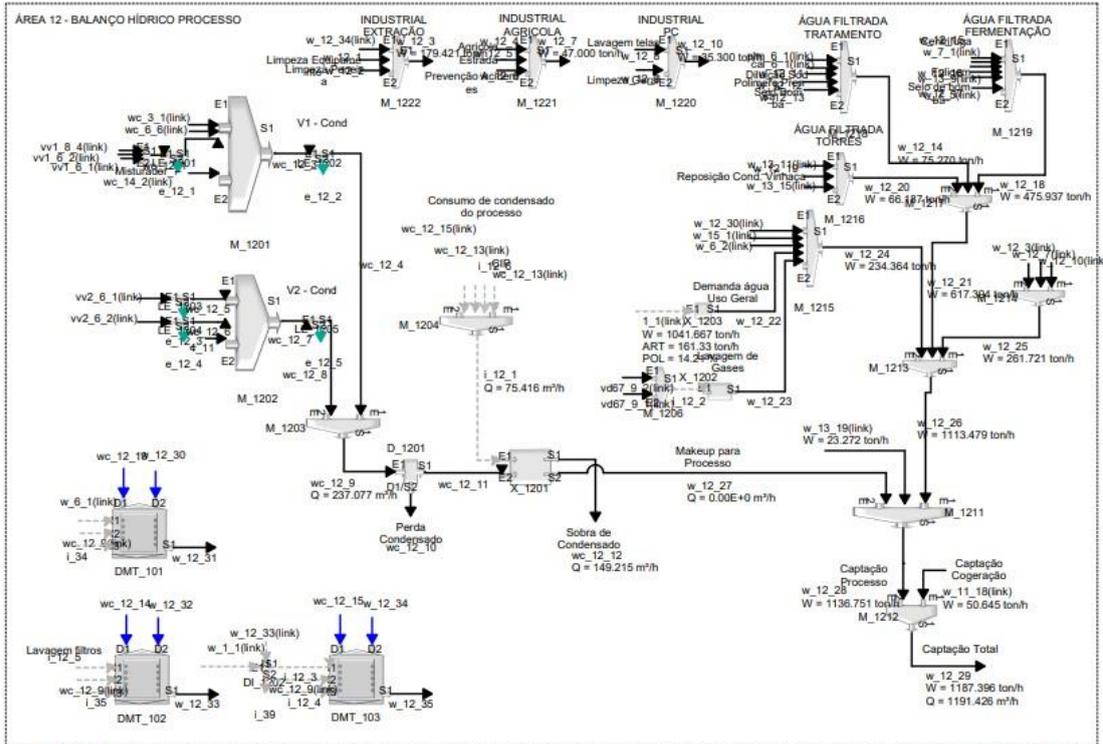
Simulador Pentagro®



Pentagro

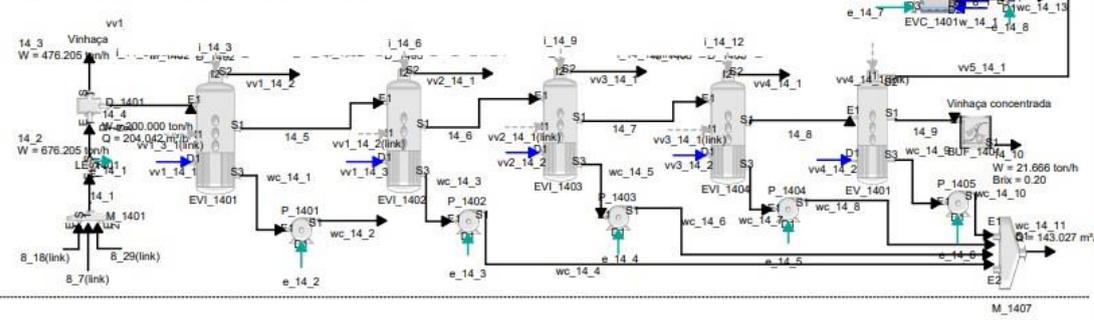
Amplificando as Possibilidades

Simulador Pentagro®



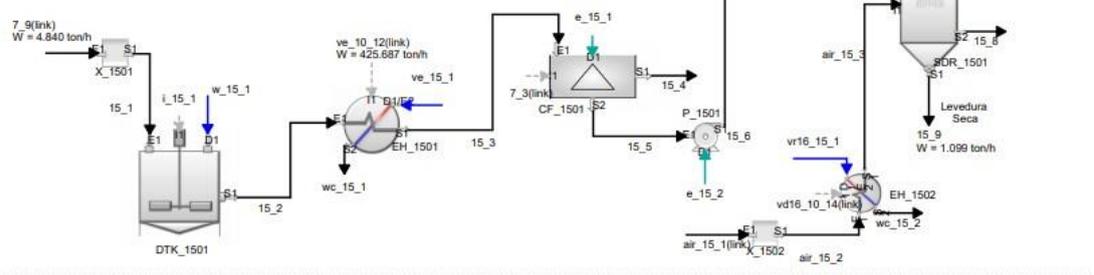
ÁREA 14 - CONCENTRAÇÃO DE VINHAÇA

EVI_1401	EVI_1402	EVI_1403	EVI_1404	EV_1401	EVC_1401
Concentrador	Concentrador	Concentrador	Concentrador	Concentrador	Condensador
1º efeito	2º efeito	3º efeito	4º efeito	5º efeito	Evaporativo



ÁREA 15 - FÁBRICA DE LEVEDURA

DTK_1501	EH_1501	CF_1501	P_1501	SDR_1501	EH_1502
Tanque de	Aquecedor de	Centrifuga	Bomba	Spray Dryer	Aquecedor de
diluição de	Levedura	de Separação			ar para
levedura		Alcólico			Spray Dryer



APÊNDICE 2

- **Cálculo dos valores totais das emissões de CO2 nas etapas determinantes**

Cultivo e Manejo - Valores Totais		
Entradas - Balanço de Massa e Energia		Energia (GJ)
Área Considerada (há)	62500	
Cana Produzida (ton)	5000000	-
Inseticidas kg	13125	24250
Herbicidas (glifosato e atrazina) kg	213125	30112,5
Fertilizantes com nitrogênio kg	3780000	3600
Fertilizantes com potássio kg	5533125	30500
Calcário kg	24466875	32531,25
Fertilizantes com fósforo kg	1066875	387,5
Uso de Vinhaça fertirrigação (m³)	12000000	44687,5
Diesel Equipamentos (L)	6562500	229687,5
Quantidade de sementes (ton)	7142857	-
Saídas - Balanço de Massa e Energia		
Emissões CO2 - Fertilizante com Nitrogênio (kg)	2305800	-
Emissões CO2 - Fertilizante com Potássio (kg)	1881263	-
Emissões de CO2 - Fertilizante com Fósforo (kg)	181369	-
Emissão CO2 pelo Fertilizante com Cal (kg)	18350156	
Emissões CO2 - Inseticidas e Herbicidas (kg)	1992386	-
Emissões CH4 - Inseticidas e Herbicidas (kg)	82	-
Emissões de N20 - Inseticidas e Herbicidas (kg)	16	-
Emissão CO2 Diesel(kg)	17019844	-
Emissões de N20 Diesel (kg)	138	-
Emissão de Ch4 Diesel (kg)	689	-
Emissão de N20 pela vinhaça (kg)	20688	
Emissão de CH4 pela vinhaça (kg)	226688	
Emissão de Amônia por uso de Fertilizante (kg)	712500	
Resíduos no solo pelos Herbicidas - Glifosato (kg)	15313	-
Resíduos no solo pelos Herbicidas - Atrazina (kg)	9063	-
Resíduos na água pelo uso de fertilizante - Nitrato (kg)	104	-
Resíduos na água pelo uso de fertilizante - Fósforo(kg)	0,907	-
Resíduos na água pelo uso de fertilizante - Glifosato (kg)	0,0322	-

Colheita Mecanizada - Valores Totais		
Entradas - Balanço de Massa e Energia		Energia (GJ)
Hectares Colhidos	62500	-
Diesel para equipamentos durante a Colheita (L)	5625000	196875000
Saídas - Balanço de Massa e Energia		
Emissões CO2 - Diesel (kg)	14588438	-
Emissões N2O- Diesel (kg)	118125	-
Emissões CH4 - Diesel (kg)	590625	-

Transporte para a Destilaria		
Entradas - Balanço de Massa e Energia		Energia (GJ)
Cana Transportada	5000000	-
Distância média - destilaria (km)	30	
Quantidade de cana por Caminhão (ton)	27	-
Diesel Transporte até Destilaria (km/L) - Carregado	3	-
Diesel Transporte até Destilaria (km/L) - Descarregado	5	-
Quantidade de cargas necessárias	185185	-
Diesel utilizado (L)	2962963	103703704
Saídas - Balanço de Massa e Energia		
Emissões CO2 - Diesel (kg)	7684444	-
Emissões N2O- Diesel (kg)	1777,8	-
Emissões CH4 - Diesel (kg)	8888,9	-

Informações Gerais	
Produção Etanol Anidro (ton)	5262446,4
Produção Etanol Hidratado (ton)	5289475,2
Consumo Vapor de Escape (kg)	2131765000
Consumo Vapor Direto (kg)	2329780000
Captação de Água (m³)	5705000000
Emissões na Caldeira	
Saída de Gases da combustão (ton)	6023040
CO2 no Gás de Combustão (ton)	998620
N2 no Gás de Combustão (ton)	3746933
O2 no Gás de Combustão (ton)	294948
CO no Gás de Combustão (ton)	1506
Água no Gás de Combustão (ton)	981033
Emissões na Fermentação	
Saída Coluna de Absorção (ton)	324240
CO2 Saída Coluna (ton)	323559
Etanol Saída Coluna (ton)	680,9

Etapa	Insumo	Valor
Tratamento água (captura e reciclo) (kg)	Ácido acético	4549
Tratamento água (captura e reciclo) (kg)	Cloreto de Cálcio	14811
Tratamento água (captura e reciclo) (kg)	Sulfato de Alumínio	201000
Tratamento água (captura e reciclo) (kg)	Sulfato de Sódio	2052316
Tratamento água (captura e reciclo) (kg)	Formaldeído	449605
Tratamento água + Moagem + Tratamento Caldo + Evaporação + Fermentação + Destilação (kg)	Soda Caustica	21157901
Tratamento do Caldo (kg)	Parafina	89921
Tratamento do Caldo (kg)	Ácido Fosfórico	7246581
Tratamento do Caldo (kg)	Cal	19412
Fermentação (kg)	Ácido Sulfúrico	16397373

APÊNDICE 3

- **Cálculo da Emissão de CO2 na Caldeira**

Equação IPCC (2013):

$$GEE_{queima} = P \times P_{biomassa} \times E_f \times F_{eq}$$

P = Produtividade da Cana de Açúcar (ton cana/ha.ano)

P_{biomassa} = Produtividade da biomassa (kg biomassa/ton cana)

E_f = Eficiência da Queima

F_{eq} = Fator de Emissão da queima da biomassa (kgCo₂eq/kg biomassa)

i. **Bagaço – destilaria**

POL 1.7

Quantidade de Caldeira: 2

Entrada de Bagaço por caldeira (ton/h): 117, 274

Perda de Bagaço = 3,624% = 9,32 ton/h

$$\text{Poder Calorífico} = 4600 - 12 * 1,7 - 46 * 50 = \frac{2279,6kcal}{kg} = 2279,6 * 4,18 = 9528,7Kj/kg$$

Quantidade de horas totais = 4800h

$$\text{Consumo Energia total} = \frac{(257,414 - 9,32)ton}{h} * \frac{1000kg}{ton} * \frac{9528,7KJ}{kg}$$

$$\text{Consumo Energia total} = \frac{2364GJ}{h}$$

$$\text{Consumo Energia total} = \frac{2364}{h} * 4800h = 11347200GJ$$

Quantidade Total de Bagaço = 1190851,2ton

Para o Bagaço:

P = 80

Pb = 257410kg bagaço por hora / 1700,4 ton cana limpa por hora = 151,4

Ef = 90%

Feq = 0,0268

$$\text{GEE queima} = 80 * 151,4 * 0,9 * 0,0268$$

$$\text{GEE queima} = 292,14kgCO2eq/ha$$

ii. Bagaço umidade 49%

1) POL 1

Número Caldeiras: 2

Entrada por caldeira: 117, 27

Poder Calorífico: 2334 kcal/kg = 4,18*2334 = 9756,12KJ/kg

Consumo Energia total do Bagaço = 11347200 GJ

$$\text{Quantidade Equivalente de bagaço 49\%} = \frac{kg}{9756,12\text{ kJ}} \times \frac{1\text{ ton}}{1000\text{ kg}} \times \frac{1000000\text{ kJ}}{1\text{ GJ}} \times 11347200\text{ GJ}$$

Quantidade Total = 1163085,32

Quantidade por hora = 243,30ton/h

Equação IPCC (2013):

P = 80

Pb = 242300 kg / 1700 = 142,5

$$\text{GEE queima} = 80 * 142,5 * 0,9 * 0,0268$$

$$\text{GEE queima} = 274,97\text{ kgCO}_2\text{eq/ha}$$

2) POL 1.7

Número Caldeiras: 2

Entrada por caldeira: 117, 27

Poder Calorífico: 2325,6 kcal/kg = 4,18*2325,6 = 9721KJ/kg

Consumo Energia total do Bagaço = 11347200 GJ

$$\text{Quantidade Equivalente de bagaço 49\%} = \frac{kg}{9721\text{ kJ}} \times \frac{1\text{ ton}}{1000\text{ kg}} \times \frac{1000000\text{ kJ}}{1\text{ GJ}} \times 11347200\text{ GJ}$$

Quantidade Total = 1167287,31ton

Quantidade por hora = 243,1ton/h

Equação IPCC (2013):

P = 80

Pb = 243100 kg / 1700 = 143

$$\text{GEE queima} = 80 * 143 * 0,9 * 0,0268$$

$$\text{GEE queima} = 275,9 \text{ kgCO}_2\text{eq/ha}$$

iii. Bagaço umidade 47%

1) POL 1

Número Caldeiras: 2

Entrada por caldeira: 117, 27

Poder Calorífico: 2426 kcal/kg = 4,18*2334 = 10140,7KJ/kg

Consumo Energia total do Bagaço = 11347200 GJ

$$\text{Quantidade Equivalente de bagaço } 49\% = \frac{\text{kg}}{10140,7 \text{ kJ}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}} \times \frac{1000000 \text{ kJ}}{1 \text{ GJ}} \times 11347200 \text{ GJ}$$

Quantidade Total = 1118976ton

Quantidade por hora = 233,1ton/h

Equação IPCC (2013):

P = 80

Pb = 233100 kg / 1700 = 137,17

$$\text{GEE queima} = 80 * 137,17 * 0,9 * 0,0268$$

$$\text{GEE queima} = 264,68 \text{ kgCO}_2\text{eq/ha}$$

3) POL 1.7

Número Caldeiras: 2

Entrada por caldeira: 117, 27

Poder Calorífico: 2417,6 kcal/kg = 4,18*2417,6 = 10105,57KJ/kg

Consumo Energia total do Bagaço = 11347200 GJ

$$\text{Quantidade Equivalente de bagaço } 49\% = \frac{kg}{10105,57kJ} \times \frac{1ton}{1000kg} \times \frac{1000000kJ}{1GJ} \times 11347200 \text{ GJ}$$

Quantidade Total = 1122865,9ton

Quantidade por hora = 233,9ton/h

Equação IPCC (2013):

P = 80

Pb = 233900 kg / 1700 = 137,58

$$\text{GEE queima} = 80 * 137,58 * 0,9 * 0,0268$$

$$\text{GEE queima} = 265,47kgCO2eq/ha$$

2) Pellet

Número Caldeiras: 2

Entrada por caldeira: 117, 27

Poder Calorífico: 16000 kJ/kg

Consumo Energia total do Bagaço = 11347200 GJ

$$\text{Quantidade Equivalente de Pellet} = \frac{kg}{16000kJ} \times \frac{1ton}{1000kg} \times \frac{1000000kJ}{1GJ} \times 11347200 \text{ GJ}$$

Quantidade Total de Pellet = 709200ton

Quantidade Pellet por hora = 147,75ton/h

Equação IPCC (2013):

Para o Pellet

$$P = 80$$

$$P_b = 147750 \text{ kg} / 1700 = 86,9$$

$$\text{GEE queima} = 80 * 86,9 * 0,9 * 0,0268$$

$$\text{GEE queima} = 167,68 \text{ kgCO}_2\text{eq/ha}$$