

**Estudo da viabilidade ambiental de processos de obtenção de produtos de
valor agregado a partir de casca de laranja**

PQI3502 - Trabalho de Conclusão de Curso II (2024)

Professor Orientador: Luiz Alexandre Kulay



Danielle Lu Fan - 11804870
Fernanda Arantes Bezerra - 11806826
Olivia Victoria Kita - 11908503

**São Paulo
Abril 2024**

Resumo

A biorrefinaria em estudo tem como objetivo otimizar os processos e potencializar a produção de produtos, a partir de um insumo que era, anteriormente, rejeito. O rejeito em questão é a casca da laranja que ao ser processado na biorrefinaria gera D-limoneno, pectina e energia. O estudo base indica poucas análises ambientais sobre o novo processo. Portanto, o objetivo do trabalho é avaliar o sistema da biorrefinaria por meio do viés ambiental e, para isso, será feita uma análise de ciclo de vida de todo o processamento da casca de laranja, contemplando as ODS relacionadas a inovação e consumo responsável.

Ademais, a utilização de um resíduo como matéria prima para outro processo é uma inovação tanto em relação ao resíduo quanto à infraestrutura para o processamento, revalorizando esse insumo. Assim, o consumo se torna mais responsável à medida que um subproduto passa a ser reaproveitado. Por exemplo, na safra 2022/2023 pelo menos 1,1 milhão de toneladas de casca de laranja foram geradas, indicando haver um grande potencial para a biorrefinaria. Por fim, a última ODS escolhida foi em termos ambientais, pois a partir do estudo de impacto ambiental do processo, espera-se entender as condições que minimizem os danos ambientais, fomentando o combate às mudanças climáticas.

Lista de Figuras

Figura 1: Estágios do ciclo de vida de um determinado produto ou serviço. Fonte: (FUNDAÇÃO ESPAÇO ECO, 2022)	9
Figura 2: Estrutura da ACV com os seus estágios e aplicações diretas da metodologia. Fonte: (ABNT, 2009).	11
Figura 3 : Esquema representativo das delimitações do processo, assim como os ciclos de vida associados a cada uma das entradas e saídas; Fonte: Autoria própria	16
Figura 4: Design conceitual da planta de biorrefinaria a ser estudada.	16
Figura 5: Carga ambiental PED por receita potencial dos produtos gerados.	20
Figura 6: Carga ambiental GWP e GWP utilizando CO ₂ <i>uptake</i> por receita potencial dos produtos gerados.	20
Figura 7: Atribuição dos impactos aos produtos em cada cenário estabelecido.	21

Lista de Tabelas

Tabela 1: Impacto dos cenários utilizando indicador de demanda primária de energia (PED)
18

Tabela 2: Impactos considerando indicador de potencial de aquecimento global (GWP) 18

Tabela 3: Impactos considerando indicador de potencial de aquecimento global (GWP),
considerando carbon uptake 18

Tabela 4: Preço de venda dos produtos. 19

Tabela 5: Receita potencial relativo à quantidade de cada produto produzido. 20

Sumário

1. Introdução e Objetivo	6
2. Revisão Bibliográfica	8
2.1. Biorrefinaria	8
2.2. Avaliação do Ciclo de Vida	9
2.2.1. Conceito	9
2.2.2. Aplicações e Limitações	10
2.2.3. Aspectos Metodológicos	10
2.2.4. Definição de objetivo e escopo	11
2.2.5. Análise do Inventário do Ciclo de Vida	11
2.2.6. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida	12
2.2.7. Interpretação do Ciclo de Vida	13
2.2.8. Situações de Multifuncionalidade	14
3. Método de Trabalho	15
3.1. Modelagem do ciclo de vida	15
4. Resultados e Discussões	18
4.1. Análise dos resultados obtidos para cada cenário	18
4.2. Análise pelo retorno financeiro gerado pelos produtos	19
5. Conclusões	23
6. Referências Bibliográficas	24

1. Introdução e Objetivo

O agronegócio é um setor muito relevante para a economia brasileira. De acordo com a CEPEA, o setor do agronegócio alcançou a representatividade de 24,8% do Produto Interno Bruto Brasileiro no ano de 2022 (CEPEA, 2023). São estimados que a agroindústria brasileira gere 597 milhões de toneladas de resíduos agrícolas por ano, provenientes das indústrias da cana-de-açúcar, milho, mandioca, trigo, arroz e frutas cítricas (LEITÃO et al., 2010). Em vista disso, há um grande potencial para reaproveitamento desses resíduos gerados, destinando-os para produção de energia e compostos químicos que apresentam valor agregado. Esse reaproveitamento promove vantagens, como a redução dos impactos ambientais que podem estar ligados ao descarte massivo desses resíduos.

No cenário brasileiro, a laranja se destaca por ser uma das principais *commodities* produzidas no Brasil, sendo que o suco de laranja produzido no país representa 61% da produção mundial, havendo destaque de produção principalmente para as regiões do estado de São Paulo e no Triângulo Mineiro (CITRUSBR, 2020). Esse setor agrícola apresenta grande importância para o PIB nacional, uma vez que arrecada nacionalmente US\$2 bilhões por ano (CITRUSBR, 2020).

Na produção de suco de laranja, cerca de 50% a 60% da massa inicial da fruta fresca corresponde à casca, que são descartados como resíduos (MANTHEY, GROHMANN, 2001; LI et al., 2014). Esses resíduos gerados pelo processo são denominados *orange peel waste*, e serão referidos como “casca de laranja” ao longo deste trabalho.

Atualmente, o principal destino dos resíduos gerados são aterros ou terrenos adjacentes às indústrias. No entanto, essa forma de descarte prejudica a flora do solo, e é capaz de poluir os cursos de água geograficamente próximos, uma vez que as cascas de laranja apresentam alta concentração de carboidratos sujeitos à fermentação, produzindo uma fase aquosa resultantes da decomposição. Caso essa decomposição ocorra de forma descontrolada sob condições anaeróbicas, pode ser produzidos uma mistura de metano, composto altamente inflamável quando em contato com o ar atmosférico (LÓPEZ; LI; THOMPSON, 2010; NEGRO et al., 2016).

A principal alternativa encontrada para um destino mais adequado para as cascas de laranja é a produção de ração animal, dado as características nutricionais

benéficas e a presença de fibras no resíduo (REZZADORI; BENEDETTI, 2009). No entanto, a casca de laranja apresenta uma série de compostos que são precursores de produtos mais rentáveis, e que podem ser utilizados nas indústrias alimentícias, de cosméticos e farmacêuticas, como os óleos essenciais — principalmente o D-Limoneno —, polifenóis, pectina, açúcares, ácidos, carboidratos insolúveis e pigmentos (SATARI; KARIMI, 2018; BOUKROUFA et al., 2015).

Além da revalorização da casca de laranja para obtenção de produtos de alto valor agregado, outros produtos podem ser produzidos a partir dessa biomassa. A matéria orgânica, por exemplo, pode ser utilizada para geração de energia, por meio de processos como a incineração, pirólise, além de rotas de bioconversão (SATARI; KARIMI, 2018).

Diante desse cenário de representatividade da produção de suco de laranja no Brasil e, conseqüentemente, do elevado volume de resíduos gerados, tornam-se cada vez mais necessários os estudos para analisar a viabilidade do processo de revalorização das cascas de laranja, não só técnica e financeiramente, mas também sob a ótica dos impactos ambientais. Assim, o objetivo desse trabalho é realizar as análises de ciclo de vida, estudando os impactos do berço ao túmulo a fim de quantificar os impactos ambientais.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Biorrefinaria

As biorrefinarias possuem processos análogos aos de refinarias de petróleo, apresentando processos industriais integrados, combinando tecnologias e operações unitárias, com o objetivo de converter a biomassa (RODRIGUES, 2011). Dessa forma, são obtidos produtos de alto valor agregado, como combustíveis, energia, óleos essenciais, vitaminas e açúcares.(FERREIRA et al., 2014; SUZUKI, 2019).

Por meio das biorrefinarias é possível revalorizar resíduos que seriam destinados ao descarte. Além de produzir produtos com valor agregado, também é possível minimizar os impactos ambientais associados ao descarte, realizado de modo incorreto em sua maioria (LEITAO, 2010).

Considerando o processo de produção de suco de laranja, sabe-se que 50% da fruta é transformada em resíduo, que é usualmente descartado. Dessa composição, a maior parte da biomassa descartada é composta pela casca de laranja, que por sua vez apresenta quantidades relevantes de compostos químicos valorizados em diferentes indústrias. Na casca, são encontrados açúcares livres, carboidratos insolúveis (celulose e pectina), óleos essenciais (D-limoneno), pigmentos, flavonóides e ácidos, como o cítrico e o málico (BOUKROUFA et al., 2015; SHARMA et al., 2017; SATARI; KARIMI, 2018).

Desses compostos presentes na casca de laranja, sabe-se que 76% a 82% são constituídos por água, 5% a 8% são de açúcares simples, 2% a 5% de pectina, 2% a 8% de celulose e hemicelulose, 1% a 2% de flavonóides, 1% de ácidos orgânicos, 1% de proteína, 1% de cinzas e 1% de óleo essencial (LEITAO et., 2010).

Diante dos diferentes compostos presentes na casca de laranja, a biorrefinaria é uma alternativa para revalorização desse resíduo. Isso ocorre porque, essa alternativa possibilita a construção de uma estrutura completa, capaz de combinar processos e tecnologias para obtenção de diferentes produtos a partir do resíduo (SUZUKI, 2019).

A biorrefinaria analisada apresenta processos para extração e obtenção de D-limoneno, pectina e energia elétrica a partir do processamento da casca de laranja. Destes compostos, a energia elétrica é considerada um subproduto, uma

vez que é gerada para suprir parte da energia demandada pela biorrefinaria ou vendida.

A definição dos produtos da biorrefinaria se dá pelo valor agregado e funcionalidades dos compostos. No caso do D-limoneno, o composto é um óleo essencial muito relevante para a indústria farmacêutica devido às suas propriedades antimicrobianas e antioxidantes, sendo muito importantes para o desenvolvimento de produtos para tratamento de doenças como o câncer e a diabetes (MURALI; KARTHIKEYAN; SARAVANAN, 2013; TAN et al., 2016). Além disso, o D-limoneno também se destaca na indústria alimentícia, como agente oxidante e aromatizante (MARTOS et al., 2019).

A pectina, por sua vez, é um açúcar frequentemente utilizado na indústria alimentícia como agente espessante, gelificante e estabilizante para alimentos (LOPEZ et al., 2010).

2.2. Avaliação do Ciclo de Vida

2.2.1. Conceito

A crescente conscientização quanto à importância da proteção ambiental e os possíveis impactos associados aos produtos, tanto na sua fabricação quanto no consumo, tem aumentado o interesse no desenvolvimento de métodos para melhor compreender e lidar com este contexto. Uma das técnicas em desenvolvimento com esse objetivo é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). O princípio básico da ACV é que todos os encargos ambientais associados a um produto, processo ou serviço devem ser avaliados, desde as matérias-primas até a remoção de resíduos (KLÖPFFER, 1997).

Ao considerar esta técnica é essencial partir da perspectiva de ciclo de vida, logo que todas as atividades ou processos na vida de um produto resultam em impactos ambientais devido ao consumo de recursos, emissões de substâncias no ambiente natural e outras trocas ambientais. Conforme conceitualiza-se na norma (ABNT, 2009) ciclo de vida se refere ao “conjunto de estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final”. A ilustração deste conceito pode ser visualizada no esquema da Figura 1.



Figura 1: Estágios do ciclo de vida de um determinado produto ou serviço. Fonte: (FUNDAÇÃO ESPAÇO ECO, 2022)

Com seu desenvolvimento inicial orientado a reduzir custos e, ao mesmo tempo, melhorar o desempenho sustentável, a metodologia ACV evoluiu como uma forma oportuna de definir e apoiar estratégias relacionadas à redução de resíduos, emissões e consumo de recursos atribuíveis ao consumo e fornecimento de bens e serviços, de forma completa ou em partes de interesse de ciclos de vida. Isto posto, a ACV é de modo geral, uma técnica de diagnóstico, ou seja, não tem por objetivo a proposição de soluções, mas de subsidiar a tomada de decisões que se voltem para melhorias de desempenho, do arranjo dentro do pilar ambiental (REBITZER et al., 2004).

Aspectos ambientais, dentro desse âmbito, se referem a toda interação do ciclo de vida de um determinado produto ou serviço com o seu entorno, enquanto impacto ambiental é a alteração ao meio ambiente em consequência da ação dos aspectos ambientais (BAUMANN; TILLMAN, 2004). A ACV é, portanto, uma estrutura metodológica para estimar e avaliar os impactos ambientais atribuíveis a ciclos de vida. Sendo assim, essa abordagem, permite a quantificação de influências em respeito às interações antrópicas e o meio ambiente com caráter claro, amplo e sistêmico, possibilitando identificar melhorias de processos produtivos ao longo da cadeia de produção, e não somente em um único processo isolado em si (REBITZER et al., 2004). Dessa forma, informações importantes podem ser consideradas sob o ponto de vista ambiental, como inclusive do social e econômico.

2.2.2. Aplicações e Limitações

A expansão do interesse pela metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida coincide com a diversidade de aplicação e uso da ferramenta pelos setores industriais, empresariais, governamentais, órgãos reguladores, organizações não governamentais (ONGs) e consumidores. Por conseguinte, são verificadas distintas vertentes de aplicação da ACV, como: a identificação de oportunidades de melhoria de desempenho ambiental; comparação de desempenho ambiental de produtos com mesma função; mensurar diferentes indicadores de desempenho ambiental relevantes; concessão de rótulos ou selos; projeto de novos produtos e processos, ou remodelação dos já existentes, a partir da variável ambiental; comunicação ambiental; entre outras (DA SILVA; KULAY, 2006).

2.2.3. Aspectos Metodológicos

O método de execução de estudos de ACV é padronizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, que organizou a tradução das Normas ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2009). A divisão pode ser fundamentada em quatro etapas principais, sendo estas de caráter iterativo, isto é, com readequações que podem ocorrer ao longo do processo de execução a partir de ações tomadas em outras etapas. A forma como estas etapas se interrelacionam de forma lógica para efeito de aplicação do método são apresentadas na Figura 2 e serão descritos em sequência.

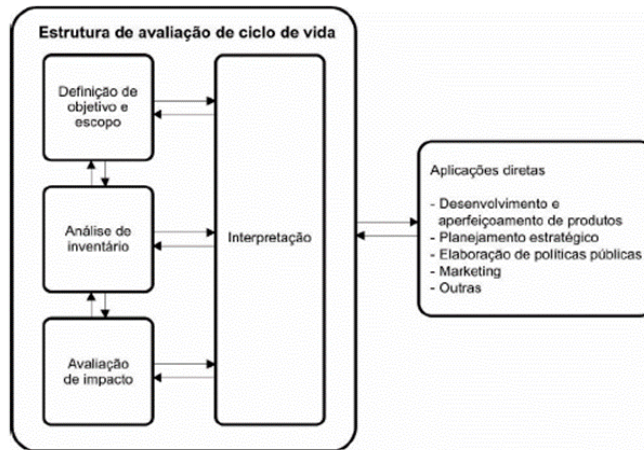


Figura 2: Estrutura da ACV com os seus estágios e aplicações diretas da metodologia. Fonte: (ABNT, 2009).

2.2.4. Definição de objetivo e escopo

O objetivo de uma ACV tem como propósito geral a definição da motivação e abrangência do estudo, os motivos e as utilizações previstas, bem como o público-alvo ao qual está destinado, as razões para a sua realização e se há intenção de publicação dos resultados. Durante a definição de *escopo* são conceituados elementos de aspectos metodológico, como o sistema de produto, a função do produto ou do serviço objeto de análise, a unidade funcional, as fronteiras de estudo, a forma como a coleta de dados será conduzida, os mecanismos de tratamento de situações de multifuncionalidade, bem como, os impactos que serão auferidos (ABNT, 2009).

2.2.5. Análise do Inventário do Ciclo de Vida

Nesta etapa é conduzida a descrição e quantificação dos aspectos ambientais e dos fluxos de matéria e energia que compreendem o ciclo de vida do produto em estudo. Os processos compreendidos, como os consumos de materiais e recursos e as quantidades de resíduos e emissões, bem como outras trocas, são modelados para representar o sistema de produto e suas entradas e saídas totais de e para o ambiente natural, respectivamente. Isso resulta em um modelo de sistema de produto e um inventário de trocas ambientais relacionadas à unidade funcional (REBITZER et al., 2004).

Os dados coletados devem ser consistentes e representativos da realidade que espelham para que os resultados do estudo cumpram com os propósitos a que se destinam. Os dados usados em estudos de ACV podem ser de dois tipos: primários ou secundários. Os primários são coletados em campo por meio de medições *in loco*, via registros em boletins de operação, ou documentos equivalentes. Ao passo que, os secundários são de registros de literatura, podendo por isso ser obtidos a partir de artigos científicos, livros, manuais técnicos, anuários, ou outras fontes referenciáveis de informação. Concluída a coleta, procede-se então ao tratamento dos dados. Em termos metodológicos, essa ação consiste em dois procedimentos: (a) ajuste à Unidade funcional ou Fluxo de referência; e b) tratamento de situações de multifuncionalidade. O ajuste à Unidade funcional ou Fluxo de referência compreende expressar os valores de todos os aspectos ambientais coletados em termos daquelas bases de cálculo. Já o tratamento de multifuncionalidades consiste tanto na seleção de um procedimento para abordar situações daquela natureza, como da estimativa dos fatores de correção que devem ser adotados em cada situação de análise (ABNT, 2009).

2.2.6. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

Possui como intuito avaliar e classificar os potenciais impactos ambientais associados aos aspectos inventariados, expressando em termos quantitativos os efeitos ambientais a que são submetidos a natureza e o ser humano a fim de atender a função para a qual o produto, processo ou serviço em análise foi concebido. Em outros termos é a "fase de avaliação do ciclo de vida com o objetivo de compreender e avaliar a magnitude e a significância dos impactos ambientais potenciais para um sistema de produto ao longo do ciclo de vida do produto". Assim sendo, pode-se dizer que envolve conversão dos resultados da etapa de Análise de Inventário em unidades comuns e a agregação dos resultados convertidos dentro da mesma categoria de impacto (CURRAN, 2012).

Conforme as orientações das normas da série ISO 14040 esta etapa consiste em elementos obrigatórios e opcionais. Como obrigatórios se enquadram a seleção de categorias de impactos e de seus respectivos indicadores; Classificação; Caracterização. Já a Normalização e Ponderação são opcionais. Na primeira etapa da Avaliação do Impacto do ciclo de vida ocorre a seleção das categorias de

impacto que são relevantes a serem consideradas no LCA, em referência ao objetivo e escopo do estudo, e a classificação dos fluxos elementares dos resultados da etapa do Inventário nessas categorias de impacto. A classificação é conduzida com base na identificação das questões ambientais para as quais cada fluxo elementar pode contribuir, como esgotamento de água, esgotamento de recursos não renováveis, mudança climática ou eutrofização de água doce etc. Em seguida, na caracterização, é realizada a tradução dos resultados da etapa de Inventário em pontuações de indicadores para as diferentes categorias de impacto. Em respeito a normalização, expressa-se as pontuações dos indicadores para todas as categorias de impacto em uma métrica comum, normalmente as contribuições anuais para os impactos ambientais totais de uma pessoa média. E por fim na ponderação, as pontuações do indicador (normalmente normalizadas) para as diferentes categorias de impacto são comparadas atribuindo-se pesos a cada categoria de impacto que se destina a refletir sua importância relativa. A relevância deste elemento opcional está relacionada à capacidade de calcular uma única pontuação do indicador somando todas as pontuações de impacto ponderadas (ABNT, 2009; HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2017).

A quantificação dos resultados para cada categoria de impacto é baseada em valores de referência. Cada categoria possui uma determinada substância padrão de medição e todas as outras substâncias que interferem nesta categoria têm seu valor de impacto convertido para a substância padrão por meio de um valor de conversão. Por fim, quando se há a expressão de todas as categorias de desempenho ambiental, é obtido o chamado Perfil de Impacto Ambiental. Entre as categorias de impacto consideradas pela ACV, encontram-se: Mudanças Climáticas, Redução (ou depleção) da camada de ozônio, Acidificação, Depleção de recursos abióticos, Eutrofização, Formação de foto-oxidantes, Depleção de recursos hídricos e fósseis, Transformação e ocupação do solo, Toxicidade humana e Ecotoxicidade, entre outros (CURRAN, 2012).

2.2.7. Interpretação do Ciclo de Vida

Envolve a combinação dos resultados das fases anteriores, na qual se visa alcançar conclusões e recomendações para os tomadores de decisão, considerando a sensibilidade e consistência do estudo. Nesse sentido, tem como objetivo uma

avaliação crítica de todo o estudo ACV, de modo iterativo, visa verificar aspectos estruturais e aferir premissas conceituais e metodológicas, bem como de procedimentos operacionais (como de coleta e tratamento de dados, ou de tratamento de multifuncionalidades) se foram conduzidos de maneira consistente com as diretrizes e padrões. Além dessas ações a elaboração desta etapa pode depreender análises complementares, com vistas a determinar seu grau de representatividade, destacando-se análises de sensibilidade e de incerteza (PENNINGTON et al., 2004).

Assim, a interpretação dos resultados realizada com base no perfil de impacto ambiental obtido tem por finalidade identificar quais são os gargalos do sistema de estudo em termos de emissões e consumos, com o intuito de determinar as soluções mais eficientes para a melhora do desempenho ambiental do sistema. Esta etapa pode ser visualizada como um mecanismo que propicia melhorias contínuas ao estudo de ACV com vistas a elevar os graus de precisão, acurácia e, de maneira geral, a qualidade dos resultados obtidos e da avaliação realizada, relacionando com as possíveis aplicações para a qual o estudo se destina (ABNT, 2009).

2.2.8. Situações de Multifuncionalidade

Os ciclos de vida de diferentes produtos estão muitas vezes interconectados ao longo da cadeia produtiva. Como exemplo, quando dois ou mais produtos são originados em um único processo um mesmo processo produz mais de um produto de interesse comercial (e.g. coprodução de óleos vegetais e de farelos usados como alimentos); ou onde dois ou mais resíduos de sistemas de produto distintos são submetidos a um mesmo processo de tratamento (e.g. incineração de plásticos e de papel); e ainda processos onde ocorre, simultaneamente, o tratamento de certo resíduo, e a coprodução de um bem de interesse econômico (e.g. disposição final de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários, com a coprodução de eletricidade a partir do biogás recuperado). Dessa maneira, quando é necessário expressar a carga ambiental desses processos em relação a apenas um desses produtos (ou funções), surge um problema multifuncional (NOGUEIRA, 2018).

A multifuncionalidade constantemente leva a complicações na avaliação do ciclo de vida (ACV) e por esta razão é um aspecto metodológico bastante debatido

na literatura (PELLETIER et al., 2015). Essa questão pode ser lidada mediante a alguns tipos de procedimentos. A norma ISO 14044 fornece orientação sobre a ordem de preferência desses procedimentos, de modo a evitar ou minimizar sempre que possível a alocação. De forma preferencial, é indicado a subdivisão dos processos multifuncionais, ou seja, a divisão em dois ou mais subprocessos e realizar a coleta de dados de entrada e saída em referência a esses subprocessos. Caso isso não seja possível, deve-se aplicar a expansão do sistema, incluindo as funções na unidade funcional, isto é, incluir as funções adicionais relacionadas aos coprodutos. Se a alocação não puder ser evitada, pode-se aplicar o particionamento do estoque pelas múltiplas funções, de acordo com o critério de particionamento. Este critério é baseado na preferência nas relações físicas, caso contrário, os valores econômicos podem ser usados (ABNT, 2009; SCHRIJVERS; LOUBET; SONNEMANN, 2016).

Em geral, concebe-se que as implicações de cada caso de multifuncionalidade em estudos de ACV vão variar em função do tipo de abordagem dada ao estudo em referência. A abordagem mais comumente empregada é a atribucional, de caráter retrospectivo, orientada para a causa, e são consideradas mais descritivas ou estáticas. Por outro lado, a abordagem do tipo consequencial é orientada para os efeitos das mudanças diretas ou indiretas devido a uma decisão, ou uma mudança na demanda por um produto, e possui caráter prospectivo (SCHRIJVERS; LOUBET; SONNEMANN, 2016).

Em suma, os problemas multifuncionais podem ser encontrados em três situações gerais: Processos que geram vários produtos (saídas múltiplas); Processo que recebem produtos diferentes (entradas múltiplas) e Processos envolvendo reciclagem em ciclo aberto (Open Loop Recycling: OLR).

3. Método de Trabalho

3.1. Modelagem do ciclo de vida

O estudo foi realizado de acordo com as condicionantes e orientações técnicas descritas na norma ABNT NBR ISO 14040 e na norma ABNT NBR 14044, que orientam e determinam aspectos metodológicos associados à técnica de ACV. Esse estudo remete a aplicação da técnica para o escopo do tipo “*berço-ao-portão*”

da fábrica e a técnica de ACV na situação presente foi aplicada em sua modalidade atribucional. Sendo assim, estabeleceu-se como fluxo de referência para a presente análise: produzir 5.358 kg de D-limoneno e 17.657 kg de pectina em um processo de biorrefino a partir de cascas de laranja. Ademais, para fins de cálculo, linearizou-se os indicadores baseados em 1,000 kg de D-limoneno, 3,295 de Pectina e 3,014 kWh de energia elétrica.

Essa modelagem foi realizada empregando-se dados secundários obtidos por meio de simulação com auxílio da ferramenta computacional ASPEN na versão 8.5 (ASPEN TECHTM). Dados complementares foram obtidos de Suzuki et al, 2023 e Suzuki et al, 2020. O sistema de produto considerado para efeito desta análise está descrito na figura 3 abaixo.

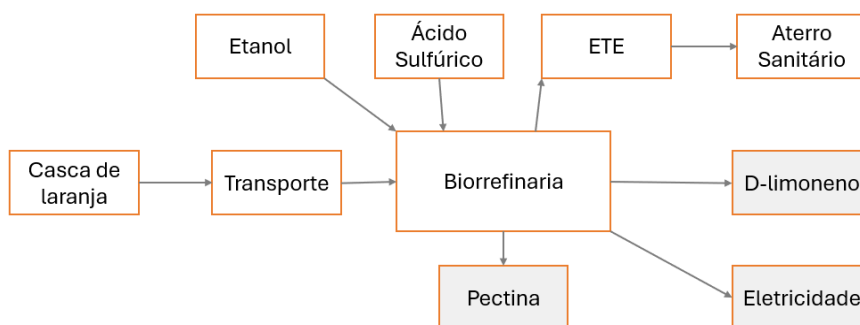


Figura 3 : Esquema representativo das delimitações do processo, assim como os ciclos de vida associados a cada uma das entradas e saídas; Fonte: Autoria própria

Nela é possível ver que, além dos processos compreendidos na biorrefinaria, foram considerados desde o berço até essa transformação, os ciclos de vida de ativos químicos como etanol e ácido sulfúrico, bem como de utilidades nas suas formas elétrica e térmica. Também fazem parte do sistema soluções selecionadas para o tratamento dos rejeitos gerados pelos processos praticados na biorrefinaria. Esse processo é realizado até que o grau de periculosidade desses mesmos despejos tenha sido completamente eliminado ou amortecido dentro dos limites previstos na legislação vigente.

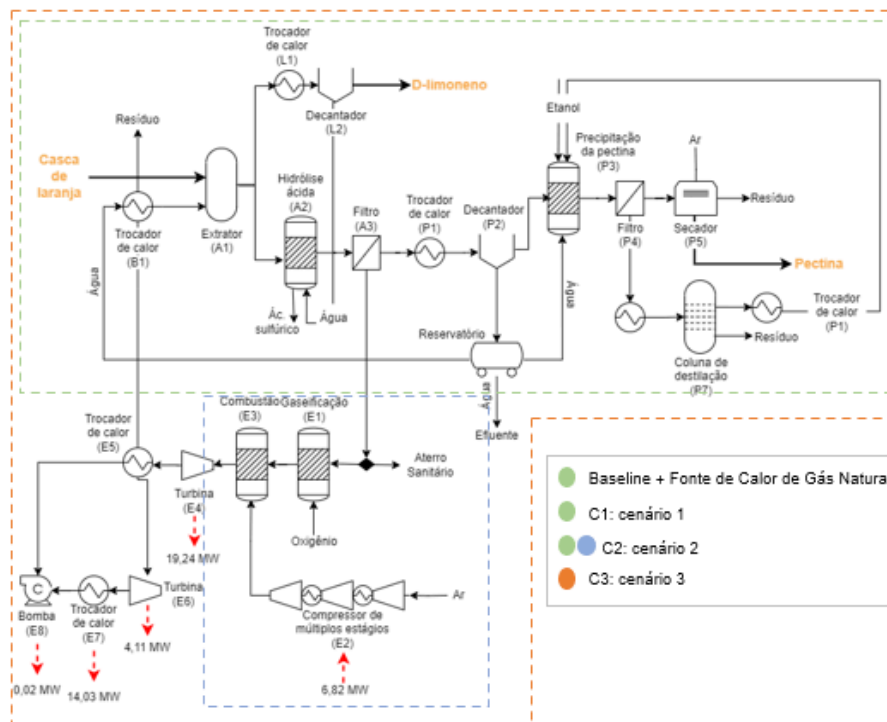


Figura 4: Design conceitual da planta de biorrefinaria a ser estudada.

A figura 4 traz um detalhe do processo de biorrefino, no qual é possível ver que a unidade produtiva compõe-se de três processos interconectados, a saber : (i) planta de produção de D-limoneno; (ii) planta de produção de pectina; e, (iii) unidade de geração de energia elétrica. Os dados empregados para descrever os ativos químicos consumidos no processo, bem como suas utilidades elétrica e materiais, foram obtidos da base de dados EcolInvent (EcolInvent TM) e adaptados para as condições práticas para o Brasil, para essas mesmas gerações antrópicas. Foram empregados procedimentos de harmonização, no sentido de coordenar os resultados obtidos das práticas de simulação com aqueles gerados junto aos bancos selecionados da base EcolInvent. Esses procedimentos se concentraram, fundamentalmente, em ajuste da condição operacional e checagem dessas mesmas práticas por meio de balanços de massa e energia quando isso se fez necessário.

As situações de multifuncionalidades identificadas ao longo da elaboração do modelo foram tratadas por meio do procedimento de alocação, empregando na totalidade dos casos, critério físico de massa como forma de repartição de cargas ambientais associadas às correntes de entrada e de saída, e de subsistemas ou de processos elementares que constituem aquelas mesmas repartições. A avaliação de

impacto se restringiu a uma medição da demanda primária de energia e do potencial de aquecimento global proporcionado por esse sistema para a obtenção dos produtos supracitados de maneira simultânea.

A análise do ciclo de vida foi feita para 4 cenários: baseline, cenário 1 (C1), cenário 2 (C2) e cenário 3 (C3). Tem-se como objetivo variar as fontes de energia e produtos da planta em cada cenário para avaliação do impacto ambiental. No baseline, a planta química produz dois produtos: D-limoneno e Pectina com fonte de energia de gás natural. Já no primeiro cenário, mantém-se a produção acrescida de integração energética, assim utilizando parcialmente gás natural como fonte de energia. O cenário 2 assemelha-se ao C1, mas com acréscimo de recuperação de calor para reduzir a quantidade de energia por fonte de gás natural; para isso ativou-se as unidades de combustão e gaseificação. Por fim, soma-se à produção de eletricidade as condições anteriores no último cenário (C3).

Para avaliar o desempenho ambiental desses cenários, foram analisadas três categorias de impacto: GWP (“Global Warming Potential”), GWP “CO₂ uptake” e PED. Nos dois primeiros indicadores, aplicou-se o método proposto pelo Intergovernamental Panel of Climate Change (IPCC), em sua versão 2013 (IPCC, 2013). A diferenciação entre os indicadores do Potencial de Aquecimento Global ocorre à medida que cada um tem um método de contabilização de CO₂ diferente. No caso, apenas o GWP “CO₂ uptake” considera o ônus da biogênese, a liberação de CO₂ em sua forma biogênica. Ademais, o indicador PED (Demanda Primária de Energia) mede a quantidade total de energia requerida pela planta para demonstrar a variação das fontes de energia para suprir a produção. Para comparação dos produtos nos diferentes cenários, dividiu-se os indicadores pelo preço de venda de cada produto para todos terem uma mesma base, no caso, dólar.

Por fim, as delimitações geográficas e de dados da modelagem basearam-se em parâmetros da literatura e de premissas adotadas pelo grupo durante a definição de projeto. Quanto à cobertura geográfica espacial, optou-se por instalar a fábrica na região Sudeste do Brasil, onde concentram-se grande parte das plantações de laranja e cana de açúcar, dois insumos essenciais para a operação da biorrefinaria. Já em relação à cobertura geográfica dos dados, seguiu-se os parâmetros associados ao biênio de 2019 e 2020, datas referentes ao projeto Suzuki et al, 2020, base da biorrefinaria em estudo.

4. Resultados e Discussões

4.1. Análise dos resultados obtidos para cada cenário

A partir das simulações realizadas no SimaPro, foi possível obter quantitativamente os impactos para produção de pectina, D-limoneno e eletricidade para cada um dos cenários projetados (baseline, C1, C2 e C3). Os resultados dos três indicadores adotados para esse estudo (PED, GWP e GWP (CO₂ uptake)) são apresentados nas tabelas 1, 2, 3.

Tabela 1: Impacto dos cenários utilizando indicador de demanda primária de energia (PED)

Cenário	Pectina (MJ)	D-limoneno (MJ)	Eletricidade (MJ)
Baseline	293	4,47	-
S1	121	1,74	-
S2	77,8	1,39	-
S3	77,1	1,36	12,3

Tabela 2: Impactos considerando indicador de potencial de aquecimento global (GWP)

Cenário	Pectina (kg de CO ₂ equivalente)	D-limoneno (kg de CO ₂ equivalente)	Eletricidade (kg de CO ₂ equivalente)
Baseline	15,7	0,27	-
S1	5,39	0,09	-
S2	2,81	0,08	-
S3	2,78	0,08	0,53

Tabela 3: Impactos considerando indicador de potencial de aquecimento global (GWP), considerando *carbon uptake*

Cenário	Pectina (kg de CO ₂ equivalente)	D-limoneno (kg de CO ₂ equivalente)	Eletricidade (kg de CO ₂ equivalente)
Baseline	17,5	0,38	-
S1	7,22	0,21	-
S2	4,83	0,20	-
S3	4,78	0,19	0,82

A carga ambiental do indicador de Demanda Primária de Energia (PED) é medida pela unidade MJ, enquanto o impacto medido pelo Potencial de

Aquecimento Global (GWP) considera o quilograma de CO₂ equivalente. Uma vez que as unidades de medida são distintas, não se deve comparar diretamente o indicador de PED com os de GWP.

Comparando os indicadores de GWP, apresentados nas tabelas 2 e 3, é possível observar que o indicador de potencial de aquecimento global que utiliza CO₂ de *uptake* apresenta maior impacto. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que nessa análise de GWP com CO₂ *uptake*, não há o benefício da fixação de CO₂ pelo processo da fotossíntese, havendo apenas o ônus relativo à liberação do gás carbônico para o processo.

Realizando a análise por indicador, pode-se observar que os resultados de PED e de GWP (com e sem carbono biogênico) apresentam coerência no comportamento dos resultados dos cenários, uma vez que é possível verificar que o cenário baseline é o que apresenta maior carga ambiental, tanto em níveis de PED, quanto em GWP, havendo diminuição gradual do impacto até o cenário C2. Esse resultado é coerente com o esperado, uma vez que o cenário baseline utiliza apenas energia proveniente do gás natural, enquanto o cenário C2 é favorecido com a integração energética e recuperação de calor.

No cenário baseline, que apresenta o pior resultado de impacto ambiental, toda demanda energética é suprida pelo gás natural. Dessa forma, todos os impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida dessa fonte também são contabilizados na análise, o que explica esse desempenho. Em vista disso, a implementação da recuperação de calor e a integração energética maximizam o ganho em eficiência, reduzindo a demanda de energia proveniente do gás natural, o que explica a diminuição do impacto associado ao processo do cenário C2.

Dentre os cenários propostos a partir do baseline, o C3 é o que apresenta maior carga energética, resultado explicado pela incorporação de processos adicionais para produção de um outro produto, a eletricidade. Apesar do maior impacto ambiental relacionado à demanda primária de energia e ao potencial de aquecimento global, pode-se analisar esse impacto ambiental comparado ao retorno de valor agregado gerado pela produção adicional de eletricidade.

4.2. Análise pelo retorno financeiro gerado pelos produtos

Para normalização das cargas pelo valor agregado gerado, foram considerados os preços de comercialização dos produtos apresentados na tabela 4. Com isso, foi possível calcular a receita potencial, visualizada na tabela 5, considerando a quantidade produzida definida na análise de ciclo de vida.

Tabela 4: Preço de venda dos produtos.

Produto	Preço	Referências
D-Limoneno	13 \$/kg	Ultra International B.V. (2023)
Pectina	70 \$/kg	PULVIT (2024)
Eletricidade	0,134 \$/kWh	GlobalPetrolPrices (2024)

Tabela 5: Receita potencial relativo à quantidade de cada produto produzido.

Produto	Receita Potencial
D-Limoneno	\$13
Pectina	\$98,85
Eletricidade	\$0,40

A partir desses valores, fez-se a divisão entre a carga ambiental apresentada nas tabelas 1, 2, 3 pelo potencial econômico da tabela 6, para que seja possível realizar a comparação entre o impacto ambiental e retorno financeiro. Com isso foram obtidos os resultados apresentados nas Figuras 5 e 6.

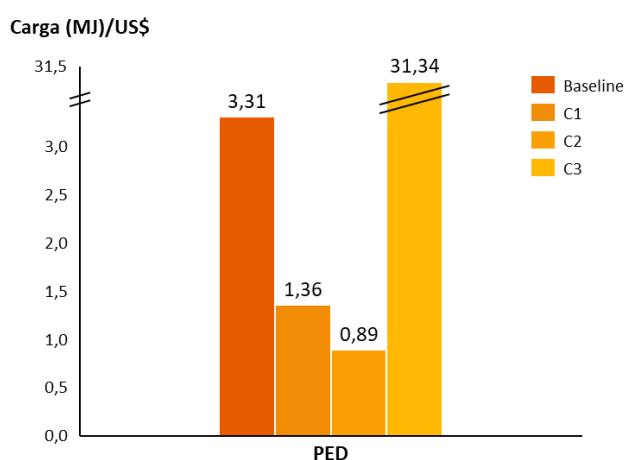


Figura 5: Carga ambiental PED por receita potencial dos produtos gerados.

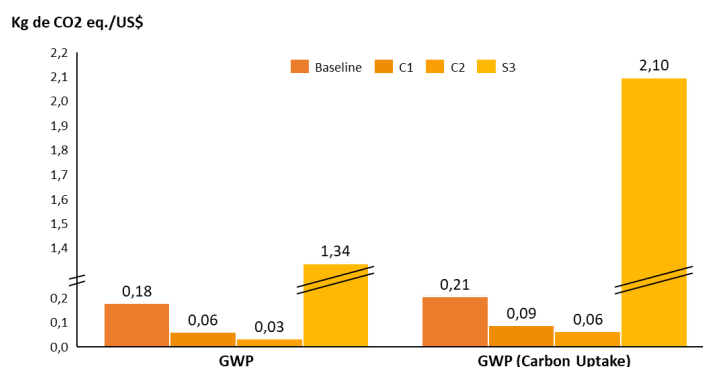


Figura 6: Carga ambiental GWP e GWP utilizando CO₂ uptake por receita potencial dos produtos gerados.

Observa-se na Figura 6 e 7 que as implementações dos cenários C1 aplicadas ao baseline são positivas, uma vez que a carga ambiental requisitada para geração de valor agregado diminui mais de 65% entre o valor de GWP do baseline para C2. Além disso, o C2 mantém o melhor desempenho, havendo redução de mais de 80% do impacto comparado de GWP comparado ao cenário baseline.

No cenário C3, esperava-se que o retorno financeiro adicional pela comercialização da eletricidade provocasse maior distribuição da carga comparada ao incremento do retorno financeiro, a partir da comercialização da eletricidade. No entanto, observa-se que o impacto ambiental por valor agregado gerado apresentou valores maiores que o cenário baseline. Nesse contexto, o cenário C3 apresenta um *trade-off* para a comercialização de eletricidade, uma vez que provoca aumento do impacto ambiental, mas gera receita adicional para a biorrefinaria.

Diante disso, é possível concluir que apesar do cenário C3 possibilitar a comercialização de um produto adicional, deve-se considerar o impacto ambiental atrelado, que chega a apresentar resultados dez vezes maior que o baseline, de acordo com o indicador de GWP com carbono biogênico. Além disso, conclui-se que o cenário C2 apresenta melhor resultado ambiental por retorno monetário, uma vez que os processos implementados geram maior valor agregado com menor carga ambiental de PED e GWP.

4.3. Análise por produto

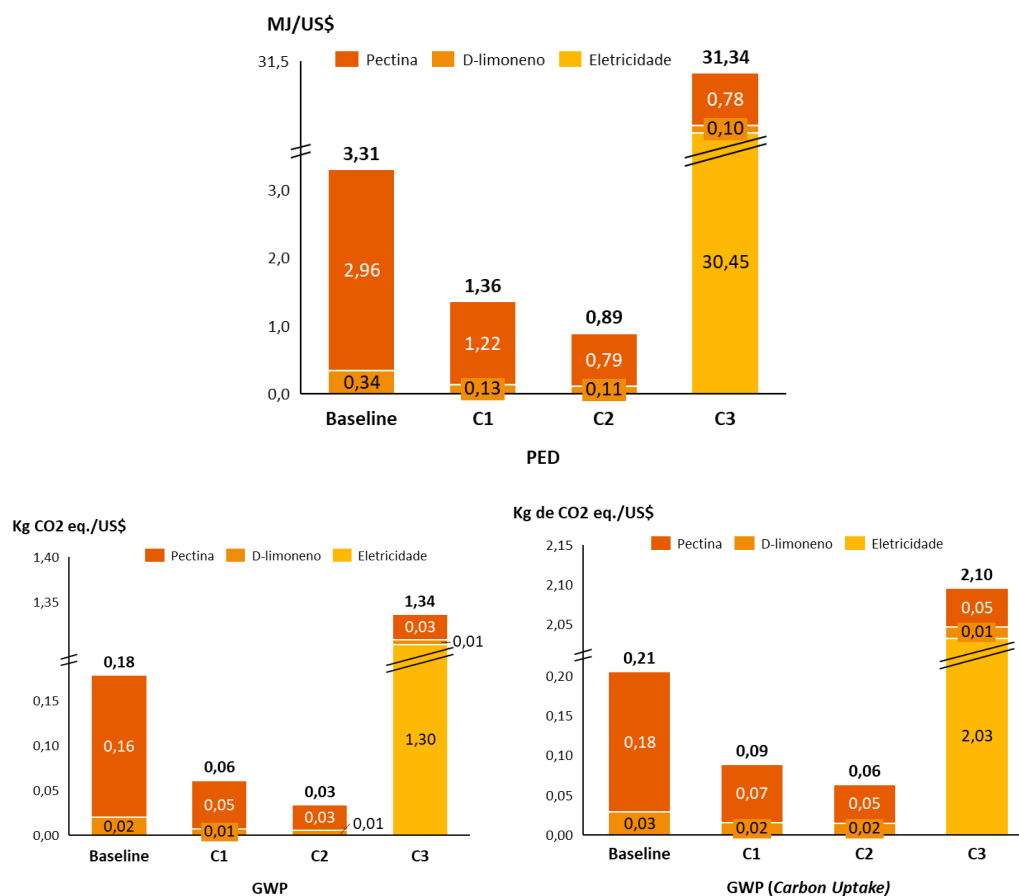


Figura 7: Atribuição dos impactos aos produtos em cada cenário estabelecido.

Analisando os produtos separadamente, é notório nos cenários baseline, C1 e C2 que a pectina é o produto com maior impacto ambiental, representando valor médio de 86,4% de toda a carga do cenário. Isso pode ser explicado pela necessidade de mais etapas de processo para produção desse produto e, conseqüentemente, maior demanda energética e impacto associado. Essa percepção se reflete também no valor agregado ao produto, uma vez que essa complexidade se reverte no custo de produção, tal qual o caso da pectina.

É importante ressaltar, no entanto, que, no caso isolado da eletricidade como produto, este absorve muito do impacto associado ao cenário 3, representando até 97,5% de todo impacto relacionado ao C3. Isso pode ser explicado porque, apesar da eletricidade abastecer a necessidade da planta (diminuindo a contribuição dos impactos ambientais relacionados ao grid Brasil), as demandas de energia relativas à produção de eletricidade também aumentam. Na análise de PED isso também é

observado, uma vez que o consumo de energia aumenta consideravelmente com o acionamento de uma nova unidade à planta integrada.

5. Conclusões

A partir das análises realizadas, é possível concluir que a implementação dos cenários C1 e C2, comparado ao baseline, reduz os impactos ambientais associados à geração de valor agregado dos processos.

Nesse contexto, o cenário C2 é o que apresenta menor atribuição de carga, considerando os três indicadores utilizados. Além disso, apesar do cenário C3 produzir um produto adicional (eletricidade), a carga relacionada à geração de valor agregado se manteve elevada. Assim, no cenário C3, há um trade-off a ser considerado, uma vez que essa configuração possibilita fonte adicional de receita devido à comercialização de eletricidade, elevando o potencial econômico, mas em contrapartida, provoca maior impacto ambiental.

6. Referências Bibliográficas

- ABNT. **ABNT NBR ISO 14044: Gestão ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Orientações**. São Paulo. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.
- BAUMANN, H.; TILLMAN, A.-M. The Hitchhikers' guide to LCA: an orientation in life cycle assessment methodology and application. **Studentlitteratur, Sweden**, 2004.
- BOUKROUFA, M.; BOUTEKEDJIRET, C.; PETIGNY, L.; RAKOTOMANOMANA, N.; CHEMAT, F. Bio-refinery of orange peels waste: A new concept based on integrated green and solvent-free extraction processes using ultrasound and microwave techniques to obtain essential oil, polyphenols, and pectin. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 24, p. 72-79, 2015.
- CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **PIB do agronegócio cresce no segundo trimestre e acumula alta de 0,5% em 2023**. Disponível em: <<https://cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/CT-PIB-DO-AGRONEGOCIO-28SET2023.pdf>>. Acesso em: 6 dez. 2023.
- CITRUSBR. Associação Nacional dos Exportadores de Sucos Cítricos. A Cadeia do suco de laranja Brasileiro: Position Paper Safra 2018/2019. **Revista CitrusBR**, 2020.
- CURRAN, M. A. **Life Cycle Assessment Handbook: a guide for environmentally sustainable products**. John Wiley & Sons, 2012.
- DA SILVA, G. A.; KULAY, L. A. Avaliação do ciclo de vida. In: VILELA JÚNIOR, A. e DEMAJOROVIC, J. (Org.). Em: **Modelos e Ferramentas de Gestão Ambiental - Desafios e Perspectivas para as Organizações**. 1. ed. São Paulo: Ed. Senac, 2006.
- FERREIRA, J.; BISCAIA JR, E. C.; SECCHI, A. R. Biorrefinaria virtual: Simulação dinâmica de evaporadores. **COBEQ**, 2014.
- FUNDAÇÃO ESPAÇO ECO. **Estágios do ciclo de vida de um determinado produto ou serviço**. BASF, 2022. Disponível em: <<https://www.espacoeco.org.br/>>. Acesso em: 3 jan. 2023.
- GLOBALPETROPRICES. **Brazil Electricity Prices**. Disponível em: <https://www.globalpetrolprices.com/Brazil/electricity_prices/>. Acesso em: 08 abr. 2024.
- HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S. I. **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**., Springer International Publishing, 2017.
- KOUGIAS, P. G.; ANGELIDAKI, I. **Biogas and its opportunities—A review**. Front. Environ. Sci. Eng., v. 12, p. 14, 2018.
- KLÖPFFER, W. Life Cycle Assessment From the Beginning to the Current State. **Environ. Sci & Pollut. Res**, v. 4, n. 4, p. 223–228, 1997.
- LI, Y.; FABIANO-TIXIER, A.-S.; CHEMAT, F. **Essential oils: from conventional to green extraction**. Essential Oils as Reagents in Green Chemistry p. 9–20. Cham: Springer, 2014.
- LEITAO, V. F. et al. Biomass residues in Brazil: Availability and potencial uses. **Waste and Biomass Valorization**, v. 1, n.1, p. 65-76, 2010.
- LÓPEZ, J. Á. S.; LI, Q.; THOMPSON, I. P. Biorefinery of waste orange peel. **Critical Reviews in Biotechnology**, 30(1), 63-69, 2010.

MANTHEY, J.A.; GROHMANN, K. Phenols in citrus peel byproducts. Concentrations of hydroxycinnamates and polymethoxylated flavones in citrus peel molasses. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 49, 3268–3273, 2001.

MURALI, R.; KARTHIKEYAN, A.; SARAVANAN, R. Protective effects of D-limonene on lipid peroxidation and antioxidant enzymes in streptozotocin-induced diabetic rats. **Basic Clin Pharmacol Toxicol**, v. 112, n. 3, p. 175-181, mar. 2013.

NEGRO, V.; MANCINI, G.; RUGGERI, B.; FINO, D. Citrus waste as feedstock for bio-based products recovery: Review on limonene case study and energy valorization. **Bioresource Technology**, v. 214, p. 806-815, 2016.

NOGUEIRA, A. R. **Avaliação do desempenho ambiental de biodiesel produzido a partir de gordura animal segundo diferentes abordagens para situações de multifuncionalidade**. Tese de Doutorado—São Paulo: Universidade de São Paulo (USP), 2018.

PELLETIER, N. et al. Rationales for and limitations of preferred solutions for multi-functionality problems in LCA: is increased consistency possible? **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 1, p. 74–86, 2015.

PENNINGTON, D. W. et al. Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. **Environment International**, v. 30, n. 5, p. 721–739, 2004.

PULVIT Industry LTD. **What is Pectin?** Disponível em: <<https://pulvit.com/pectin-market/>> . Acesso em: 10 abr. 2024.

REBITZER, G. et al. Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment International**, v. 30, n. 5, p. 701–720, 2004.

REZZADORI, K.; BENEDETTI, S.; AMANTE, E. R. Proposals for the residues recovery: Orange waste as raw material for new products. **Food and Bioproducts Processing**, v. 90, n. 4, p. 606-614, 2012.

RODRIGUES, J. A. R. Do engenho à biorrefinaria: a usina de açúcar como empreendimento industrial para a geração de produtos bioquímicos e biocombustíveis. **Química Nova**, n. 34, 2011.

SATARI, B.; KARIMI, K. Citrus processing wastes: Environmental impacts, recent advances, and future perspectives in total valorization. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 129, p. 153-167, 2018.

SCHRIJVERS, D. L.; LOUBET, P.; SONNEMANN, G. Developing a systematic framework for consistent allocation in LCA. **International Journal of Life Cycle Assessment**. Springer Verlag, 2016.

SHARMA, Kavita; MAHATO, Neelima; CHO, Moo Hwan; LEE, Yong Rok. **Converting citrus wastes into value-added products: Economic and environmentally friendly approaches**. *Nutrition*, v. 34, p. 29-46, 2017.

SUZUKI, Lorryne Lins. **Análise técnico-econômica e ambiental de processos de valorização do resíduo da indústria de suco de laranja**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. doi:10.11606/D.3.2019.tde-28112019-141114. Acesso em: 12 dez. 2023.

TAN, X. C.; CHUA, K. H.; RAVISHANKAR RAM, M.; KUPPUSAMY, U. R. Monoterpenes: Novel insights into their biological effects and roles on glucose uptake and lipid metabolism in 3T3-L1 adipocytes. **Food Chemistry**, 2016.

ULTRA INTERNATIONAL B.V, E. O. **Product: Orange Oil CP**. Disponível em: <<https://ultranl.com/market/market-report-winter-2023/#scrollspy-898>>. Acesso em: 08 abr. 2024.