



Aplicação da Química Verde na Indústria Química como Desenvolvimento Sustentável com Ênfase na Produção do Plástico Verde

Gisiane de Oliveira Aguiar¹, Pollyanna Rodrigues Huguinim Souza¹, Rogério Manhães Soares¹,
Yasmim Monteiro Cordeiro¹ e Camila dos Santos Silva Franco¹

¹Faculdade Católica Salesiana, Macaé, RJ, Brasil.

Resumo - Este trabalho descreve e analisa os aspectos técnicos e ambientais do biopolietileno e polietileno convencional, dando ênfase aos parâmetros de processos de produção, avaliação do ciclo de vida (ACV) e biodegradabilidade. Através de uma compilação de dados bibliográficos e de entrevista, verificou-se que o biopolietileno, plástico oriundo de fonte renovável, tem sido uma alternativa atrativa para substituir o polietileno convencional. Quando comparado ao polietileno convencional, o plástico verde apresenta um melhor desempenho na categoria de mudanças climáticas e consumo de recursos fósseis na ACV, o que é interessante para a fabricação de plásticos, tendo em vista os impactos negativos ambientais proporcionados pela indústria química. Vale ressaltar que o plástico convencional e o verde são semelhantes em sua estrutura e composição, a diferença de ambos está somente vinculada ao processo industrial. Embora o biopolietileno seja cerca de 40% mais caro que o convencional, ele agrega valor e gera um diferencial para a empresa que o adota como alternativa, representando, ainda, aos consumidores a aplicação da química verde como desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Polietilenos; Química Verde; Desenvolvimento Sustentável.

Application of Green Chemistry in the Chemical Industry for Sustainable Development with Emphasis on Green Plastic Production

Abstract - This work describes and analyzes the technical and environmental aspects of biopolyethylene and conventional polyethylene, with special focus on the parameters of production processes, life cycle assessment (LCA) and biodegradability. Through a compilation of bibliographic data and interviews, it was found that biopolyethylene, plastic from a renewable source, has become an attractive alternative to replace conventional polyethylene. When compared to conventional polyethylene, green plastic performs better in the category of climate change and consumption of fossil resources in LCA, which is interesting for the plastics manufacturing, given the negative environmental impacts provided by the chemical industry. It is worth mentioning that conventional and green plastics are similar in structure and composition, the difference between them is only linked to the industrial process. Although biopolyethylene is about 40% more expensive than the conventional one, it adds

value and creates a differential for the company that adopts it as an alternative, also representing to consumers the application of green chemistry for sustainable development

Keywords: Polyethylenes; Green Chemistry; Sustainable Development.

I. INTRODUÇÃO

A indústria química desempenha um papel primordial na conversão das matérias-primas como o petróleo, o gás natural, os metais, os minerais e, até mesmo, a água. Além disso, desenvolve inúmeros produtos indispensáveis à humanidade, que estão presentes no ramo alimentício, cosmético, farmacológico e de higiene pessoal [1] [2] [3].

Embora a indústria química possua uma significativa relevância na economia global, ela desperta, em similar proporção, a preocupação em relação aos efeitos que suas atividades possam ocasionar ao meio ambiente, visto que é responsável por 15% das emissões anuais de carbono no setor industrial mundial [3] [4].

A fim de reverter este cenário, ela está a cada vez mais comprometida em promover o desenvolvimento sustentável, que consiste no atendimento das necessidades da geração atual sem prejudicar a capacidade das gerações futuras de atender às suas necessidades [5] [6].

Este novo direcionamento na questão da minimização do impacto da atividade química ao ambiente vem sendo denominado de Química Verde ou Química Sustentável, que está atrelada à criação de materiais e produtos, como os plásticos, apropriados às necessidades humanas e às novas condições de sustentabilidade [7] [8].

Os plásticos são polímeros que podem ser moldados em diferentes formas quando aplicada uma energia externa. Podemos ter, por exemplo, polímeros moldados por aquecimento (termoplásticos) ou moldados por radiação eletromagnética (fotoplásticos).

Há diversos modos de categorizá-los, com base nas estruturas químicas, recursos e propriedades, como: Polietileno Tereftalato (PET), Policloreto de Vinila (PVC), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS), Polietileno de Baixa

Densidade (PEBD), Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e Polietileno Linear de Baixa Densidade (PELBD), entre outros [9] [10] [11], sendo o polietileno (PE) um dos plásticos mais importantes da atualidade, pois é usado para a fabricação de produtos dos mais variados segmentos.

A maneira convencional de produção do PE é por meio da obtenção do etileno vindo da nafta, um subproduto do petróleo. O polietileno é quimicamente o polímero mais simples e, em razão da sua elevada produção mundial, possui um menor custo, sendo considerado um dos tipos de plásticos mais comuns. No entanto, atualmente, há outras maneiras de obtenção deste produto, como por meio da biomassa, método este que gera os denominados plásticos verdes.

Diante de tais fatos, a Química Verde pode contribuir para minimizar ou extinguir os malefícios, no meio ambiente, acarretados pela produção e utilização dos plásticos convencionais.

O objetivo geral deste artigo é verificar a aplicação da biomassa como fonte de energia, utilizando rotas limpas nos processos das indústrias químicas, buscando eliminar substâncias nocivas ao meio ambiente, com ênfase na produção do plástico verde.

Para tanto, a Seção II aborda o conceito de desenvolvimento sustentável, apresentando os quatro tipos de componentes existentes no campo: sustentabilidade ambiental, econômica, sociopolítica e cultural; a Seção III apresenta a Química Verde e os 12 princípios que regem esta nova vertente da química; a Seção IV aborda a biomassa como fonte energética; a Seção V descreve o polietileno e apresenta a diferenciação da rota sintética empregada na fabricação do produto com fonte renovável quando comparada à obtenção do produto convencional; na Seção VI é apresentado um estudo comparativo dos polietilenos; e, finalmente, na Seção VII são sumarizadas as principais conclusões.

II. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

De acordo com a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD) (1988) [12], o “desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem as suas próprias necessidades”.

Esta definição possui a sua estrutura organizada sobre quatro componentes, também chamados de dimensões, conforme a Figura 1 [13] [14].

A sustentabilidade ambiental consiste no gerenciamento das funções e componentes dos ecossistemas, a fim de certificar que permaneçam viáveis e capazes de se autorreproduzir e se adaptar a mudanças, para manter a sua diversidade biológica. Além disso, esta dimensão da sustentabilidade é a capacidade de manter as condições de vida para as pessoas e outros seres vivos, levando em consideração a habitabilidade, a harmonia do ambiente e o seu emprego como fonte de energias renováveis [15].

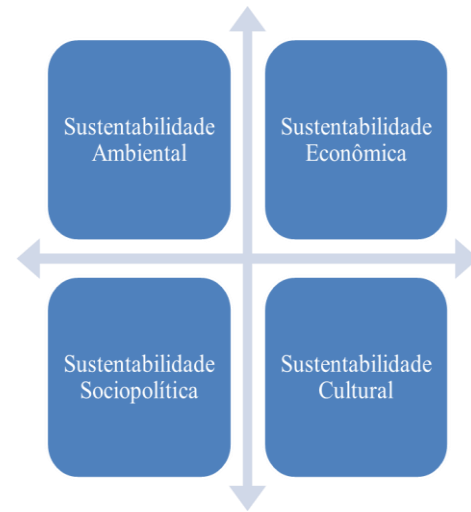


Figura 1. Componentes do campo de desenvolvimento sustentável. Elaboração própria a partir dos dados de [13] [14].

A sustentabilidade econômica consiste em um conjunto de medidas e políticas que objetivam a integração de preocupações e conceitos ambientais e sociais. Nessa sustentabilidade, o lucro passa a ser também avaliado por meio da perspectiva social e ambiental, levando à melhoria da utilização de recursos limitados e à administração de tecnologias de reservas de materiais e energia, visto que a exploração sustentável dos recursos evita o esgotamento de suas reservas [15].

A sustentabilidade sociopolítica está orientada para o desenvolvimento humano, a estabilidade das instituições públicas e culturais, assim como a minimização de conflitos sociais. Consiste em um meio de humanização da economia e, simultaneamente, tem a intenção de desenvolver projetos dos seus componentes humanos e culturais. Avaliar o indivíduo não como objeto, mas sim como objetivo de todo o desenvolvimento, pois ele participa na formação de políticas que o afeta, determina, controla e executa as decisões [16].

Por fim, mas não menos importante, tem-se a sustentabilidade cultural, que considera como os povos encaram os seus recursos naturais e, principalmente, como são construídas e examinadas as relações com outros povos, a curto e longo prazo, tendo em vista a criação de um mundo mais sustentável em todos os níveis sociais. A integração das particularidades culturais na concepção, medição e prática do desenvolvimento sustentável é primordial, já que garante a atuação da população local nos esforços de desenvolvimento [15].

III. CONCEITOS DE ENGENHARIA VERDE E QUÍMICA VERDE

Há dois princípios fundamentais que regem a mentalidade verde expressa pelos conceitos expostos acima, que são: a Engenharia Verde e a Química Verde. Estes princípios têm por finalidade buscar uma maior sustentabilidade, da fase inicial até o fim do projeto.

A Engenharia Verde, um novo ramo que está sendo explorado e que anda junto com a Química Verde nas

aplicações industriais, consiste na busca da sustentabilidade através da combinação das práticas de engenharia, ciência e tecnologia com princípios e técnicas ambientalmente aceitáveis, empregado a produtos, processos e sistemas. Dessa forma, os Princípios de Engenharia Verde servem como base para projetistas e gestores ampliarem suas atividades com resultados, além de especificações de qualidade e segurança, mas que também consideram parâmetros ambientais, econômicos e sociais [17].

A Engenharia Verde fundamenta-se na utilização dos 9 princípios apresentados na Figura 2.

Projetar processos e produtos de forma holística, utilizar análises de sistema e integrar ferramentas de avaliação de impacto ambiental	Conservar e melhorar ecossistemas naturais enquanto se protege a vida humana e o bem-estar	Utilizar a abordagem de ciclo de vida em todas as atividades de engenharia
Garantir que todas as entradas e saídas de material e energia são tão inerentemente seguras e benignas quanto possível	Reduzir a depleção de recursos naturais	Esforçar-se para evitar o desperdício
Desenvolver e aplicar soluções de engenharia estando ciente da geografia, aspirações e cultura locais	Criar soluções de engenharia além das tecnologias atuais ou dominantes; melhorar, inovar e inventar (tecnologias) para alcançar a sustentabilidade	Envolver ativamente comunidades e partes interessadas no desenvolvimento de soluções de engenharia

Figura 2. Os 9 princípios da Engenharia Verde. Elaboração própria a partir dos dados de [17].

A metodologia de aplicação da Química Verde se fundamenta na utilização dos 12 princípios apresentados na Figura 3. Esses princípios têm como objetivo buscar processos industriais cada vez mais limpos, seguros e sustentáveis tanto para o meio ambiente quanto para a humanidade [18].

Estes princípios vão desde a prevenção e economia de átomos (unidades básicas da matéria) ao controle em tempo real da prevenção da poluição, à química inerentemente mais segura e à prevenção de derramamentos. O princípio da prevenção propõe que os processos sejam bem planejados antes mesmo de serem colocados em prática, tendo como intuito principal evitar a formação de resíduos e, conseqüentemente, reduzir os gastos com o seu tratamento.

A economia de átomos prevê a incorporação e reciclagem dos átomos, a fim de reduzir o desperdício. A síntese segura trata do desenvolvimento de rotas químicas mais seguras possíveis, evitando a formação de compostos com elevada toxicidade. Conseqüentemente, os princípios de desenvolvimento de compostos seguros e de diminuição de

solventes auxiliares enfatizam o que foi mencionado anteriormente.

Ainda, têm-se os demais princípios que auxiliam a obtenção de uma química direcionada ao desenvolvimento sustentável, minimizando e assegurando a fabricação e incorporação de produtos mais conscientes na indústria e no cotidiano.

Prevenção	Economia de átomos	Sínteses com compostos de menor toxicidade
Desenvolvimento de compostos seguros	Diminuição de solventes e auxiliares	Eficiência energética
Uso de substâncias recicladas	Redução de derivativos	Catálise
Desenvolvimento de compostos para a degradação	Análise em tempo real para a prevenção da poluição	Química segura para a prevenção de acidentes

Figura 3. Os 12 princípios da Química Verde. Elaboração própria a partir dos dados de [18].

Nos subtópicos seguintes, será abordado, detalhadamente, cada princípio da Química Verde.

A. PREVENÇÃO

O primeiro princípio da Química Verde menciona que investimentos em tecnologias limpas, com menos solventes e menor número de etapas de produção, podem diminuir a necessidade de investimentos pesados no tratamento da matéria agregada [19].

Anastas *et al.* (2016) [20] identificou que “prevenir a formação de resíduos é melhor e menos dispendioso que a sua remediação ou seu tratamento a posteriori.”

B. ECONOMIA DE ÁTOMOS

O segundo princípio da Química Verde relata que a economia de átomos trata da máxima incorporação de átomos dos materiais reagentes nos produtos das reações [19] [21].

A reação tida como ideal consiste naquela em que toda a massa de reagente está contida no produto final, isto é, rendimento de 100%, sem geração de resíduos. Nenhum produto químico apresenta um rendimento final considerado ideal. No entanto, as rotas verdes via economia de átomos possibilitam um aumento percentual significativo no rendimento de uma reação química.

C. REAÇÕES COM COMPOSTOS DE MENOR TOXICIDADE

Este princípio também é chamado de síntese segura. Trata-se da necessidade de desenvolver metodologias sintéticas, que substituam os compostos que possuem elevada toxicidade por

compostos de menor toxicidade. Tal substituição faz com que sejam gerados poucos ou zero resíduos que sejam prejudiciais à saúde humana e animal em razão da toxicidade. A inserção desses materiais menos nocivos em sínteses orgânicas pode ser classificado como o coração da Química Verde [22].

D. DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS SEGUROS

O quarto princípio é considerado uma extensão do terceiro. Este princípio determina o desenvolvimento de produtos que, após realizarem a função desejada, não acarretem danos ao ambiente [23] [24].

E. REDUZIR O USO DE SUBSTÂNCIAS AUXILIARES

O quinto princípio aponta que, em processos químicos, deve-se empregar a menor quantidade possível de substâncias auxiliares, especialmente solventes. Quando for indispensável usá-los, que sejam menos tóxicos possíveis. Assim, busca-se que algum dos próprios reagentes do processo seja um solvente. Quanto à utilização de solventes inócuos, a Química Verde tem levado adiante várias investigações sobre este tema, incluindo a relevância da utilização de solventes no estado supercrítico e a utilização de líquidos iônicos [23].

F. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Este princípio retrata que uma reação ideal, em termos de eficiência energética, impreterivelmente, deve acontecer a uma temperatura e pressão ambiente para que seja eficiente, buscando reduzir a energia gasta no decorrer do processo químico, apresentando, dessa forma, um impacto econômico e ambiental relativamente coerente. O sexto princípio também visa reduzir o uso de energias que não sejam fontes renováveis, como o petróleo e o carvão, na indústria substituindo-as por fontes alternativas, tais como a biomassa, a energia solar e a hidráulica [25].

G. UTILIZAR MATÉRIAS-PRIMAS RENOVÁVEIS

O sétimo princípio refere-se à utilização de matérias-primas renováveis na indústria. Substâncias de origem vegetal e outras fontes biológicas renováveis ou recicláveis devem ser aproveitadas, sempre que possível. Um exemplo de extrema relevância, no cenário nacional, é a utilização de etanol - proveniente da cana-de-açúcar (Figura 4) ou, até mesmo, do biodiesel oriundo da matéria-prima vegetal, podendo ser considerados casos de ganho ambiental, uma vez que são combustíveis derivados de fontes renováveis e que podem vir a substituir os combustíveis fósseis [26].



Figura 4. Cana-de-açúcar: uma das principais matérias-primas renováveis [27].

H. EVITAR A FORMAÇÃO DE DERIVADOS

A questão tratada no oitavo princípio é a de restringir o uso de qualquer tipo de grupo bloqueador, protetor ou modificador em uma reação química, com o objetivo de minimizar a formação de derivados que aumentem o número de etapas no procedimento, tornando-o mais dispendioso e árduo de ser processado, além da viabilidade em gerar resíduos ao fim do processo [28].

I. POTENCIALIZAR A CATÁLISE

Por muitas vezes, para tornar viável uma reação muito lenta, aplica-se como recurso o aumento da concentração de um dos reagentes - que resulta em um gasto maior de matérias-primas - além de um excessivo desperdício proveniente da quantidade de reagente que não foi consumido. Por conseguinte, o nono princípio surgiu com a função de solucionar este problema. Com isso, a aplicação de tal princípio resulta no uso de catalisadores na reação química, assim, aumentando a sua velocidade. Os catalisadores são bem específicos e podem ser reaproveitados, já que não são consumidos nas reações [23].

Em suma, os catalisadores consistem em substâncias que não participam da reação química, e tampouco são materiais inertes. Suas funções ácidas, básicas e/ou metálicas são as que promovem o fenômeno da catálise. Essas substâncias são empregadas para reduzir a energia de ativação e aumentar a velocidade da reação.

J. DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS BIODEGRADÁVEIS

O décimo princípio aborda o desenvolvimento de agentes químicos que devem ser fabricados com o intuito de serem altamente capacitados a se degradarem em produtos inócuos, à medida que forem descartados após a realização de suas funções [24].

K. ANÁLISE EM TEMPO REAL PARA A PREVENÇÃO DA POLUIÇÃO

Este princípio define que as análises de produção de um determinado produto devem ser realizadas em tempo real; para que, assim, quaisquer desvios da ordem natural possam ser corrigidos o mais rápido possível, evitando qualquer dano ou resíduo ao fim do processo. Logo, fundamenta-se na ideia prática de que apesar de todos os esforços relatados nos itens anteriores, o processo não é ideal e há chances de formação de produtos e derivados tóxicos. Dessa forma, origina-se uma das ideias e fontes principais da Química Verde, a Prevenção [24].

L. QUÍMICA SEGURA PARA A PREVENÇÃO DE ACIDENTES

A escolha das substâncias, assim como seu emprego em um processo químico, devem buscar a redução do risco de acidentes, tais como vazamentos, incêndios e explosões que, dependendo da magnitude, pode ocasionar, até mesmo, perdas humanas [24].

IV. BIOMASSA

Biomassa é definida como qualquer matéria orgânica que possa ser convertida em energia mecânica, térmica ou elétrica.

Conforme a sua origem, esta pode ser de diversos tipos [29], como apresentado no Quadro 1.

TIPOS	EXEMPLOS
Florestal	Madeira, principalmente.
Agrícola	Soja, arroz, cana-de-açúcar etc.
Rejeitos urbanos e industriais	Líquidos ou sólidos, como o lixo.

Quadro 1. Classificação da biomassa conforme a sua origem. Elaboração própria a partir dos dados de [29].

A matéria-prima empregada, cuja potencialidade energética muda de acordo com o tipo, e a tecnologia de processamento para a aquisição dos energéticos definem quais serão os derivados obtidos [30].

A biomassa mais usada, em áreas pouco desenvolvidas, é oriunda de florestas. Além do mais, os processos associados à obtenção de energia, a partir desta fonte, se caracterizam pela baixa eficiência, ou seja, há a necessidade de um considerável volume de matéria-prima para produzir pequenas quantidades de energia. Uma exceção a essa regra consiste no emprego da biomassa de origem florestal em processos de cogeração industrial. Do processamento da madeira no processo de extração da celulose é viável, por exemplo, a extração da lixívia negra, também conhecido como licor negro, empregada como combustível em usinas de cogeração da própria indústria de celulose [29].

A cogeração refere-se à produção combinada e paralela de calor e energia elétrica, a partir de uma única fonte energética primária.

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos, tanto no mercado internacional quanto no interno. Esta fonte de energia é tida como uma das fundamentais alternativas para a alteração da matriz energética e a decorrente minimização da dependência dos combustíveis fósseis. A partir dela, é possível obter energia elétrica e biocombustíveis, como biodiesel e etanol, cujo consumo está crescendo devido à substituição de derivados de petróleo, como o óleo diesel e a gasolina [31].

Conforme o Gráfico 1, a biomassa possui uma considerável participação na matriz elétrica brasileira. Em torno de 9% da energia elétrica produzida no Brasil tem como fonte a biomassa (especialmente bagaço de cana, lixívia e lenha).

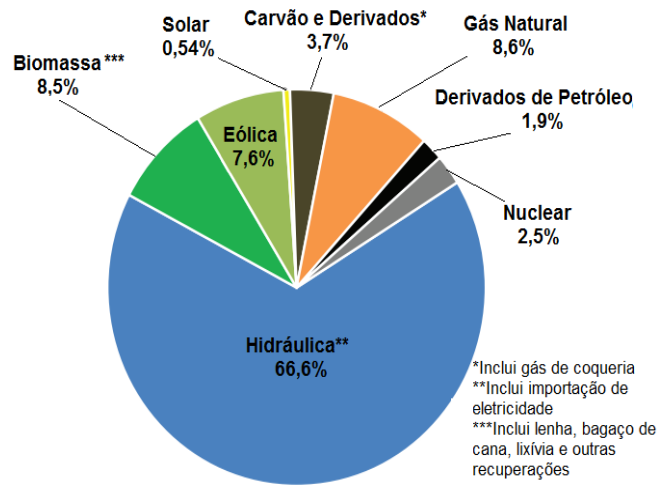


Gráfico 1. Distribuição da matriz elétrica brasileira. Adaptado de [32].

a) Consumo de Biomassa a Nível Mundial

De acordo com Eren, Taspinar e Gokmenoglu (2019) [33], o processo de industrialização, junto com o crescimento da economia e da população, acarretou o aumento da demanda mundial de energia. Entre os anos de 1971 e 2014, o consumo mundial de energia aumentou em torno de 44%.

Cerca de 80% da energia utilizada são oriunda de combustíveis fósseis. Tal dependência vem sendo diminuída, devido às questões de degradação ambiental, segurança energética e oferta limitada [34].

Dentre as energias renováveis, a biomassa apresenta a maior parcela de participação. Atualmente, a energia da biomassa contribui com aproximadamente 10% do suprimento mundial de energia, dois terços dessa bioenergia sendo gerados nos países em desenvolvimento e o restante no mundo industrializado [34] [35].

A bioenergia consiste em uma alternativa de energia bastante atrativa para todas as etapas de desenvolvimento, em razão da sua flexibilidade e capacidade de integração com todas as etapas das estratégias de desenvolvimento, além da aceitação geral de que a bioenergia pode proporcionar energia com menor quantidade de emissões de gases de efeito estufa (GEE) do que aquela gerada pelos meios de energia de combustíveis fósseis [34] [35].

No ano de 2016, países como Suécia, Finlândia e Alemanha possuíam de 20% a 30% de participação da bioenergia na matriz energética. Na Índia, o índice está em 10%. A China, por sua vez, assegura aumentar de 11% para 20% a proporção de energias renováveis até 2030. Os Estados Unidos estão construindo 115 plantas de geração de energia com biomassa [36]. E o Brasil possui quase 9% de sua oferta total de eletricidade representada pela biomassa [37].

Conforme a *International Energy Agency (IEA)* (2017) [38], a África subsaariana, o Sudeste Asiático, a Índia, a China e os outros países em desenvolvimento têm uma parcela da população sem acessibilidade à eletricidade e à energia limpa para cocção. Para Silva *et al.* (2018) [39], tal parcela da população se mantém dependente da biomassa tradicional, correlacionando a utilização de biomassa tradicional com o nível de desenvolvimento dos países. Assim sendo, quanto

maior for a diferença econômica, maior será a utilização da biomassa tradicional.

Na Figura 5, tem-se a distribuição da matriz elétrica mundial em 2018.

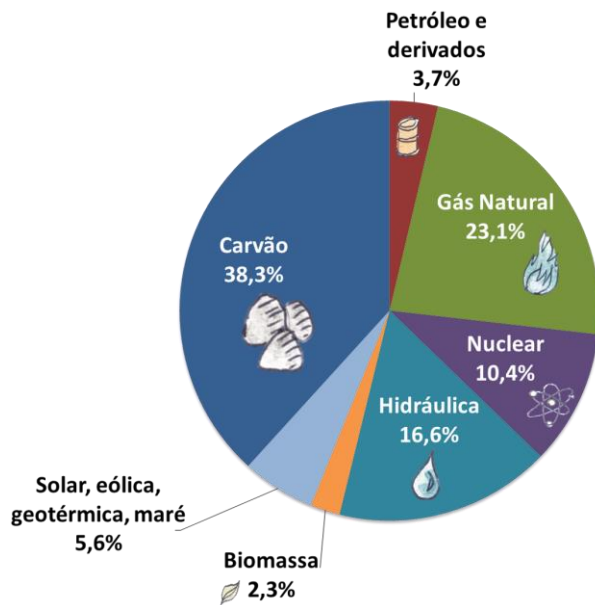


Figura 5. Matriz elétrica mundial em 2018. Adaptado de [40].

b) Bioenergia no Brasil

O Brasil possui uma posição tida como privilegiada quando se trata da geração de energia elétrica por meio da biomassa em larga escala, visto que abrange uma extensa área favorável à agricultura e tem uma experiência de grande produtor e exportador de produtos agrícolas [41].

No cenário nacional, São Paulo se destaca por possuir uma capacidade instalada de 6 GW (40,7%) dos 15 GW de potência de geração de energia a partir de diversas fontes de biomassa no país, concentrando 224 (39,5%) das 567 unidades no país [42].

A fabricação de madeira, em forma de lenha, carvão vegetal ou toras, gera uma significativa quantidade, que podem ser, da mesma maneira, aproveitadas na geração de energia elétrica. Paraná e São Paulo são os estados brasileiros que possuem o maior potencial de aproveitamento de resíduos da madeira, proveniente de silvicultura, a fim de gerar energia elétrica. A distribuição espacial dos resíduos gerados é influenciada pelo tipo de produção de madeira, que pode ser uma atividade extrativista ou de reflorestamento. Na extração seletiva e com beneficiamento descentralizado, o aproveitamento de resíduos torna-se inviável no ponto de vista econômico [43].

Outro exemplo de biomassa é a cana-de-açúcar. O estado de São Paulo é responsável por possuir uma forte produção de biomassa energética através dessa matéria-prima. Tal produção é comparada à de energia hidráulica. Sendo importador de eletricidade (40% do que consome) e exportador de álcool para o restante do Brasil. Foi verificado, assim, que – embora a produção de biomassa seja globalmente tida como uma atividade que demanda muitas terras, mesmo numa região com elevada densidade demográfica – tem-se a possibilidade encontrar áreas para a realização desta atividade.

Grande parte da energia dessa biomassa é empregada na produção do etanol, que é combustível líquido [43].

No país, o bagaço da cana-de-açúcar é considerado a fonte de maior potencial para geração de energia elétrica. A elevada produção atingida pela lavoura canavieira, acrescida de ganhos contínuos nos processos de transformação da biomassa sucroalcooleira, tem viabilizado considerável quantidade de matéria orgânica sob a forma de bagaço nas usinas e destilarias de cana-de-açúcar, associadas aos sistemas elétricos de base, que atendem a grandes centros de consumo dos estados das regiões Sul e Sudeste [44].

Ainda, se equiparam os períodos de colheita da cana-de-açúcar e estiagem das principais bacias hidrográficas do parque hidrelétrico brasileiro, fazendo com que tal alternativa seja ainda mais favorável [45], pois a cana se torna então um elemento complementar ao fornecimento hidrelétrico.

O setor sucroalcooleiro produz uma considerável parcela de resíduos, que pode ser aproveitada na produção de eletricidade, especialmente em sistemas de cogeração. Diferentemente da fabricação de madeira, o cultivo e o beneficiamento da cana são realizados em significativas e ininterruptas extensões, sendo os resíduos como o bagaço e palha aproveitados pela concentração dos processos de produção [43].

c) Biomassa para Geração de Energia

A busca por fontes renováveis, como a biomassa, tem sido impulsionada por questões relacionadas à sustentabilidade, tendo em vista que os combustíveis fósseis, que são amplamente empregados atualmente, vão de encontro à atual necessidade de minimização da geração de riscos ao meio ambiente [46] [47].

Há inúmeras tecnologias para converter as fontes de biomassa, a fim de se obter um produto final com valor energético. Esta conversão pode ser realizada através da combustão direta - que é a conversão da energia química dos combustíveis em calor, por intermédio das reações dos elementos constituintes com o oxigênio disponibilizado - (com ou sem processos físicos de secagem, classificação, compressão, corte/quebra, entre outros), de processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) ou de processos biológicos (digestão anaeróbia e fermentação).

A gaseificação consiste na conversão termoquímica da biomassa em uma atmosfera de vapor ou ar, com o intuito de gerar um gás de médio ou baixo poder calorífico. A pirólise consiste na decomposição química obtida por meio de aquecimento.

Já a liquefação é o processo de fabricação de combustíveis líquidos através da reação da biomassa triturada, em um meio líquido, juntamente com monóxido de carbono em presença de um catalisador alcalino. E, por fim, a transesterificação consiste no processo que ocorre por meio da mistura de óleo vegetal ou gordura animal com um álcool simples na presença de catalisadores.

Na perspectiva técnica-econômica, as fundamentais questões relacionadas à maior utilização da biomassa na geração de energia elétrica são: a baixa eficiência termodinâmica das plantas e os custos parcialmente elevados

de produção e transporte. Sumariamente, incluindo aspectos socioambientais, é verificada a indispensabilidade de maior gerenciamento da utilização e ocupação do solo, em razão da falta de regularidade no suprimento (sazonalidades da produção), criação de monoculturas, perda de biodiversidade e acentuada utilização de defensivos agrícolas [43].

Essas questões tendem a ser contornadas, a médio e longo prazo, pelo desenvolvimento, aplicação e melhoria de novas e eficientes tecnologias de conversão energética da biomassa e através dos estímulos instituídos pelas políticas do setor elétrico [47].

Entretanto, apesar da importância da biomassa para a produção de energia elétrica, existem outras contribuições que ela pode fornecer para que tenhamos uma economia mais verde. Uma delas é a substituição de plásticos gerados a base de petróleo, como discutiremos a seguir.

V. POLIETILENO

O polietileno (PE) é o plástico mais utilizado mundialmente e faz parte da família de resina de poliolefina (polímero obtido a partir da polimerização de olefinas - chamadas também de alcenos ou alquenos - que são hidrocarbonetos que contêm cadeia aberta e ligações duplas C=C). É representado pela fórmula química $(C_2H_4)_n$ e, portanto, consiste em um polímero de eteno (ou etileno), em que o valor n pode variar, podendo o mesmo ser baixo ou consideravelmente elevado (mais de um milhão), possibilitando a produção de materiais sólidos à temperatura ambiente, com diversas propriedades físicas [48] [49].

Para Elmrabet, Elharfi e Elbyoubi (2020) [49], este polímero é um material leve, viscoelástico e termoplástico, devido ao fato de que, caso seja aquecido continuamente, torna-se maleável e com potencial de deformação plástica antes de derreter. Ao esfriar, torna-se rígido outra vez. A temperatura na qual isso ocorre depende do valor de n, isto é, o comprimento médio da sua cadeia.

O PE é um polímero no qual o monômero formador da macromolécula é o etileno, a macromolécula é obtida por meio da reação em cadeia (poliadição) [50].

A produção do PE é dada pela polimerização por intermédio da adição do etileno. Normalmente, obtém-se o etileno através do craqueamento da nafta oriunda do refino do petróleo. Logo após a etapa de craqueamento, ele é submetido à etapa de purificação. Nesta etapa, acontece a conversão do etileno (ou eteno) em polietileno. Na etapa final, os produtos são modificados, de maneira física e/ou química, por meio do processo de polimerização, originando o produto final, conforme a Figura 6.

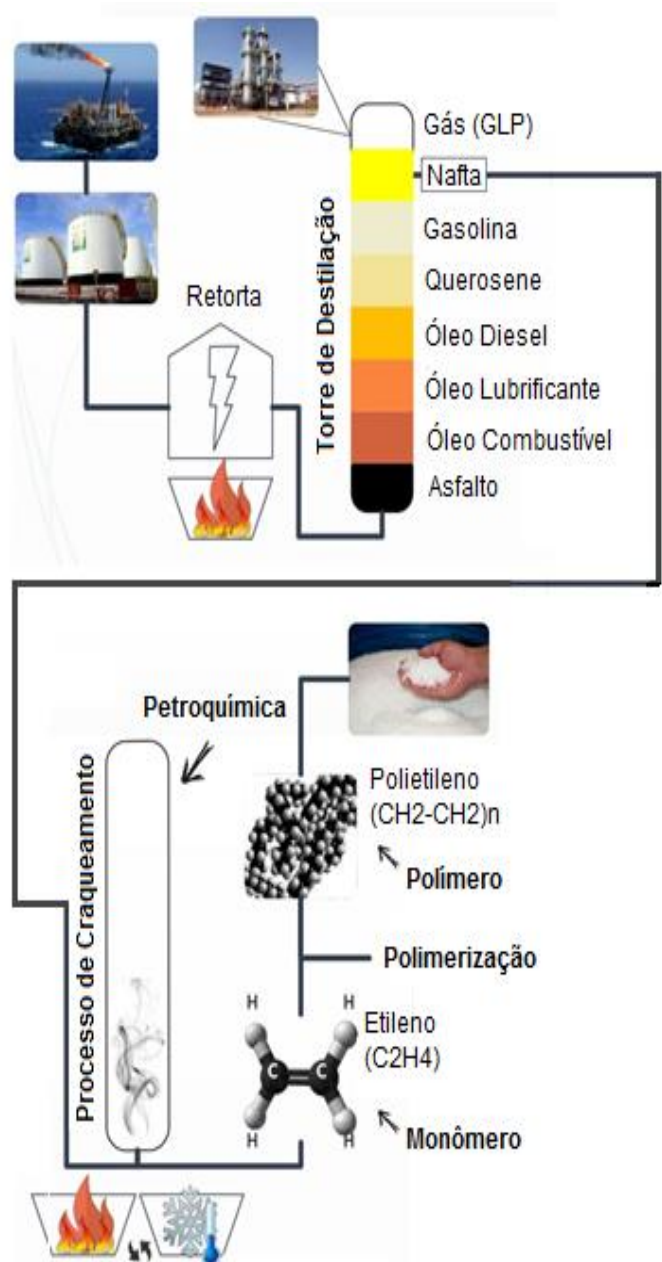


Figura 6. Figura esquemática do refino do petróleo e produção de PE. Adaptado de [51].

Ainda, dependendo do modo de polimerização, três tipos básicos de PE são constantemente empregados: Polietileno de Alta Densidade (PEAD), Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) e Polietileno Linear de Baixa Densidade (PELBD) [48].

O PE possui inúmeras utilidades, especialmente na produção de recipientes ou embalagens para produtos variados. Contudo, após uma curta vida, tais produtos podem ser substituídos e, por conseguinte, são descartados para o meio ambiente. Em razão da sua resistência à degradação, permanecem no meio ambiente por longos períodos, acarretando graves problemas ambientais de contaminação, além de malefícios aos animais e outras espécies de organismos vivos [49] [52] [53].

Em relação ao tratamento de resíduos, a resolução nº 275 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece um código de cores para variados tipos de resíduos a ser adotado na identificação de coletores e transportadores, assim como nas campanhas informativas da coleta seletiva. Os critérios para a escolha das cores são desconhecidos. Nesta resolução, a cor vermelha representa os plásticos, incluindo o PE [54].

• Polietileno Verde

A demanda por PE verde - que também é conhecido como plástico verde, polímero verde, biopolietileno, biopolímero, resina de polímero, resina verde ou bio-PE - está crescendo, progressivamente, em virtude das suas vantagens em relação aos PE convencionais [55] [56].

A resina verde consiste no primeiro plástico certificado fabricado por meio de uma fonte renovável, tornando a indústria petroquímica pioneira nessa área [56].

O bio-PE possui desempenho e características similares às resinas provenientes de matérias-primas não renováveis [57].

No que tange à cadeia produtiva do plástico verde, há cinco etapas principais, conforme a Figura 7. Vale ressaltar que as etapas 4 e 5 são iguais à da indústria do plástico convencional.

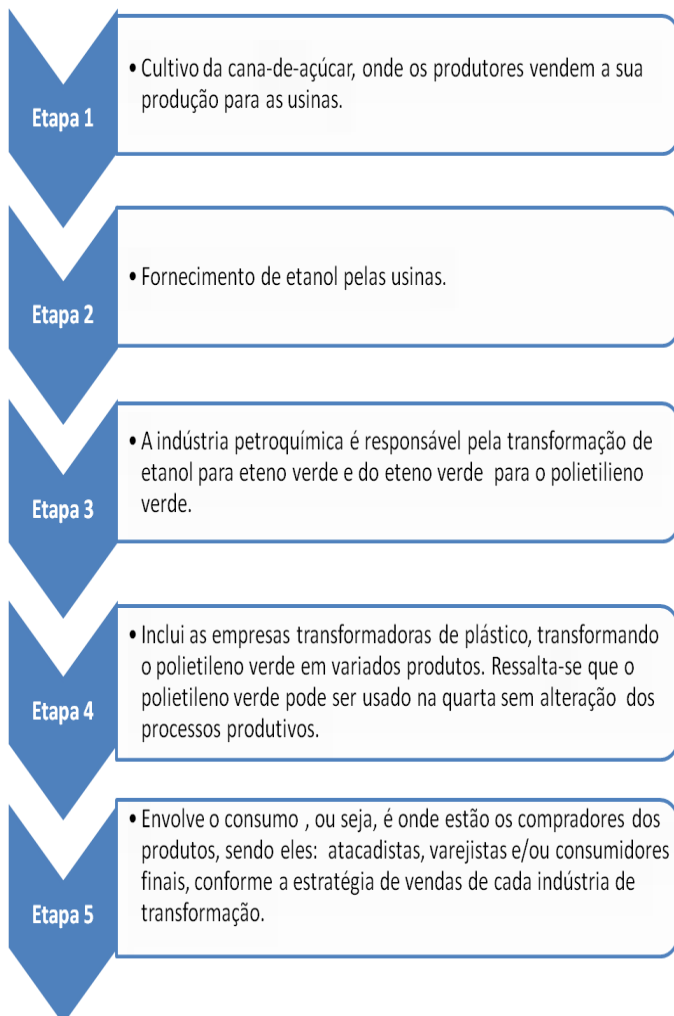


Figura 7. Etapas da cadeia produtiva do PE verde. Adaptado de [58].

• Rotas Sintéticas

O PE consiste em um polímero obtido por intermédio da reação de poliadição - que também é conhecida como polimerização de adição - independente da fonte de matéria-prima empregada, supracitada no tópico anterior.

Tal polimerização ocorre por meio do acoplamento de monômeros utilizando suas ligações múltiplas [59], conforme a Figura 8.

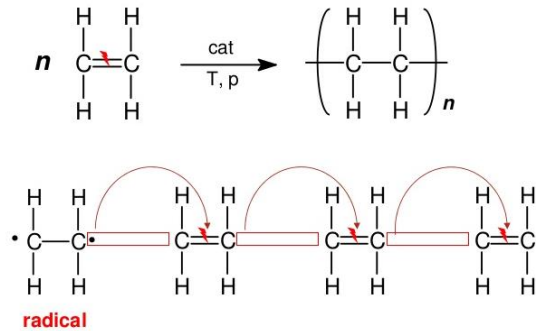


Figura 8. Processo de polimerização por adição [60], onde: cat - catalisador; T - temperatura; p - pressão.

No caso da formação de PE, a reação ocorre a partir de moléculas de etileno. Na presente reação, a ligação dupla em cada molécula de etileno se abre (parte superior da Figura 8), e dois dos elétrons originalmente nessa ligação são empregados para formar novas ligações simples carbono-carbono com outras duas moléculas de etileno (parte inferior da Figura 8) [59].

A inserção de tecnologias limpas em processos industriais é, certamente, um grande desafio para a indústria química em todo o mundo [61]. Para tal, foram desenvolvidas rotas sintéticas verdes, ou seja, rotas sintéticas alternativas para a prevenção de poluição.

A Braskem é um exemplo de suma importância nesta inovação, visto que atua na produção do primeiro PE oriundo do etanol de cana-de-açúcar [62]. Esse produto vem ganhando importância devido às suas vantagens tanto no meio ambiente quanto na vida dos organismos vivos quando comparado ao PE convencional.

A Figura 9 apresenta as rotas sintéticas empregadas para a obtenção do PE.

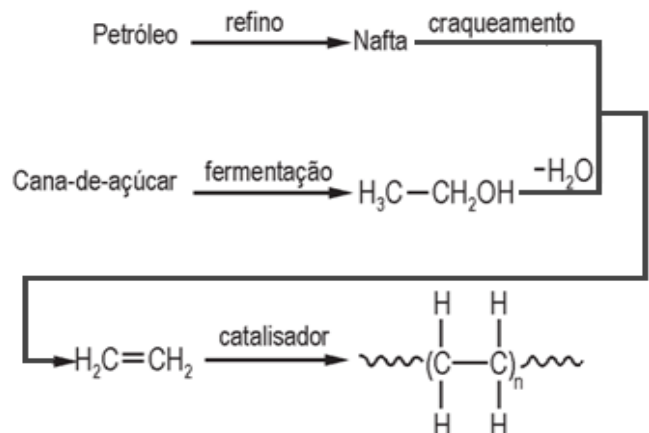


Figura 9. Rotas sintéticas do PE. Adaptado de [62].

Quando se trata da rota sintética do PE verde, tanto em escala de laboratório quanto em escala piloto, a fermentação pode ocorrer através de um processo contínuo ou em batelada. No balanço global, o benefício do plástico verde é que a quantidade de CO₂ produzida após a sua vida útil será menor do que a gerada pelo plástico originário de fonte não renovável [62], visto que este gás liberado é oriundo da atmosfera e será, mais uma vez, capturado, na próxima safra, pela cana-de-açúcar.

VI. ASPECTOS TÉCNICOS E AMBIENTAIS DO POLIETILENO VERDE E CONVENCIONAL

Nesta seção, será apresentado um estudo comparativo do biopolietileno e polietileno convencional, dando ênfase aos seguintes parâmetros: processos de produção, avaliação do ciclo de vida (ACV) e biodegradabilidade.

• Comparação dos Polietilenos

A maioria dos polietilenos é proveniente do refino do petróleo, mais especificamente da fração desta matéria-prima denominada nafta. O PE convencional é o plástico mais comum utilizado mundialmente. Este plástico é empregado na produção, especialmente, de recipientes ou embalagens para produtos variados. Dessa forma, possui uma ampla participação no cotidiano das pessoas.

No entanto, o PE convencional apresenta algumas características que contribuem para o encadeamento de impactos associados a efeitos negativos, principalmente, no meio ambiente, como mencionado na seção V deste trabalho. Diante disso, o PE verde está sendo cada vez mais estudado e valorizado por todos os setores industriais.

Ressalta-se que o plástico convencional e o verde são semelhantes em sua estrutura e composição, a diferença de ambos está somente associada ao processo industrial. A molécula de partida (eteno) é igual para ambos.

No Quadro 2, tem-se uma análise comparativa dos dois tipos de polietilenos avaliados, convencional e verde, sendo pontuados alguns dos parâmetros primordiais levados em consideração ao desempenho diante do contexto atual.

		PE Convencional	PE Verde
Parâmetros	Biodegradabilidade	Nula	Nula
	Sustentabilidade	Nula	Alta
	Proveniente de fonte renovável	Não	Sim

Quadro 2. Análise comparativa quanto aos parâmetros. Elaboração própria a partir dos dados de [63] [9] [64] [65].

O PE verde apresenta alguns excelentes parâmetros para sua utilização como plásticos, como ser um insumo sustentável e oriundo de matéria-prima renovável, conforme o Quadro 2.

No que tange à biodegradabilidade, ambos os polímeros não apresentam este parâmetro, ou seja, o PE verde também não é biodegradável, perdurando no meio ambiente por longos anos.

A diferenciação destes dois tipos de PE se dá em relação à questão de sustentabilidade, pois o PE verde auxilia na redução das emissões de GEE no decorrer da cadeia produtiva. O cultivo da cana-de-açúcar - que é um insumo sustentável - responsável pela produção de PE verde, também auxilia na captura e no sequestro de carbono (CO₂), que auxiliam na mitigação das mudanças climatológicas. Como resultado, a pegada de carbono do biopolímero é negativa quando se considera uma análise do ciclo de vida desde o princípio ao fim, contribuindo no potencial para uma economia de baixo carbono.

Através do quadro acima e realizando a compilação de dados de outras fontes, foi possível criar a Figura 10, que apresenta as principais vantagens e desvantagens que o PE verde.

Como vantagens, tem-se que não há a necessidade de investir em novos equipamentos, podendo permanecer as condições operacionais e taxas de produtividade similares às do PE fóssil, uma vez que ambos apresentam desempenho similar. Além disso, o *design* dos produtos não precisa ser alterado, diminuindo, dessa forma, o período de lançamento de materiais mais sustentáveis no mercado. A reutilização da água em uma das etapas do processo de produção do plástico verde (desidratação) representa um significativo impacto positivo em relação à geração de bioeletricidade, onde a mesma é produzida e utilizada pela própria usina.

Em relação às desvantagens, o custo da mesma quantidade de produto do final do plástico verde é em torno de 40% maior que o plástico convencional [66]. Ademais, a resina verde produzida não é biodegradável e apresenta exatamente as mesmas características químicas, mecânicas e de processabilidade de um polietileno petroquímico.

E, com isso, o PE verde apresenta similar versatilidade de aplicações atreladas ao PE de origem fóssil, que é tida como um ponto positivo.

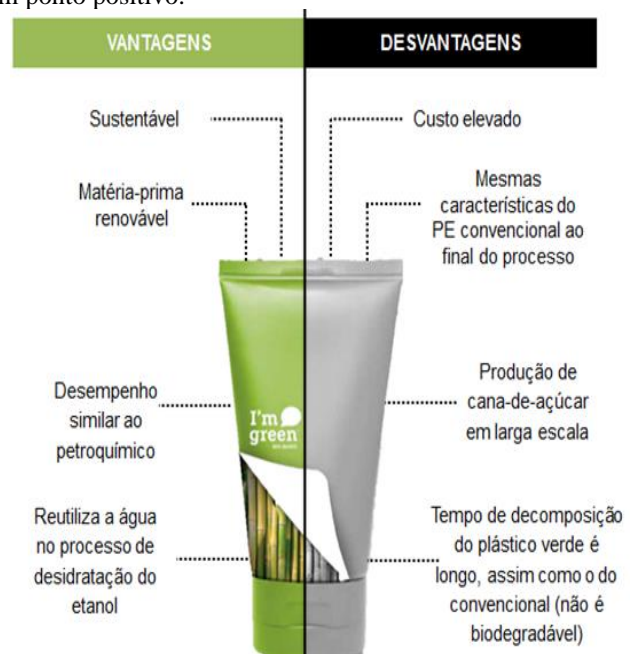


Figura 10. Vantagens e desvantagens do PE verde. Elaboração própria a partir dos dados de [67] [2].

Sabendo-se da importância de alternativas que ofereçam à empresa e ao consumidor vantagens sustentáveis, foram selecionados três parâmetros importantes associados aos motivos expostos anteriormente para serem analisados nos tópicos a seguir. São eles: processos de obtenção dos polietilenos, avaliação do ciclo de vida (ACV) e biodegradabilidade.

A. PROCESSOS DE OBTENÇÃO DOS POLIETILENOS

Como foi abordada na seção V, a principal diferença entre os tipos de polietileno está associada à fonte de obtenção da matéria-prima.

A.1 VIA NAFTA

O processo de obtenção do PE fóssil se inicia no refino do petróleo, como apresentado na Figura 11. Na fase do refino, que consiste na separação deste insumo, são observados diversos problemas referentes à preservação do meio ambiente, visto que há o descarte de efluentes líquidos, a emissão de gases e vapores tóxicos para a atmosfera, além dos resíduos sólidos, comumente armazenados em aterros industriais. Ainda, há os impactos atrelados ao derramamento de óleo na água, que são os mais visíveis para a população em geral.

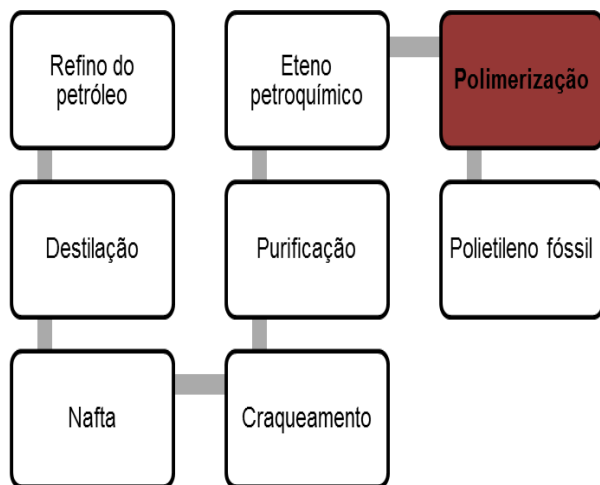


Figura 11. Fluxograma simplificado da obtenção do polietileno petroquímico.

Nas refinarias de petróleo, ocorre a destilação fracionada, onde são obtidos inúmeros derivados, produtos de grande interesse comercial, como a nafta para a indústria de plástico,

Após esta etapa, a nafta segue para o processo de craqueamento, que consiste na divisão das moléculas complexas deste produto a fim de transformá-las em moléculas mais simples, por meio da quebra de algumas ligações químicas. As moléculas mais simples são chamadas de monômeros e o plástico a ser originado é definido através da obtenção de variados tipos destas moléculas. Entre os monômeros mais utilizados estão: o eteno e o propeno.

As plantas destinadas ao craqueamento de nafta para a fabricação de petroquímicos de base, como o eteno, consistem nas maiores consumidoras de energia da indústria química global, utilizando em torno de 8% do consumo de energia

primária total do setor, excluindo a energia presente nos produtos acabados no final da cadeia [68].

Neste caso, será analisado o eteno, pois ele é precursor de diversos intermediários, principalmente do polietileno. A etapa de purificação deste elemento petroquímico é necessária para a recuperação do eteno de alta pureza.

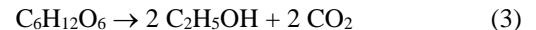
Por fim, tem-se o processo de polimerização, que é similar tanto na fabricação do PE fóssil quanto do bio-PE. Esse processo ocorre através de reações químicas, onde uma série de moléculas monoméricas são agrupadas e ordenadas, originando os polímeros. Estes polímeros formam longas cadeias, e suas propriedades variam em relação ao tamanho, à composição, à estrutura química e às interações moleculares existentes. É por isso que os plásticos são tão diferentes entre si.

A.2 VIA ETANOL

O processo de obtenção do bio-PE se inicia na plantação da cana-de-açúcar. A lavoura captura o dióxido de carbono (CO₂) presente na atmosfera, fixando-o através do processo natural da fotossíntese, a fim de produzir o açúcar, produto que será empregado futuramente neste ciclo. Esta matéria-prima é colhida e vendida pelos produtores, seguindo para as usinas sucroalcooleiras. Nas usinas, é realizado o tratamento da biomassa para que o açúcar seja extraído.

Logo após, ocorre a fermentação e a glicose (C₆H₁₂O₆) reage produzindo o etanol (C₂H₅OH), conforme a equação (3).

A fermentação é o processo bioquímico que ocorre por meio de micro-organismos vivos que, neste caso, são as leveduras.



Com este processo, tem-se a formação de uma solução que possui, aproximadamente, 12% de etanol, e, diante disso, a fermentação é interrompida em razão do efeito tóxico do etanol sobre as leveduras. Posteriormente, o etanol obtido na fermentação é encaminhado para a destilação, na qual se obtém o etanol a 96%.

Em seguida, tem-se a produção do eteno verde (C₂H₄), utilizando o etanol destilado. A conversão de etanol para eteno é obtida através da tecnologia de desidratação catalítica, que ocorre na fase vapor por meio de reatores de leito fixo ou leito fluidizado, empregando, principalmente, catalisadores de alumina (Al₂O₃).

A alumina é o nome dado para o óxido de alumínio, que é um composto químico obtido por meio da reação do alumínio com o oxigênio.

O leito fixo consiste na situação na qual o sólido se encontra em repouso. O fluido percola entre os espaços vazios entre as partículas. Por outro lado, o leito fluidizado é quando a velocidade do fluido é suficiente para promover movimento aleatório nas partículas no leito.

Para os reatores de leito fixo, a operação pode ser isotérmica (quando a temperatura do sistema se mantém constante durante todo o processo) ou adiabática (um sistema que está isolado de quaisquer trocas de calor). E, para os reatores de leito fluidizado, esta operação é realizada, normalmente, em condições adiabáticas.

A reação é endotérmica, reversível e absorve cerca de 380 kcal/kg de eteno formado, conforme a equação (4). O

equilíbrio da reação viabiliza a formação de produtos a altas temperaturas (reação endotérmica) e a baixas pressões (mais moles de produtos do que de reagentes).

A reação endotérmica é o processo em que há absorção de energia. A variação da entalpia é sempre positiva ($\Delta H > 0$).



A Braskem, empresa pioneira na produção de plástico verde, atua no mercado fabricando este produto com o etanol dihidratado (combinado com duas moléculas de água), por meio de reatores adiabáticos de leito fixo (geralmente são utilizados três leitos fixos), mediante as condições operacionais apresentadas na Figura 12, que descreve os principais parâmetros influenciadores do processo.

Nas condições operacionais, são consideradas cinco variáveis importantes: catalisador, pressão, temperatura, tempo de residência e diluição do etanol no vapor.



*Consiste no tempo em que cada elemento de fluido ou molécula passa pelo reator, sendo dependente da velocidade das moléculas no interior do reator, logo, do fluxo do reator.

Figura 12. Influenciadores do processo de desidratação do etanol e as condições operacionais. Elaboração própria a partir dos dados de [69] [70].

Devido ao fato de o processo ser endotérmico, o emprego de vapor d'água como fluido inerte (quimicamente inativo) de aquecimento na proporção 2:1 a 3:1 (vapor:etanol), apresentada na Figura 12, para o transporte do etanol aumenta a troca de massa térmica da corrente, fazendo com que a redução da temperatura do reator tenha um melhor controle. A questão do controle é tida como importante, visto que a determinadas temperaturas tem-se a geração de produto almejado ou de produtos indesejáveis (que reduzem consideravelmente o rendimento da reação desejada), como mostra a seguir.

- Temperaturas abaixo de 300°C - Formação do éter etílico (produto indesejável);
- Temperaturas acima de 360°C - Formação do eteno (produto desejável).

Ademais, a utilização do vapor d'água junto à corrente de etanol proporciona uma diminuição da formação de coque

sobre o catalisador empregado, a alumina. Este fator influencia no aumento da vida útil e do rendimento do catalisador. Vale ressaltar que, assim como toda reação química, obtém-se uma parcela de co-produtos como: acetaldeído, ácido acético, hidrogênio, CO e CO₂.

Posteriormente à reação de desidratação, ocorre a purificação do eteno bruto em uma sequência de operações mostradas na Figura 13.

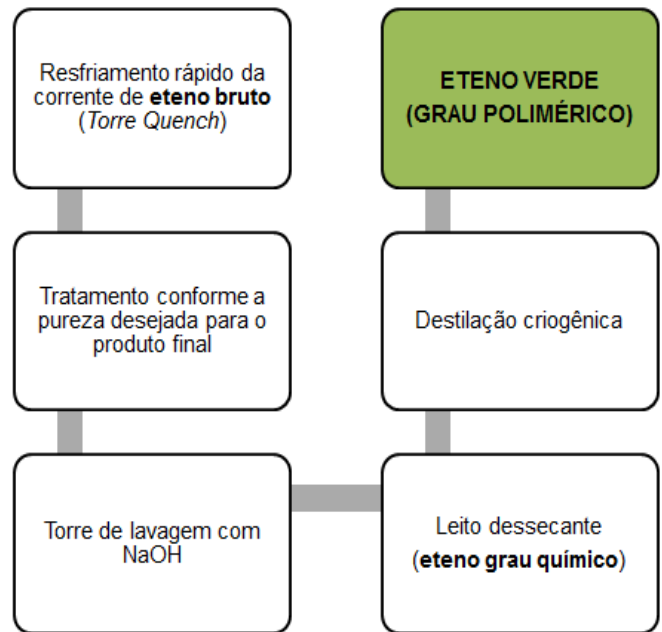


Figura 13. Purificação do eteno bruto. Elaboração própria a partir dos dados de [69].

A purificação do eteno bruto inicia-se na operação de resfriamento rápido da corrente de reação em uma torre de *quench*, a fim de retirar a maior parte da água formada e as substâncias condensáveis polares, tais como: etanol não reagido e pequenas quantidades de acetaldeído e ácido acético. Logo após, a corrente que sai do resfriamento (torre *quench*), contendo outros contaminantes em uma menor parcela, segue para o tratamento de forma a atingir a pureza desejada para o produto final.

Em seguida, a corrente é encaminhada para uma torre de lavagem com hidróxido de sódio (NaOH). Esta etapa tem por objetivo retirar o CO₂ (coproduto da operação e desidratação). No leito dessecante, é obtido o grau químico, tendo uma pureza de 99%. Já a última etapa da purificação consiste no fracionamento da corrente anterior por intermédio da destilação criogênica, que é a obtenção de gases a baixas temperaturas, para a obtenção do eteno verde (grau polimérico).

Conforme a Figura 14, observa-se que, logo após este procedimento, é efetuada a operação de polimerização que é equivalente à da via nafta, mencionada anteriormente.

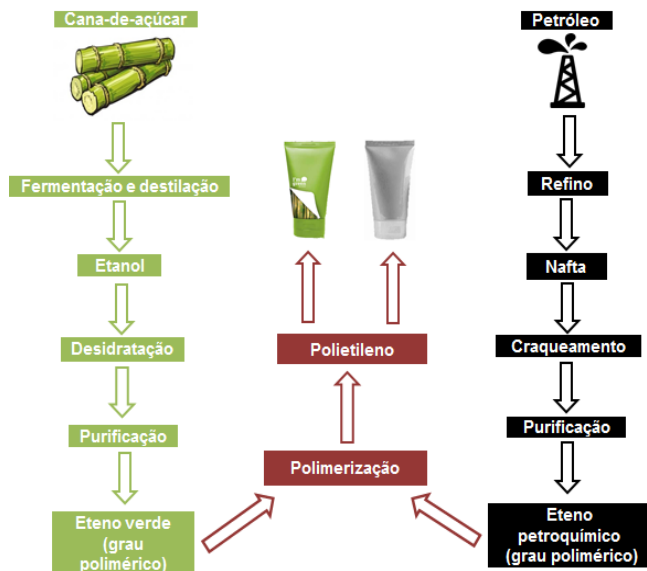


Figura 14. Comparativo entre os processos de produção dos PEs. Adaptado de [2].

B. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

De acordo com Walker e Rothman (2020) [71], a ACV consiste em um método desenvolvido para analisar os impactos de um produto ou processo no meio ambiente. Quando aplicada apropriadamente, essa técnica possibilita determinar os possíveis impactos tanto positivos quanto negativos de um produto, alguns dos quais são geralmente invisíveis.

Atualmente, as empresas buscam indicar os benefícios ambientais de seus produtos, em especial, do biopolietileno (*I'm green™*), no caso da Braskem. Dessa maneira, a ACV é tida como uma ferramenta de suma importância para demonstrar uma comparação entre o polietileno sustentável e o convencional.

Além disso, para esta avaliação, consideram-se diversas categorias de impacto. No presente trabalho, foram enfatizadas cinco categorias, conforme a Figura 15.

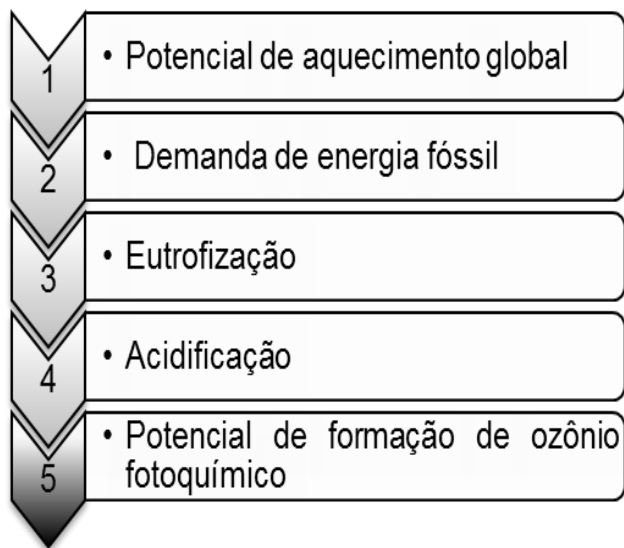


Figura 15. Categorias de impacto. Elaboração própria a partir dos dados de [63] [72].

A seguir, tem-se a apresentação de cada categoria mencionada acima e suas respectivas análises críticas, fazendo um comparativo entre 1kg do PE *I'm green™* e do Polietileno de Alta Densidade (PEAD) fóssil da empresa Braskem.

O cálculo das categorias de impacto foi realizado por meio de um *software* de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). As metodologias empregadas são apresentadas no “Resumo dos relatórios de avaliação de ciclo de vida, mudança do uso da terra e pegada hídrica” de Ziem *et al.* [73].

B.1 POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL

O potencial de aquecimento global, também conhecido como categoria de mudanças climáticas, consiste em apresentar as emissões de GEE dos dois produtos de PE.

Nesta categoria, a produção e a extração da matéria-prima são as etapas que precisam ser enfatizadas. Na plantação da cana-de-açúcar, tem-se a liberação do monóxido de dinitrogênio (N₂O), devido à queima do bagaço da cana-de-açúcar. Este fator é uma questão relevante, visto que este gás, assim como outros que também são liberados neste processo, contribui para as emissões de GEE.

Além de que, na etapa do cultivo da cana-de-açúcar, deve-se levar em consideração a utilização de fertilizantes e herbicidas, podendo ocasionar a contaminação dos aquíferos (reservas de água doce), por exemplo.

No entanto, o bio-PE apresenta um impacto positivo, tendo em vista que o saldo de GEE é negativo. As principais razões são a captura de carbono da atmosfera, que corresponde a 3,09 kg de CO₂ para cada kg produzido, e sua incorporação ao polímero, além da cogeração de energia elétrica nas usinas sucroalcooleiras e pelas mudanças diretas do uso do solo, que são tidas como significativas quando comparadas ao PE fóssil.

B.2 DEMANDA DE ENERGIA FÓSSIL

A demanda de energia fóssil está relacionada ao consumo da energia proveniente de reservas finitas. Nesta categoria, o cálculo efetuado para analisar o polietileno petroquímico abrange a energia inserida na matéria-prima (petróleo) convertida no polímero, além da energia de origem fóssil consumida no processo produtivo. Para o bio-PE, o cálculo também considera a energia empregada no processo produtivo, abordando as seguintes etapas (Figura 16):

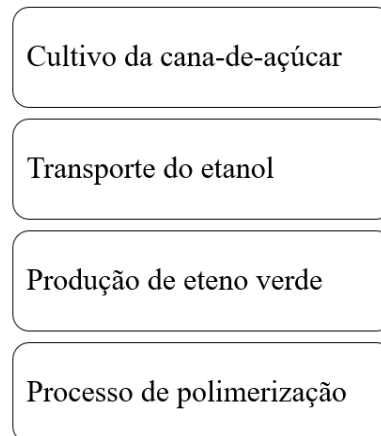


Figura 16. Etapas do PE verde consideradas nesta categoria. Elaboração própria a partir dos dados de [73].

No entanto, é desconsiderada a energia inserida na matéria-prima, visto que esta é renovável, devido ao fato de ser proveniente do etanol da cana-de-açúcar.

Analisando o Gráfico 2, pode-se visualizar que o melhor desempenho foi do polímero de origem renovável. Este resultado foi obtido em razão do bio-PE ser oriundo de fonte biológica, como mencionado anteriormente, não necessitando consumir ou extrair matérias-primas fósseis. Cerca de 80% da energia consumida no seu processamento é proveniente da cogeração de energia, obtida através do bagaço da cana. Por isto, o impacto desta categoria foi correspondente a 15 MJ/kg PE.

No que tange ao PE fóssil, verifica-se que a maior parte do seu ciclo produtivo necessita do consumo de energia oriunda de combustíveis fósseis, sendo o equivalente a 85 MJ/kg PE. Vale ressaltar que ambos os tipos de PE compartilham o mesmo processo de polimerização, isto é, eles possuem a mesma demanda de energia fóssil para essa fase específica da produção.

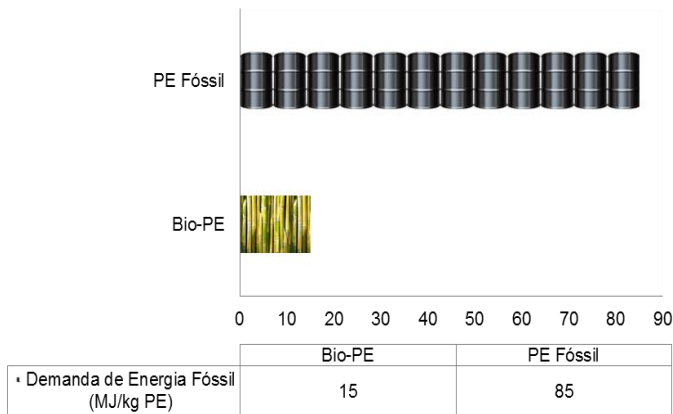


Gráfico 2. Consumo de energia fóssil. Elaboração própria a partir dos dados de [74].

B.3 EUTROFIZAÇÃO

No que tange à categoria de eutrofização, é retratado o potencial de enriquecimento da terra e de corpos d'água por compostos de nitrogênio (N) e fósforo (P), a partir de emissões atmosféricas e escoamento superficial. O enriquecimento por estes compostos pode acarretar o aumento da produção de algas que, conseqüentemente, retiram o oxigênio da água, fazendo com que outras vidas aquáticas não tenham acesso a este elemento.

A partir do Gráfico 3, pode-se observar que o polímero verde apresenta um maior potencial de eutrofização. Os motivos relacionados a este impacto negativo estão atrelados ao cultivo da cana-de-açúcar e, principalmente, às emissões de fosfato e fósforo, decorrentes do uso de agrotóxicos. Para minimizar a influência na etapa do cultivo, faz-se o uso de práticas mecânicas de conservação do solo e adubação.

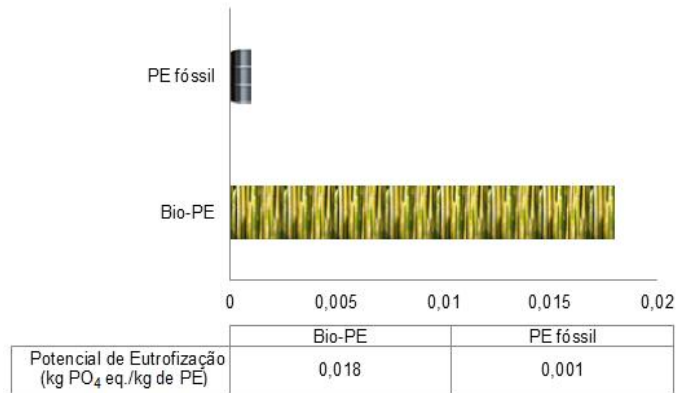


Gráfico 3. Potencial de eutrofização. Elaboração própria a partir dos dados de [74].

B.4 ACIDIFICAÇÃO

A categoria de acidificação descreve o potencial de modificação química no meio ambiente, especialmente em rios e lagos, que é resultado da produção de íons de hidrogênio em um nível mais elevado quando comparado à capacidade de dispersão ou neutralização no meio ambiente.

O impacto nessa categoria, demonstrado no Gráfico 4, é causado, principalmente, pelas emissões de SO_x e NO_x. Em relação ao bio-PE, a etapa de produção de etanol, que considera as emissões de óxidos de nitrogênio da queima de bagaço, foi enfatizada. Além de que, na etapa de produção da cana, tem-se a emissão de óxidos de nitrogênio e amônia da agricultura. E, ainda, as máquinas agrícolas queimam combustíveis fósseis no seu processo de funcionamento.

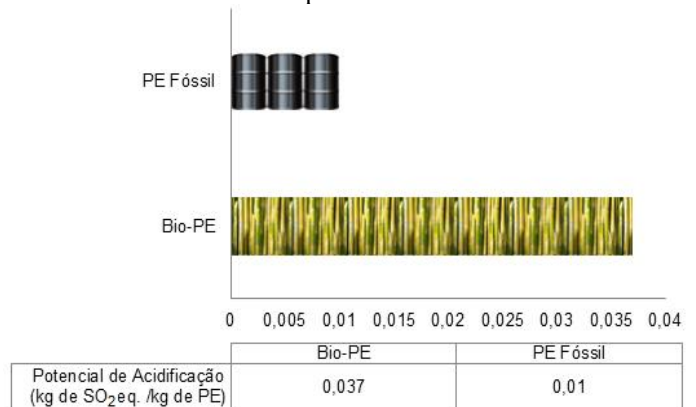


Gráfico 4. Potencial de acidificação. Elaboração própria a partir dos dados de [74].

B.5 FORMAÇÃO DE OZÔNIO FOTOQUÍMICO

A formação de ozônio fotoquímico é ocasionada pela degradação de compostos orgânicos (VOCs) na presença de luz e óxido de nitrogênio (NO_x), acarretando o impacto local de névoa fotoquímica de verão, também denominada de *summer smog*, e o impacto regional de aumento dos níveis de ozônio troposférico.

O termo *Smog* consiste na união de duas palavras: *smoke* = fumaça e *fog* = nevoeiro. O *smog* é reação de hidrocarbonetos (os gases oriundos do escapamento de todo veículo de motor a explosão) com o ozônio (O₃).

O ozônio troposférico é formado na troposfera, em razão da emissão de gases contaminantes da atmosfera e que são gerados pela indústria e libertados pelos escapes dos

automóveis. É poluente, tóxico e pode ocasionar sérios problemas à saúde humana.

No caso do PE verde, os principais fatores que contribuem para essa categoria de impacto são o cultivo da cana-de-açúcar e a produção de eteno verde, sendo a produção de cana-de-açúcar o principal fator de contribuição, devido à emissão de monóxido de carbono proveniente da queima da palha no campo.

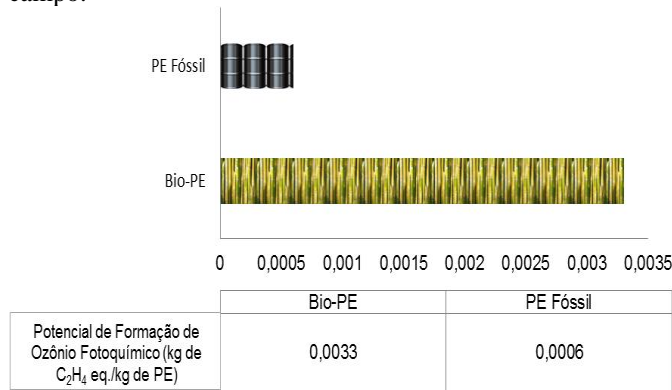


Gráfico 5. Potencial de formação de ozônio fotoquímico. Elaboração própria a partir dos dados de [74].

Sendo assim, através da ACV, pode-se analisar que o polímero de origem renovável possui vantagem em duas categorias: mudanças climáticas e consumo de recursos fósseis, conforme a Figura 17. O lado positivo se sobrepõe o lado negativo devido ao fato de o PE verde contribuir na redução da dependência de combustíveis fósseis, que consiste em uma proposta de valor, visto que este é um dos fatores que mais impulsionam as mudanças climáticas. Esta redução consiste em 70 MJ/kg de PE.

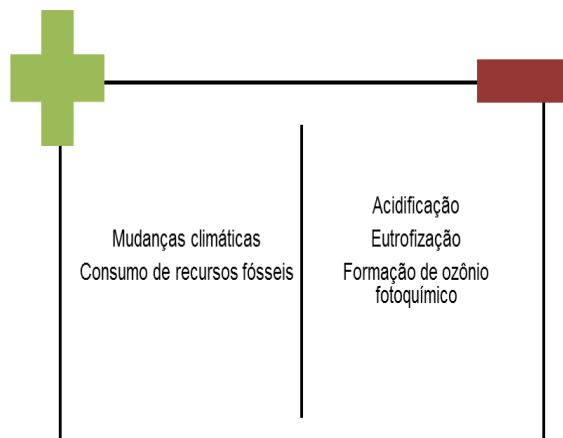


Figura 17. Análise dos resultados da ACV. Elaboração própria a partir dos dados de [75].

Esse resultado surge como uma oportunidade às empresas que buscam investir em resinas verdes, visto que elas são responsáveis pela diminuição da emissão de GEE, além de reduzir o consumo de recursos fósseis. Em relação às empresas, adotar esta possibilidade agrega valor e gera um diferencial para a organização. Ademais, estes dois aspectos são observados pelos consumidores, o que torna um fator de suma importância, devido à representação da sustentabilidade atrelada ao produto.

C. BIODEGRADABILIDADE

De acordo com Chen e Yan (2020) [9], a biodegradabilidade pode ser descrita como a viabilidade de decomposição de um plástico pelos microrganismos (MOs) biológicos no meio ambiente, formando, ao final do processo de biodegradação, alguns produtos, conforme a Figura 18.

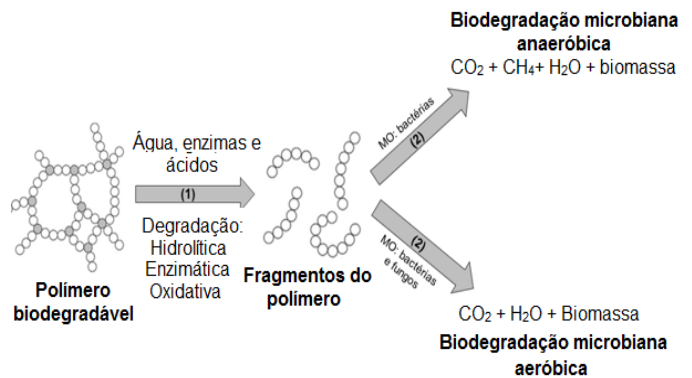


Figura 18. Processo de biodegradação. Adaptado de [76].

Como pode ser visto na Figura 18, há duas etapas principais: fragmentação (1) e mineralização (2). A fragmentação consiste no encurtamento e quebra das cadeias poliméricas do material plástico, mediante a influência de agentes como: calor, umidade, enzimas e/ou ácidos, sendo denominadas de degradação hidrolítica, enzimática e oxidativa. Dessa forma, verifica-se que as questões ambientais também influenciam na realização deste processo.

Já a etapa da mineralização trata-se da assimilação completa dos fragmentos do polímero através dos microrganismos (MOs) presentes no ambiente onde o material foi descartado. Nesta etapa, ação do MO pode ocorrer de maneira anaeróbica (sem presença de oxigênio (O₂)), por meio de bactérias, formando produtos como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), água (H₂O) e biomassa. Na biodegradação aeróbica (com presença de oxigênio (O₂)), realiza-se através de bactérias e fungos, formando produtos como dióxido de carbono (CO₂), água (H₂O) e biomassa.

Destaca-se que, para um plástico ser considerado biodegradável, é necessário que este apresente todas estas etapas mencionadas anteriormente. Os fragmentos de polímero podem apresentar efeitos negativos em potencial ao meio ambiente. No entanto, estes efeitos são reduzidos quando os fragmentos são totalmente assimilados pelos MOs presentes no local de descarte em um período relativamente curto.

O período de degradação dos plásticos biodegradáveis é comumente muito mais curto quando comparado aos plásticos tradicionais, variando de dias a meses. A Figura 19 apresenta o processo de biodegradação de um plástico, PET, em 80 dias.



Figura 19. Processo de decomposição de um PET biodegradável (80 dias). Adaptado de [77].

A questão da biodegradabilidade é bastante discutida, visto que o termo provoca bastante ambiguidade, sendo o polietileno verde um exemplo disso. O biopolímero é um plástico de base biológica, ou seja, consiste em um produto que é obtido a partir de materiais que são derivados de recursos renováveis, como a biomassa, que, na presente abordagem, é a cana-de-açúcar, em vez de matéria-prima fóssil (base fóssil).


Embora isto aconteça, os biopolímeros são produzidos com matérias-primas de fonte sustentável e não são necessariamente biodegradáveis e vice-versa, conforme o Quadro 3.

Nome	Classificação	Biodegradabilidade	Fonte
Biopolietileno/ Bio-PE	Bioplástico	Não biodegradável	Renovável
Biopolietileno tereftalato/ Bio-PET	Bioplástico	Não biodegradável	Renovável
Amido termoplástico/ TPS	Bioplástico	Biodegradável	Renovável
Poliácido láctico/ PLA	Bioplástico	Biodegradável	Renovável
Polibutilenosuccinato/ PBS	Bioplástico	Biodegradável	Renovável
Polihidroxialcanoato/ PHA	Bioplástico	Biodegradável	Renovável
Policaprolactona/ PCL	Bioplástico	Biodegradável	Fóssil
Polibutileno tereftalato adipato/ PBAT	Bioplástico	Biodegradável	Fóssil
Polietileno/ PE	Plástico convencional	Não biodegradável	Fóssil
Polipropileno/ PP	Plástico convencional	Não biodegradável	Fóssil

Quadro 3. Classificação de alguns plásticos quanto à matéria-prima e à biodegradabilidade. Elaboração própria a partir dos dados de [9] [76].

Pode-se observar, na figura anterior, que o plástico convencional (PE) pode ser sintetizado a partir de recursos renováveis através de novas tecnologias, tornando o PE de base biológica (ou bio-PE), mas, mesmo assim, não são biodegradáveis, enquanto a PCL consiste em um plástico biodegradável de origem fóssil.

Posto isto, o Quadro 4 apresenta um polímero comercial de base biológica e não biodegradável bastante abordado atualmente.

Polímero	Estrutura	Conteúdo de base biológica (%) ^a	Produção anual (ton) ^b	Exemplos de marca comercial/ empresa	Aplicações
Bio-PE		100	200000	I'M GREENTM/ BRASKEM	Especialmente em embalagens, filmes e sacos.

^aEste item baseia-se em informações atuais sobre produtos disponíveis comercialmente e pode ser aumentado para polímeros que atualmente são parcial ou totalmente baseados em fósseis.

^bO volume anual de produção dos polímeros foi obtido em www.european-bioplastics.org/market/.

Quadro 4. Polímero comercial de origem biológica e não biodegradável. Elaboração própria a partir dos dados de [78] [79].

Quando comparado ao plástico convencional, o bio-PE se assemelha no aspecto de não ser biodegradável, o que é tido como uma desvantagem. O plástico comum, que é produzido com derivado do petróleo, leva cerca de 500 anos para se degradar. Já, em relação ao plástico verde, oriundo da cana-de-açúcar, é estimado um período em torno de 200 anos [80] [81]. Mesmo que não seja o ideal, ainda é vantajoso em relação à alternativa original.

VII. CONCLUSÕES

A indústria química possui um duplo papel na sociedade, em que, por um lado, está atrelada aos impactos negativos ao meio ambiente e, pelo outro, ao fato de possuir um papel primordial para amenizar a situação de alerta vivenciada atualmente.

Posto isto, os conceitos de química verde e desenvolvimento sustentável estão sendo, gradualmente, introduzidos dentro das indústrias, a fim de agregar melhorias nos seus processos, produtos e serviços, sendo a ferramenta ACV responsável pela identificação destas características.

Embora o plástico petroquímico seja amplamente empregado no cotidiano, atualmente tem-se uma opção da substituição que traz um novo conceito para este produto, que é o plástico oriundo de fonte renovável, uma vez que as fontes fósseis são limitadas e promovem grandes impactos ambientais.

A partir da compilação de dados, foi possível realizar uma análise comparativa das propriedades do polietileno convencional e o biopolietileno. A ACV constatou que os polietilenos fósseis possuem menor impacto nas categorias de acidificação, eutrofização e formação de ozônio fotoquímico. Por outro lado, os biopolietilenos apresentaram um melhor resultado nas categorias de mudanças climáticas e demanda de energia fóssil.

No entanto, esses polímeros verdes também apresentam algumas desvantagens, como não ser biodegradável, assim como o PE petroquímico; requerem uma plantação de cana-de-açúcar em larga escala, o que desencadeia outras desvantagens; além de possuírem um custo elevado quando comparado aos convencionais, sendo cerca de 40% mais caro. Uma das explicações para o alto valor de aquisição dos plásticos verdes está atrelado aos elevados investimentos em pesquisa, desenvolvimento e produção ainda em escala reduzida. No entanto, conforme a produção cresça, a tendência é que o custo caia.

Ainda, mesmo sendo caro, deve-se considerar a compensação nos outros fatores, como a cogeração de energia e uma nova visão não dependente do petróleo, além de utilizar, de maneira responsável, o potencial de energia renovável existente no país, como abordado na seção IV.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Abordar os aspectos mercadológicos e analisar as tendências de utilização do plástico verde;
- Incluir na ACV o custo em termos de GEE do desmatamento necessário para plantar cana-de-açúcar suficiente para produzir Bio-PE em larga escala (com efeitos substitutivos do PE tradicional);
- Realizar uma análise de custo, com dados consolidados, abordando a viabilidade econômica do emprego do biopolietileno;
- E, por fim, avaliar as outras categorias da ACV não abordadas no presente trabalho, a fim de confirmar, ainda mais, a importância da substituição das fontes de produção dos plásticos.

REFERÊNCIAS

- [1] BAJPAL, P. Chemical industry. **Biotechnology In The Chemical Industry**, [s.l.], p. 31-36, 2020. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-818402-8.00004-5>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620305977>. Acesso em: 21 jun. 2020.
- [2] CORDEIRO, Y. M. *et al.* Aplicação do Polietileno no Contexto da Química Verde. **Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana**, Macaé, v. 1, n. 8, p. 26-33, jul./dez. 2018. Disponível em: http://www.fsma.edu.br/RESA/Edicao8/FSMA_RES_2018_2_02.pdf. Acesso em: 5 jun. 2020.
- [3] PRADO, V. *et al.* Energy apportionment approach to incentivize environmental improvement investments in the chemical industry. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 257, p. 120550, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120550>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620305977>. Acesso em: 21 jun. 2020.
- [4] ALLONDA. **A importância da indústria química para economia e seus impactos ambientais**, 2020. Disponível em: <https://allonda.com/blog/quimica/a-importancia-da-industria-quimica-para-economia-e-seus-impactos-ambientais/>. Acesso em: 21 jun. 2020.
- [5] CHEN, A. *et al.* (ed.). Sustainable Development. **Dictionary Of Geotourism**, [s.l.], p. 595-596, 11 nov. 2019. Springer Singapore. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-2538-0_2388.
- [6] VERDI, L. **Indústria química busca sustentabilidade**, 2016. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/informatica/item/13714-noticia-acom-2016-10-1925.html>. Acesso em: 21 jun. 2020.
- [7] LOSTE, N. *et al.* Assessing awareness of green chemistry as a tool for advancing sustainability. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 256, p. 120392, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120392>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262030439X?via%3Dihub>. Acesso em: 21 jun. 2020.
- [8] MAXWELL, M. **The Chemical Industry and U.N. Sustainable Development Goal 3: Good Health & Well-Being**, 2019. Disponível em: <https://www.pcimag.com/blogs/14-pci-blog/post/106123-the-chemical-industry-and-unsustainable-development-goal-3-good-health-well-being>. Acesso em: 21 jun. 2020.
- [9] CHEN, X.; YAN, N. A brief overview of renewable plastics. **Materials Today Sustainability**, [s.l.], v. 7-8, p. 100031, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100031>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589234719300594>. Acesso em: 10 jun. 2020.
- [10] LASKAR, N. KUMAR, U. Plastics and microplastics: a threat to environment. **Environmental Technology & Innovation**, [s.l.], v. 14, p. 100352, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2019.100352>.
- [11] MAGNI, S. *et al.* Plastics and biodegradable plastics: ecotoxicity comparison between polyvinylchloride and mater-bi@ micro-debris in a freshwater biological model. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 720, p. 137602, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137602>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972031113X>. Acesso em: 19 jun. 2020.
- [12] CMMAD. **Nosso futuro comum**. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1988.
- [13] BARBOSA, G. S. O desafio do desenvolvimento sustentável. **Revista Visões**, [s.l.], v. 1, n. 4, p. 1-11, jan/jun. 2008. Disponível em: http://www.fsma.edu.br/visoes/ed04/4ed_O_Desafio_Do_Desenvolvimento_Sustentavel_Gisele.pdf. Acesso em: 28 maio 2020.
- [14] DIAZ-SIEFER, P. *et al.* Human-environment system knowledge: a correlate of pro-environmental behavior. **Sustainability**, Switzerland, v. 7, n. 11, p. 15510-15526, 2015. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/7/11/15510>. Acesso em: 28 maio 2020.
- [15] DUTRA, F. C. M. S. *et al.* Envolvimento em ocupações sustentáveis: mudanças nos hábitos de vida a partir de espaços de práticas educativas. **Cadernos Brasileiros de Terapia Ocupacional**, [s.l.], v. 26, n. 2, p. 345-355, 2018. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/2526-8910.ctoao1143>. Disponível em: <http://www.cadernosdeterapiaocupacional.ufscar.br/index.php/cadernos/article/view/1850>. Acesso em: 28 maio 2020.
- [16] JACOBI, P. R. Educação Ambiental: o desafio da construção de um pensamento crítico, complexo e reflexivo. **Educação e Pesquisa**, São Paulo, v. 31, n. 2, p. 233-250, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/ep/v31n2/a07v31n2.pdf>. Acesso em: 28 maio 2020.
- [17] ALMEIDA, P. C. **Análise técnico-ambiental de alternativas de processamento de cascalho de perfuração offshore**. 2016. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://dissertacoes.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli1723.pdf>. Acesso em: 29 set. 2020.
- [18] SILVA, A. F. da. *et al.* Química Verde: Desafios do Futuro. **Revista Conexão Eletrônica**, Três Lagoas - MS, v. 16, n. 1, p. 452-459, 2019. Disponível em: <file:///E:/Arquivos/Downloads/41-QU%C3%8DMICA-VERDE-Desafios-do-Futuro.-P%C3%A1g.-E-452-459.pdf>. Acesso em: 29 maio 2020.
- [19] MOREIRA, A. M. **Química Verde: Análise da Emergência do Estilo de Pensamento a partir da Perspectiva Fleckiana**. 2018. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Educação em Ciências e em Matemática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/58566/R%20-%20D%20-%20AMANDA%20MAGAGNIN%20MOREIRA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 jun. 2020.
- [20] ANASTAS, P. *et al.* Happy silver anniversary: green chemistry at 25. **Green Chemistry**, [s.l.], v. 18, n. 1, p. 12-13, 2016. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/gc/c5gc90067k#!divAbstract>. Acesso em: 30 maio 2020.
- [21] RAMOS, M. A. F. A. **Química Verde - potencialidades e dificuldades da sua introdução no ensino básico e secundário**. 2009. 117 f. Dissertação (Mestrado em Química para o Ensino) - Faculdade de Ciências, Departamento de Química e Bioquímica, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2009. Disponível em: https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/41001/ulfc095924_tm_Maria_Adelai_de_Ramos.pdf. Acesso em: 28 maio 2020.
- [22] CUNHA, B. R. da. **O papel da química verde no desenvolvimento sustentável e a aplicação dos seus princípios na indústria química**. 2014. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014. Disponível em: <http://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/monografias/2014/MEQ14036.pdf>. Acesso em: 30 maio 2020.
- [23] CASULLO, P.; SOUBIRÓN, E. Química Verde: Metas, Desafios y Formas de Contribuir a su Desarrollo desde La Enseñanza Media. In: MOYNA, P. *et al.* **Aportes de La Química al Mejoramiento de La Calidad de Vida**. 1 ed. Montevideo: 2012. cap. 1, p. 15-45. Disponível em: <http://riiquim.fq.edu.uy/archive/files/13606ed59300f1443ffca9b3ad70b281.pdf>. Acesso em: 27 maio 2020.
- [24] PRADO, A. G. S. Química verde, os desafios da química do novo milênio. **Química Nova**, [s.l.], v. 26, n. 5, p. 738-744, out. 2003. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422003000500018>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422003000500018. Acesso em: 27 maio 2020.
- [25] SERRÃO, R. G. S.; SILVA, M. D. B. S. A Química Verde presente nos artigos da Revista Química Nova: A divulgação científica dos últimos 10 anos. In: Encontro Nacional de Ensino de Química, 15, 2010, Brasília. **Anais**

- eletrônicos... Brasília: SBQ, 2010. p. 11. Disponível em: <http://www.s bq.org.br/eneq/xv/resumos/R0184-2.pdf>. Acesso em: 27 maio 2020.
- [26] LENARDÃO, E. J. *et al.* *Green chemistry* - Os 12 princípios da química verde e sua inserção nas atividades de ensino e pesquisa: os 12 princípios da química verde e sua inserção nas atividades de ensino e pesquisa. **Química Nova**, [s.l.], v. 26, n. 1, p. 123-129, jan. 2003. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422003000100020>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422003000100020&script=sci_arttext. Acesso em: 27 maio 2020.
- [27] AGRONOVAS. **Matéria-prima renovável**, 2017. Disponível em: <http://www.agronovas.com.br/materia-prima-renovavel/>. Acesso em: 02 jun. 2020.
- [28] CORRÊA, A. G.; ZUIN, V. **Química Verde: Fundamentos e Aplicações**. São Carlos: EdUFSCar, 2009.
- [29] ANEEL. **Parte II – Fontes Renováveis**, 2008. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf. Acesso em: 30 maio 2020.
- [30] FERNANDES, D. M. *et al.* Biomassa como fonte alternativa de energia. **Revista da Madeira**, [s.l.], n. 138, 2014. Disponível em: http://www.remade.com.br/revistadamadeira_materia.php?num=1734. Acesso em: 31 maio 2020.
- [31] NOGUEIRA, E. W.; BISPO, C. J. C.; FRANCO, D. S. Potencial de utilização do eucalipto para geração de energia no município de Paragominas/PA, Brasil. **4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente**, Bento Gonçalves - RS, abr. 2014. Disponível em: https://siambiental.ucs.br/congresso/getArtigo.php?id=96&ano=_quarto. Acesso em: 1 jun. 2020.
- [32] BEN. **Balanco Energético Nacional – Ano Base 2018**, 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2020.
- [33] EREN, B. M.; TASPINAR, N.; GOKMENOGLU, K.K. The impact of financial development and economic growth on renewable energy consumption: empirical analysis of India. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 663, n. 1, p. 189-197, maio 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719303729>. Acesso em: 3 jun. 2020.
- [34] WANG, Z.; BUI, Q.; ZHANG, B. The relationship between biomass energy consumption and human development: empirical evidence from brics countries. **Energy**, [s.l.], v. 194, p. 116906, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2020.116906>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054422030013X>. Acesso em: 2 jun. 2020.
- [35] WELFLE, A. Balancing growing global bioenergy resource demands - Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. **Biomass And Bioenergy**, [s.l.], v. 105, p. 83-95, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953417301976>. Acesso em: 3 jun. 2020.
- [36] WORLD ENERGY CONCIL. **World Energy Resources: Unconventional gas, a global phenomenon**, 2016. Disponível em: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Unconventional-gas-a-global-phenomenon-World-Energy-Resources_-Full-report-.pdf. Acesso em: 3 jun. 2020.
- [37] BEN. **Balanco Energético Nacional – Ano Base 2018**, 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2020.
- [38] IEA (International Energy Agency). **Renewable Informations: Overview 2017**, 2017. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/RenewablesInformation2017Overview.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2020.
- [39] SILVA, A. P. de S. *et al.* Uso de biomassa tradicional como fonte de energia em residências – um panorama do Brasil e do mundo. **XI Congresso Brasileiro de Planejamento Energético (CBPE)**. Cuiabá – MS, p. 1-13, set. 2018. Disponível em: https://www.xicbpe.com.br/_down_artigos/120.pdf. Acesso em: 3 jun. 2020.
- [40] EPE - Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Matriz Energética e Elétrica**. Ministério de Minas e Energia. Brasília: MME/EPE, 2018.
- [41] PUC-RIO. **Biomassa**. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/18319/18319_5.PDF. Acesso em: 3 jun. 2020a.
- [42] ALIOTTE, F. F. **Indicador de preço para valoração da biomassa a partir da geração de vapor no estado de São Paulo**. 2020. 44 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronegócio, Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2020. Disponível em: https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/29032/Final_Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20Indicador%20de%20pre%C3%A7o%20para%20biomassa%20%28Ale%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 3 jun. 2020.
- [43] ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil**, 2005. 2ª ed. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2005_AtlasEnergiaElétricaAtlas2ed/06b7ec52-e2de-48e7-f8be-1a39c785fc8b. Acesso em: 3 jun. 2020.
- [44] FERNANDES, A. S.; MIGUEL, E. R. A importância da utilização do bagaço de cana-de-açúcar na geração de energia em termelétricas. **III Encontro Científico e Simpósio de Educação Unisalesiano**, Lins - SP, p. 1-11, out. 2011. Disponível em: <http://www.unisalesiano.edu.br/simpósio2011/publicado/artigo0034.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2020.
- [45] GARCEZ, L.; GARCEZ, C. **Energia**. 1ª ed. São Paulo: Callis Ed., 2011, 24 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=TYmzDQAAQBAJ&pg=PT2&dq=garcez+energia&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKewir4t-zsObpAhUiHbkGHTUIAJMQ6AEIzAA#v=onepage&q=garcez%20energia&f=false>. Acesso em: 3 jun. 2020.
- [46] PUC-RIO. **Biomassa na Geração de Energia**. Disponível em: http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/1012767_2012_cap_3.pdf. Acesso em: 3 jun. 2020b.
- [47] VILLELA, A. A.; FREITAS, M. A. V.; ROSA, L. P. (org.). **O Uso de Energia de Biomassa no Brasil**. [s.l.]: Interciência, 2015. 196 p.
- [48] AGBOOLA, O. *et al.* Polyolefins and the environment. **Polyolefin Fibres**, [s.l.], v. 1, n. 1, p. 89-133, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081011324000047>. Acesso em: 3 jun. 2020.
- [49] ELMRABET, R.; ELHARFI, A.; ELYOUBI, M.S. Study of properties of polyethylene and cement mixtures. **Materials Today: Proceedings**, [s.l.], p. 1-4, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.475>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320322550>. Acesso em: 3 jun. 2020.
- [50] BATISTA, R. A. **Obtenção do polietileno a partir de fontes renováveis**. 2013. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Química, Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2013. Disponível em: <https://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/monografias/2013/MIQ13026.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2020.
- [51] ALVES, C. A. **Polímeros - Classificações e Propriedades**. 2016. 27 slides. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/carlosalves91/polmeros-classificacoes-e-propriedades>. Acesso em: 5 jun. 2020.
- [52] LIZÁRRAGA-LABORÍN, L. L. *et al.* Accelerated weathering study of extruded polyethylenagbooe/poly (lactic acid)/chitosan films. **Polymer Degradation And Stability**, [s.l.], v. 155, p.43-51, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.06.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014139101830199X>. Acesso em: 3 jun. 2020.
- [53] STURM, D. R. *et al.* Solubility of solvents in polyethylene below the melt temperature. **Fluid Phase Equilibria**, [s.l.], v. 470, p.68-74, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fluid.2017.09.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378381217303357>. Acesso em: 3 jun. 2020.
- [54] CONAMA. **Resolução CONAMA nº 275, de 25 de abril de 2001**, 2001. Disponível em: http://www.unigranrio.com.br/_docs/comissão_residuos/resoluxo_275_de_01_.pdf. Acesso em: 23 jun. 2020.
- [55] KUMAR, S. P. Green Plastic: A New Plastic For Packaging. **International Journal Of Engineering Sciences & Research Technology**, [s.l.], p. 168-174, set. 2016. Disponível em: <http://www.ijesrt.com/issues%20pdf%20file/Archive-2016/September-2016/22.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2020.
- [56] MORES, G. de V. *et al.* Sustainability and innovation in the Brazilian supply chain of green plastic. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], p. 12-18, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.138>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617330974>. Acesso em: 3 jun. 2020.
- [57] BORONAT, T. *et al.* Development of a biocomposite based on green polyethylene biopolymer and eggshell. **Materials & Design**, [s.l.], v. 68, p. 177-185, mar. 2015. Elsevier BV.

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.12.027>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306914010115?via%3Dihub>. Acesso em: 4 jun. 2020.
- [58] EISELE, F. V. P.; PETRINI, M. de C.; VACCARO, G. L. R. **Inovação sustentável na cadeia suprimentos do plástico verde a partir da ótica do ciclo de vida do produto**. 2015. Disponível em: <http://altec2015.nitec.co/altec/papers/904.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2020.
- [59] GRATTINI, A. **What is Polymerization? - Definition, Types & Examples**. Disponível em: <https://study.com/academy/lesson/what-is-polymerization-definition-types-process-reactions.html>. Acesso em: 5 jun. 2020.
- [60] ERNESTINA, A. **Aula – Reações de Polimerização**. 2015. 33 slides. Disponível em: <https://www.slideshare.net/AldinhaSantos/aula-reaes-de-polimerizao>. Acesso em: 5 jun. 2020.
- [61] ESPÍNDOLA, J. Z.; ANDRADE, E. T. de; HALL, J. Aplicação da Metodologia Produção mais Limpa (P+L) como Sugestão de Redução de Resíduos Sólidos em Agroindústrias de Café. **VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão**, [s.l.], p. 1-21, ago. 2011. Disponível em: http://www.inovarse.org/sites/default/files/T11_0354_1857.pdf. Acesso em: 5 jun. 2020.
- [62] ENADE. **Tecnologia Processos Químicos**. 2008. Disponível em: http://download.inep.gov.br/download/Enade2008_RNP/TECNOLOGIA_PR_OCESSOS_QUIMICOS.pdf. Acesso em: 5 jun. 2020.
- [63] BRASKEM. **Avaliação do ciclo de vida do PE verde I'green™**. 2020. Disponível em: <http://plasticoverde.braskem.com.br/Portal/Principal/Arquivos/ModuloHTML/Documentos/1191/Avaliacao-do-Ciclo-de-Vida-v02.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2020a.
- [64] REDAÇÃO FISPAL TECNOLOGIA. **Plástico verde é solução sustentável para o mercado de embalagens**, 2017. Disponível em: <https://digital.fispaltecnologia.com.br/sustentabilidade/pl-stico-verde-solu-sustent-vel-para-o-mercado-de-embalagens>. Acesso em 9 jun. 2020.
- [65] SPITZECK, H. **Braskem – Plástico Verde – O Desafio da Sustentabilidade: Estudo de Caso**, 2016. Disponível em: http://acervo.ci.fdc.org.br/AcervoDigital/Casos/Casos%202016/Braskem%20pl%C3%A1stico%20verde_Sustentabilidade.pdf. Acesso em: 11 jun. 2020.
- [66] ROCHA, B. *et al.* **Embalagens de plástico verde coma dição de resina biodegradável**, 2017. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/knoxnati/embalagens-de-plastico-verde-com-adio-de-resina-biodegradavel>. Acesso em: 19 jun. 2020.
- [67] BRASKEM. **Como é produzido**. Disponível em: <http://plasticoverde.braskem.com.br/site.aspx/Como-e-Produzido>. Acesso em: 5 jun. 2020b.
- [68] SAMPAIO, C. da S. **Avaliação do consumo energético na separação do eteno através do fracionamento com Recompressão Mecânica de Vapor**. 2017. 119 p. Dissertação (Mestrado em Processos Industriais) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2017.
- [69] BELLOLI, R. **Polietileno Verde do Etanol da Cana-de-Açúcar Brasileira: Biopolímero de Classe Mundial**. 2010. 34 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/35204/000792993.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 5 jun. 2020.
- [70] HOMBEECK, M. V. **Comparação entre as rotas via nafta e via etanol para a produção de eteno - Análise de custos e emissões de CO₂**. 2019. 83 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Estratégico). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/index.php/pt/publicacoes/dissertacoes/2019/1431-comparacao-entre-as-rotas-via-nafta-e-via-etanol-para-a-producao-de-eteno-analise-de-custos-e-emissoes-de-co2>. Acesso em: 19 jun. 2020.
- [71] WALKER, S.; ROTHMAN, R. Life cycle assessment of bio-based and fossil-based plastic: a review. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 261, p. 1-15, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121158>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620312051>. Acesso em: 11 jun. 2020.
- [72] LUZ, B. **Design e Sustentabilidade: A Inovação do Plástico verde**, 2014. Disponível em: http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_13/2014/11/03/1125/CNI_3_12_2014_BeatrizLuz_Braskem.pdf. Acesso em: 18 jun. 2020.
- [73] ZIEM, S. *et al.* **Resumo dos relatórios de avaliação de ciclo de vida, mudança do uso da terra e pegada hídrica**, 2013. Disponível em: <http://plasticoverde.braskem.com.br/Portal/Principal/Arquivos/ModuloHTML/Documentos/1191/20131206-enviro-assessment-summary-report-final-TRADUCAO-BL-outubro-2014.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2020.
- [74] BIRON, M. **Thermoplastics and Thermoplastic Composites**. 3ª ed. [s.l.]: William Andrew, 2018. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=XRNfDwAAQBAJ&pg=PA145&lpg=PA145&dq=eutrophication+potential+braskem+green+plastic&source=bl&ots=cmhwtK08LI&sig=ACfU3U1CcbH6DYpSajY3VX-yuDWGNqeTdA&hl=pt-BR&sa=X&ved=2ahUKEwi5xf-W_ozqAhWdErkGHWpsCNIQ6AEwB3oECAoQAQ#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 17 jun. 2020.
- [75] CASTRO, T. H. M. de. **Os Bioplásticos: Impactos Ambientais e Perspectivas de Mercado**. 2019. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Planejamento Energético, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Thais_Hessab_MESTRADO_2019.pdf. Acesso em: 11 jun. 2020.
- [76] HAVSTAD, M. R. **Biodegradable plastics. Plastic Waste And Recycling**, [s.l.], p. 97-129, 2020. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-817880-5.00005-0>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128178805000050>. Acesso em: 17 jun. 2020.
- [77] BETAEQ. **Bioplástico - o polímero termoplástico biodegradável**, 2014. Disponível em: <http://betaeq.blogspot.com/2014/07/bioplastico-o-polimero-termoplastico.html>. Acesso em: 17 jun. 2020.
- [78] HATTI-KAUL, R. *et al.* **Designing Biobased Recyclable Polymers for Plastics. Trends In Biotechnology**, [s.l.], v. 38, n. 1, p. 50-67, jan. 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31151764/>. Acesso em: 10 jun. 2020.
- [79] MENDIETA, C. M. *et al.* **Review: bio-polyethylene from wood wastes. Journal Of Polymers And The Environment**, [s.l.], v. 28, n. 1, p. 1-16, 17 out. 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10924-019-01582-0>. Acesso em: 17 jun. 2020.
- [80] BONA, J. C. de. **Preparação e caracterização de filmes biodegradáveis a partir de blendas de amido com polietileno**. 2007. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Alimentos, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. Disponível em: http://www.pgeal.ufsc.br/files/2011/01/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Jaqueline-C-De-Bona_2007.pdf. Acesso em: 23 jun. 2020.
- [81] USP (Universidade de São Paulo). **Pesquisadores produzem plástico biodegradável com resíduos da agroindústria**. 2017. Disponível em: <http://www.fiepr.org.br/boletins-setoriais/12/especial/pesquisadores-produzem-plastico-biodegradavel-com-residuos-da-agroindustria-2-32028-350075.shtml>. Acesso em: 17 jun. 2020.