

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA

Análise de Ciclo de Vida (ACV) de óleos refrigerantes para transformadores: comparação entre óleo mineral e óleo vegetal

Marcos Rafael Pereira Batista

Itajubá, Julho de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA

Marcos Rafael Pereira Batista

**Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de óleos refrigerantes
para transformadores: comparação entre óleo mineral e
óleo vegetal**

**Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia de
Energia como parte dos requisitos
para a obtenção de Título de Mestre
em Ciências em Engenharia de
Energia**

**Área de Concentração: Energia,
Sociedade e Meio Ambiente**

**Orientador: Prof. Dra. Maria Luiza
Grillo Renó**

Itajubá, Julho de 2021

RESUMO

Os transformadores são considerados um dos componentes mais importantes no setor de transmissão e de distribuição do sistema elétrico. Como funcionam em alta temperatura, seu sistema de refrigeração deve possuir elevado desempenho para aumentar sua vida útil. Para realizar esta refrigeração, a maioria dos sistemas, utiliza o óleo mineral. Os demais, utilizam óleo de origem vegetal. O objetivo deste trabalho é fazer uma análise do ciclo de vida (ACV) de diferentes tipos de óleo de refrigeração para verificar qual desses apresentam menores impactos ambientais. Para esta comparação será utilizado o óleo de origem mineral, mais utilizado atualmente (óleo de base naftalênica) e o óleo vegetal (óleo de girassol e o óleo de soja). Assim, foram criados três cenários para fazer a distinção destas formas mais usadas para serem utilizados em transformadores. No cenário 1, se encontra o óleo mineral. No cenário 2 o óleo de girassol e no cenário 3 o óleo de soja. Todos os inventários levantados foram plotados no software SimaPro para que se cheguem aos resultados propostos. Quando feita a comparação destes três cenários, constatou-se que a melhor opção para se fazer a lubrificação e refrigeração de um transformador é o cenário 1, onde foi constatado por questões ambientais, a melhor opção proposta para esta atividade. Tal resposta é devido ao fato deste cenário apresentar os menores valores de impactos ambientais para o ar, água e solo. Nos resultados, o cenário 1, apresenta somente o impacto de esgotamento fóssil maior em relação aos demais cenários, devido a utilização do petróleo para sua produção. O pior cenário para refrigerar e lubrificar transformadores é o cenário 2, porque apresenta quinze valores de impactos maiores que as dos outros cenários, como: mudança climática, ocupação de solo agrícola e esgotamento da água. Já o cenário intermediário seria o terceiro, apresentando dois valores de impactos maiores que os outros cenários e ainda apresenta um impacto negativo (esgotamento da água). A cotação serviu como auxílio para verificar qual óleo apresenta um custo menor de produção. O custo de litros de óleo mineral lubrificante é de R\$1547,6 reais por transformador e o custo de litros de óleo vegetal lubrificante é de R\$1653,6 reais por transformador. Podemos concluir, baseado nos custos, que os óleos lubrificantes minerais possuem um custo de produção menor que os óleos vegetais lubrificantes.

Palavras-chave: Transformador, Óleo de origem mineral, Óleo de origem vegetal, Análise de ciclo de vida (ACV), Impacto ambiental, Cenários.

ABSTRACT

Transformers are considered one of the most important components in the transmission and distribution of the system sector electrical. As they work at high temperature your cooling system must work very well to increase its useful life. Carrying out this refrigeration, most systems use mineral oil. The others use vegetable oil. The goal of this work is to carry out a life cycle analysis (LCA) so that it can be checked which of the oils have the lowest environmental impacts. For this comparison, the most commonly used mineral oil (which is naphthalene base oil) and vegetable oil (sunflower and soybean oil) will be used. Thus, three scenarios were created to distinguish these most used forms to be used in transformers. In the scenario 1, there is mineral oil. In scenario 2, sunflower oil and in scenario 3, soybean oil. All inventories collected were plotted to the SimaPro software so that the proposed results could be reached. When comparing these three scenarios, it was found that the best option for lubricating and cooling a transformer is scenario 1, for environmental reasons, to be the best option proposed for this activity. Such response is due to the fact that this scenario presents the lowest values of environmental impacts for air, water and soil. In comparison, scenario 1 only presents the impact of fossil depletion greater than others scenarios, due to the use of oil for its production. The worst scenario for cooling and lubricating transformers is scenario 2, because it presents fifteen values of impacts greater than others scenarios, such as: climate change, occupation of agricultural land and water depletion. The intermediate scenario, presenting two values of impacts greater than others scenarios and still having a negative impact (depletion of water). The quotation served as an assistance to verify which oil has a lower production cost. The cost of liters of lubricating mineral oil is R\$1576.6 real per transformer and the cost of liters of lubricating vegetable oil is R\$1653.6 real per transformers. We can conclude, based on costs, that mineral lubricating oils have a lower production cost than vegetable lubricating oil.

Keywords: Transformers, Mineral oil, Vegetable oil, Life Cycle Analysis (LCA), Environment impact, Scenarios.

Agradecimentos

Nesses anos de empenho, dedicação e estudo para a obtenção deste título, tenho que agradecer a algumas pessoas para que esta jornada tenha sido menos árdua devido a sua problemática.

Primeiramente, ao nosso senhor Deus Jeová, que sem ele nada é possível e sem sua vontade, este sonho poderia não ser possível ser atingido. Agradecer aos meus pais Rúbia e Marcos Batista, pelo apoio, suporte e incentivo quando precisei nesses anos. Meus agradecimentos para minhas irmãs também Mariane e Francine Batista pela paciência e carinho.

Não posso me esquecer da minha orientadora Maria Luiza Grillo Renó, pela ajuda dispensada, para que eu atinja meus objetivos e sonhos em concluir esse trabalho com êxito, por deixar seus momentos de descanso ou de trabalho para me orientar, principalmente na época em que estava de licença gestacional. Obrigado por ter acreditado em mim e neste tema escolhido para a minha dissertação de mestrado.

Agradeço a UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá) e seus funcionários pelo apoio e gentilezas; aos professores que conheci esses anos, que de alguma forma contribuíram para meu crescimento e conhecimento acadêmico. Não posso esquecer dos amigos que conquistei, onde demonstraram total companheirismo.

Por fim, e não menos importante, gostaria de agradecer ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo amparo financeiro, sem a qual não teria como me dedicar totalmente a esse curso que me proporcionou crescente conhecimento e amadurecimento na obtenção deste título de Mestre na operacionalidade deste estudo.

Lista de Figuras

Figura 1 - Mapa do setor elétrico.....	12
Figura 2 - Funcionamento dentro de um transformador	14
Figura 3 – Destilação fracionada do petróleo e seus produtos	15
Figura 4 – Cadeia do óleo Naftênico	16
Figura 5 – Cadeia simples de um óleo vegetal.....	18
Figura 6 – Fases de um produto ou processo	22
Figura 7 – Estrutura de um ACV	24
Figura 8 – Dimensões envolvidas pelo escopo.....	25
Figura 9 – Fluxos de entrada e saídas	27
Figura 10 – Fluxograma para a obtenção do óleo mineral.....	43
Figura 11 – Fluxograma para a obtenção do óleo refinado de girassol	44
Figura 12 – Fluxograma para a obtenção do óleo refinado de soja	45
Figura 13 – comparação da etapa de refino do petróleo	61
Figura 14 – Impactos para o óleo mineral.....	62
Figura 15 – Impactos para o óleo de girassol.....	64
Figura 16 – Impactos ambientais na produção do óleo de girassol	65
Figura 17 – Impactos para todas as etapas do girassol	66
Figura 18 – Comparação para a produção do óleo de girassol.....	67
Figura 19 – Impactos para a produção e cultivo da soja	69
Figura 20 – Impactos para a produção do óleo de soja.....	70
Figura 21 – Comparação do óleo para todos os cenários.....	71
Figura 22 – Normalização	73

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Normas ISO que embasam a LCA	23
Tabela 2 – Todos os impactos e suas respectivas unidades	37
Tabela 3 – Dados técnicos de transformadores de 15 KV de tensão de operação	41
Tabela 4 – Dados da extração de petróleo (106 litros)	47
Tabela 5 – Refino do petróleo (106 litros)	48
Tabela 6 – Refino do petróleo (106 litros)	49
Tabela 7 – Óleo de girassol (106 litros)	51
Tabela 8 – Energia elétrica (1GJ)	51
Tabela 9 – Cultivo de girassol (106 litros)	52
Tabela 10 – Óleo de girassol (106 litros)	53
Tabela 11 – Cultivo do girassol (106 litros)	53
Tabela 12 – Óleo de girassol (106 litros)	53
Tabela 13 – Cultivo da soja (106 litros)	54
Tabela 14 – Óleo de soja (106 litros)	55
Tabela 15 – Cultivo de soja (106 litros)	55
Tabela 16 – Transporte 1 (106 litros) (1700 km)	57
Tabela 17 – Transporte 2 (106 litros) (1010 Km)	57
Tabela 18 – Transporte 1 (106 litros) (1324 km)	58
Tabela 19 – Transporte 2 (106 litros) (1045 km)	58
Tabela 20 – Transporte 1 (106 litros) (1324 km)	59
Tabela 21 – Transporte 2 (106 litros) (1045 km)	59
Tabela 22 – Impactos com suas unidades para o cenário 1	60
Tabela 23 – Impactos com suas unidades para o cenário 2	63
Tabela 24 – Impactos ambientais para o cenário 3	68

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1. Objetivo geral	10
1.2. Objetivos específicos	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1. Transformadores	12
2.2. Óleo de lubrificação de origem mineral.....	14
2.3. Óleo de lubrificação de origem vegetal	17
2.3.1. Girassol	21
2.3.2. Soja	21
2.4. Análise de Ciclo de Vida (ACV).....	22
2.4.1. Definição do objetivo e escopo	25
2.4.2. Inventário	26
2.4.3. Avaliação de impactos.....	27
2.4.3.1. Formação de material particulado (<i>midpoint</i>).....	29
2.4.3.2. Formação de oxidantes fotoquímicos (<i>midpoint</i>).....	29
2.4.3.3. Radiação ionizante (<i>midpoint</i>).....	30
2.4.3.4. Toxicidade humana (<i>midpoint</i>)	30
2.4.3.5. Mudanças climáticas (<i>midpoint</i>).....	31
2.4.3.6. Ecotoxicidade em água doce (<i>midpoint</i>).....	31
2.4.3.7. Eutrofização de água doce (<i>midpoint</i>)	32
2.4.3.8. Eutrofização marinha (<i>midpoint</i>).....	32
2.4.3.9. Depleção da camada de ozônio (<i>midpoint</i>)	32
2.4.3.10. Ecotoxicidade terrestres (<i>midpoint</i>).....	33
2.4.3.11. Acidificação terrestre (<i>midpoint</i>).....	33
2.4.3.12. Ocupação do solo (<i>midpoint</i>)	33
2.4.3.13. Ecotoxicidade marinha (<i>midpoint</i>)	34
2.4.3.14. Transformação do solo (<i>midpoint</i>)	34
2.4.3.15. Depleção de recursos naturais (<i>midpoint</i>).....	34
2.4.3.16. Depleção dos combustíveis fósseis (<i>midpoint</i>)	35
2.4.3.17. Depleção da água (<i>midpoint</i>).....	35
2.4.3.18. Danos à saúde humana (<i>endpoint</i>).....	35
2.4.3.19. Danos à diversidade do ecossistema (<i>endpoint</i>).....	36
2.4.3.20. Danos aos recursos naturais (<i>endpoint</i>)	36

2.4.3.21. Unidade dos impactos.....	37
2.4.4. Interpretação.....	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1. Software SimaPro	39
3.2. Método ReCiPe.....	40
3.3. Escopo e objetivo do ACV	40
3.3.1. Unidade funcional.....	41
3.3.2. Fronteiras para o sistema.....	42
3.3.2.1. Fronteira para o óleo mineral (cenário 1).....	42
3.3.2.2. Fronteira para o óleo de girassol (cenário 2).....	43
3.3.2.3. Fronteira para o óleo de soja (cenário 3)	44
3.4. Limitações do estudo	45
3.5. Cotação.....	46
4. INVENTÁRIOS	47
4.1. Inventários do cenário 1	47
4.2. Inventários do cenário 2	50
4.3. Inventários do cenário 3	54
4.4. Transportes	56
4.4.1. Transporte para o cenário 1	56
4.4.2. Transporte para o cenário 2.....	57
4.4.3. Transporte para o cenário 3.....	58
5. RESULTADOS	60
5.1. Resultados do cenário 1	60
5.2. Resultados do cenário 2	62
5.3. Resultados do cenário 3	67
5.4. Resultados da comparação para todos os óleos	70
5.5. Normalização.....	72
6. COTAÇÃO.....	74
7. CONCLUSÕES	75
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77
REFERÊNCIAS	78

1. INTRODUÇÃO

Os transformadores são um dos equipamentos mais importantes do setor elétrico, tanto para a distribuição da energia como para a transmissão da mesma. Eles podem ser utilizados tanto pela planta geradora de energia (com o intuito de elevar ou abaixar a corrente ou a tensão) quanto pelos consumidores residenciais. Devido à sua alta utilização em vários setores da distribuição e geração da energia, eles já estão incorporados em nosso cotidiano.

Os transformadores necessitam de óleos para promover a refrigeração do seu núcleo, pois quando ele entra em funcionamento, seu núcleo fica em alta temperatura (podendo chegar até aproximadamente 120°Celsius em trabalho). O óleo lubrificante possui a finalidade de promover a refrigeração no núcleo de transformadores e ainda consegue fazer o isolamento de circuitos magnéticos e elétricos do mesmo, durante toda a vida útil e durante toda a operação destes equipamentos. O óleo também pode ser utilizado como um fluido arrefecedor, para proteção do isolante sólido dos transformadores e ainda tem a capacidade de fazer a extinção do arco elétrico (Martins, 2008). Além destas todas aplicações do óleo, ele é utilizado para que em toda a vida útil do transformador, funcionando de forma eficiente e sem o risco de que os componentes em seu interior possam se desgastar. De acordo com um estudo realizado no Estados Unidos pela empresa TMI (Transformer Maintenance Institute, 1981), num período de 23 anos de trabalho, os componentes e a isolação do transformador começam a se deteriorar.

Atualmente, os transformadores são refrigerados por meio de três formas diferentes: por meio de óleos minerais (provenientes do petróleo), por óleos de origem vegetal (como exemplo os óleos de girassol e de soja) e ainda os que são refrigerados a seco (por meio de ventilação natural).

O óleo mineral sempre foi o mais utilizado em transformadores. Porém devido ao alto consumo do petróleo para inúmeros processos e produtos, tem-se notado a escassez deste recurso. Assim, a alternativa para se fazer a refrigeração e lubrificação com os óleos vegetais em transformadores, pode ser viável, diminuindo a necessidade do uso de petróleo para se produzir óleos minerais.

Uma forma de verificar qual será a melhor opção em nível ambiental é realizar uma análise de ciclo de vida (ACV) destas formas de refrigeração. Assim, pode fazer a comparação para determinar qual destas opções seria a melhor, verificar os impactos que cada uma tem no meio

ambiente e qual seria uma alternativa mais sustentável para o planeta. Este estudo tem um papel e a responsabilidade de mostrar os potenciais impactos que estas alternativas de refrigeração podem causar na sociedade, no meio ambiente e na economia (Hauschild *et al.*, 2017).

Entretanto, deve-se salientar que os transformadores refrigerados a seco, ou seja, os refrigerados por ventilação natural, não entrará no estudo de ACV, pois o foco do trabalho é analisar o óleo de refrigeração, e nesta tecnologia o óleo está ausente.

O capítulo 1 irá salientar a introdução deste trabalho, o capítulo 2 se trata da revisão bibliográfica, o capítulo 3 mostra os materiais e métodos utilizados para se produzir este trabalho, para o capítulo 4 temos o levantamento dos inventários, capítulo 5 se encontra os resultados encontrados, no capítulo 6 temos uma cotação econômica, no capítulo 7 temos a conclusão e no capítulo 8 se encontra sugestões para trabalhos futuros. Para finalizar tem-se as referências do trabalho.

1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi realizar uma análise de ciclo de vida (ACV) para fins de comparação entre o óleo mineral e óleo vegetal, que são os óleos que fazem a função de lubrificação e refrigeração nos transformadores. O óleo mineral considerado neste trabalho é proveniente do petróleo, os de bases naftalênicas. Os óleos vegetais; são o óleo de girassol e o óleo de soja. Com os resultados obtidos, através do software SimaPro, será possível determinar qual destas alternativas é mais sustentável para o meio ambiente, ou seja, apresentam menores valores de impactos ambientais.

Este trabalho tem como base a busca na literatura de inventários de produção de óleo mineral e de vegetal, para que ambas possam ser confrontadas, por meio dos indicadores de impactos, verificando qual delas é uma melhor opção para lubrificação e refrigeração de transformadores.

Para fazer as distinções dos óleos nos transformadores, três cenários foram criados. O cenário 1 representa um transformador lubrificado por óleo mineral, o cenário 2 é representado por um transformador lubrificado por óleo de girassol e o cenário 3 representa um transformador que utiliza óleo de soja.

1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho foram:

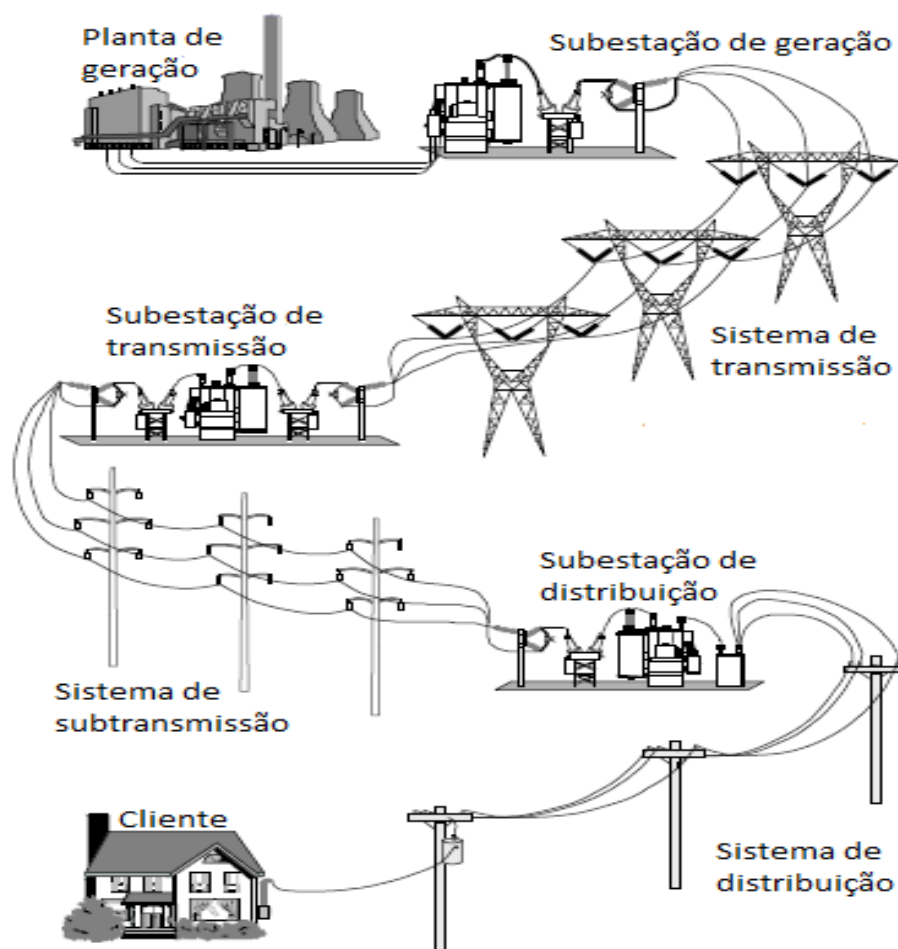
- Realizar o inventário do ciclo de vida de cada cenário, através de pesquisa bibliográfica;
- Determinação dos impactos ambientais em cada cenário analisado;
- Fazer uma cotação de cada óleo de refrigeração; e
- Realizar a normalização dos impactos ambientais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Transformadores

Os transformadores são equipamentos que podem ser usados em todo o setor elétrico. Sendo utilizados nas plantas geradora, nas subestações de energia e em postes nas ruas. A Figura 1 apresenta onde os transformadores são usados para que a energia chegue até os consumidores finais.

Figura 1 - Mapa do setor elétrico



Fonte: Brown (2002)

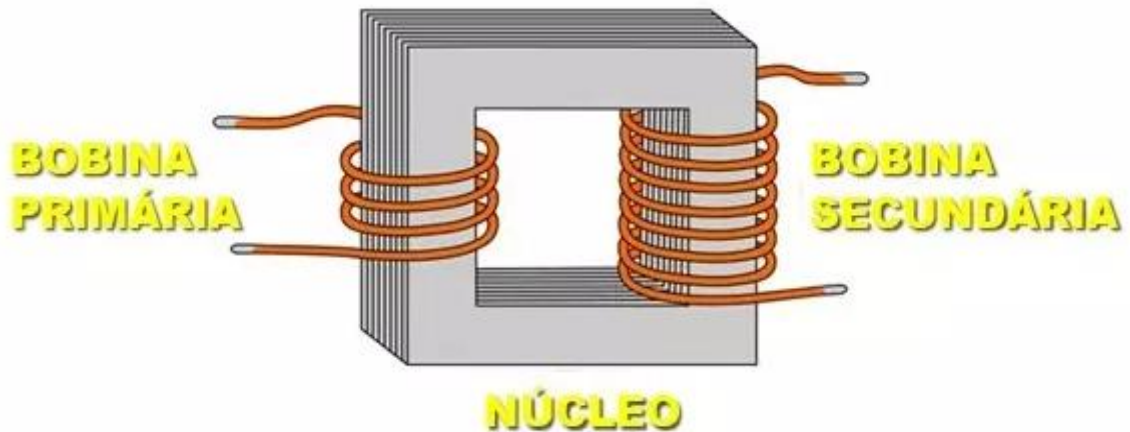
A energia é produzida por uma planta de geração, que pode ser de forma hidráulica ou até mesmo uma planta térmica. A planta gera a energia, sendo esta energia enviada para uma subestação de geração, que por sua vez, faz a transmissão da energia da planta de geração até a subestação de transmissão. A subestação de geração só consegue fazer esta transmissão por meio de transformadores elevadores de tensão, que são capazes de reduzir a corrente e aumentar

a tensão da energia, para que a energia possa caminhar pelos cabos a longas distâncias. Assim, quando a energia chega na subestação de transmissão, ela é mandada para a subestação de distribuição. A subestação de distribuição possui transformadores abaixadores, que são capazes de realizar a redução da tensão e aumentar a corrente, fazendo com que esta energia possa ser usada pelos consumidores em suas casas. Após a energia sair da subestação de distribuição, ela vai até os postes, chegando aos transformadores e até as casas dos consumidores (Brown, 2002).

Os transformadores são constituídos por dois ou mais enrolamentos que são acoplados por meio de um fluxo magnético (Umans *et al.*, 2014). Assim, quando uma tensão alternada alcança o enrolamento primário, ocorre uma união deste enrolamento com o enrolamento secundário, por meio de um fluxo magnético, gerando assim uma corrente. Ries (2007) salienta que os transformadores conseguem transformar uma tensão elétrica através de suas bobinas, por meio da indução magnética. Esta forma de transformação se deve a dois componentes: núcleo e enrolamentos.

Em suma, um transformador pode realizar funções de elevar a tensão (transformador elevador) ou reduzir uma tensão (transformador abaixador), tudo depende para o qual tarefa ele é necessário. Esta tarefa de reduzir ou elevar a tensão é relacionado ao número de espiras entre o enrolamento primário e o secundário. A Figura 2 representa os esquemas de bobinas que existem no núcleo de um transformador. Dentro do núcleo do transformador existem os enrolamentos primários (bobinas primárias) e os enrolamentos secundários (bobinas secundárias), cada um constituído por um determinado número de espiras para exercer uma certa função (de elevar ou abaixar a tensão). Quando uma corrente alternada excita a bobina primária, é gerado um campo magnético, que por ele excita a bobina secundária, gerando um fluxo magnético que flui da bobina primária para a secundária. A movimentação do fluxo magnético é cíclica e seu princípio de funcionamento segue os fundamentos do eletromagnetismo, ou seja, um campo magnético é movimentado por um condutor, faz surgir uma corrente induzida.

Figura 2 - Funcionamento dentro de um transformador



Fonte: Adaptado de Jordão (1969)

Os transformadores são equipamentos muito eficientes, com um rendimento que varia de 96 a 99%. Durante a operação de um transformador, seu núcleo se aquece e é necessário que se faça um resfriamento de seu interior com o meio externo. O óleo lubrificante funciona como fluido arrefecedor, fazendo o resfriamento por meio da troca de temperatura entre o ambiente interno e externo dos transformadores. Quanto maior a potência de um transformador, mais quantidades de litros de óleo ele precisa para facilitar a troca de temperatura. Por isso, o óleo é indispensável nos transformadores.

Entretanto, os transformadores ainda são equipamentos que requerem manutenção e alguns cuidados especiais por serem muito importantes no sistema elétrico. Estes equipamentos são projetados com uma vida útil de mais ou menos 30 anos (Bianchi, 2000), a realizações de manutenções periódicas e a utilização da faixa de operação adequada, ajuda os transformadores não se deteriorarem antes do tempo (Bianchi, 2000; Graine *et al.*, 1994).

Como os transformadores são equipamentos que funcionam 24 horas por dia e sete dias por semana, o seu sistema de refrigeração e lubrificação deve ser o melhor possível, para que ele consiga resfriar o núcleo dos transformadores, dissipando assim o calor interno para o exterior.

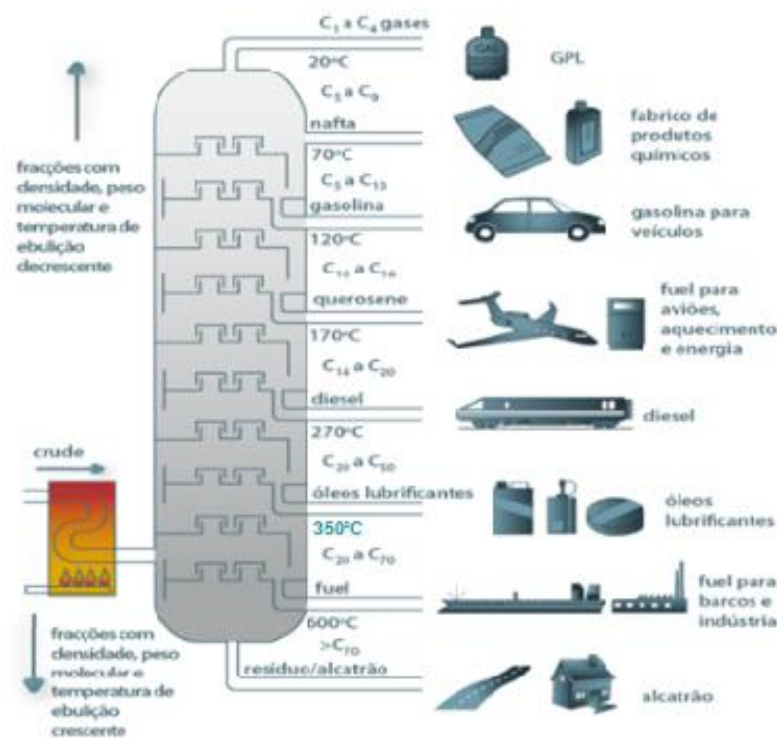
2.2. Óleo de lubrificação de origem mineral

Os óleos minerais isolantes são encontrados em inúmeros aparelhos e máquinas elétricas, devido a duas tarefas que ele consegue fazer: o isolamento de dois condutores para que não surjam arcos elétricos entre eles e refrigerar o aparelho dissipando o calor enquanto ele está em funcionamento. Estes óleos são os mais utilizados devido a facilidade de sua produção, seu

preço acessível e, conseqüentemente, seu custo baixo. Também possuem excelentes propriedades para refrigeração, lubrificação e propriedades dielétricas (Georgilakis, 2011).

O óleo mineral é obtido através da extração do petróleo tanto em alto mar quanto em terra. Porém, as maiores reservas de petróleo se encontram na água. Após a retirada do petróleo do solo marinho, o petróleo é levado a fornos, que podem atingir grandes temperaturas, fazendo com que o petróleo sofra algumas modificações preliminares para que posteriormente ele possa ser levados para outras etapas para se obter seus derivados, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Destilação fracionada do petróleo e seus produtos



Fonte: Adaptado de FCTUC (2009)

Dependendo do que se deseja, se faz a transformação inicial no petróleo aquecendo até uma certa temperatura. Por exemplo, em uma temperatura de 20° Celsius se obtêm o gás GLP, em 70° Celsius se obtêm produtos químicos, com 120° Celsius obtêm-se a gasolina, com 600° Celsius se origina combustíveis para barcos e indústria (FCTUC, 2009).

A temperatura mais importante para este trabalho é a que se encontra entre 300° a 500° Celsius, pois é nesta temperatura que o petróleo é transformado inicialmente em óleos lubrificantes. Posteriormente esses óleos lubrificantes são levados para outro forno onde o petróleo sofre destilação devido a pressão atmosférica que é exercida dentro do forno e com a

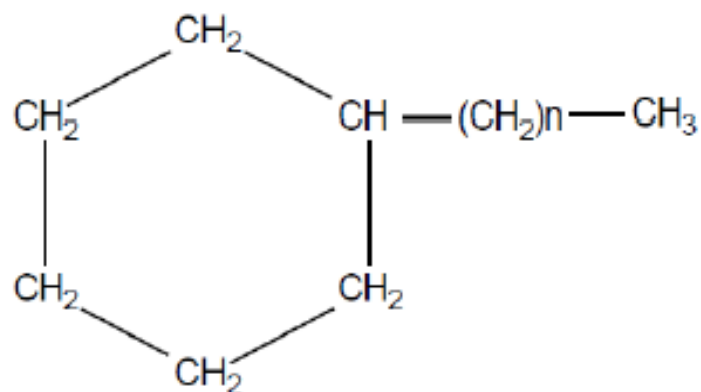
mistura de hidrocarbonetos contido dentro do forno, o óleo mineral isolante que é utilizado em transformadores é formado. A composição final do óleo é dependente do petróleo que lhe deu origem. Assim, quanto melhor for a qualidade do petróleo retirado do solo, melhores serão os produtos que deles serão derivados (FCTUC, 2009).

A maior extração de petróleo no território brasileiro se encontra no litoral do Espírito Santo até o norte do Rio de Janeiro, na chamada Bacia de Campos. Segundo Pena (2020), em uma publicação no site UOL, essa Bacia corresponde a 80% da produção nacional de petróleo, com uma produção média diária de barris de mais de um milhão e duzentos mil.

O primeiro óleo mineral produzido para o uso em transformador foi o Ascarel, que é uma mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo (uma bifenilda policlorada, apresentando um alto teor de cloro em sua fórmula). Como quase todos os óleos minerais, eles são tóxicos, bioacumulativos e possuem uma taxa de biodegradabilidade muito baixa. Entretanto, em 1976 devido a registros de contaminação ambiental por este tipo de óleo, os países produtores foram aos poucos diminuindo o seu uso (Friedenberg *et al*, 2014).

Atualmente, o óleo mais utilizado em transformadores de potência é o Naftênico, que também é proveniente do refino do petróleo. Ele é o mais utilizado por apresentar inúmeras qualidades e propriedades, como alto ponto de fulgor, condutividade térmica boa (capacidade do calor ser movimentado por todo o núcleo, evitando o sobreaquecimento de certos equipamentos), custo reduzido para sua produção, uma menor toxicidade e uma taxa maior de biodegradabilidade quando comparado ao óleo Ascarel. A Figura 4 mostra a fórmula e a estrutura molecular que este tipo de óleo apresenta. Ele é constituído por cerca de 19 a 23 átomos de carbono, são hidrocarbonetos saturados, apresentam cadeia fechada (Portella, 2010).

Figura 4 – Cadeia do óleo Naftênico



Fonte: Portella (2010)

Entretanto estes óleos acarretam sérios problemas relacionados ao que se refere a segurança ambiental (Ribeiro, 2010). Mesmo os óleos sofrerem uma mudança de sua base, eles ainda são bem prejudiciais ao meio ambiente, pois apresentam um ponto de combustão próximo a 160° Celsius e possui uma capacidade de ser biodegradável em apenas 25,2% e leva aproximadamente cerca de 15 anos para que ele seja totalmente degradado (Junior, 2006). Além disso, se tornam altamente corrosivos quando expostos a temperaturas mais elevadas do que a sua temperatura de operação e possuem uma baixa rigidez dielétrica.

Outro fato interessante foi salientado por Rozga (2013) que demonstrou que se 1 kg de óleo mineral derramado entrar em contato com água potável, pode deixar 5 milhões de litros de água impróprias para o consumo das pessoas. E como estes óleos lubrificantes apresenta um ponto de ignição relativamente baixo, uma explosão acidental pode acontecer. Rozga (2013), em seus estudos, mostrou que 1.000 kg de óleo mineral queimado emitem para a atmosfera cerca de 10 kg de substâncias nocivas, como material particulado e monóxido e dióxido de carbono.

Como mostrado, quando este tipo de óleo entra em contato com o ambiente ele pode causar muitos danos, assim o manuseio e transporte destes óleos devem ser realizados com cuidado e de maneira segura. Quando o transformador chega ao seu fim de vida, cerca de 30 anos de uso, seu descarte deve ser feito por empresas credenciadas, para que não ocorra graves acidentes entre o contato do óleo com a água. Outra questão importante é a troca do óleo ou até mesmo do transformador durante sua operação. Isto se deve ao desgaste do óleo após um determinado período de tempo, perdendo assim algumas características tais como a perda da capacidade de isolamento e a oxidação do óleo em uso.

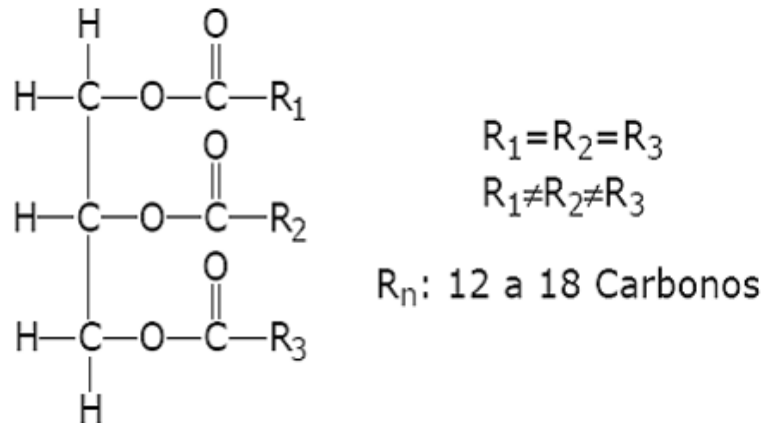
Devido à alta utilização da sua principal fonte de matéria-prima, o petróleo, estudos vem buscando substitutos para o óleo mineral desde os anos 90 (Shogren *et al.*, 2004). Desta forma, uma alternativa são os óleos produzidos através de grãos como o girassol e a soja.

2.3. Óleo de lubrificação de origem vegetal

Os estudos e pesquisa do óleo de origem vegetal para o uso em transformadores iniciou-se em 1990, em consequência da escassez do petróleo ao redor do mundo e também pela atual preocupação ambiental que estamos vivendo. Um dos estudos pioneiros acerca deste assunto foi com o óleo de soja em 1999, por meio da empresa *Waverly Light & Power* (Cannon; Honary, 1999).

Os óleos vegetais são constituídos de moléculas acilgliceróis de acordo com a Figura 5 que mostra uma cadeia simples que um óleo vegetal pode apresentar, que pode variar de números de carbonos, variando de 12 a 18 carbonos.

Figura 5 – Cadeia simples de um óleo vegetal



Fonte: UHREN (2007)

Cada semente oleaginosa tem a capacidade de produzir óleo quando passada por algum processo industrial, sua produtividade e porcentagem de obtenção do óleo depende da semente, do clima e do terreno onde ela está sendo cultivada (SEBRAE, 2007).

Estes óleos são originados de grãos vegetais (como grãos de soja, de girassol, amendoim, etc), o óleo bruto oriundo destes grãos é produzido por meio de alguns processos como a decorticação, descascamento, trituração, laminação, cozimento, prensagem ou extração por solvente. Depois que se consiga o óleo bruto proveniente destas diferentes formas de processo, ele é levado para outros três processos para que se consiga um óleo refinado. Estes processos são a degomagem neutralizada, o branqueamento e a desodorização. Assim, com este óleo refinado é possível fazer o papel de lubrificação e de refrigeração em um transformador (Moretto; Fett, 1998).

- **Decorticação:** este processo se caracteriza pela retirada de uma película que envolve as sementes, para que o grão possa aparecer. As máquinas, ou equipamento, giram em velocidades diferentes e em sentidos contrários para que as películas possam se desprender do grão. Os equipamentos que fazem esta operação possuem rolos estriados horizontais e discos verticais.
- **Descascamento:** ele é normalmente realizado fazendo o aquecimento e a secagem dos grãos, para que a separação da casca e do fruto possam ser mais fáceis. O descascamento

é iniciado quando os grãos são aquecidos e eles escoam por meio de uma passagem existente entre o rolo e a placa do metal da máquina específica para fazer este processo. O aquecimento e a secagem possuem grande importância, pois é por meio destas duas etapas que o grão se dilata e sofre retração da casca, respectivamente. Quando este processo é feito de maneira correta, o grão se torna matéria-prima com alto teor proteico e de fibras, características muito relevantes para se obter óleos brutos com qualidade.

- **Trituração:** trituradores tem o objetivo de cortar, moer e triturar sementes ou grãos através de rolos horizontais e oblíquos em seu interior. Quando o grão passa pelos rolos, acontece com ele a fragmentação do mesmo e também a laminação progressiva dos grãos.
- **Laminação:** este processo tem a finalidade de moer o grão logo após sua colheita e ainda úmido, para facilitar o processo. Sua função é produzir o amassamento do grão através de cilindros estriados e muito rígidos, que causa microfissuras do produto.
- **Cozimento:** ele ocorre por meio de um equipamento que produz calor suficiente para destruir microrganismo e tornar os grãos mais maleáveis para não ocorrer danos nos equipamentos que seguem a linha de produção.
- **Prensagem:** consiste em colocar as sementes ou grãos dentro de equipamento que faz a prensagem, ou esmagamento dos mesmo com o intuito de fazer a extração do óleo contido em seu interior. As máquinas que fazem essa operação possuem em sua estrutura, uma rosca sem fim (uma estrutura que para uma rosca que não para de girar) que faz a prensagem das sementes. Esta forma de obtenção do óleo é considerada a única com 100% de pureza e de naturalidade. Entretanto, este processo é muito demorado e pouco eficiente, sendo preciso cinco quilos de matéria-prima para que se obtenha um litro de óleo.
- **Extração por solvente:** neste processo, os grãos são triturados para que a penetração do solvente (éter etílico, etanol, metanol, entre outros) seja mais eficiente no interior do mesmo. Depois, o óleo contido nas sementes migra para o solvente devido à grande afinidade que este óleo possui com o solvente. Depois, esta mistura é lavada para um tanque onde o óleo e o solvente são separados. Porém, este processo impacta o meio ambiente por utilizar como solvente produtos derivados do petróleo.

Para a obtenção do óleo refinado, o óleo bruto passa por mais três processos:

- **Degomagem neutralizada:** o primeiro passo deste processo é colocar o óleo bruto em um produto (que na maioria das vezes é utilizado ácido), onde são retirados impurezas

e traços de metais, que podem aparecer de outros processos anteriores. Em seguida, ele é misturado com água e um pouco de soda cáustica para se surgem gomas precipitadas, para que elas sejam retiradas posteriormente. Dentro destas gomas estão impurezas contidas no óleo, os chamados óleos graxos.

- **Branqueamento:** sua principal função é a remoção de pigmentos indesejáveis. Assim como a degomagem neutralizada, ela também consegue retirar impurezas como sabões, metais pesados e produtos que podem aparecer durante a oxidação. Assim, ele consegue fazer o branqueamento, ou seja, retirar a cor do óleo.
- **Desodorização:** este processo possui a característica de retirar ou inativar substâncias que ainda podem ser encontradas no óleo como compostos odoríferos, substâncias tóxicas e ainda materiais provenientes da oxidação. Neste sistema, quando o óleo é aquecido entre 100° e 120° Celsius, se remove todo ar existente. Em seguida, é aquecido o produto entre 200° e 270° para que todos os materiais voláteis sejam evaporados.

Todos os processos descritos anteriormente, servem para purificar o óleo bruto obtido nos processos anteriores.

O primeiro óleo vegetal para fazer lubrificação e refrigeração em transformador foi produzido em 1999 utilizando sementes de girassol que foi denominado de BIOTEMP. Em 2006, a concessionária de energia de Minas Gerais fez o primeiro transformador utilizando óleo vegetal em seu núcleo na cidade de Contagem-MG (CEMIG, 2008).

Um das vantagens dos óleos vegetais são o fato de possuir um ponto de combustão perto dos 360° Celsius e alta taxa de ser biodegradável (97%), ou seja, quando ocorre algum acidente e o óleo entra em contato com o meio ambiente, ele leva em torno de 21 dias para ser degradado (Junior, 2006). Eles também não são tóxicos, possuem um menor risco de acidentes quando manuseados ou armazenados, suportam umidade e não perdem suas características químicas e físicas. São muito eficientes quando fazem a troca térmica no núcleo dos transformadores. Outra característica interessante é que eles conseguem suportar uma quantidade de 1 kVA maior por quilo do que com o óleo mineral, fazendo com que um transformador aguente uma potência ampliada no caso de uma descarga elétrica (Silva *et al.*, 2012). Ele apresenta também uma boa permissividade elétrica, diminuem a solicitação elétricas nos enrolamentos (Friedenberg; Santana, 2014).

2.3.1. Girassol

Girassol (*Helianthus annuus L.*) se destaca entre as diversas plantas oleaginosas devido à alta qualidade que seus óleos apresentam, quando se defrontada pelos outros tipos de plantas. Seu óleo pode ser utilizado no setor alimentício, aplicações nas indústrias (plásticos, sabão, detergente) e tem sido utilizado atualmente para a função de lubrificação e resfriamento de transformadores. O girassol se caracteriza por apresentar caule grosso e robusto, variando de 2 a 3 metros, mas existem espécies anãs com 40 centímetros de altura e com flores bonitas e grandiosas.

O girassol é famoso por apresentar o movimento em direção ao sol, chamado de heliotropismo, que significa que ela acompanha a movimentação do sol durante todo o dia. E por isso, devido a este movimento, ela consegue ser uma alta acumuladora de energia.

No território brasileiro o girassol teve início de cultivo na era dos colonizadores, onde se destacava a região sul do país, devido ao hábito de usar suas sementes torradas para alimentação (Câmara, 2001). O girassol é cultivado entre os meses de julho e setembro e colhida em meados de dezembro, assim este tipo de plantação abre uma grande janela para que se plante outros cultivos como soja ou milho (Leite *et al.*, 2007). Além disso, apresenta como característica ser resistente ao calor e ao frio.

Silva (1997) a considerou como uma planta de grande aproveitamento e é utilizada para diversas finalidades como planta ornamental, planta medicinal, pasto apícola, alimentações para animais, como adubo e etc. Seu óleo é utilizado também para alimentação humana nas frituras ou margarinas, utilizada para combustível e até sendo aproveitado em transformadores para seu sistema de refrigeração.

O estado de Mato Grosso é considerado o maior produtor de girassol do Brasil, representando cerca de 60% de toda a produção do país do ano anterior. Conforme salienta o IBGE (2020), que é o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, revelou que a produção de girassol em 2020 foi de aproximadamente 50.353 toneladas.

2.3.2. Soja

A soja (*Glycine max*) é considerada como um dos carros chefes para os produtores rurais, pelo fato de ser uma planta que lidera o ranking brasileiro de exportação de sementes (IBGE, 2020). Conforme IBGE (2020), a produção de soja foi cerca de 38 milhões de toneladas no ano de 2020, mostrando que são grandes porções de terras utilizadas para este tipo de plantio. As

áreas de plantio são sempre ampliadas e infelizmente alguns produtores fazem queimada ilegal para “limpar” o terreno e deixá-lo pronto para ser feita a produção. E isso pode implicar num aumento significativo de gases de efeito estufa no planeta.

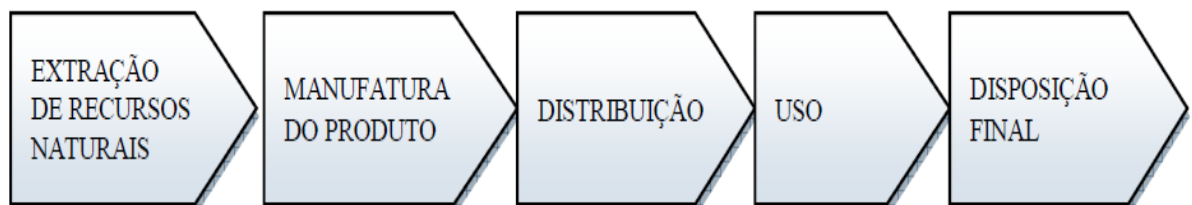
O estudo para que o óleo de soja seja utilizado para lubrificar e refrigerar transformadores é mais recente quando se comparado ao óleo de girassol, tendo poucos exemplares de transformadores que utilizam o óleo de soja em seu interior. Caso seja comprovado o uso com esta finalidade irá ser benéfico para o Brasil, pois é um recurso produzido em larga escala e baixo custo de produção. As trocas dos óleos minerais por vegetais serão importantes para o desenvolvimento sustentável, garantindo assim, a qualidade de vida para gerações futuras.

2.4. Análise de Ciclo de Vida (ACV)

Todos os produtos/processos possuem um “ciclo de vida”, ou uma linha de tempo, onde se englobam fases dessa vida, como o seu desenvolvimento (funcionamento), obtenção dos recursos para a sua confecção e produção, a sua utilização pela sociedade e até que ele chegue ao seu fim (que pode ser descarte, reuso ou até mesmo sua reciclagem). Assim, durante todas estas fases da vida de um produto/processo, são gerados impactos ao meio ambiente e a sociedade, por exemplo a extração da matéria-prima e de emissões de gases que aumentam o efeito estufa durante sua fabricação ou funcionamento (Ekvall, 2000).

A Figura 6 mostra todas as fases que produtos ou processos podem apresentar, indo desde a extração de recursos naturais (matéria-prima), passando pela manufatura do produto/processo, sua distribuição no mercado, uso do mesmo e vai até sua disposição final.

Figura 6 – Fases de um produto ou processo



Fonte: CHEHEBE (1997)

A análise de ciclo de vida (ACV) é muito mais conhecida pela sua sigla em inglês LCA (*Life Cycle Assessment*), sendo que esta forma de análise foi utilizada primeiramente nos Estados Unidos em 1990. Os conceitos da LCA são considerados uma parte essencial quando

se procura objetivos mais amplos, não somente quando se queira comparar dois produtos parecidos (Curran, 1999).

De forma geral, a ACV é “a compilação e avaliação das entradas, das saídas e dos impactos ambientais e potenciais durante o ciclo de vida do produto e identifica quais estágios possuem uma contribuição alta que impacta ambientalmente uma sociedade (Andrade, 2012; Mattsson; Sonesson, 2003). A ACV é uma das ferramentas mais integradas e completas para que o impacto ambiental de um determinado produto ou processo possa ser medido e quantificado.

Esta forma de análise tem a característica de mostrar todas as fases, inventários e atividades durante todo o processo de fabricação ou produção de um determinado produto. As fases compreendidas podem ser desde a aquisição da matéria-prima (ou plantio) até o seu descarte final e identificando possíveis resíduos gerados em cada fase. O estudo é amplamente ligado à sustentabilidade, pois ele consegue quantificar as emissões de gases que afetam e possam aumentar o efeito estufa (Liska, 2015).

A Tabela 1 vem demonstrando que a LCA já possui diretrizes estabelecidas pela ISO (Organização Internacional de Normalização), dando fundamento e base para esta forma de se analisar um determinado produto.

Tabela 1 – Normas ISO que embasam a LCA

ISO e DATA	NOME DA NORMA
ISO 14040 - 1997	Gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura.
ISO 14041 - 1998	Gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Objetivo e definição do escopo e análise do inventário.
ISO 14042 - 2000	Gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Avaliação de impacto do ciclo de vida
ISO 14043 - 2000	Gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Interpretação do ciclo de vida.
ISO/TR 14049 - 2000	Gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Exemplos de aplicação da ISO 14041, do objetivo e definição do escopo e análise do inventário.
ISO/TS 14048 - 2002	Gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Formato de documentação de dados.
ISO/TR 14047 - 2003	Gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Exemplos de aplicação da ISO 14042.
ABNT ISO 14044 - 2009	Gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações
ABNT ISO/TS 14071:2018	Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Processos de análise crítica e competências do analista.

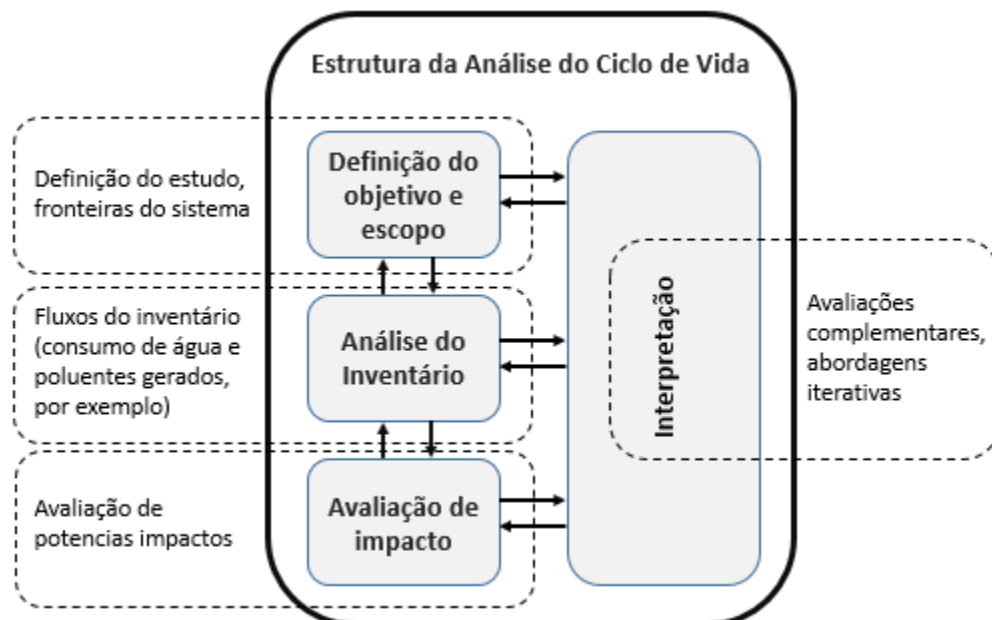
Fonte: Adaptado de ISO (2000)

Atualmente, a norma utilizada aqui no Brasil é a ABNT ISO/TS 14071:2018 que apresenta requisitos e diretrizes para a realização em qualquer estudo de ACV e as competências requeridas para a análise crítica da versão anterior de 2009 (ABNT, 2021).

Um estudo de ACV completo consegue determinar inúmeros aspectos ambientais, que são mais conhecidos como impactos ambientais. Os mais conhecidos são mudança climática, depleção de ozônio, acidificação terrestre, uso do solo agrícola, etc.

Entretanto, uma boa análise de ciclo de vida segue uma determinada estrutura e uma linha de pensamento. A Figura 7 vem mostrando a estrutura de um bom estudo de ACV, conforme a ISO 14044 (2009, a), isso significa que, todo estudo de ACV deve seguir obrigatoriamente este formato que engloba quatro principais áreas: a definição do objetivo e escopo, a análise do inventário dos processos envolvidos, a avaliação dos impactos relacionados a entrada e as saídas dos sistema e a interpretação dos dados e resultados (Berlim, 2002). Nota-se que a fase de interpretação está ligada a todas as fases da estrutura de ACV, demonstrando que ela é interligada durante todo o estudo.

Figura 7 – Estrutura de um ACV



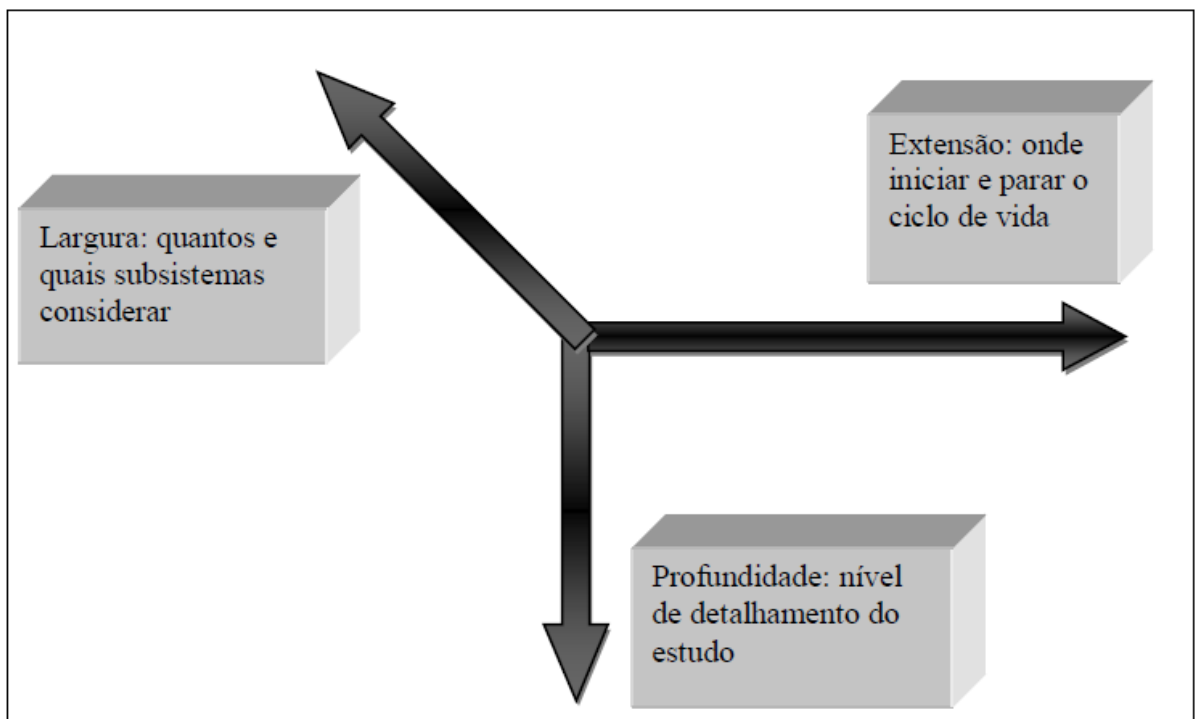
Fonte: Adaptado de PFISTER (2017)

2.4.1. Definição do objetivo e escopo

Conforme a ABNT (2009a) define que no objetivo de um estudo de ACV, não pode haver equívocos na definição do que vai ser estudado, tornando assim o objetivo claro para que não haja duas possíveis definições (ambiguidade) do estudo. Tem que ser mostrado também o público alvo que se queira atingir, fazendo com que os resultados do estudo sejam direcionados para estas pessoas. Conseqüentemente, o objetivo tem que ser claro e objetivo para o público alvo, para que ocorra uma boa condução do estudo e dos resultados.

O escopo do estudo de ACV tem que ser bem definido pelo objetivo, para que suas três dimensões possam ter sentido e qualidade. As três dimensões que o escopo possui são a extensão, profundidade e a largura. A Figura 8 faz a caracterização destas três dimensões, onde a extensão se refere onde começar e onde irá terminar o estudo, a profundidade se refere a quão detalhado será o estudo e a largura quantos e quais subsistemas serão incluídos ou excluídos.

Figura 8 – Dimensões envolvidas pelo escopo



Fonte: CHEHEBE (1997)

Uma curiosidade é que o objetivo e escopo podem ser mudados durante o processo de estruturação do ACV e também pelos resultados obtidos durante a interpretação dos resultados na fase final do estudo.

ABNT (2009a) define as etapas para que se defina o objetivo e o escopo de um estudo de ACV, que passa desde a definição da função do sistema, unidade funcional e fluxo de referência, estabelecimento do sistema de produto, definição das fronteiras do sistema de produto, definição dos procedimentos de alocação, seleção dos impactos, etc.

A unidade funcional determina a medida de desempenho das entradas e saídas relacionadas ao produto, que dará suporte a futuros cálculos que virão posteriormente no estudo. O fluxo de referência é associado a unidade funcional, que representa a quantidade de produtos para a produção do produto, a unidade de materiais utilizados (pode ser em litros, quilogramas, quilos, etc).

Heijungs *et al.* (2007) diz que o escopo deve ser muito bem definido, fazendo com que o estudo possua uma boa extensão (mostrando onde o estudo vai começar e terminar), ter uma boa largura (quais os subsistemas que serão incluídos ou excluídos) e uma boa profundidade (o nível de detalhamento que o estudo irá ter), fazendo com que o objetivo seja alcançado.

Outra etapa importante é a fronteira do sistema, que indica onde o estudo começa e termina. As fronteiras devem ser claramente identificadas, mostrando os limites que serão abordados no estudo. Quando se faz as delimitações do estudo, os inventários e os impactos serão somente para essas delimitações, não para fluxos de operações fora do limite (Guinée *et al.*, 2002). As delimitações das fronteiras devem responder as questões propostas no objetivo do estudo. As fronteiras podem excluir determinadas partes de um processo que não vai ser contemplado pelo estudo. É pertinente nesta fase do estudo se fazer um diagrama delimitando assim de onde o estudo irá começar e onde ele vai ser finalizado (Coltro, 2007; Goedkoop *et al.*, 2013).

E na etapa de alocação é onde se encontra a divisão adequada dos fatores de impacto entre o produto ou processo principal do estudo com os subprodutos que eles podem ter. Esta etapa é muito utilizada em estudos em que um produto tenha subprodutos dentro da sua cadeia de produção.

2.4.2. Inventário

Esta parte de análise de inventário é considerada a segunda etapa de um estudo de ACV. A ABNT (2009a) salienta que é nesta parte que acontece a compilação e quantificação tanto das entradas quanto das saídas do produto estudo durante todo o seu ciclo de vida. Por exemplo, ele compila e quantifica a energia utilizada, matéria-prima, coprodutos quando houver, as emissões para ar, emissões para a água, emissões para o solo e também os resíduos sólidos que possa apresentar.

Nesta etapa os materiais consumidos e produzidos durante todo o ciclo de vida (matéria-prima, energia, transporte, etc) são identificados e quantificados, para que possa notar quais deles possui maior ou menor impacto no meio ambiente (Zbicinski *et al.*, 2006). Ito (2011) menciona que esta parte do estudo é muito técnica, onde as entradas e as saídas do produto ou processo em estudo são coletadas e quantificadas, por meio de dados primários (coletados direto da fonte) e por meio de dados secundários (coletados da literatura).

Como é nesta parte que são compilados e quantificados as entradas e saídas, a Figura 9 mostra esquematicamente como são feitos os fluxos de entradas e saídas do processo/produto estudado.

Figura 9 – Fluxos de entrada e saídas



Fonte: GUINÉE *et al.* (2002)

O inventário também compreende todo o processo de levantamento de dados para que se possa fazer os cálculos dos fluxos de entradas e saídas. Como esses dados são conhecidos e as informações podem ser adquiridas em visitas a lugares e perguntas a pessoas conhecedoras dos fluxos do produto ou processo que está sendo estudado, ele se torna interativo por esses motivos.

2.4.3. Avaliação de impactos

Esta fase é subsequente ao levantamento do inventário. Aqui os potenciais impactos ao ambiente são identificados, caracterizados e avaliados, através das categorias de impactos que serão escolhidos.

Hauschild *et al.* (2012) diz que os impactos ambientais que cada emissão possa ter (na água, no solo e no ar) podem ser modelados quantitativamente através de um modelo de caracterização. Esses modelos de caracterização podem fazer cálculos de substâncias específicas possam impactar ao meio ambiente. Quando se queira realizar esses cálculos, pode-se relacionar a um determinado processo unitário, relacionando a mesma unidade funcional e validando assim os dados obtidos.

Esses modelos de caracterização são classificados em duas categorias, e se modificam de acordo com a abordagem do estudo em que se queira contemplar. As categorias são conhecidas como *midpoint* (ponto médio) e *endpoint* (ponto final). Na categoria *midpoint* todas as emissões são transformadas em categorias de impacto. Porém, elas não contemplam características finais no percurso ambiental (Cavalett *et al.*, 2012). Na categoria *endpoint*, Cavalett *et al.* (2012) salienta que nesta categoria a gravidade e as consequências de impactos abordados no *midpoint* possam gerar e interagir negativamente no futuro a longo prazo.

Existem vários modelos que fazem essas caracterizações e conseguem englobar estas duas formas de categorias *midpoint* e *endpoint*, como por exemplo o CML 2011, Eco-indicador 99, ReCiPe, EDIP 2003, entre outros.

Zbicinski *et al.* (2006) salienta que a avaliação de impactos deve incluir três passos obrigatórios:

- Seleção das categorias ambientais, indicadores de categorias e modelos de caracterização são selecionadas e definidos. Nos indicadores de categorias têm-se: ruído, recursos abióticos e bióticos, uso do solo, aquecimento global, toxicidade humana, etc.
- Classificação: onde os dados são correlacionados e apurados nas categorias de impactos que foram escolhidos. O potencial que esses impactos possam ter são calculados com base nos inventários levantados.
- Caracterização: os dados que contém a quantidade de matérias da saída são calculados por meio de fatores de caracterização que produzem indicadores números para cada categoria de impacto escolhido.

Cada categoria de impacto influencia o meio ambiente de maneiras diferentes. Dessa forma, tem que se escolher as categorias de impactos coerentes com o objetivo do estudo, para que todas as categorias de impacto importantes estejam dentro do estudo e categorias menos

importantes não sejam levadas em conta, para que não ocorra excesso de informação (Goedkoop *et al.*, 2013).

Em sequência, tem a definição dos impactos mais relevantes que serão abordadas pelo estudo.

2.4.3.1. Formação de material particulado (*midpoint*)

Alves (2005) diz que material particulado é empregado para designar misturas de partículas sólidas ou gotas de líquidos que são encontrados na atmosfera. As partículas podem ser grandes, podem ser escuras ou claras, visíveis (fumaças ou fuligens) ou não visíveis (vistas somente por microscópio). Esse material pode variar também pela forma de origem, podendo ser natural ou artificial. Quando sua origem é natural podem ser partículas que evaporam do mar, poeiras, pólen das plantas e por erupções geotérmicas ou vulcânicas. As queimadas também são consideradas fontes de poluição do ar, causando problemas respiratórios para as pessoas (Alves, 2005). Já as de origem artificial é proveniente por motores de veículos, caldeiras de indústrias e até por fumaça de cigarro.

O material particulado é dividido pelo seu intervalo de tamanho. Quando o tamanho é de 2,5 μm de diâmetro é denominada partícula fina e quando possuem um diâmetro maior que 2,5 μm ela é denominada partícula grande (Gennari, 1991).

Existem um órgão, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que controla a quantidade deste material suspenso no ar que são provenientes das indústrias, pois quando ocorre uma alta taxa de material particulado no ar, pode haver inúmeros efeitos negativos para as pessoas como problemas respiratórios e levando até a morte por sufocamento em crianças pequenas e pessoas idosas.

2.4.3.2. Formação de oxidantes fotoquímicos (*midpoint*)

Estes oxidantes podem ser formados por distintas maneiras através da geração de energia, saem por meio de escapamento dos carros, indústrias químicas, atividades que usam solventes, devido a produção industrial, atividades onde emitem oxônio e óxidos de nitrogênio quando queimados (Dutra *et al.*, 2009). Estas substâncias em excesso no ar, podem ser ativadas pela luz do sol, eles formam aglomerados de gases agressivos, denominados assim oxidantes fotoquímicos.

O ozônio é o gás mais importante, pois é por meio dele que a quantidade de oxidantes fotoquímicos é medida na atmosfera. Quando em alta quantidade, esses oxidantes podem ser muito prejudiciais a população, provocando danos à saúde, como irritabilidade dos olhos, mucosa nasal e tosse. E quando exposto por vários dias, pode levar a lesão do tecido epitelial das vias aéreas.

2.4.3.3. Radiação ionizante (*midpoint*)

A radiação é definida como a energia que se propaga por meio de uma fonte emissora, considerada uma energia em trânsito. A radiação ionizante se apresenta por diferentes partículas, como a partícula alfa, os elétrons, os prótons, etc. A radiação também pode se apresentar por meio de ondas eletromagnéticas.

A radiação ionizante é caracterizada como aquela energia que é capaz de retirar um elétron de um átomo. Okano e Yoshimura (2010) relataram que esta radiação ionizante tem a capacidade de retirar o elétron de qualquer átomo que ele entra em contato, fazendo com que este átomo interage de forma diferente com outros átomos. Devido a esta interação diferente, pode causar danos a seres humanos como causar queimaduras de pele e em altas concentrações causar mutações genéticas e danos irreversíveis as células.

Esta forma de radiação é extremamente prejudicial quando exposta ao meio ambiente, podendo deixar solos impróprios para o plantio, causar danos as pessoas e animais (levando os a morte, em casos graves).

2.4.3.4. Toxicidade humana (*midpoint*)

Toxicidade se refere a qualidade e quantidade que uma substância pode apresentar quando se entra em contato com um ser vivo e o impacta de forma negativa. Estas substâncias entram em contato com os seres humanos de diversas formas como a inalação (pelo ar), ingestão e até mesmo pela pele. Assim, toxicidade humana se refere a substâncias tóxicas que quando em contato com seres humanos podem causar doenças, irritações ou levar até a morte dependendo da quantidade e do ser vivo.

Essas substâncias tóxicas podem ser oriundas de pesticidas, herbicidas e fungicidas que são utilizados nas plantações para aumentarem os desempenhos dos grãos (como girassol, soja, amendoim, trigo, etc).

2.4.3.5. Mudanças climáticas (*midpoint*)

Esse tipo de impacto é devido a influência que as ações humanas geram para o nosso planeta. Ações como queimadas, aumento das concentrações de gases que intensificam o efeito estufa, o desmatamento para criação agrícola e da pecuária causam impactos negativos para o planeta.

Algumas monoculturas são feitas em solo de desmatamento por queimadas, o que significa que, antes nestes lugares havia florestas e campos e agora, existem campos para plantio de grãos. Os gases provenientes da queima de florestas e campos (como o dióxido de carbono, monóxido de carbono e óxido de nitrogênio) são as grandes responsáveis pelo aumento das mudanças climáticas, lançando no ar toneladas de substâncias tóxicas para o meio ambiente.

Ao que se refere ao efeito estufa, os principais gases que o intensificam são o dióxido de carbono (provenientes da queima de combustíveis fósseis e do processo industrial), o metano (resultante da pecuária, queima e produção de madeira e carvão, e dos aterros sanitários), o óxido nitroso (derivado das atividades agrícolas) e os gases fluoretados (são os Clorofluorcarboneto, altamente nocivo ao meio ambiente).

As mudanças climáticas podem ser por meio de duas formas: de forma natural ou por ações antrópicas. As mudanças de forma natural se referem a mudanças naturais da intensidade do sol, mudanças do eixo do planeta, por meio de atividades vulcânicas etc. Já as mudanças de origem antrópica são aquelas relacionadas as ações humanas, já mencionadas anteriormente.

A principal mudança climática que temos é o aquecimento global, que é o aumento da temperatura média do planeta, que por sua vez causa vários problemas como a variação do regime de chuvas no mundo e o aumento do nível do mar (devido ao derretimento das calotas polares).

2.4.3.6. Ecotoxicidade em água doce (*midpoint*)

Este tipo de impacto segue a mesma definição de toxicidade humana, pois a toxicidade (ou ecotoxicidade) é a capacidade de uma determinada substância em causar um dano a um organismo (Hobold, 2007). Deste forma, a ecotoxicidade em água doce pode ser entendida como a quantidade de substâncias tóxicas que podem ser encontradas em água doce. Essas substâncias, em suma, são oriundas de agrotóxicos utilizados para prevenir a ação de ervas daninhas e de insetos que possam prejudicar o crescimento das plantas e das colheitas (Ribeiro

et al., 2007). Devido ao aumento de campos para plantio, conseqüentemente, o uso de agrotóxicos aumenta as chances de contaminação.

A ecotoxicidade em água doce é o impacto que se caracteriza por medir a quantidades de substâncias nocivas a seres vivos que são encontrados em águas doces.

2.4.3.7. Eutrofização de água doce (*midpoint*)

Eutrofização é a forma de poluição que são encontrados em corpos de d'água como rios e lagos. Esta forma de poluição causa uma mancha turva na água que causa uma diminuição drástica do nível de oxigênio dissolvido na água, que conseqüentemente, acarreta em mortes de animais e de plantas aquáticas.

Essa poluição é oriunda de ações humanas por meio de duas formas, em sua maioria, por meio do despejo ilegal de esgotos e lixos humanos nesses corpos de água e a contaminação desses corpos por excesso de agrotóxicos utilizados na agroindústria. Assim, este impacto mede a concentração de poluição encontrados em corpos de água doce como bacias hidrográficas, aquíferos e poços artesianos.

2.4.3.8. Eutrofização marinha (*midpoint*)

A eutrofização marinha segue a mesma definição da eutrofização em água doce, como sendo o aumento excessivos de minerais (como fosfato e nitrato) devido as mesmas ações humanas salientadas no impacto anterior. Com o acúmulo destes minerais, ocorre uma acelerada multiplicação de micro-organismos na água, causando uma camada densa na superfície das águas que impossibilita a passagem da luz solar para regiões mais profundas do mar. Assim, este impacto mede estas quantidades de minerais que são encontrados em águas marinhas que podem causar mortes a animais e a plantas aquáticas.

2.4.3.9. Depleção da camada de ozônio (*midpoint*)

A camada de ozônio é considerada uma “barreira” contra os raios solares, pois ela tem a capacidade de filtrar os raios ultravioletas do sol, antes que eles cheguem a superfície do planeta. Esses raios são bem nocivos aos seres vivos e ao meio ambiente.

O homem, devido aos gases em excesso (como o monóxido e o dióxido de carbono) que estão injetando no ar, por meio de escapamentos dos carros, fumaça das fábricas e das queimadas, se interagem com o ozônio de forma negativa, fazendo com que a concentração do ozônio diminua. Assim, está se formando um grande buraco na camada de ozônio, na qual os

raios ultravioletas não são filtrados e passam com força total pela atmosfera e chegam até o planeta com carga máxima (Solomon, 1999).

Os raios ultravioletas quando não filtrados, podem provocar vários danos aos seres humanos como queimaduras e câncer de pele, afetar o sistema imunológico e acelerar o crescimento excessivo de plantas (Ucko, 1992).

Este tema é muito discutido atualmente, pois o aumento do buraco da camada de ozônio causa grandes danos ao meio ambiente e aos seres humanos. Este impacto consegue medir quantitativamente a concentração destes gases poluidores na atmosfera.

2.4.3.10. Ecotoxicidade terrestres (*midpoint*)

É um impacto semelhante a ecotoxicidade em água doce, porém, este impacto se relaciona a interação negativa que uma substância possa ter no solo do planeta. Essas substâncias podem ser provenientes de produtos agrotóxicos e lixos urbanos. E quando estas substâncias entram em contato com o solo terrestre, podem deixá-lo impróprio para o plantio devido a retirada de nutrientes do solo, pois esses produtos interagem negativamente com algumas substâncias encontradas no solo.

2.4.3.11. Acidificação terrestre (*midpoint*)

A acidificação do solo é algo muito importante para ser controlado e verificado, pois é capaz de ser limitante ao crescimento de plantas, vegetais e a produtividade agrícola do solo. Com um aumento exponencial de substâncias como o alumínio e o manganês pode tornar o solo tóxico para as plantas e aumentar o pH do solo, tornando-o impróprio para o crescimento de plantas e árvores.

Esta acidificação não impacta somente as plantas e vegetais, também interage negativamente com as atividades dos microrganismos do solo, diminuindo alguns nutrientes que esses microrganismos depositam na terra.

2.4.3.12. Ocupação do solo (*midpoint*)

Este tipo de impacto refere a ocupação humana em lugares onde são impróprias para a construção de moradias e alojamentos, como por exemplo próximas de rio, matas auxiliares, montanhas, florestas (para extração ilegal de madeiras ou minerais), campos (para plantação de inúmeros grãos). São lugares onde não deveria ser encontradas essas construções.

O uso da terra é relacionado com fatores econômicos (trabalho humano) que provoca transformações nos fatores naturais, que podem provocar: inundações, enchentes, erosão do solo, perda de moradia e pode levar a morte de animais, plantas e até de seres humanos.

2.4.3.13. Ecotoxicidade marinha (*midpoint*)

O ambiente marinho é muito complexo e diversificado, havendo dentro dele inúmeros ecossistemas como rios, lagos, mares e oceanos. A vulnerabilidade deste ambiente é muito sensível, assim, qualquer substância que entra em contato com este ambiente pode causar vários danos negativos ao mesmo.

Essas substâncias também são originadas a ações humanas, que fazem seu depósito inadvertidamente nesses ambientes, mudando a composição da água e de seus nutrientes que pode levar a morte de plantas, algas e animais marinhos.

2.4.3.14. Transformação do solo (*midpoint*)

O solo é a camada superficial da crosta terrestre, formado por um conjunto de minerais e matérias orgânicas de animais e plantas. As ações humanas, mais uma vez, podem causar transformações do solo através de construções de cidades, asfaltamento de regiões rurais e erosões.

A erosão é considerada a mais preocupante destes impactos, pois este é um processo que consiste no deslocamento do solo sem cobertura, onde camadas de terras são arrastadas para lugares mais baixo de onde elas estavam situadas.

Outra transformação é a desertificação, muito comum em regiões áridas, que se caracteriza pela perda da capacidade de produção do solo. Queimadas e desmatamento são ações humanas que podem aumentar significativamente este processo de desertificação.

2.4.3.15. Depleção de recursos naturais (*midpoint*)

Este tipo de impacto se refere a diminuição dos recursos naturais mediante ao uso exagerado pelo homem. Os recursos naturais, mesmo sendo sustentáveis, levam-se anos para se formar no solo e quando o homem não respeita este tempo e faz a extração exagerada destes recursos, eles vão se esgotando.

Recursos como petróleo, ferro, metais, ouro, estanho, cobre, alumínio e entre outros fazem parte do nosso cotidiano e servem para inúmeras funções como combustível, construções e

atividades. Com o crescimento das cidades e das economias dos países, esses recursos vão sendo retirados do solo de maneiras muito mais rápidas do que eles conseguem se regenerar, havendo assim uma depleção dos recursos naturais.

Caso esta maneira de extração não for controlada e monitorada, dentro de alguns anos, estes recursos possam se tornar escassos, fazendo com que o homem procure novos produtos que podem ser piores do que os naturais.

2.4.3.16. Depleção dos combustíveis fósseis (*midpoint*)

Nos carros, máquinas e equipamentos são utilizados como energia combustíveis que são originados a partir de petróleo, do carvão ou gás natural. Todas estas formas de energia são oriundas de combustíveis fósseis e devido ao alto consumo deste insumo pelas pessoas, esta forma de matéria-prima está acabando em nosso planeta. Além disso, esta forma de extração gera inúmeros impactos para o nosso planeta como queima de gases poluentes que podem aumentar o aquecimento global ou o efeito estufa, podem causar desequilíbrio da fauna e flora marinha/terrestre, desmatamento e etc.

Como consequência desta forma de extração intensiva destes materiais, seus estoques estão se esgotando em nosso planeta.

2.4.3.17. Depleção da água (*midpoint*)

A água é uma das substâncias mais importantes para a vida dos animais, para as plantas e para todos os seres humanos. Ela também possui uma enorme importância para a produção do país, pois a água é muito importante para o setor agrícola. Para este setor, a falta ou excesso de água pode afetar o crescimento e o rendimento da plantação.

A diminuição de mananciais de água potável pode diminuir o acesso deste pelas pessoas e animais, e sem água potável para o consumo destes seres, pode levar a morte dos mesmos.

2.4.3.18. Danos à saúde humana (*endpoint*)

Este impacto se refere a como os impactos descritos anteriormente possam impactar a saúde humana, podendo levar até a morte. Este impacto é mais conhecido como DALY, que procura combinar dois fatores para se ter uma ideia melhor da qualidade de vida. Estes fatores são a mortalidade e a morbidade. Mortalidade se refere ao número de mortes registradas em uma determinada região do país em um determinado período de tempo. Morbidade é a quantidade

de pessoas que apresentam uma determinada doença em uma região em um determinado período de tempo.

DALY significa *disability adjusted life years*, ou seja, os anos de vida perdidos devido aos dois indicadores citados anteriormente. Assim, esses anos perdidos são deduzidos da média de uma população.

2.4.3.19. Danos à diversidade do ecossistema (*endpoint*)

Este tipo de impacto se refere aos danos tanto para animais quanto para plantas. Este impacto tem-se aumentado significativamente devido a algumas ações humanas como crescimento populacional e em uma distribuição desigual de riquezas em nosso mundo. O homem destrói o habitat de animais e plantas para construção de casas, rodovias e pastos para a produção do setor pecuário.

Assim, essas ações humanas estão criando um colapso no ecossistema que o mesmo não está conseguindo se recuperar, e uma vez o ecossistema não se recupera, animais e plantas podem ser extintos, faixas de terras podem sofrer desertificação, aumento da temperatura terrestre, perda de nutrientes para o solo, etc.

Uma outra coisa que pode diminuir muito a diversidade do ecossistema é a extração sucessiva e descontrolada dos recursos naturais. A contaminação do solo, do ar e da água também pode exercer influência sobre danos ao ecossistema.

2.4.3.20. Danos aos recursos naturais (*endpoint*)

Recursos naturais são aqueles produtos que o nosso planeta tem a capacidade de produzir (como petróleo, gás natural, etc) sem que haja a ação humana para a sua produção. Esses materiais podem ser o petróleo, o gás natural, o ferro, o ouro entre outros e eles são extremamente importantes para várias atividades e ações do nosso cotidiano.

Com a retirada excessiva e inadequada destes itens pelos seres humanos, eles podem se esgotar. Então, este impacto consegue medir quanto e como as ações humanas podem diminuir o número de reservas e de quantidade destes materiais em nosso planeta.

2.4.3.21. Unidade dos impactos

A Tabela 2 mostra todos os impactos analisados e suas respectivas unidades de referência.

Tabela 2 – Todos os impactos e suas respectivas unidades

Nome da categoria	Unidade resultante
Formação de material particulado	kg (PM10 para o ar)
Formação de oxidantes fotoquímicos	kg (NMVOC** para o ar)
Radiação ionizante	kg (U235 para o ar)
Toxicidade humana	kg (14DCB para o ar urbano)
Mudança climática	kg (CO ₂ para o ar)
Ecotoxicidade em água doce	kg (14-DCB para água doce)
Eutrofização da água doce	kg (P para água doce)
Eutrofização marinha	kg (N para água doce)
Depleção da camada de ozônio	kg (CFC-11* para o ar)
Ecotoxicidade terrestre	kg (14-DCB*** para solo industrial)
Acidificação terrestre	kg (SO ₂ para o ar)
Ocupação do solo	kg (m ² x ano)
Ecotoxicidade marinha	kg (14-DCB para água salgada)
Transformação do solo	kg (m ² em área natural)
Depleção de recursos naturais	kg (Fe)
Depleção dos combustíveis fósseis	kg (Petróleo)
Depleção da água	m ³ (água)
Danos à saúde humana	anos (perda de anos de vida por incapacidade)
Danos à diversidade do ecossistema	anos (perda de espécie durante o ano)
Danos aos recursos naturais	\$ (aumento do custo)

*CFC-11: clorofluorcarbono

**NMVOC: composto de carbono orgânico volátil não metano

***14-DCB: 1,4 diclorobenzeno

Fonte: Furtado (2014).

2.4.4. Interpretação

É nesta última fase, onde todos os dados levantados e calculados durante o estudo são interpretados pelo elaborador do ACV. Caso o elaborador esteja satisfeito com o resultado dos dados e dos impactos envolvidos, chega-se ao fim do estudo e se faz a conclusão do mesmo. Entretanto, se o elaborador do estudo não esteja de acordo com os resultados e dos impactos envolvidos, se faz toda uma reanálise do estudo para se verificar se foi omitido algum dado, colocado de forma errônea. Desta forma, verifica-se novamente o objetivo e uma nova análise do inventário é realizada a procura de dados falsos ou errados, os tipos de impactos são

analisados para se verificar se eles foram escolhidos de forma certa e posteriormente o estudo é realizado novamente. Após feito isso, se o elaborador estiver satisfeito, o estudo é finalizado, caso contrário, uma nova reanálise do estudo é realizada até que o objetivo seja alcançado.

Assim, se bem feita a interpretação, ela torna os resultados bem claros e objetivos, fazendo com que o público alvo os compreenda. Porém, as fronteiras estabelecidas no princípio do estudo devem ser respeitadas. Nesta fase são incluídos quais são os impactos ambientais mais significativos dentre os impactos escolhidos, além disso, são incluídas as conclusões do estudo e recomendações para que o estudo possa ser melhorado com o intuito de que os impactos significativos possam ser reduzidos ou até mesmo extintos (ABNT, 2005).

Como base de pesquisa, este estudo segue alguns trabalhos, artigos e teses publicados que também tiveram em seu estudo óleo de transformadores, ACV para óleo mineral, sobre plantio e colheita da soja e do girassol e extração de petróleo. Por exemplo, para um ACV de óleo mineral, teve como base o trabalho de Phoebe Cuevas em 2010 pela universidade de Pittsburgh, onde o autor fez um estudo que teve o objetivo de se comparar biolubrificantes com lubrificantes de base mineral. Para auxílio para um bom ACV para transformadores e entender como é seu funcionamento, teve como auxílio o trabalho realizado por Miro Hegedic *et al* em 2016, onde os autores procuraram fazer um ACV de transformadores, assim procurando salientar os impactos que podem encontrados e seus resultados.

Já no que se refere a óleos vegetais, especificamente para óleo de girassol e de soja, teve como base o estudo de Filipa Figueiredo *et al* em 2012 que fez uma análise do óleo de girassol e de Rendi Dalgaard *et al* em 2008, onde os autores fizeram um estudo de ACV a respeito sobre o óleo de soja.

Entretanto, não foram encontrados estudo que englobam ACV com óleos vegetais utilizados em transformadores. Logo, este trabalho é um estudo pioneiro para este fim de análise ambiental e para comparação entre estes três tipos de modos de refrigeração.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo de ACV foi feito de acordo com a ISO 14040 (ISO, 2009), pois é onde são encontrados os conceitos e modelos para uma boa sequência da metodologia ACV. Foram analisados diversos inventários encontrados na literatura, de entradas e saídas, dos óleos minerais e vegetais.

Para o óleo de girassol, os estudos que foram utilizados como base, foram os trabalhos de Tsoutsos *et al.*, (2010); Viana (2008) e Figueiredo *et al.*, (2012). No que se refere ao óleo de soja, os artigos de base foram Dalgaard *et al.*, (2008); Hou *et al.*, (2011) e Tsoutsos *et al.*, (2010). Já para o inventário do óleo mineral, foram utilizados como base os estudos realizados por Viana (2008) e McManus *et al.*, (2004).

Para os cálculos e quantificação dos potenciais impactos, este estudo teve auxílio do software SimaPro e do método ReCiPe *midpoint*. A escolha deste software e deste método foi pelo fato de serem um dos mais utilizados para um estudo de ACV. As categorias de impactos são os impactos *midpoint*, que foram descritos na seção 2.4.3.

Como salientado anteriormente, temos que definir para um estudo de ACV o escopo e o objetivo do estudo, sua unidade funcional, quais os limites dos sistemas, os inventários utilizados no estudo, os potenciais impactos encontrados e a conclusão ou interpretação dos dados quantificados.

3.1. Software SimaPro

Como um estudo de ACV gera grande números de informações, de dados e de cálculos é necessário um software completo para que se possa comparar esses cálculos e dados com as categorias de impactos utilizados. Existem diversos software para fazer essas comparações, sendo os mais utilizados o OpenLCA (de origem alemã), o GABI 6 (também desenvolvido na Alemanha) e o que será utilizado por este estudo o SimaPro (foi desenvolvido na Holanda).

O SimaPro foi desenvolvido por uma empresa holandesa chamada PRé Consultans e este é um dos softwares mais utilizados pelas pessoas em pesquisas de estudo de ACV. Ele consegue guardar os dados coletados e fazem a análise desses dados com os impactos ambientais escolhidos, seguindo as normas ISO.

Um dos motivos pelo seu amplo uso hoje em dia em estudos, é devido a base de dados que ele consegue abranger como o Ecoinvent v3, o ELCD e da indústria Agri-footprint.

3.2. Método ReCiPe

É um dos métodos mais utilizados para se realizar um ACV e amplamente utilizado em diversos estudos no Brasil (Goedkoop *et al*, 2013). Ele é de origem holandesa, desenvolvida pela PRé (*Product Ecology Consultants*) e é considerado uma renovação de outros dois modelos muito utilizados, o Eco-Indicador 99 e o CML.

Ele tem a característica de fazer a conversão das emissões de substâncias perigosas e as extrações de recursos naturais em indicadores de impactos. Os indicadores são escolhidos de acordo com o objetivo do estudo e se diferem em *midpoint* e *endpoint*.

Quando o indicador escolhido for *midpoint*, 18 categorias de impacto são abrangidas por ele e os impactos estão relacionados a danos à saúde humana, danos à diversidade do ecossistema e a danos à disponibilidade de recurso. Quando o dano é referente a saúde humana as categorias de impactos são: formação de material particulado, formação de oxidantes fotoquímicos, radiação ionizante, toxicidade humana e mudanças climáticas. Quando o dano é à diversidade do ecossistema, as categorias são: ecotoxicidade em água doce, eutrofização de água doce, eutrofização marinha, depleção da camada de ozônio, ecotoxicidade terrestre, acidificação terrestre, ocupação do solo, ecotoxicidade marinha e transformação do solo. E quando o dano for em relação a disponibilidade de recursos, as categorias são: depleção de recursos naturais, depleção de combustíveis fósseis e depleção da água. E na categoria *endpoint*, as pontuações são apresentadas em três categorias que expressam a gravidade do impacto ambiental. As categorias são: danos à saúde humana, danos à diversidade do ecossistema e danos aos recursos naturais (Goedkoop *et al*, 2013).

Pelo fato deste método englobar impactos importantes e possuir estas duas formas de categorias *midpoint* e *endpoint*, este método foi escolhido para embasar este estudo e assim auxiliar para os resultados futuros que serão discutidos.

3.3. Escopo e objetivo do ACV

Conforme a ISO 14040 (ISO, 2009), o escopo e o objetivo são a primeira etapa para um estudo de ACV. Nesta etapa, evidencia-se o público-alvo que será atingido pelos resultados do estudo.

O escopo inicia-se com o objetivo do estudo. Sendo que para este trabalho o obtivo é realizar uma análise em nível ambiental de qual seria a melhor opção de óleo para fazer a lubrificação

e refrigeração de um transformador. Conseqüentemente, a função do sistema de produto é lubrificar e refrigerar transformadores.

O público-alvo que se queira atingir pelo trabalho são empresas fabricantes de transformadores, tendo em vista que, possa escolher a melhor opção, entre os tipos de óleo de lubrificação, em questões de sustentabilidade e em questões ambientais. Assim, essas empresas terão um auxílio para tomar a melhor decisão, pois elas saberão qual é o óleo que impacta menos o meio ambiente e geram menos resíduos para o mesmo.

3.3.1. Unidade funcional

Os transformadores de distribuição mais utilizados nas cidades para fazer o abastecimento até os consumidores são os transformadores trifásicos. Eles possuem diversas tensões de operações e com diversas potências. Conforme salientado por Batista (2020) em uma comunicação pessoal, os transformadores mais utilizados nas cidades são os transformadores que apresentam uma tensão máxima de operação de 15 kV e uma potência de 45 kVA.

A Tabela 3 fornece informações de transformadores trifásicos com tensão máxima de operação de 15 kV e diferentes potências, bem como apresenta informações da quantidade de óleo utilizada nos transformadores.

Tabela 3 – Dados técnicos de transformadores de 15 KV de tensão de operação

Tensão Máxima de Operação (kV)	Potência (kVA)	Volume de Óleo (litros)	Peso Total (kg)
15	15	70	209
	30	78	245
	45	106	327
	75	145	322

Fonte: Adaptado ITAIPU (2020)

Conforme mostra a Tabela 3, o transformador de distribuição de 15 kV de tensão de operação e com 45 kVA de potência necessita de uma quantidade de 106 litros de óleo para fazer sua lubrificação e refrigeração. Assim, a unidade funcional utilizada neste trabalho é de 106 litros. Essa quantidade de litros é relacionada a quantidade de óleo que existe dentro de um transformador trifásico de distribuição. Assim, todos os dados contidos nos inventários encontrados foram convertidos para esta unidade funcional.

Foi escolhido a unidade funcional de 106 litros como sendo a unidade funcional devido ao dado ser absoluto, ou seja, eles podem ser representados como sendo 1 transformador. Todos

os impactos que serão identificados são equivalentes aos impactos gerados para que consiga óleo suficiente para se colocar dentro de um transformador.

O fluxo de referência deste estudo, por coincidência, é o mesmo utilizado para a unidade funcional, de 106 litros de óleo lubrificante e refrigerante em transformadores.

3.3.2. Fronteiras para o sistema

Um estudo de ACV pode apresentar quatro formas de fronteiras em seu estudo. O primeiro é do “berço-ao-túmulo”, a segunda é de “berço-ao-portão”, a terceira pode ser de “berço-ao-berço” e a quarta se caracteriza por ser de “portão-ao-túmulo”.

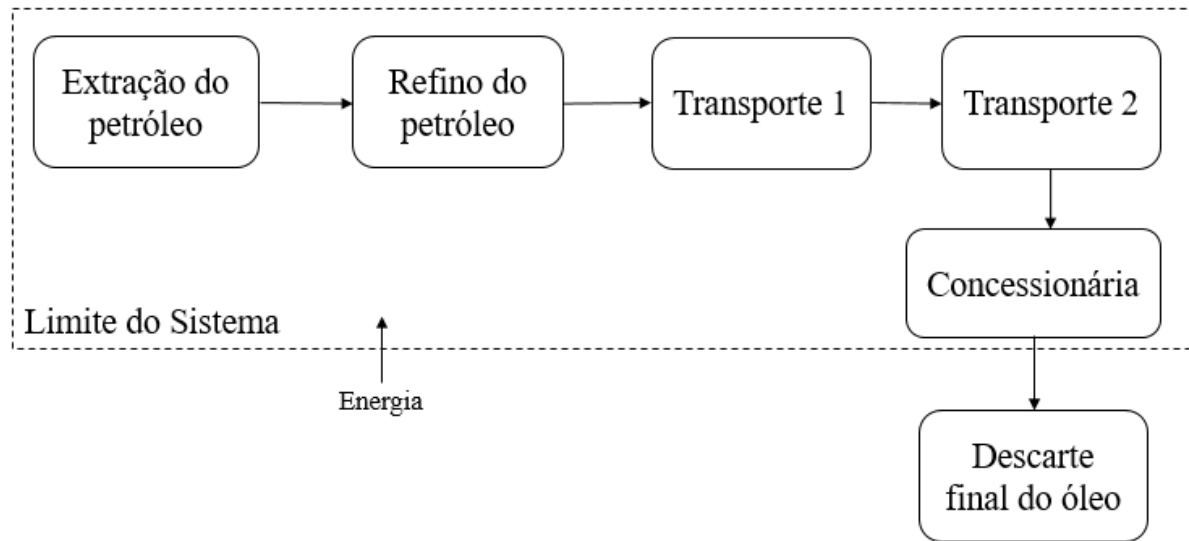
Este estudo utilizou a fronteira “berço-ao-portão”, sendo incluídas etapas de matéria-prima, produção, transporte, energia etc. Como neste estudo foram abordados o óleo de origem vegetal, o óleo de soja e o óleo de girassol, a mesma fronteira será utilizada para que os cálculos e a interpretação dos resultados possam ser o mais coerente possível.

Este estudo vai considerar três cenários. O cenário 1 é representado pelo óleo com origem mineral, o cenário 2 é representado pelo óleo de girassol e o cenário 3 representa o óleo de soja. Assim, conseqüentemente terá uma fronteira para cada cenário do estudo.

3.3.2.1. Fronteira para o óleo mineral (cenário 1)

A Figura 10 representa o fluxograma para que o óleo mineral refinado possa ser utilizado em um transformador, bem como a sua fronteira. As etapas para que o óleo refinado seja produzido passa pela extração do petróleo (óleo bruto), transformação do óleo bruto em óleo refinado (refino do óleo) e armazenamento. Em seguida, o óleo refinado é transportado para a empresa que o coloca no transformador para a finalidade de lubrificação e refrigeração. Posteriormente, o transformador é levado para as concessionárias para que possa ser utilizado. Como mostra a Figura 10, o transporte 1, transporte 2 e a energia entrou no estudo ficando apenas de fora do estudo a parte de disposição final do óleo.

Figura 10 – Fluxograma para a obtenção do óleo mineral

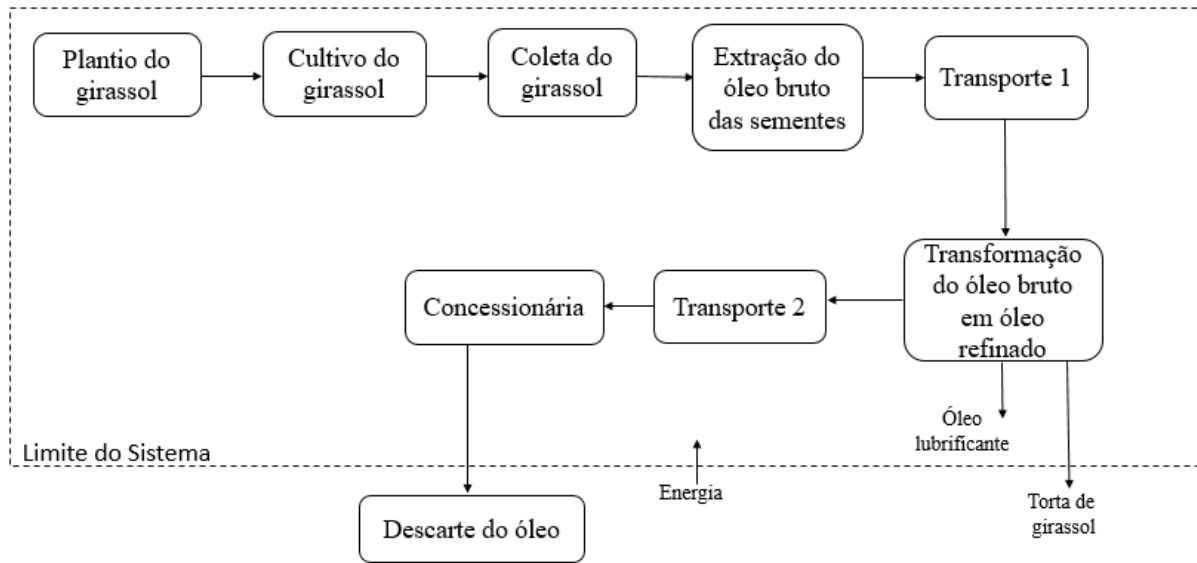


Fonte: Pessoal (2021)

3.3.2.2. Fronteira para o óleo de girassol (cenário 2)

A Figura 11 mostra o fluxograma de produção de óleo refinado proveniente da semente de girassol, até chegar as empresas que o utilizam para a lubrificação e refrigeração de transformadores. O processo é iniciado com o plantio, o cultivo e a coleta do girassol. Após essas etapas, as sementes são levadas do armazém até as empresas que fazem a extração do óleo bruto destes insumos. O óleo bruto é transportado para as empresas que conseguem fazer o refinamento do óleo bruto, através de inúmeras etapas que são explicadas em seguidas. Depois que essas empresas fazem o refinamento, o óleo é levado para empresas que o utilizam para fazer a lubrificação e refrigeração dos transformadores. Esses transformadores são levados para as concessionárias de energia e posteriormente, os transformadores são utilizados pela empresa. A Figura 11 também apresenta o limite abordado neste estudo, mostrando que entrou no estudo o transporte 1, transporte 2, óleo lubrificante e a energia. O óleo para alimentação e as rações utilizadas para alimentação de animais não entrou no estudo. Como também seu descarte não entrou no estudo.

Figura 11 – Fluxograma para a obtenção do óleo refinado de girassol

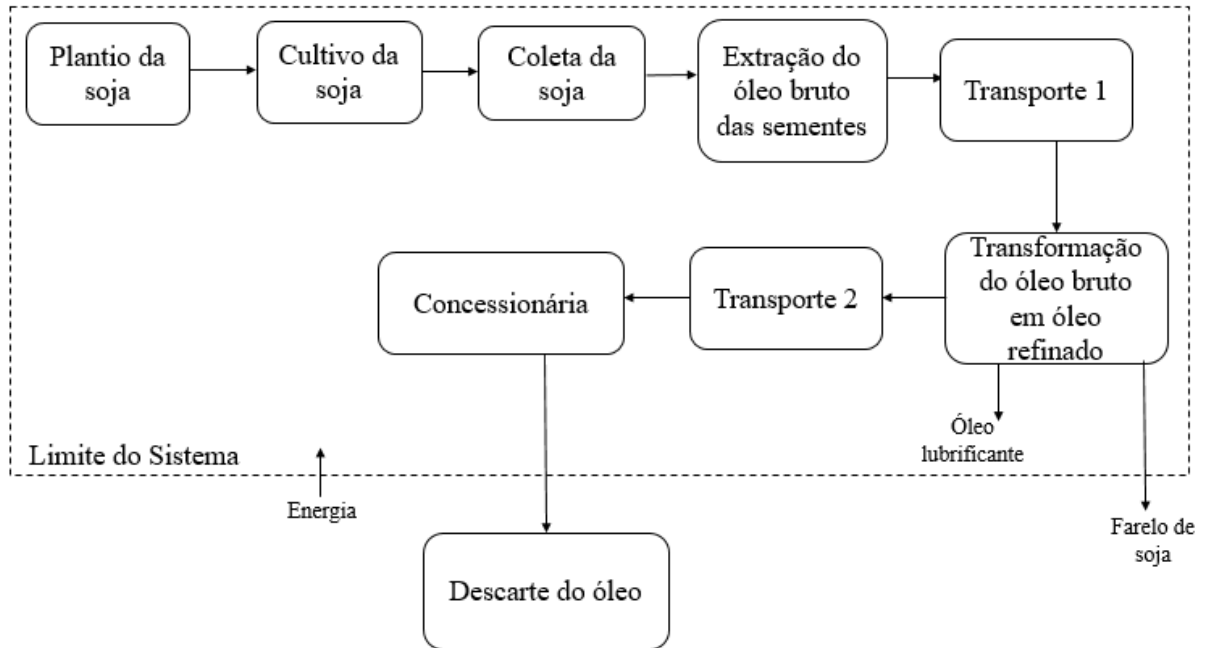


Fonte: Pessoal (2021)

3.3.2.3. Fronteira para o óleo de soja (cenário 3)

A Figura 12 representa de como o óleo refinado, obtido a partir dos grãos de soja é produzido. O processo se inicia com o plantio, o cultivo e a coleta da soja do solo e são transportados para os armazéns. Em seguida, esses grãos e sementes são levados para a empresa que faz a extração do óleo bruto destes insumos, a após essa atividade, o óleo bruto é levado para a empresa que faz o refinamento deste óleo, para que ele possa ser utilizado para a função de lubrificação e refrigeração para os transformadores. Após colocado este óleo refinado nos transformadores, estes são lavados para as concessionárias de energia que o utilizam em suas obras. A linha tracejada delimita o limite dos sistemas. O transporte 1, transporte 2, óleo lubrificante e a energia entrou no estudo. O óleo utilizado para a alimentação e a ração utilizada como alimento, não entrou no estudo. Como o descarte deste óleo também não entrou no estudo.

Figura 12 – Fluxograma para a obtenção do óleo refinado de soja



Fonte: Pessoal (2021)

3.4. Limitações do estudo

Uma das limitações deste estudo é a exclusão da etapa de destino final dos óleos lubrificantes. Devido os óleos lubrificantes vegetais serem, em sua maioria, biodegradáveis, esta etapa teria bastante peso nos resultados. Como não temos dados para a etapa de descartes dos óleos, não entrou no estudo.

Um das limitações do estudo são as fronteiras utilizadas, pois para este estudo foi utilizado as etapas descritas na fronteira. Um outro elaborador pode verificar outras etapas que passou despercebido.

O uso do método ReCiPe pode ser uma limitação, pelo fato de que ele não possa ser o mais adequado para esta comparação. Foi utilizado este método devido a ser o mais utilizado em estudos de ACV e ser utilizado em ACV com vários objetivos diferentes.

Outra limitação do estudo é a confiabilidade dos inventários dos autores que servirão de base para este estudo, devido que as incertezas existem em todos os lugares, e principalmente, em valores de emissões ou entrada de produto/serviço.

Como foram criados 3 cenários diferentes, suas fronteiras foram desenvolvidas para serem as mais iguais possíveis para que os valores dos resultados possa ser mais coerente possível.

Porém, como são cenários diferentes algumas etapas podem ter mais peso nos impactos do que outras etapas que não existe nos outros cenários.

3.5. Cotação

A importância de se fazer uma cotação é pelo fato que através dela se consegue ter mais base para que se possa tomar melhores decisões em investimentos e projetos novos. Ao passar dos anos, os custos dos barris de óleo vegetal vêm se equiparando com os barris de óleo mineral. Estes custos são proporcionais aos transformadores que serão utilizados. Isso se deve a cada característica que um transformador apresenta em relação a sua potência e as suas tensões primárias e secundárias, pois quanto maior o transformador mais litros de óleos ele precisa para fazer o papel de lubrificação e refrigeração do mesmo. O preço por litro para se produzir o óleo mineral é de R\$14,6 reais/litro e o óleo vegetal é de R\$15,6 reais/litro (Mercado Livre, 2021).

4. INVENTÁRIOS

4.1. Inventários do cenário 1

Os primeiros dois inventários seguintes se referem a uma adaptação feita no trabalho de Viana (2008), que fez um levantamento sobre a extração de petróleo e também sobre o refino de petróleo. Em seu estudo, ele faz um levantamento sobre produção de girassol, da cana-de-açúcar e do petróleo para a produção do biodiesel etílico e assim, obter informações sobre os impactos que um biodiesel oriundo do óleo do girassol possam apresentar.

Eles sofreram uma adaptação para a unidade funcional deste estudo, que é de 106 litros, que é a capacidade que um transformador de 15 kV de operação com uma potência de 45 kVA em operação. A Tabela 4 se refere aos dados obtidos referentes a extração de petróleo.

O fator de alocação que foi utilizado para o cenário 1 foi a densidade do óleo lubrificante mineral apresenta, que é de $0,863 \text{ g/cm}^3$ (Filho *et al*, 2016) e um calor específico de $0,400 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$ (Aalborg, 2021).

Tabela 4 – Dados da extração de petróleo (106 litros)

Extração de petróleo	Quantidade	Unidade
Entradas		
Petróleo	$9,82 \times 10^{+01}$	kg
Gás natural	3,28	kg
Energia	$2,92 \times 10^{-05}$	GJ
Combustíveis renováveis	$2,92 \times 10^{-02}$	kg
Urânio natural	$1,03 \times 10^{-06}$	kg
Água	$2,03 \times 10^{-01}$	kg
Saídas		
DBO (emissões para a água)	$3,01 \times 10^{-03}$	kg
DQO (emissões para a água)	$1,86 \times 10^{-02}$	kg
Metais pesados não-especificados (emissões para a água)	$4,17 \times 10^{-07}$	kg
Hidrocarbonetos (emissões para água)	$1,75 \times 10^{-04}$	kg
Efluentes líquidos não-especificados (emissões para a água)	$2,90 \times 10^{-06}$	kg
Água residual (emissões para a água)	$2,82 \times 10^{-04}$	kg

(continuação)

Óleo não especificado (emissões para a água)	$7,44 \times 10^{-04}$	kg
Sólidos suspensos totais (emissões para a água)	$9,55 \times 10^{-03}$	kg
CO ₂ (emissões para o ar)	$1,47 \times 10^{+01}$	kg
CO (emissões para o ar)	$2,91 \times 10^{-02}$	kg
Vapor de água (emissões para o ar)	$2,07 \times 10^{-02}$	kg
CH ₄ (emissões para o ar)	$2,32 \times 10^{-01}$	kg
Material particulado (emissões para o ar)	$1,10 \times 10^{-02}$	kg
Resíduos não-especificados (resíduos sólidos)	$3,13 \times 10^{-08}$	kg
Óleo mineral (produto)	$9,01 \times 10^{+01}$	kg

Fonte: Adaptado de Viana (2008)

A Tabela 5 apresenta as principais entradas do refino do petróleo, bem como as saídas referentes as emissões tanto para atmosfera quanto para a água.

Tabela 5 – Refino do petróleo (106 litros)

Refino do petróleo	Quantidade	Unidade
Entradas		
Petróleo	$9,01 \times 10^{+01}$	kg
Energia	$1,02 \times 10^{-02}$	GJ
Saídas		
CO ₂ (emissões para o ar)	$7,49 \times 10^{-01}$	kg
CH ₄ (emissões para o ar)	$3,42 \times 10^{-03}$	kg
Nox (emissões para o ar)	$5,26 \times 10^{-04}$	kg
CO (emissões para o ar)	$2,38 \times 10^{-03}$	kg
COVNM (emissões para o ar)	$8,61 \times 10^{-02}$	kg
Material particulado (emissões para o ar)	$9,20 \times 10^{-04}$	kg
SOx (emissões para o ar)	$4,40 \times 10^{-04}$	kg
Metil carptano (emissões para o ar)	$9,01 \times 10^{-07}$	kg
Hidrocarbonetos (emissões para o ar)	$1,79 \times 10^{-06}$	kg

(continuação)

H ₂ S (emissões para o ar)	1,88 x10 ⁻⁰⁵	kg
Na (emissões para a água)	1,47 x10 ⁻⁰³	kg
Cloretos (emissões para a água)	2,19 x10 ⁻⁰³	kg
Óleo não-especificado (emissões para a água)	6,41 x10 ⁻⁰⁴	kg
Óleo mineral (produto)	9,01 x10 ⁺⁰¹	kg

Fonte: Adaptado de Viana (2008)

A Tabela 6 apresenta os dados para o refino de petróleo, com base no dado fornecido por McManus *et al* (2004). Em seu estudo, foram evidenciados os estágios para a produção do óleo mineral com o intuito de analisar os impactos causados em comparação a óleos minerais reutilizáveis. Verificando assim se é melhor produzir óleo novo ou apenas reutilizá-lo para diminuir seus impactos.

Tabela 6 – Refino do petróleo (106 litros)

Refino do petróleo	Quantidade	Unidade
Entradas		
Óleo (matéria-prima)	4,06 x10 ⁺⁰³	MJ
Minério de ferro (matéria-prima)	1,26 x10 ⁻⁰²	kg
Calcário (matéria-prima)	1,26 x10 ⁻⁰²	kg
Água (matéria-prima)	1,90 x10 ⁺⁰¹	kg
Bauxita (matéria-prima)	2,88 x10 ⁻⁰²	kg
Cloreto de sódio (matéria-prima)	1,26 x10 ⁻⁰²	kg
Argila (matéria-prima)	2,70 x10 ⁻⁰³	kg
Ferromanganês (matéria-prima)	9,01 x10 ⁻⁰⁵	kg
Saídas		
Poeira (emissões para o ar)	3,06 x10 ⁻⁰²	kg
Monóxido de carbono (emissões para o ar)	7,21 x10 ⁻⁰³	kg
Dióxido de carbono (emissões para o ar)	2,56 x10 ⁺⁰¹	kg
Óxido de enxofre (emissões para o ar)	1,62 x10 ⁻⁰¹	kg
Óxido de nitrogênio (emissões para o ar)	2,61 x10 ⁺⁰¹	kg
Cloreto de hidrogênio (emissões para o ar)	4,51 x10 ⁻⁰⁴	kg
Hidrocarbonetos (emissões para o ar)	2,61 x10 ⁺⁰¹	kg
Metais (emissões para o ar)	9,30 x10 ⁻⁰⁵	kg

(continuação)

COD (emissões para a água)	9,01 x10 ⁻⁰⁴	kg
BOD (emissões para a água)	4,55 x10 ⁻⁰⁴	kg
Ácido como H ⁺ (emissões para a água)	2,70 x10 ⁻⁰³	kg
Nitratos (emissões para a água)	9,01 x10 ⁻⁰⁵	kg
Metais (emissões para a água)	4,51 x10 ⁻⁰⁴	kg
Íons de amônio (emissões para a água)	9,01 x10 ⁻⁰⁵	kg
Íons de cloreto (emissões para a água)	9,01 x10 ⁻⁰⁴	kg
Sólidos em suspensão (emissões para a água)	5,41 x10 ⁻⁰³	kg
Hidrocarbonetos (emissões para a água)	1,80 x10 ⁻⁰³	kg
Outro nitrogênio (emissões para a água)	9,01 x10 ⁻⁰⁵	kg
Resíduo sólido (resíduos sólidos)	2,79 x10 ⁻⁰²	kg
Resíduo mineral (resíduos sólidos)	1,98 x10 ⁻⁰¹	kg
Escórias e cinzas (resíduos sólidos)	2,25 x10 ⁻⁰¹	kg
Produtos químicos não tóxicos (resíduos sólidos)	1,53 x10 ⁻⁰²	kg
Óleo mineral (produto)	9,01 x10 ⁻⁰⁵	kg

Fonte: Adaptado de McManus *et al* (2004)

4.2. Inventários do cenário 2

As tabelas seguintes se referem à alguns dados referentes ao girassol, como plantio, cultivo, obtenção do óleo entre outros. Os dados mostrados na Tabela 7 referem-se ao trabalho de Tsoutsos *et al* (2010). Em seu estudo, foi realizado um levantamento para se produzir soja e girassol para fins de utilização como biodiesel. O ACV destes dois insumos foi realizado para verificação de qual a melhor forma de se produzir o biodiesel. Vale ressaltar que todos os inventários seguintes, possuem sementes que receberam algum tipo de fertilizante ou adubo químico em seu crescimento, pois não foi encontrado na literatura, inventários onde se utilizam sementes orgânicas. Isso vale tanto para o cenário 2 quanto para o cenário 3.

O fator de alocação utilizada para a produção de girassol utilizou a quantidade de óleo que a usina Parecis Alimentos S/A (indústria que faz o processo da retirada do óleo das sementes). Essa indústria possui o rendimento de torta de girassol de 55%, produção de óleo em 36% e 9% é material que se perde no processo. Então, o fator de alocação utilizado foi de 36% (Garcia *et al*, 2014).

Tabela 7 – Óleo de girassol (106 litros)

Óleo e cultivo de girassol	Quantidade	Unidade
Entradas		
Sementes (óleo)	9,78 x10 ⁺⁰¹	kg
MeOH	2,12 x10 ⁺⁰¹	kg
NaOH	7,80 x10 ⁻⁰¹	kg
H ₂ O	9,90 x10 ⁺⁰¹	kg
H ₃ PO ₄	6,06 x10 ⁻⁰¹	kg
Água de rio	1,26 x10 ⁺⁰²	kg
N (fertilizantes)	8,15 x10 ⁺⁰⁰	kg
Trifluralin (pesticidas)	1,16 x10 ⁻⁰¹	kg
Energia	8,96 x10 ⁺⁰¹	MJ
Saídas		
Óleo (produto)	8,40 x10 ⁺⁰²	kg

Fonte: Adaptado de Tsoutsos *et al* (2010)

A Tabela 8 se refere a energia elétrica para se produzir 1 GJ de eletricidade e este inventário se encontra no trabalho de Coltro (2003). Esta referência foi seguida no presente trabalho para eletricidade utilizada nos três cenários.

Tabela 8 – Energia elétrica (1GJ)

Energia elétrica	Quantidade	Unidade
Entradas		
Energia	1,58 x10 ⁺⁰⁰	GJ
Carvão	1,28 x10 ⁺⁰¹	kg
Gás natural	7,60 x10 ⁻⁰¹	kg
Petróleo	1,21	kg
Água	1,17 x10 ⁺⁰⁵	kg
Materiais secundários	9,00 x10 ⁻⁰¹	kg
Urânio	1,80 x10 ⁻⁰⁴	kg
Saídas		
CH ₄ (emissões para o ar)	5,48 x10 ⁻⁰²	kg
CO (emissões para o ar)	1,49 x10 ⁻⁰¹	kg
CO ₂ (emissões para o ar)	1,78 x10 ⁺⁰¹	kg
Vapor de água (emissões para o ar)	2,30 x10 ⁻⁰¹	kg
Hidrocarbonetos (emissões para o ar)	7,50 x10 ⁻⁰⁴	kg
Metais (emissões para o ar)	1,00 x10 ⁻⁰⁸	kg
NH ₃ (emissões para o ar)	6,00 x10 ⁻⁰⁹	kg
COVNM (emissões para o ar)	7,28 x10 ⁻⁰³	kg
NOx (emissões para o ar)	5,75 x10 ⁻⁰¹	kg
N ₂ O (emissões para o ar)	1,10 x10 ⁻⁰²	kg
Material particulado (emissões para o ar)	6,72 x10 ⁻⁰²	kg
SOx (emissões para o ar)	1,16 x10 ⁻⁰¹	kg
Radioatividade para o ar (emissões para o ar)	9,77	kBq

(continuação)

Ácidas (emissões para a água)	$1,70 \times 10^{-07}$	kg
DBO (emissões para a água)	$7,00 \times 10^{-05}$	kg
DQO (emissões para a água)	$1,30 \times 10^{-04}$	kg
Cl (emissões para a água)	$6,00 \times 10^{-08}$	kg
Metais pesados não especificados (emissões para a água)	$1,80 \times 10^{-07}$	kg
Hidrocarbonetos (emissões para a água)	$3,00 \times 10^{-05}$	kg
Metais (emissões para a água)	$1,00 \times 10^{-05}$	kg
Compostos de nitrogênio (emissões para a água)	$4,50 \times 10^{-06}$	kg
Óleos e graxas (emissões para a água)	$1,40 \times 10^{-04}$	kg
Compostos de enxofre (emissões para a água)	$4,50 \times 10^{-07}$	kg
Sólidos dissolvidos totais (emissões para a água)	$5,00 \times 10^{-05}$	kg
Sólidos suspensos totais (emissões para a água)	$1,00 \times 10^{-04}$	kg
Radioatividade para a água (emissões para a água)	$1,51 \times 10^{+01}$	kBq
Resíduos no solo (resíduos sólidos)	$1,34 \times 10^{+01}$	dm ³
Resíduos processuais (resíduos sólidos)	$1,07 \times 10^{+01}$	kg

Fonte: Coltro (2003)

As Tabelas 9 e 10 são referentes à produção de grão de girassol e para a produção do óleo de girassol, respectivamente, todas oriundas do trabalho de Vianna (2008).

Tabela 9 – Cultivo de girassol (106 litros)

Grãos de girassol	Quantidade	Unidade
Entradas		
Sementes de girassol	$1,04 \times 10^{-01}$	kg
Fertilizantes nitrogenados	$7,42 \times 10^{-01}$	kg
Fertilizantes fosfatado	1,37	kg
Fertilizantes potássico	1,37	kg
Calcário	$4,39 \times 10^{+01}$	kg
Óleo diesel	1,13	kg
Alachlor	$7,20 \times 10^{-02}$	kg
Trifluralin	$7,45 \times 10^{-02}$	kg
Triclorfom	$4,00 \times 10^{-02}$	kg
Saídas		
CO ₂ (emissões para o ar)	$3,71 \times 10^{-01}$	kg
NO _x (emissões para o ar)	$5,26 \times 10^{-03}$	kg
N ₂ O (emissões para o ar)	$2,45 \times 10^{-02}$	kg
NH ₃ (emissões para o ar)	$7,70 \times 10^{-02}$	kg
Alachlor (emissões para o ar)	$7,20 \times 10^{-03}$	kg
Trifluralin (emissões para o ar)	$7,45 \times 10^{-03}$	kg
Triclorfom (emissões para o ar)	$4,00 \times 10^{-03}$	kg
Compostos de nitrogênio (emissões para a água)	$7,45 \times 10^{-02}$	kg
Alachlor (emissões para a água)	$1,95 \times 10^{-01}$	kg
Trifluralin (emissões para a água)	$2,00 \times 10^{-02}$	kg
Triclorfom (emissões para a água)	$1,08 \times 10^{-02}$	kg
Alachlor (resíduos sólidos)	$4,03 \times 10^{-02}$	kg
Trifluralin (resíduos sólidos)	$4,18 \times 10^{-02}$	kg

(continuação)

Triclorfom (resíduos sólidos)	2,23 x10 ⁻⁰²	kg
Grãos de girassol (produto)	3,50 x10 ⁺⁰¹	kg
Torta de girassol (co-produto)	5,35 x10 ⁺⁰¹	kg

Fonte: Adaptado de Viana (2008)

Tabela 10 – Óleo de girassol (106 litros)

Óleo de girassol	Quantidade	Unidade
Entradas		
Grãos de girassol	4,23 x10 ⁺⁰²	kg
Energia	9,83 x10 ⁻⁰¹	GJ
Energia térmica proveniente de óleo diésel	9,39 x10 ⁻⁰¹	GJ
Saídas		
Vapor de água (emissões para o ar)	5,08 x10 ⁺⁰¹	kg
Resíduos processuais (resíduos sólidos)	5,50 x10 ⁺⁰¹	kg
Óleo de girassol (produto)	9,73 x10 ⁺⁰¹	kg

Fonte: Adaptado de Viana (2008)

As Tabelas 11 e 12 se referem, respectivamente, ao cultivo do girassol e a produção do óleo de girassol. As duas tabelas seguintes são do estudo da Figueiredo *et al* (2012), que realizou um ACV para a produção de girassol e do óleo de girassol para se verificar, por meios dos impactos, se é viável realizar um plantio com irrigação ou sem irrigação.

Tabela 11 – Cultivo do girassol (106 litros)

Cultivo do girassol	Quantidade	Unidade
Entradas		
N (fertilizantes)	2,45 x10 ⁻⁰¹	kg
K ₂ O (fertilizantes)	7,34 x10 ⁻⁰¹	kg
P ₂ O ₅ (fertilizantes)	7,34 x10 ⁻⁰¹	kg
Atrazine	3,50 x10 ⁻⁰²	kg
Sementes para plantação	8,06 x10 ⁻⁰²	kg
Diesel	1,83	kg
Água	5,72 x10 ⁺⁰⁴	l
Saídas		
Sementes de girassol (produto)	3,50 x10 ⁺⁰¹	kg
Torta de girassol (co-produto)	5,35 x10 ⁺⁰¹	kg

Fonte: Adaptado de Figueiredo *et al* (2012)

Tabela 12 – Óleo de girassol (106 litros)

Óleo de girassol	Quantidade	Unidade
Entradas		
Sementes de girassol	2,23 x10 ⁺⁰²	kg
Gás natural	1,63	MJ
Bentonite	5,23 x10 ⁻⁰¹	kg
Hexane	2,46 x10 ⁻⁰¹	kg

(continuação)

Ácido fosfórico	$7,93 \times 10^{-02}$	kg
Energia	$9,66 \times 10^{-02}$	kWh
Saídas		
Óleo de girassol	$9,72 \times 10^{+01}$	kg

Fonte: Adaptado de Figueiredo *et al* (2012)

4.3. Inventários do cenário 3

A Tabela 13 apresenta os dados referentes ao cultivo de soja baseadas no estudo de Dalgaard *et al* (2008), no qual realizou um ACV sobre a soja e sobre o óleo de soja para verificar se ambos são considerados sustentáveis, ou seja, possuem poucos impactos relevantes sobre o meio ambiente e a sociedade.

Em 2019, foram processadas 36.865 toneladas de grãos de soja, sendo desde total 28.402 toneladas destinadas a farelo de soja e 7.469 toneladas destinada aos óleos. Assim, temos um valor que 23%, aproximadamente, foi usada para os óleos, tendo assim o fator de alocação de 23% (ABIOVE, 2020).

Tabela 13 – Cultivo da soja (106 litros)

Cultivo da soja	Quantidade	Unidade
Entradas		
Fósforo (fertilizantes)	$4,28 \times 10^{-01}$	kg
Diesel	1,12	kg
Óleo lubrificante	$1,06 \times 10^{-01}$	kg
Saídas		
Óxido nitroso (emissões para o ar)	$1,26 \times 10^{-01}$	kg
Óleo de soja (produto)	$1,93 \times 10^{+02}$	kg
Farelo de soja (co-produto)	$8,40 \times 10^{+02}$	kg

Fonte: Adaptado de Dalgaard *et al* (2008)

A Tabela 14 apresenta alguns insumos e emissões encontrados para a produção do óleo de soja, sendo esta, baseada em estudos de Hou *et al* (2011). Os autores realizaram um estudo de ACV sobre o plantio e a colheita da soja, para que esta possa ser utilizada na produção de biodiesel. Eles analisaram todas as etapas como transporte, energia e insumos.

Tabela 14 – Óleo de soja (106 litros)

Produção do óleo da soja	Quantidade	Unidade
Entradas		
N (fertilizantes)	1,11	kg
P ₂ O ₅ (fertilizantes)	4,16 x10 ⁻⁰¹	kg
K ₂ O (fertilizantes)	3,40 x10 ⁻⁰¹	kg
Diesel	1,18	kg
Gasolina	9,64 x10 ⁻⁰²	l
Energia	6,07	kWh
Dimetoato (pesticida)	2,48 x10 ⁻⁰³	kg
Phoxim (pesticida)	2,27 x10 ⁻⁰³	kg
Glifosato (herbicida)	3,42 x10 ⁻⁰²	kg
Tirame (fungicida)	5,66 x10 ⁻⁰³	kg
Carbendazim (fungicida)	5,66 x10 ⁻⁰³	kg
Saídas		
NH ₃ (emissões para o ar)	2,02 x10 ⁻⁰¹	kg
N ₂ O (emissões para o ar)	2,26 x10 ⁻⁰²	kg
NOx (emissões para o ar)	3,63 x10 ⁻⁰¹	kg
Emissões de pesticidas (para a água)	5,04 x10 ⁻⁰⁴	kg
Emissões de pesticidas (para o solo)	2,16 x10 ⁻⁰²	kg
Emissões de pesticidas (para o ar)	5,04 x10 ⁻⁰³	kg
NO ₃ ¹⁻ (emissões para a água)	6,88 x10 ⁻⁰¹	kg
PO ₄ ³⁻ (emissões para a água)	1,28 x10 ⁻⁰²	kg
Hexane (emissão para o ar)	2,29 x10 ⁻⁰¹	kg
Óleo (produto)	2,27 x10 ⁺⁰¹	kg

Fonte: Adaptado de Hou *et al* (2011)

A Tabela 15 relaciona-se à produção de soja e do óleo da mesma, encontra-se no estudo de Theocharis Tsoutsos *et al* (2010).

Tabela 15 – Cultivo de soja (106 litros)

Produção de soja	Quantidade	Unidade
Entradas		
Água do rio	9,43 x10 ⁺⁰¹	kg
N (fertilizantes)	1,75	kg
Trifluralin (pesticidas)	4,37 x10 ⁻⁰²	kg
Pirimicarb (pesticidas)	4,37 x10 ⁻⁰²	kg
Dicofol (pesticidas)	2,18 x10 ⁻⁰²	kg
MeOH	4,09	kg
NaOH	1,53 x10 ⁻⁰¹	kg
H ₂ O	1,91 x10 ⁺⁰¹	kg
H ₃ PO ₄	1,14 x10 ⁻⁰¹	kg
Energia	1,43 x10 ⁺⁰¹	MJ
Saídas		
Óleo (produto)	9,94 x10 ⁺⁰¹	kg

(continuação)

Farelo de soja (co-produto)	4,32 x10 ⁺⁰²	kg
-----------------------------	-------------------------	----

Fonte: Adaptado de Tsoutsos *et al* (2010)

4.4. Transportes

Existem dois tipos de transporte diferentes em cada um dos três cenários. Como pode ser notado, dentro de cada fluxograma existe um transporte 1 e transporte 2.

O transporte 1 se refere a um caminhão tanque que possui a capacidade de transportar até 20.000 litros de óleo (INBRAMAQ, 2020).

O transporte 2 se refere a outro tipo de caminhão, pois este transporta em sua carga transformadores prontos para o uso, com o óleo já em seu interior. Este tipo de caminhão possui uma capacidade de carregar cerca de 25 transformadores em cada viagem (Batista, 2020).

Os caminhões do transporte 1 e do transporte 2 irão percorrer distâncias diferentes, assim os inventários de cada um dos transportes teve um valor de quilometragem diferente. Algo para salientar, é que todas as tabelas irão utilizar os mesmos dados de referência do estudo de Vianna (2008).

4.4.1. Transporte para o cenário 1

O transporte do óleo é realizado por um caminhão que percorre um percurso do local onde o óleo mineral é extraído até a empresa que o utiliza para fazer a lubrificação e refrigeração de um transformador.

O lugar onde se mais extrai o óleo mineral para este fim é na Bacia de Campos, situada na costa norte do Rio de Janeiro até o sul do Estado de Espírito Santo. Então, este óleo vai da Bacia de Campos até a empresa Energitrafo (2020), localizada em Araçongas, Paraná. Este caminhão se desloca aproximadamente 1700 Km, que é a distância entre os dois lugares. No fluxograma este trajeto é denominado transporte 1.

A Tabela 16 se refere a um inventário de um caminhão que percorre esta distância entre a Bacia de Campos até a empresa Energitrafo (2020), todos os dados convertidos aos 106 litros.

Tabela 16 – Transporte 1 (106 litros) (1700 km)

Transporte 1	Quantidade	Unidade
Entradas		
Óleo diesel	1,10	kg
Saídas		
SOx	$1,06 \times 10^{-03}$	kg
NOx	$3,63 \times 10^{-02}$	kg
CO ₂	3,44	kg
COVNM	$3,38 \times 10^{-03}$	kg
CO	$5,91 \times 10^{-03}$	kg
N ₂ O	$7,86 \times 10^{-04}$	kg
CH ₄	$1,18 \times 10^{-04}$	kg
MP	$1,65 \times 10^{-03}$	kg

Fonte: Adaptado de Viana (2008)

O transporte 2 se diferencia do transporte 1 devido a troca de caminhão. O caminhão que faz este percurso é um caminhão que transporta o transformador. A distância que ele vai percorrer é a distância entre a empresa Energitrafo (2020), localizada em Arapongas (PR), até a cidade de Belo Horizonte, onde se situa uma concessionária de energia. A distância é de cerca de 1010 km. A Tabela 17 se refere aos mesmos dados, porém variando os quilômetros percorridos.

Tabela 17 – Transporte 2 (106 litros) (1010 Km)

Transporte 2	Quantidade	Unidade
Entradas		
Óleo diesel	6,89	kg
Saídas		
SOx	$6,65 \times 10^{-03}$	kg
Nox	$2,27 \times 10^{-01}$	kg
CO ₂	$2,15 \times 10^{-01}$	kg
COVNM	$2,11 \times 10^{-02}$	kg
CO	$3,70 \times 10^{-02}$	kg
N ₂ O	$4,92 \times 10^{-03}$	kg
CH ₄	$7,37 \times 10^{-04}$	kg
MP	$1,03 \times 10^{-02}$	kg

Fonte: Adaptado de Viana (2008)

4.4.2. Transporte para o cenário 2

Para este mesmo cenário existe o transporte 1 e o transporte 2. O transporte 1 segue a mesma linha de raciocínio do cenário 1. Porém, este caminhão que transporta óleo vai percorrer uma distância de 1324 km. Este trajeto é entre o Estado de Mato Grosso (maior produtor de girassol do país) até a empresa Romagnole (2020) (empresa que utiliza o óleo de girassol para lubrificar

e refrigerar transformadores, sendo esta empresa situada na cidade de Mandaguari, PR). A Tabela 18 mostra os dados referentes a esta distância de 1324 km entre estas duas localidades.

Tabela 18 – Transporte 1 (106 litros) (1324 km)

Transporte 1	Quantidade	Unidade
Entradas		
Óleo diesel	1,18	kg
Saídas		
SO _x	1,14 x10 ⁻⁰³	kg
NO _x	3,91 x10 ⁻⁰²	kg
CO ₂	3,71	kg
COVNM	3,64 x10 ⁻⁰³	kg
CO	6,36 x10 ⁻⁰³	kg
N ₂ O	8,46 x10 ⁻⁰⁴	kg
CH ₄	1,27 x10 ⁻⁰⁴	kg
MP	1,77 x10 ⁻⁰³	kg

Fonte: Adaptado de Viana (2008)

O transporte 2 é a distância entre a empresa Romagnole (2020) e a cidade de Belo Horizonte (onde se situa uma concessionária de energia) e esta distância é cerca de 1045 km. A Tabela 19 é referente a esses dados com esta distância em questão.

Tabela 19 – Transporte 2 (106 litros) (1045 km)

Transporte 2	Quantidade	Unidade
Entradas		
Óleo diesel	7,42	kg
Saídas		
SO _x	7,16 x10 ⁻⁰³	kg
NO _x	2,45 x10 ⁻⁰¹	kg
CO ₂	2,32 x10 ⁺⁰¹	kg
COVNM	2,28 x10 ⁻⁰²	kg
CO	3,98 x10 ⁻⁰²	kg
N ₂ O	5,30 x10 ⁻⁰³	kg
CH ₄	7,93 x10 ⁻⁰⁴	kg
MP	1,11 x10 ⁻⁰²	kg

Fonte: Adaptado de Viana (2008)

4.4.3. Transporte para o cenário 3

O transporte 1 para este cenário 3 é entre a distância do Estado de Mato Grosso (maior produtor de soja do país) e a empresa Romagnole (2020) (empresa que utiliza óleo de soja para lubrificar e refrigerar transformadores) e esta distância é de 1324 km. Entretanto, os cálculos são diferentes, pois para fazer as transformações se utiliza densidade do óleo e o óleo de girassol

e o óleo de soja apresentam densidades diferentes. A Tabela 20 apresenta os dados com a distância de referência.

Tabela 20 – Transporte 1 (106 litros) (1324 km)

Transporte 1	Quantidade	Unidade
Entradas		
Óleo diesel	1,20	kg
Saídas		
SO _x	1,16 x10 ⁻⁰³	kg
NO _x	3,96 x10 ⁻⁰²	kg
CO ₂	2,26	kg
COVNM	3,69 x10 ⁻⁰³	kg
CO	6,45 x10 ⁻⁰³	kg
N ₂ O	8,58 x10 ⁻⁰⁴	kg
CH ₄	1,28 x10 ⁻⁰⁴	kg
MP	1,80 x10 ⁻⁰³	kg

Fonte: Adaptado de Viana (2008)

O transporte 2 refere-se a distância entre a empresa Romagnole (2020) e a cidade de Belo Horizonte, que é de 1045 km. A Tabela 21 apresenta os dados referentes a distância entre essas duas localidades.

Tabela 21 – Transporte 2 (106 litros) (1045 km)

Transporte 2	Quantidade	Unidade
Entradas		
Óleo diesel	7,52	kg
Saídas		
SO _x	7,26 x10 ⁻⁰³	kg
NO _x	2,48 x10 ⁻⁰¹	kg
CO ₂	2,35 x10 ⁺⁰¹	kg
COVNM	2,31 x10 ⁻⁰²	kg
CO	4,04 x10 ⁻⁰²	kg
N ₂ O	5,37 x10 ⁻⁰³	kg
CH ₄	8,04 x10 ⁻⁰⁴	kg
MP	1,13 x10 ⁻⁰²	kg

Fonte: Adaptado de Viana (2008)

5. RESULTADOS

Nesta etapa do estudo, todos os inventários do cenário 1, do cenário 2, do cenário 3 e os transportes foram inseridos no SimaPro. Como consequência, poderá mensurar os impactos ambientais e determinar os impactos ambientais de cada cenário, como também realizar uma comparação entre os três cenários.

5.1. Resultados do cenário 1

Como o trabalho de Viana (2008) e de McManus *et al* (2004) se referem em seus inventários a fase de refino do petróleo, pode-se fazer uma comparação com os dados levantados dos dois autores para verificar quais impactos cada um apresenta. A Tabela 25 apresenta os impactos e sua quantidade para cada um dos autores.

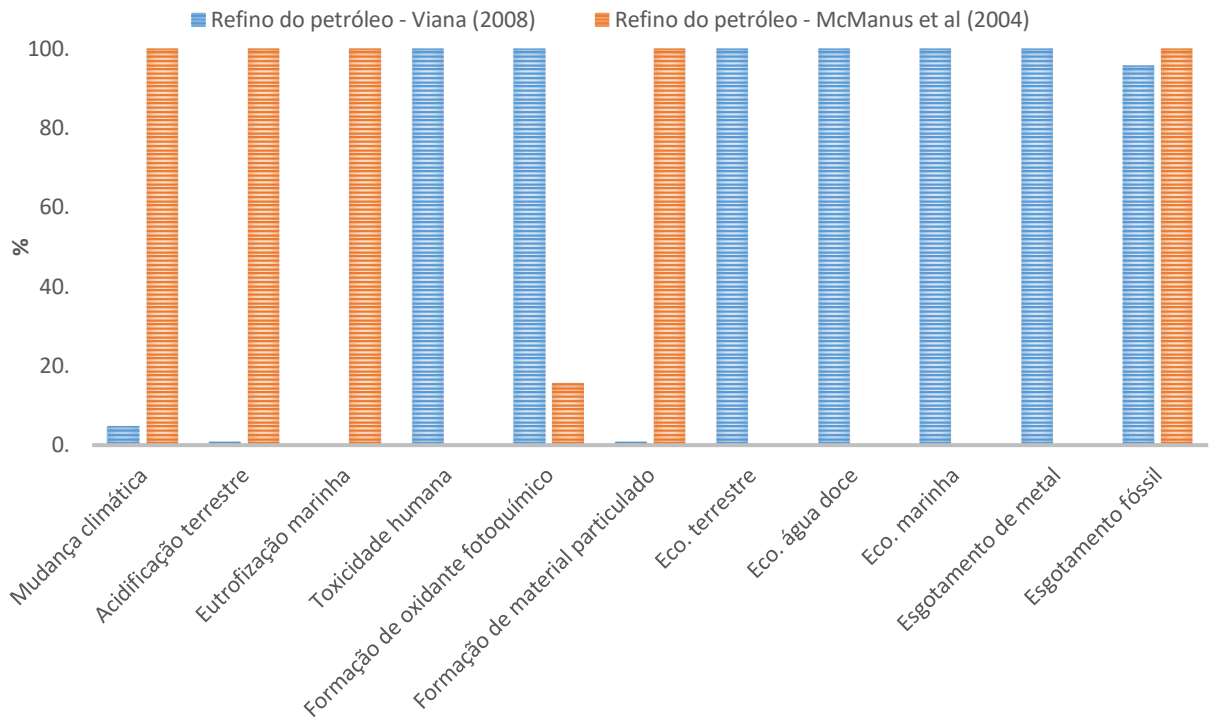
Tabela 22 – Impactos com suas unidades para o cenário 1

IMPACTOS	DADOS VIANA (2008)	DADOS MCMANUS ET AL (2004)	UNIDADE
Mudança climática	62,1	25,6	kg CO ₂ eq
Acidificação terrestre	0,0238	0,162	kg SO ₂ eq
Eutrofização marinha	0,000159	0	kg N eq
Toxicidade humana	0,0129	0	kg 1,4-DB eq
Formação de oxidante fotoquímico	0,146	0,0135	kg NMVOC
Formação de material particulado	0,00692	0,0324	kg PM10 eq
Ecotoxicidade terrestre	0,000168	0	kg 1,4-DB eq
Ecotoxicidade de água doce	0,00807	0	kg 1,4-DB eq
Ecotoxicidade marinha	0,0111	0	kg 1,4-DB eq
Esgotamento de metal	0,0686	0	kg Fe eq
Esgotamento fóssil	193	92,2	kg oil eq

Fonte: Pessoal (2021)

A Figura 13 apresenta os dados de Viana (2008) e de McManus *et al* (2004). Os resultados de Viana (2008) mostram que para a etapa de refino de petróleo, os principais impactos encontrados foram na mudança climática, acidificação terrestre, eutrofização marinha e na formação de material particulado. Já os dados de McManus *et al* (2004) possuem maiores impactos relacionados a toxicidade humana, esgotamento fóssil e de metal e as ecotoxicidade terrestre, água doce e marinha. Nota-se que esses impactos comentados, são piores para o solo e para a água.

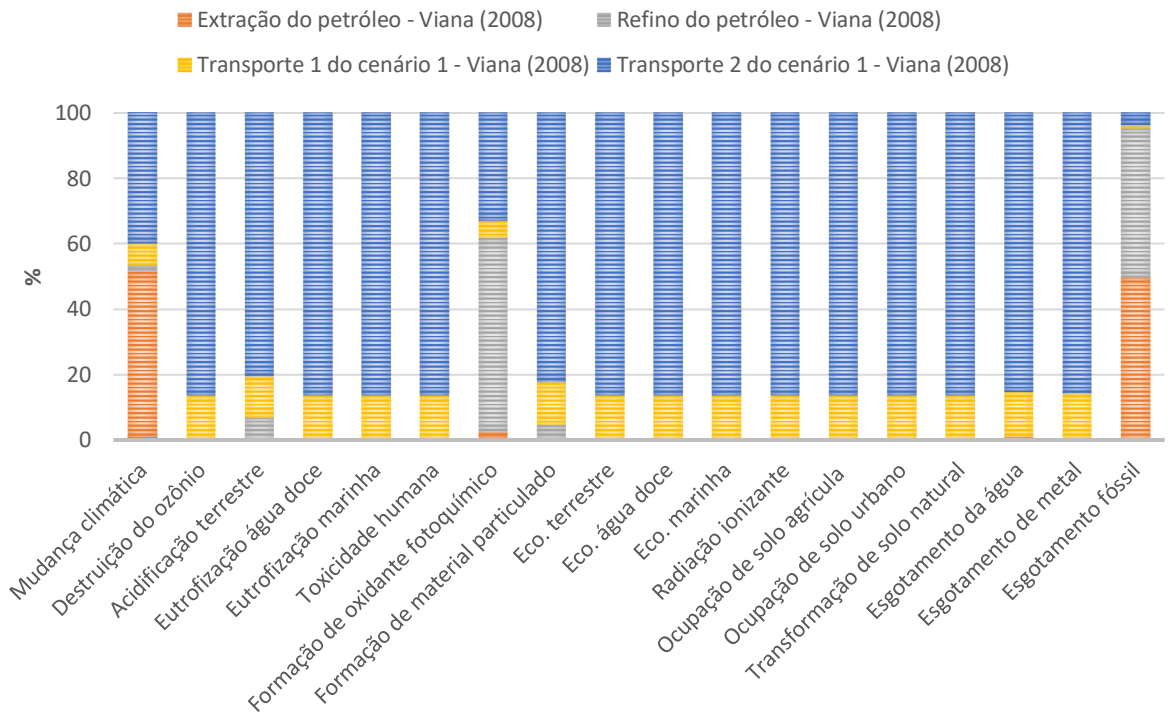
Figura 13 – comparação da etapa de refino do petróleo



Fonte: Pessoal (2021)

Em seguida, com base no estudo de Viana (2008), a Figura 14 mostra uma etapa completa para a produção do óleo lubrificante de origem mineral, que passa da extração do petróleo e o refino do mesmo. Esses dados são bem relevantes pelo fato de verificar em qual destas etapas são encontrados os piores impactos e quais são eles. Também nestes dados, foram inseridos os transportes 1 e transportes 2 deste cenário, para que se tenha dados mais completos e verídicos. Por meio destes resultados mostrados na Figura 14, verifica-se que na etapa de extração do petróleo são obtidos os impactos relevantes na mudança climática e no esgotamento fóssil. Na fase de refino do petróleo, destaca-se a formação de oxidante fotoquímico e também no esgotamento fóssil. O transporte 1, que se refere ao caminhão que transporta o óleo bruto, possui resultados em quase todos os impactos medidos.

Figura 14 – Impactos para o óleo mineral



Fonte: Pessoal (2021)

Com todos os dados e inventários, a pior etapa é a do transporte 2, que é o caminhão carregado de transformador com o óleo lubrificante e refrigerante no transformador. Ele possui resultados expressivos em quase todos os impactos, mostrados no gráfico acima. Isto se deve ao baixo rendimento dos caminhões utilizados para esta finalidade e suas emissões atmosféricas.

5.2. Resultados do cenário 2

Com os inventários e levantamentos dos dados coletados para o cenário 2, representado pelo óleo de girassol, foi possível chegar a algumas conclusões, como será observado na tabela abaixo. Por meio dos estudos de Viana (2008) e da Figueiredo *et al.* (2012), temos os *inputs* e *outputs* para a obtenção do óleo de girassol. A Tabela 23 mostra os valores obtidos a partir do software SimaPro dos dados do estudo de Viana (2008) e do estudo de Figueiredo *et al.* (2012). Nota-se que na comparação dos dois estudos, temos quase todos os valores de impactos maiores em Viana (2008) do que na Figueiredo *et al.* (2012). Somente o impacto de ocupação de solo, é maior no estudo de Figueiredo *et al.* (2012).

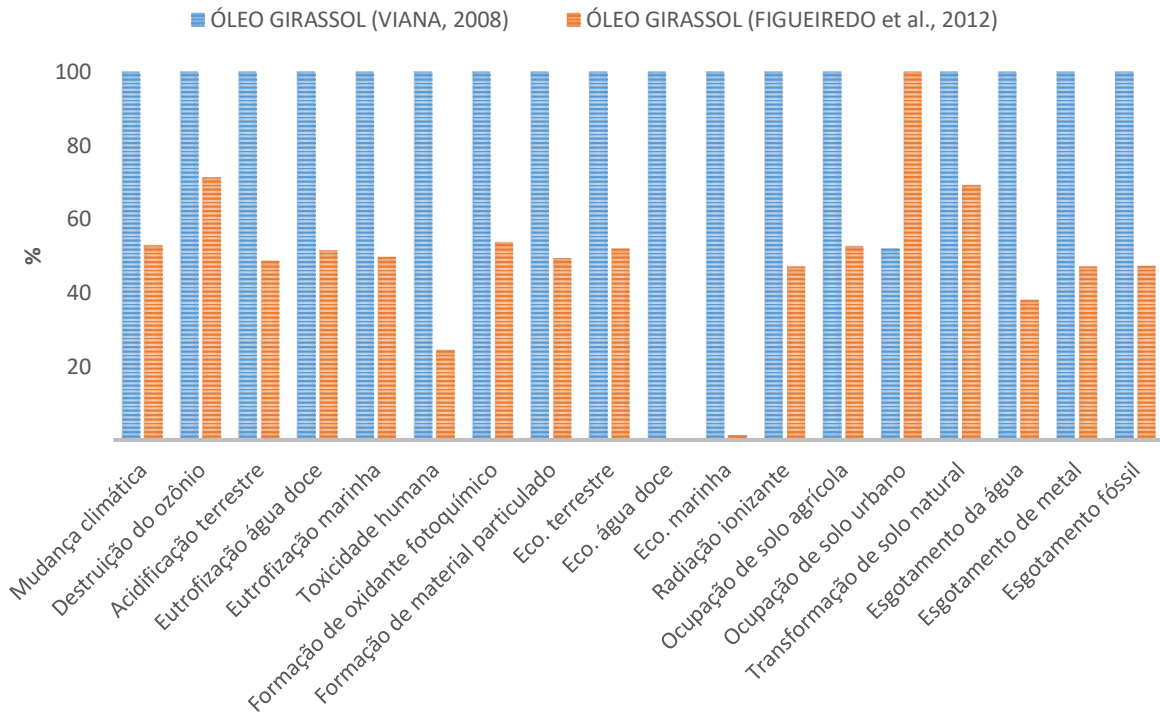
Tabela 23 – Impactos com suas unidades para o cenário 2

IMPACTOS	DADOS VIANA (2008)	DADOS FIGUEIREDO ET AL (2012)	UNIDADE
Mudança climática	375	198	kg CO ₂ eq
Destruição do ozônio	0,00000606	0,00000432	kg CFC-11 eq
Acidificação terrestre	6,92	3,37	kg SO ₂ eq
Eutrofização água doce	0,159	0,0818	kg P eq
Eutrofização marinha	4,32	2,15	kg N eq
Toxicidade humana	9,21	2,26	kg 1,4-DB eq
Formação de oxidante fotoquímico	1,2	0,646	kg NMVOC
Formação de material particulado	1,35	0,666	kg PM10 eq
Ecotoxicidade terrestre	3,67	1,91	kg 1,4-DB eq
Ecotoxicidade água doce	138	0,578	kg 1,4-DB eq
Ecotoxicidade marinha	20,8	0,286	kg 1,4-DB eq
Radiação ionizante	2,75	1,3	kBq U235 eq
Ocupação de solo agrícola	269.000	142.000	m ² a
Ocupação de solo urbano	0,481	0,925	m ² a
Transformação de solo natural	0,0169	0,0117	m ²
Esgotamento da água	76,2	29	m ³
Esgotamento de metal	2,51	1,19	kg Fe eq
Esgotamento fóssil	108	51,1	kg oil eq

Fonte: Pessoal (2021)

A Figura 15 apresenta os dados descritos na Tabela 26. Deste gráfico é possível notar que para se produzir o óleo de girassol, os dados levantados por Viana (2008) no inventário acabaram impactando mais do que os dados de Figueiredo *et al.* (2012). Assim, os dados de Viana (2008) têm impactos significativos em todos os impactos estudados.

Figura 15 – Impactos para o óleo de girassol

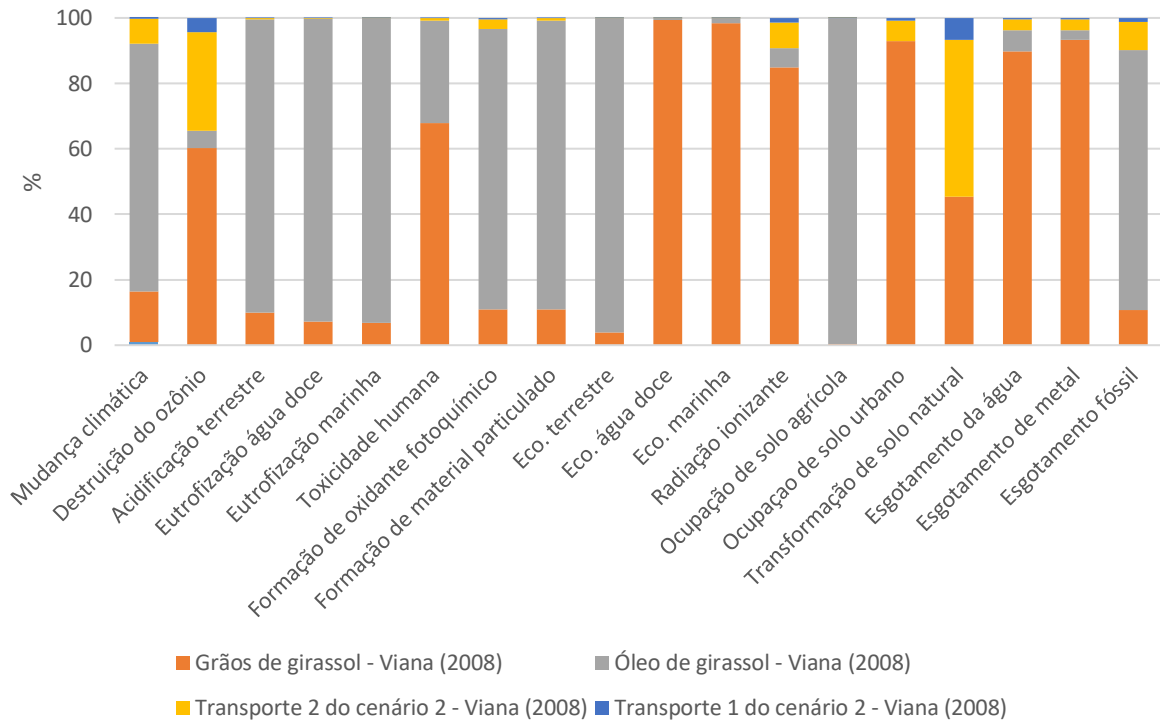


Fonte: Pessoal (2021)

A Figura 16 apresenta as etapas para o plantio dos grãos de girassol, a produção do óleo de girassol e o transporte 1 e 2 para este cenário. Os dados desta Figura são oriundos do estudo de Viana (2008), com objetivo de mostrar onde se encontra os principais impactos para o ambiente. Os principais impactos com os dados obtidos, são encontrados nas etapas de plantio dos grãos de girassol e para se produzir o óleo de girassol. Dentre estas, a etapa para se obter o óleo de girassol apresenta impactos para o meio ambiente como em mudança climática, eutrofização em água doce e na marinha, ocupação de solo agrícola e esgotamento fóssil. Da etapa de produção dos grãos de girassol temos impactos em destruição do ozônio, eco. água doce e marinha e esgotamento da água e do metal.

Dentre estas duas etapas, a que apresenta os maiores impactos está na produção do óleo de girassol, apresentando um total de nove impactos significativos, com relação a etapa de plantio dos grãos, com um total de oito impactos significativos.

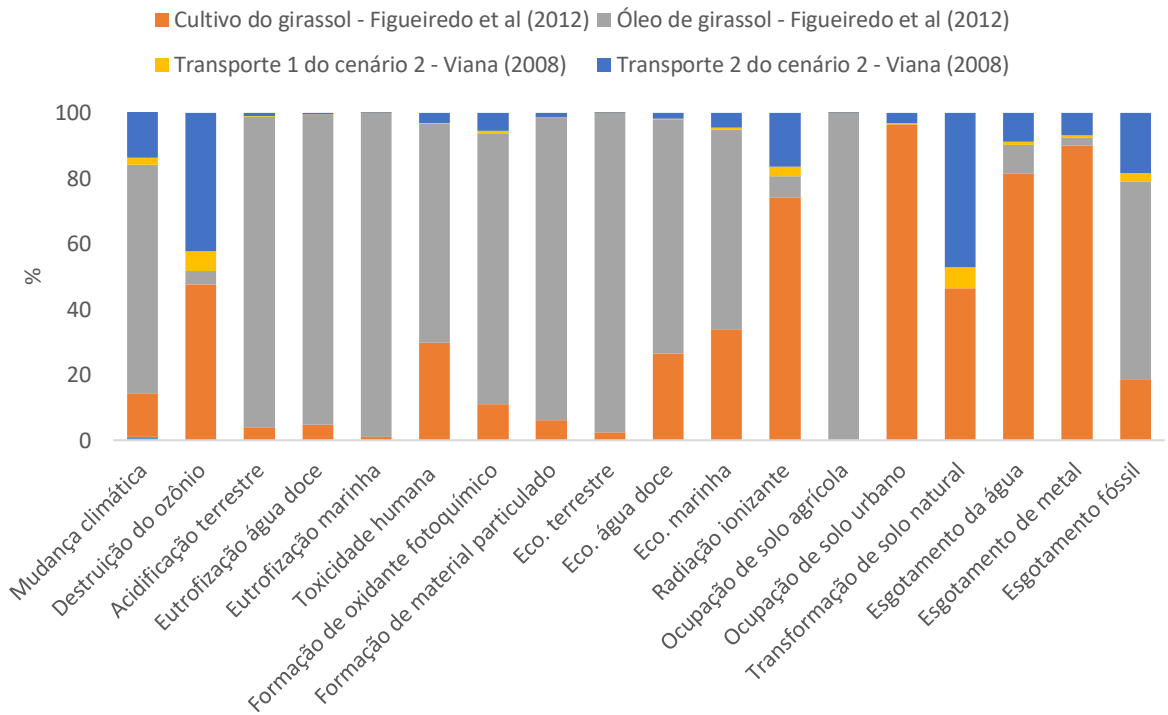
Figura 16 – Impactos ambientais na produção do óleo de girassol



Fonte: Pessoal (2021)

A Figura 17 mostra a etapa completa para se obter o óleo de girassol, passando desde o plantio da semente até os dois transportes para que o transformador chegue até a concessionária. Estes dados são oriundos do trabalho de Figueiredo *et al* (2012). Desta Figura, pode-se notar que a etapa mais impactante deste estudo é a etapa de produção do óleo de girassol, seguindo a mesma conclusão que é tirada do trabalho de Viana (2008). Esta etapa possui altos impactos como na acidificação terrestre, eutrofização marinha e na mudança climática. Ao observar esses dois trabalhos, pode-se tirar de conclusão que a etapa de produção do óleo, apresenta maiores impactos do que a etapa de plantio ou colheita do girassol. Assim, para melhorar esta etapa, podemos aprimorar a eficiência das máquinas para que se produza uma maior quantidade do óleo e também repensar no que diz respeito, a tecnologia das máquinas e do modo de se produção desse produto.

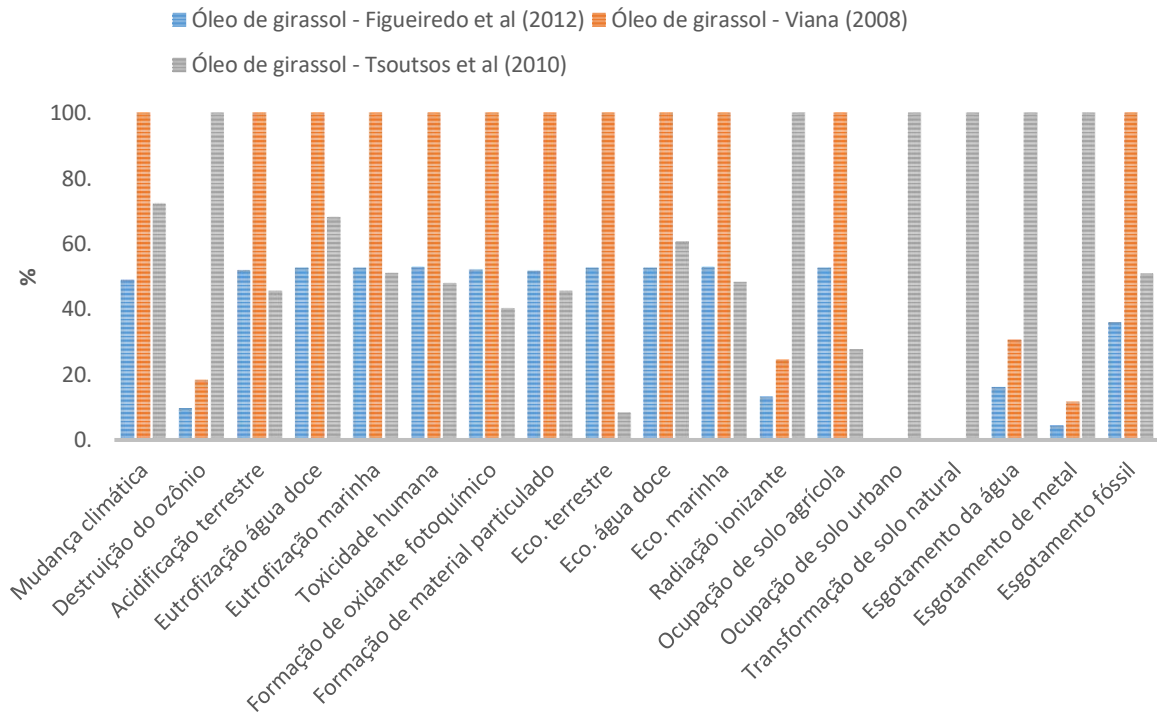
Figura 17 – Impactos para todas as etapas do girassol



Fonte: Pessoal (2021)

A Figura 18, mostra a comparação da etapa de produção do óleo de girassol, através dos estudos de Figueiredo *et al* (2012), Viana (2008) e de Tsoutsos *et al* (2010). Desta Figura, pode-se verificar qual estudo possui um inventário mais completo. Pois quanto mais completo for o inventário, maiores dados serão analisados para que se apresente reais impactos ambientais. Assim, o trabalho de Viana (2008) possui maiores valores nos impactos do que Figueiredo *et al* (2012) e Tsoutsos *et al* (2010), impactos como mudança climática, toxicidade humana, formação de material particulado e esgotamento fóssil. Em seis impactos apresentados no Gráfico acima, o estudo de Tsoutsos *et al* (2012) é maior do que o de Viana (2008) onde destaca a ocupação do solo urbano, transformação de solo natural, esgotamento da água, esgotamento de metal, destruição do ozônio e radiação ionizante. E no trabalho de Figueiredo *et al* (2012), não apresenta nenhum impacto maior perante aos outros dois estudos quando defrontados.

Figura 18 – Comparação para a produção do óleo de girassol



Fonte: Pessoal (2021)

5.3. Resultados do cenário 3

A Tabela 24 é referente a etapa de produção e cultivo da soja, tendo como base de inventários os estudos de Dalgaard *et al* (2008) e a pesquisa de Tsoutsos *et al* (2010). Nesta Tabela, temos os impactos e os resultados gerados pelo software SimaPro para estes dois autores. Uma coisa importante de salientar é que em alguns impactos tem-se valores negativos, ou seja, está deixando de impactar o meio ambiente. Isso se deve ao fato de que o trabalho de Dalgaard *et al* (2008), possuem fertilizantes, herbicidas e pesticidas orgânicos em seu inventário. Assim ao aplicar estes tipos de fertilizantes eles deixam de emitir poluentes atmosféricos, aquáticos e terrestres, característicos dos fertilizantes industriais.

Tabela 24 – Impactos ambientais para o cenário 3

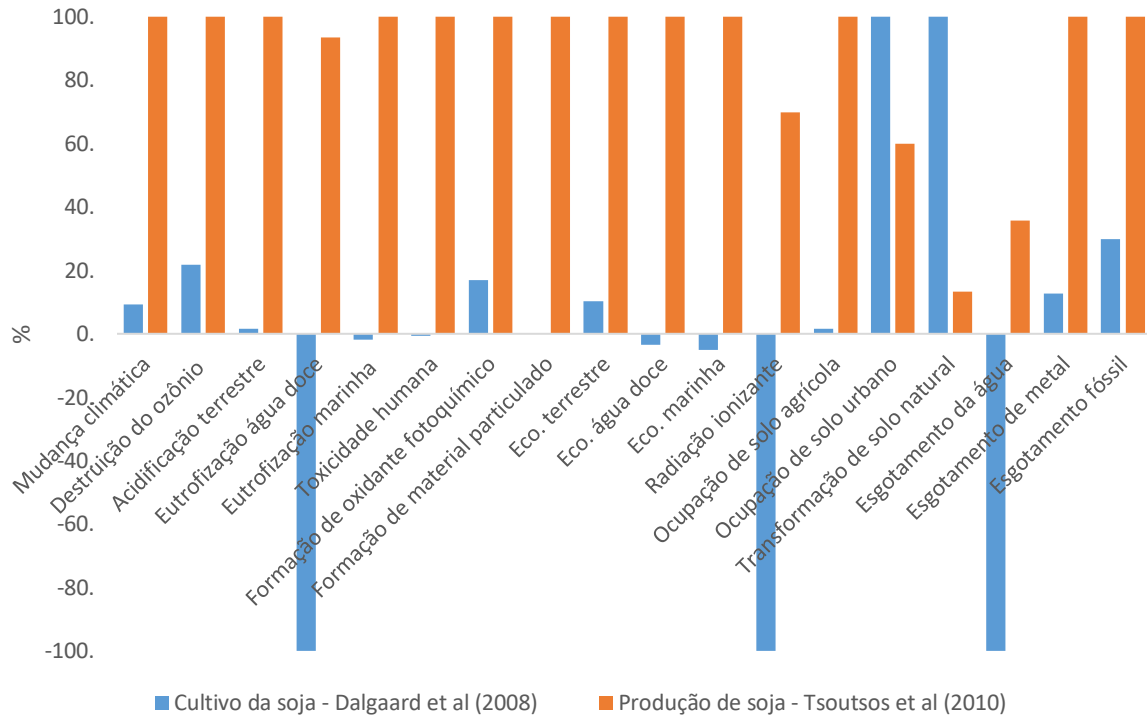
IMPACTOS	DADOS DALGAARD ET AL (2008)	DADOS TSOUTSOS ET AL (2010)	UNIDADE
Mudança climática	9,26	100	kg CO ₂ eq
Destruição do ozônio	21,697	100	kg CFC-11 eq
Acidificação terrestre	1,627	100	kg SO ₂ eq
Eutrofização água doce	-100	93,543	kg P eq
Eutrofização marinha	-2	100	kg N eq
Toxicidade humana	-1	100	kg 1,4-DB eq
Formação de oxidante fotoquímico	16,928	100	kg NMVOC
Formação de material particulado	0,112	100	kg PM10 eq
Eco. terrestre	10,318	100	kg 1,4-DB eq
Eco. água doce	-3	100	kg 1,4-DB eq
Eco. marinha	-5	100	kg 1,4-DB eq
Radiação ionizante	-100	69,778	kBq U235 eq
Ocupação de solo agrícola	1,568	100	m ² a
Ocupação de solo urbano	100	59,872	m ² a
Transformação de solo natural	100	13,328	m ²
Esgotamento da água	-100	35,616	m ³
Esgotamento de metal	12,684	100	kg Fe eq
Esgotamento fóssil	29,798	100	kg oil eq

Fonte: Pessoal (2021)

A Figura 19 apresenta os resultados que foram descritos na Tabela 27. De acordo com os dados apresentados, pode-se notar que o inventário de Tsoutsos *et al* (2010) apresenta maiores impactos para o meio ambiente, quando comparado com o inventário de Dalgaard *et al* (2008), como exemplo: mudança climática, destruição do ozônio, ecotoxicidades e acidificação terrestre. Como salientado anteriormente e bem evidente na Figura 19, têm-se essas colunas para baixo do eixo da porcentagem (%). Estes valores representam fertilizantes naturais, ou seja, deixam de emitir essas quantidades para o meio ambiente, ficando evidente de que quanto

mais se utilizar fertilizantes, pesticidas e herbicidas naturais ou orgânicos, menores serão os impactos que irão para o meio ambiente, tanto para o cenário 2 quanto para o cenário 3.

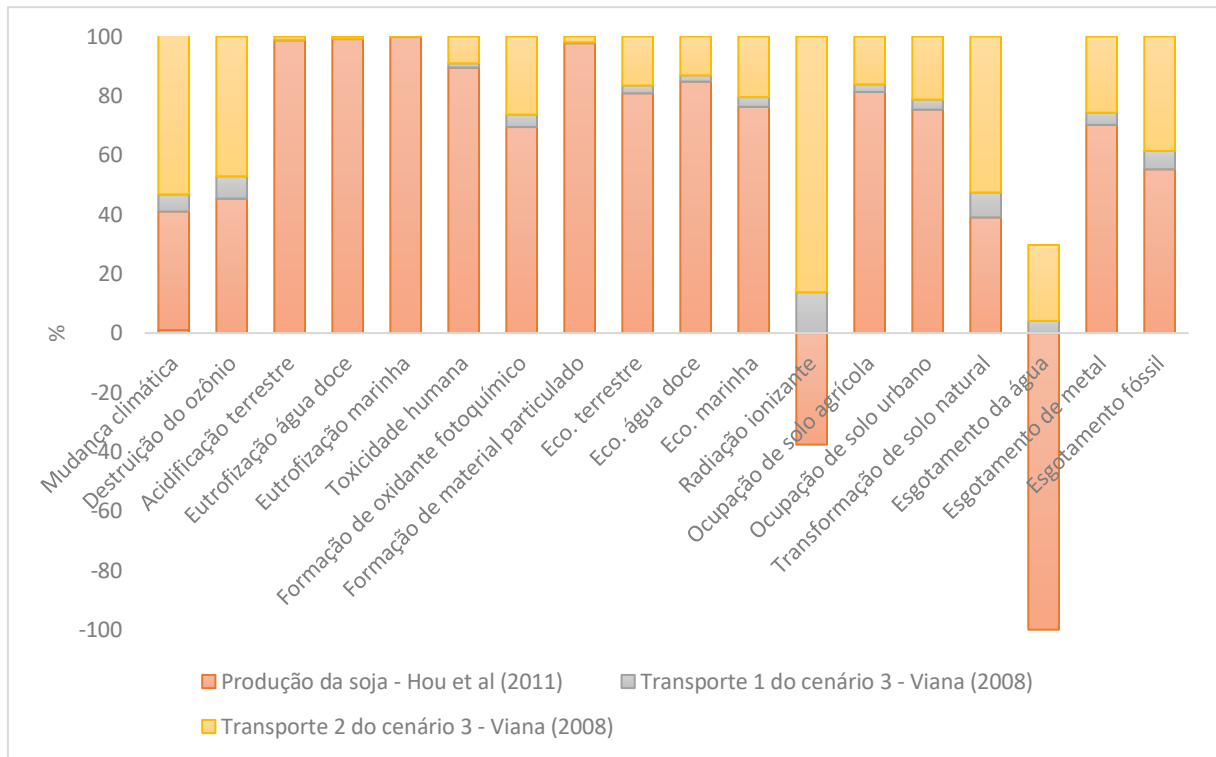
Figura 19 – Impactos para a produção e cultivo da soja



Fonte: Pessoal (2021)

A Figura 20, mostra os impactos para que se produza o óleo de soja utilizada para lubrificar e refrigerar um transformador. Os dados foram oriundos do estudo de Hou *et al* (2011). Na Figura, também apresenta os transportes 1 e 2 para que a soja chegue até a empresa que produza o óleo, e depois da empresa até a concessionária de energia. Para que se produza o óleo de soja os principais impactos são eutrofização de água doce e marinha e toxicidade humana. Entre os transportes, o transporte 2 apresenta piores impactos do que o transporte 1. O transporte 2 impacta na radiação ionizante e na transformação de solo urbano e natural. Porém, a produção do óleo é onde apresenta os piores impactos para o meio ambiente. Assim, esta deve ser estudada e melhorada, para que haja meios mais eficientes para a diminuição destes impactos. Encontramos aqui também impactos que são deixados de ser emitidos para o meio ambiente, como em radiação ionizante e em esgotamento da água, devido ao uso de fertilizantes orgânicos.

Figura 20 – Impactos para a produção do óleo de soja



Fonte: Pessoal (2021)

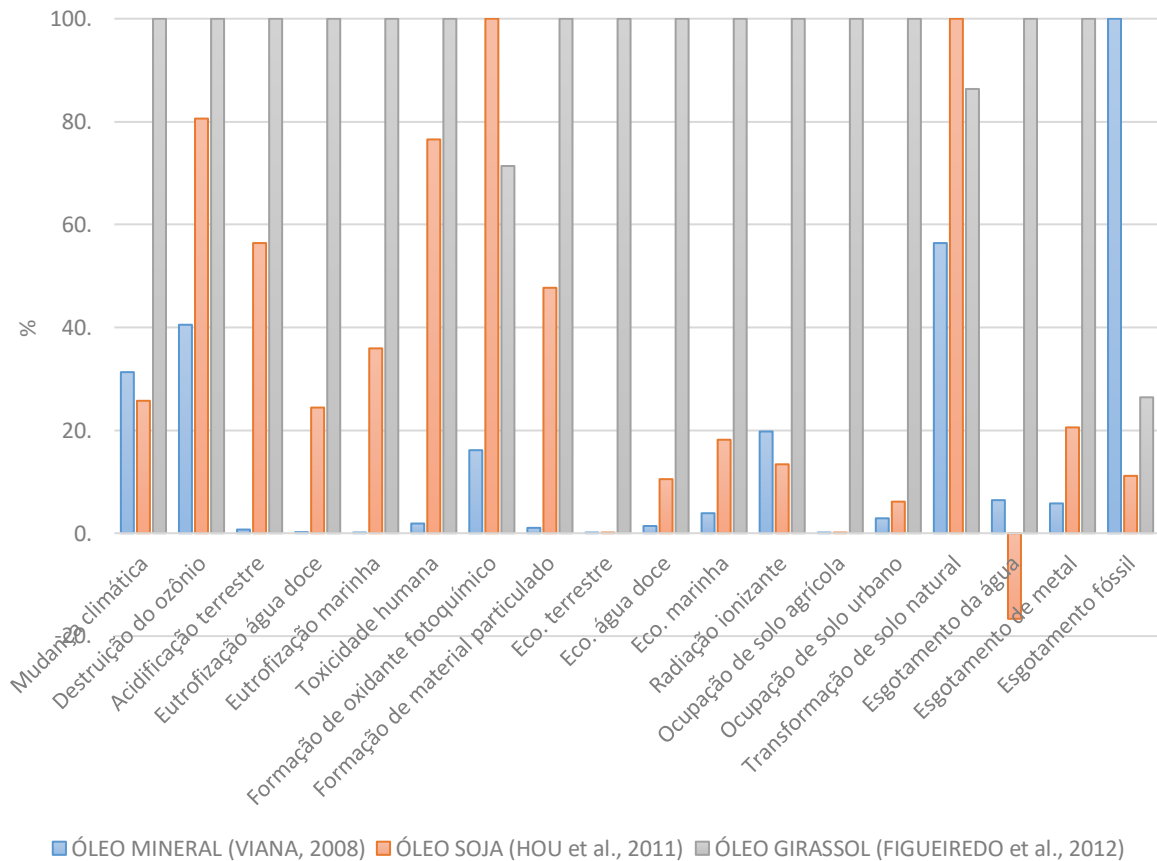
5.4. Resultados da comparação para todos os óleos

Este resultado pode ser considerado o mais importante desta pesquisa, pois confronta todos os óleos do cenário 1, do cenário 2 e do cenário 3 para que possa ter uma resposta em questão ambiental, de que será a melhor opção para se fazer a função de refrigeração e lubrificação de transformadores. Para esta etapa, foram colocados um inventário de cada cenário que é considerado o mais completo, ou seja, inventários que apresentam mais *inputs* e *outputs*.

Assim, para o cenário 1 foi utilizado o inventário de Viana (2008), para o cenário 2 foi o inventário de Figueiredo *et al.* (2012) e para o cenário 3, o inventário de Hou *et al* (2011). Estes inventários foram escolhidos pelo fato de apresentarem maiores quantidades de dados tanto na entrada como na saída, para que possuem maiores valores de impactos para podermos defrontá-los. A Figura 21, mostra o resultado obtido utilizando o software SimaPro quando postos estes três inventários. Desta Figura, pode-se notar que o cenário que apresenta o pior resultado de impacto é o cenário 2, que é representado pelo óleo de girassol. Em seguida, a segunda melhor opção é o óleo do cenário 3, que é o óleo de soja. Pode ser que estes dois cenários são piores,

pelo fato de ser uma nova atribuição para estes óleos. Entretanto, foi notado que quando foi utilizado pesticidas, herbicidas e fungicidas naturais ou orgânicos, o impacto ambiental é reduzido, como no resultado negativo no impacto esgotamento da água no cenário 3.

Figura 21 – Comparação do óleo para todos os cenários



Fonte: Pessoal (2021)

A Figura 21 mostra ainda que o melhor cenário para se fazer a tarefa de refrigeração e lubrificação de transformadores corresponde ao cenário 1, ou seja, o óleo mineral. Assim, esta forma de produção é mais eficiente do que as dos óleos vegetais, pois apresentam valores de impactos menores. Pode-se notar que somente no impacto de esgotamento fóssil, o cenário 1 apresenta um valor maior do que os outros dois cenários, devido ao fato do cenário 1 ser de base mineral, precisando de petróleo para ser produzido.

O fator do óleo de girassol apresentar os piores impactos foi devido que na etapa de produção dos grãos de girassol, quando selecionado os grãos no software SimaPro, ele utilizou o banco de dados Agri-FootPrint. Este banco de dados, quando introduzido esta etapa de grãos de girassol, apresentam grandes valores na ocupação de solo, na energia com uso de óleo diesel para sua produção e fertilizantes com base de ureia, nitrato e fosfato. Apresentam também altos

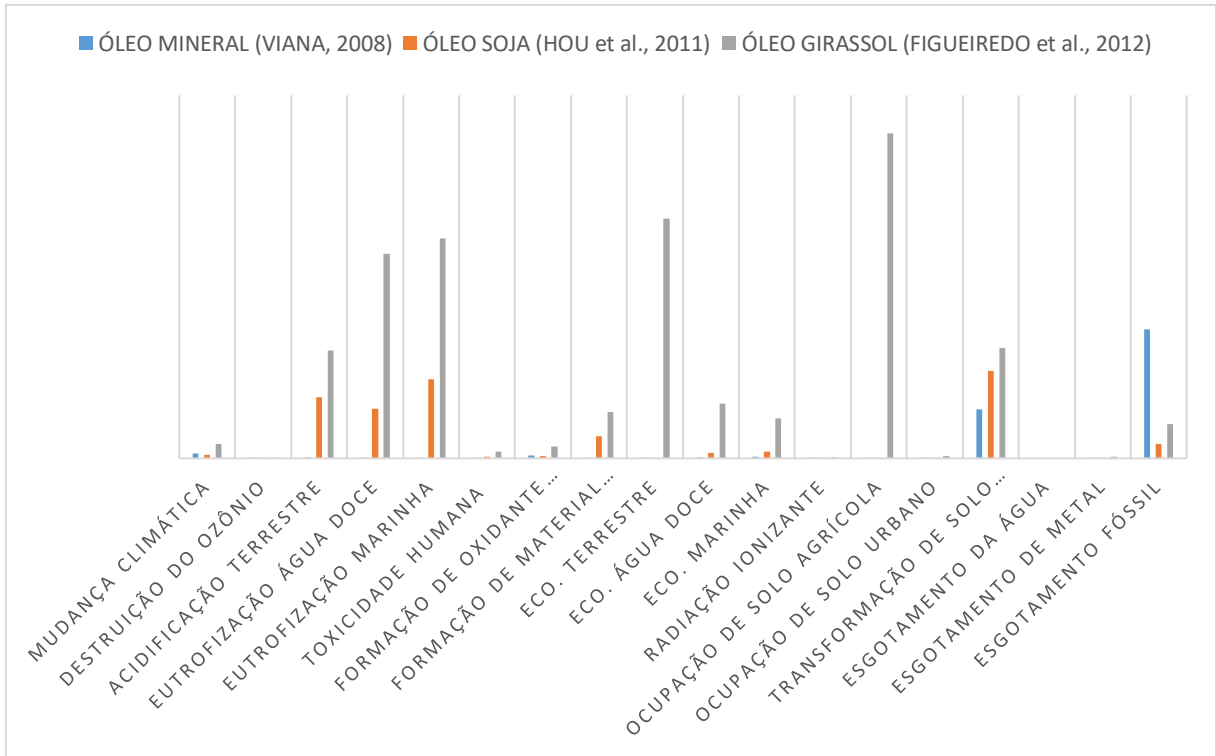
valores de emissões para o ar (emissão de N_2O , amônia e CO_2), para a água (emissão de nitrato, cádmio, cromo, cobre, mercúrio, níquel, chumbo e zinco) e para o solo (emissões de esterco, cádmio, cobre, mercúrio, níquel, chumbo e zinco). Assim, impactou significativamente nos valores mostrados na Figura 21, o que não se encontra para a produção dos outros dois cenários.

Outro fator mostrado pela Figura 21, é a barra negativa no esgotamento de água para o cenário 3. Este valor é negativo pelo fato de utilizar no inventário o fertilizante potássico orgânico. Quando este tipo de fertilizante é selecionado, este apresenta um valor de 14% de nitrogênio em sua constituição, conseqüentemente, é evitado a necessidade de consumir outros fertilizantes com base de nitrogênio. Devido ao fato de evitar o consumo de mais fertilizantes, resultou impactos negativos.

5.5. Normalização

A normalização é importante para um estudo de ACV, pois é aqui, que os resultados dos indicadores de impactos são relacionados com um elemento de referência, assim, podemos ver se estes resultados encontrados são significantes ou não. A Figura 22 mostra os resultados normalizados da Figura 21, que é a comparação de todos os óleos. Este elemento de referência utilizada pelo software SimaPro é a base de dados Europe Recipe I, do ano de 2000. Esta base de dados possui valores de impactos da Europa do ano de 2000. Nota-se que os maiores valores são encontrados para o cenário 2, óleo de girassol, devido a etapa de grãos de girassol utilizar um grande valor na ocupação do solo (que é o maior impacto dos resultados normalizados) e a grande quantidade de metais pesados que são emitidos desta mesma etapa, valores que impactam na ecotoxicidade terrestre. Já na parte de acidificação terrestre, o que influencia neste valor é o esterco que é emitido.

Figura 22 – Normalização



Fonte: Pessoal (2021)

6. COTAÇÃO

Nesta etapa, foi feita uma cotação para dar peso nos resultados levantados no capítulo 5. Os dados utilizados para a análise se encontram no capítulo 3 e na seção 3.4 e a quantidade de óleo utilizada é referente a unidade funcional, que é de 106 litros.

Conforme dito anteriormente, o preço do litro de óleo mineral que faz a lubrificação e refrigeração de um transformador é de R\$14,6 reais/litro (Mercado Livre, 2021). Neste estudo estamos utilizando o transformador de 15 kV de tensão de operação, possui uma potência de 45 kVA e assim, ele precisa de 106 litros de óleo para sua operação.

Assim, o valor do litro de óleo multiplicado pela quantidade necessária pelo transformador, se tem o valor de óleo que cada transformador possui. Portanto,

$$\text{Preço total do óleo (R\$)} = \text{preço litro óleo (R\$)} \times \text{quantidade (litros)}$$

$$\text{Preço total do óleo (R\$)} = 14,6 \text{ (R\$)} \times 106 \text{ (litros)}$$

$$\text{Preço total do óleo (R\$)} = 1547,6$$

Deste resultado, conclui-se que cada transformador refrigerado por óleo mineral, gasta um valor de óleo de R\$1547,6 reais/transformador.

Os dados para o óleo vegetal são iguais ao utilizado para o óleo mineral, o único valor que é diferente será o valor do litro deste óleo, que é de R\$15,6 reais/litro (Mercado Livre, 2021). Portanto,

$$\text{Preço total do óleo (R\$)} = \text{preço litro óleo (R\$)} \times \text{quantidade (litros)}$$

$$\text{Preço total do óleo (R\$)} = 15,6 \text{ (R\$)} \times 106 \text{ (litros)}$$

$$\text{Preço total do óleo (R\$)} = 1653,6$$

Deste resultado, conclui-se que cada transformador lubrificado e refrigerado por óleo vegetal possui um valor por transformador de R\$1653,6 reais.

Vale ressaltar que estes valores correspondem somente ao preço do óleo contido em cada transformador, não estão relacionados os outros valores de componentes que os transformadores possuem.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho realizou um ACV de diferentes tipos de óleo de lubrificação e refrigeração de um transformador. Para isso, três cenários foram criados e simulados utilizando o software SimaPro para podermos chegar à conclusão de qual seria a melhor opção do ponto de vista ambiental. O Cenário 1 é representado pelo óleo mineral, o Cenário 2 é representado pelo óleo vegetal de girassol e o Cenário 3 corresponde ao óleo vegetal de soja.

Importante salientar também que neste ACV foram levados em conta também a questão do transporte que cada tipo de óleo com seu respectivo transformador faz até que ele chegue ao seu destino final, que neste trabalho é a CEMIG de Belo Horizonte, responsável pelos transformadores no estado de Minas Gerais. Foi realizado um estudo de viabilidade econômica básica também para que ela em conjunto com o ACV possa dar uma resposta mais crítica para definir o melhor cenário.

Após todos os inventários serem plotados no software SimaPro, constatou-se que para o Cenário 1, os impactos mais relevantes foram verificados na etapa de refino de petróleo e os piores impactos deste Cenário correspondem a etapa de transporte 2 que é o caminhão com transformadores, mostrando como os veículos no Brasil são grandes poluidores para o nosso meio ambiente.

No Cenário 2 a etapa que mais impacta, ou seja, apresenta valores para impactos maiores é a etapa para se produzir o óleo de girassol, seguido de perto da etapa para se produzir o girassol (seus grãos), devida a quantidade de produtos químicos oriundos tanto da plantação dos grãos até a transformação do óleo em óleo lubrificante. Já para o cenário 3 a etapa de produção do óleo é a que apresenta maiores valores quando verificados os impactos. Nesta etapa, está incluída também o plantio da soja.

Quando estes Cenários foram comparados, temos que, o melhor Cenário encontrado por meio dos inventários levantados, foi o Cenário 1 correspondente ao óleo mineral. Chegou-se a esse resultado pelo fato de o inventário deste óleo ser menos impactante do ponto de vista ambiental que os óleos vegetais.

Um dos principais impactos do cenário 1 é encontrado no transporte 1, havendo uma melhora nos motores dos caminhões, menos gases injetados no ar e assim, haverá uma grande diminuição dos impactos no ar. Outro meio de melhorar este cenário é a implementação de um oleoduto que possa ligar a bacia de campos e a empresa que faz a inserção do óleo no

transformador, eliminando assim os impactos dos transportes 1 e 2. Uma outra sugestão é a criação de uma outra empresa que faça a inserção do óleo no transformador mais cerca da Bacia de Campos, diminuindo assim, a distância percorrida pelos caminhões.

Entretanto, um modo de mudar este resultado é por meio da utilização de sementes orgânicas ou também por usar pesticidas, herbicidas e fungicidas naturais ou orgânicos nas plantações. A criação de um oleoduto que possa ligar os grandes campos de plantação de girassol e soja até a empresa que insere o óleo no transformador, ou até mesmo, construindo uma empresa que faça essa atividade para mais perto destes campos produtores, irá haver uma diminuição dos impactos dos transportes 1 e 2.

Por meio da cotação também pode-se verificar que o preço do óleo mineral que é de R\$1547,6 por transformador, enquanto o óleo vegetal possui um valor de R\$1653,6 por transformador. Os valores podem até ser parecidos, mais quando pensamos na quantidade de transformador existente no Brasil, esta diferença se torna muito grande.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para um estudo futuro é indicado fazer uma busca por inventários mais completos e novos, pois com o passar do tempo, os impactos dos cenários criados neste estudo, possam mudar. Assim, com novos dados de inventários, os resultados poderão se modificar.

Uma análise financeira pode ser feita para analisar se realmente os custos para se produzir o óleo mineral é mais baixo do que para se fazer o óleo vegetal.

REFERÊNCIAS

Aalborg, A. F. **Calor específico médio de algumas substâncias**. Disponível em: <<http://www.aalborg-industries.com.br/downloads/calor-especifico-medio.pdf>>. Acessado em 23/06/2021, 15:03:23.

ABIOVE. **Associação Brasileira de Indústrias de Óleos vegetais**. Estatística mensal. Disponível em: <<http://abiove.org.br/estatisticas/>>. Acessado em 24/06/2021, 14:58:23.

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. NBR 14043 Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida: interpretação do ciclo de vida. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 19 p.

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. NBR ISO 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. NBR ISO 14071: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Processos de análise crítica e competências do analista. Rio de Janeiro, 2018.

ALVES, C.; Nova, Q. Aerossóis Atmosféricos: perspectiva histórica, fontes, processos químicos de formação e composição orgânica. **Escola Superior de Tecnologia e Gestão**. vol. 28, n. 5, pag. 859-870, 13 abr. 2005.

ANDRADE, T. M. S. **Comparação de metodologia para análise de ciclo de vida de biodiesel**. 2012. 80 p. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade de Aveiro, 2012.

BATISTA, M.T. Comunicação pessoal, 2020.

BERLIN, J. Environmental life cycle assessment (LCA) of Swedish semi-hard cheese. **International Dairy Journal**. v. 12, p. 939-953, 2002.

BIANCHI, P. R. **Caracterização do Envelhecimento de Transformadores de Potência: Análise Comparativa**. Florianópolis. 2000. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

BROWN, R. E. **Electric power distribution reability**. New York. 2º edição. 2002.

CÂMARA, G. M. S; *et al.* O Agronegócio das plantas oleaginosas: algodão, amendoim, girassol e mamona. **ESALQ**, Piracicaba, p. 204, 2001.

CANNON, G. S.; HONARY, L.; US Patent. **Soybean based transformer oil and transmission line fluid**. Patente: 5.958.851. p. 9, 1999.

CAVALETT, O.; CHAGASM, M. F.; *et al.* Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 18, p. 647-658, 2012.

CEMIG. **Centrais Elétricas de Minas Gerais**. Disponível em: <<http://www.cemig.com.br>>, 2008. Acessado em 2 de maio de 2019, 15:40:06.

CHEHEBE, J. R. **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000. Qualitymark**, Rio de Janeiro: Qualitymark, 1997, 104 p.

COLTRO, L.; GARCIA, E. E. C.; *et al.* Life cycle inventory for electric energy system in Brazil. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Landsberg, Alemanha, v.8, n. 5, p. 290-296, 2003.

COLTRO, L. **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão**. Campinas: CETEA/ITAL, 2007.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. 2019. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/3080-primeiro-levantamento-da-safra-2019-20-de-graos-indica-producao-de-245-8-milhoes-de-t>>. Acesso em: 22/10/2020, 18:14:36.

CUEVAS, P. **Comparative life cycle assessment of biolubricants and mineral based lubricants**. 2010. 117 p. Dissertação (mestrado em Ciência). Universidade de Pittsburgh. 2010.

CURRAN, M; **The Status of LCA in the USA**. Int. J. LCA, vol.4 (3), p. 123-124. Landsberg, Germany: Ecomed, 1999.

DALGAARD, R.; *et al.* LCA of soybean meal. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 3, p. 240, 2008.

DUTRA, E. G.; *et al.* Emissão Veicular e o Ozônio Troposférico na Região Metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. In: CIBIM9 - 9º Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, 2009, Las Palmas de Gran Canaria. **Anais...** (9º Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica), Las Palmas de Gran Canaria, 2009, p. 29-33.

EKVALL, T. A market-based approach to allocation at open-loop recycling. **Resources Conservation & Recycling**. v. 29, p. 91-109, mai. 2000.

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Soja em números (safra 18/19), jun. 2019. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em 20/01/2020, 17:35:39.

ENERGITRAFO. **Energitrafo transformadores**. Disponível em: <<http://www.energitrafo.com.br/>>. Acesso em 07/04/2020, 15:32:21.

FCTUC. **Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra**. Disponível em: <http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1>. Acessado em 05 março de 2019, 12:12:58.

FILHO, P. R. C. F. R.; *et al.* Propriedades Físicas de Óleos Lubrificantes Minerais e Vegetais e Avaliação de Desgastes por Four Ball. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, p. 154-163, 2016.

FIGUEIREDO, F.; *et al.* LCA of sunflower oil addressing alternative land use change scenarios and practices. **8th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector**, p 1-4, 2012.

FRIEDENBERG, L. E.; SANTANA, R. M. C. Propriedades de óleos isolantes de transformadores e a proteção do meio ambiente. **IX Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental**, Porto Alegre, p 1-15, 2014.

FRIEDENBERG, L.; SANTANA, R. Propriedades de óleos isolantes de transformadores e a proteção do meio ambiente. In: IX Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, 2014, Porto Alegre. **Anais...** (IX Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental). Porto Alegre, UFRS, 2014. p. 1-12.

FURTADO, J. M. S. **Comparação de Métodos e Ferramentas de Análise de Impacto de Ciclo de Vida, aplicados a processos químicos alternativos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial), - Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2014.

GARCIA, K. R. L. **Avaliação do Ciclo de Vida do Óleo de Girassol**. IV Congresso Brasileiro sobre Gestão pelo Ciclo de Vida, São Bernardo do Campo, São Paulo, 9 a 12 de novembro de 2014.

GEORGILAKIS, P. S. Environmental cost of distribution transformer losses. **Applied Energy**, v.88, p.3146–3155, 9 abr. 2011.

GENNARI, R. F. **Determinação de metais em material particulado pela técnica de espectrometria de emissão atômica de plasma de argônio induzido**. São Paulo, 1991. 90 p. Dissertação de mestrado – Instituto de Química, Universidade de São Paulo.

GOEDKOOP, M. *et al.* **Recipe 2008: a life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level**. Primeira edição, Holanda, 2013.

GRAINE, L.; FLETCHER, P.; ROHSLER, H. **Lifetime assessment and updating of substations**. In: Session papers & proceedings. 1994. Cigré, Paris. **Anais...** Session papers & proceedings, 1994. P. 1-6.

GUINÉE, J. B. *et al.* Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. **Journal of Industrial Ecology**, vol. 7, Dordrecht, 225 p., 2002.

HAUSCHILD, M. Z.; *et al.* Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 18, p.683-695, 2012.

HAUSCHILD, Michael Z.; ROSENBAUM, Ralph K.; OLSEN, S. Life cycle assessment. **Theory and practice**, 2 set. 2017.

HEGEDIC, M. *et al.* Life cycle assessment of power transformer-case study. **Technical Science – Mechanical Engineering**, 4 jun. 2016.

HEIJUNGS, R.; GUINÉE, J. Allocation and “what if” scenarios in life cycle assessment of waste management systems. **Life Cycle Assessment in Waste Management**. v. 27, p. 997-1005, 2007.

HOBOLD, V. **Avaliação de metodologias para análise toxicológica utilizando algas do tipo *Scenedesmus subspicatus* e *Daphnia magna***. 2007, 84 p. Dissertação (mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade do extremo sul catarinense, Criciúma, 2007.

HOU, J.; *et al.* Life cycle assessment of biodiesel from soybean, jatropha and microalga in China conditions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 5081-5091, 2011.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mt/mato-grosso/maisagromt/noticia/2019/10/14/girassol-produzido-em-mt-vira-oleo-comida-para-passaro-e-beleza-da-lavoura-atrai-turistas.ghtml>>. Acesso em: 13/01/2020, 16:00:32.

INBRAMAQ. **Industria Brasil de Máquinas Ltda**. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/385046885/C-3A-5CDocuments-and-Settings-5CUser-5CMeus-Docmentos-5CLICITACOES-5CCATALOG-TANQUE>>. Acesso em: 17/05/2020, 15:18:23.

ISO 14040. Environmental management. **Life Cycle Assessment: principles and framework**. Genève, Suíça, 1997.

ISO 14041. Environmental management. **Life Cycle Assessment: goal and scope definition - inventory analysis**. Genève, Suíça, 1998.

ISO 14042. Environmental management. **Life Cycle Assessment: life cycle impact assessment**. Genève, Suíça, 2000.

ISO 14043. Environmental management. **Life Cycle Assessment: life cycle interpretation**. Genève, Suíça, 2000.

ISO/TR 14047. Environmental management. **Life Cycle Impact Assessment: examples of application of ISO 14042**. Genève, Suíça, 2003.

ISO/TR 14049. Environmental management. **Life Cycle Assessment: examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis**. Genève, Suíça, 2000.

ISO/TS 14048. Environmental management. **Life Cycle Assessment: data documentation format**. Genève, Suíça, 2002.

ISO/TR 14044. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. ABNT. Disponível em: <file:///C:/Users/marco/Downloads/NBRISO14044%20%20GAACV%20%20Requisitos%20e%20orienta%C3%A7%C3%B5es.pdf>. Acesso em: 18/06/2021, 19:03:12.

ITAIPU. **Transformadores Trifásicos – Tabela de dimensões**. Disponível em: <https://www.itaiputransformadores.com.br/transformadores/trifasicos/2>. Acesso em: 7 mar. 2019, 20:12:35.

ITO, M. Life Cycle Assessment of PV Systems. **Tokyo Institute of Technology Intech**, Japão, 2011.

JUNIOR, F. W. A CPFL cumpre seu papel. **Revista P&D: Projetos ambientais**, v.1, p.23-24, 2006.

LEITE, R. M. V. B.; CASTRO, C.; *et al.* **Indicações para o cultivo de girassol nos Estados do Rio Grande do Sul, Paraná, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás e Roraima**. Comunicado técnico n. 78. Londrina: CNPSO-EMBRAPA. Fev. 2007. 4 p. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br>. Acesso em: 02 abri. 2020, 18:32:05.

LISKA, A. J. Eight principles of uncertainty for Life cycle assessment of biofuel Systems. **Sustainable Biofuels: An Ecological Assessment of Future Energy**. University of Nebraska, Lincoln, p. 243-268, 2015.

MARTINS, M. Será o óleo vegetal um possível substituto do óleo mineral para transformadores?. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, Secavém, Portugal, v. 20, n. 3-4, p. 15-20, 2008.

MATTSSON, B.; SONESSON, U. Environmentally-friendly food processing. **Woodhead Publishing Limited**. Cambridge, 337 p. ,2003.

MCMANUS, M. C.; HAMMOND, G. P.; BURROWS, C. R. Life-Cycle Assessment of Mineral and Rapeseed Oil in Mobile Hydraulic Systems. **Journal of Industrial Ecology**, Massachusetts Institute of Technology and Yale University, v. 7, insue 3-4, p. 163-177, jul 2004.

MERCADO LIVRE. Disponível em: <https://lista.mercadolivre.com.br/oleo-isolante-transformador-litro>. Acesso em 23/06/2021, 14:06:45.

MORETTO, E; FETT, R; **Tecnologia de óleos e gorduras vegetais**. São Paulo, Varela Editora e Livraria Ltda, 1998. 150 p.

MYERS, S.D; **A guide to transformer maintenance (TMI)**. Akron, Ohio, 1981. 836 p.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. Física das radiações. **São Paulo: Oficina de Textos**, 2010.

PENA, R. F. A. **Site da UOL, Mundo Educação**. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/producao-petroleo-no-brasil.htm>>. Acesso em 07/02/2020, 15:13:14.

PFISTER, S.; *et al.* Understanding the LCA and ISO water footprint: A response to Hoekstra (2016). “A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA”. **Ecological Indicators**, v. 72, p. 352-359, jan. 2017.

PORTELLA, M. D. G. **Avaliação da presença de indicadores de oxidação do papel isolante termoestabilizado em equipamentos de subestação**. Curitiba. 2010. p. 123. Dissertação (mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais). Universidade Federal do Paraná/PIPE, 2010.

RIBEIRO, M. L.; *et al.* Contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: avaliação preliminar. **Química Nova**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 688-694, 2007.

RIBEIRO, W. C. Geografia política e gestão internacional dos recursos naturais. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, São Paulo, v.24, p.69-80, 2010.

RIES, W. **Transformadores: fundamentos para projeto e cálculo**. Editora Edipucrs, 2007.

ROMAGNOLE. **Romagnole transformadores**. Disponível em: <<https://www.romagnole.com.br/>>. Acesso em: 08/05/2020, 14:36:05.

ROZGA, P. Properties of new environmentally friendly biodegradable insulating fluids for power transformers. **European Scientific Journal**, p 9-21, 2013.

SEBRAE. **Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas – BIODIESEL**. Disponível em: <<http://www.biblioteca.sebrae.com.br/>>. Publicado em: 3 abri. 2007. Acesso em: 01/04/2020, 17:20:39.

SHOGREN, R. L.; PETROVIC, Z.; Liu, Z.; ERHAN, S. Z. Biodegradation behavior of some vegetable oil-based polymers. **Journal of Polymers and the Environment**, v.12, p 50-56, 2004.

SILVA, C. R.; *et al.* Caracterização físico-química e dielétrica de óleos biodegradáveis para transformadores elétricos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.2, p. 229-234, 2012.

SILVA, M. N. Cultura do girassol. **FUNEP**, Jaboticabal, p. 67, 1997.

SOLOMON, S. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history. **Reviews of Geophysics**, v. 37, n. 3, p. 275-316, 1999.

TSOUTSOS, T.; *et al.* Life Cycle Assessment for biodiesel production under Greek climate conditions. **Journal of Cleaner Production**, p. 328-335, 2010.

UCKO, D. A. Química para as Ciências da saúde. **São Paulo: Manole**, 1992.

UHREN, W. **Aplicação de óleo vegetal como meio isolante em equipamentos elétricos, em substituição ao óleo mineral isolante**. Curitiba, 2007. 123 p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante - PRODETEC). Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e Instituto de Engenharia do Paraná, 2007.

UMANS, S.; FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. **Máquinas Elétricas**. Editora McGraw-Hill. 7^o edição. 2014.

VIANA, M. M. **Inventário do ciclo de vida do biodiesel etílico do óleo de girassol**. Dissertação (mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

ZBICINSKI, I.; *et al.* Product design and life cycle assessment. **The Baltic University**, livro 3, Uppsala, 2006.