



ANA DANIELA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE UMA USINA
TERMELÉTRICA DE BIOMASSA DE EUCALIPTO:
ESTUDO DE CASO**

**LAVRAS - MG
2023**

ANA DANIELA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE UMA USINA TERMELÉTRICA DE
BIOMASSA DE EUCALIPTO: ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, área de concentração Mudanças Climáticas, Energia e Poluição Atmosférica, para obtenção do título de Mestre.

Prof. DSc. Márcio Montagnana Vicente Leme
Orientador

Prof. Dcs. Paulo Fernando Trugilho
Co-orientador

LAVRAS - MG
2023

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Santos, Ana Daniela dos.

Avaliação do ciclo de vida de uma usina termelétrica de
biomassa de eucalipto: estudo de caso / Ana Daniela dos Santos. -
2023.

82 p. : il.

Orientador(a): Márcio Montagnana Vicente Leme.

Coorientador(a): Paulo Fernando Trugilho.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Floresta. 2. Bioenergia. 3. Sustentável. I. Leme, Márcio
Montagnana Vicente. II. Trugilho, Paulo Fernando. III. Título.

ANA DANIELA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE UMA USINA TERMELÉTRICA DE
BIOMASSA DE EUCALIPTO: ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, área de concentração Mudanças Climáticas, Energia e Poluição Atmosférica, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 25 de julho de 2023.

Prof. DSc. Márcio Montagnana Vicente Leme	UFLA
Prof. Dcs. Paulo Fernando Trugilho	UFLA
Prof. Dcs. Lucas Rezende Gomide	UFLA
Prof. Dcs. Mateus Henrique Rocha	UFRPE


Prof. DSc. Márcio Montagnana Vicente Leme
Orientador


Prof. Dcs. Paulo Fernando Trugilho
Co-orientador

LAVRAS - MG

2023

À Deus,

Aos meus pais Maurício e Lourdes

Ao meu esposo Gilmar e meu filho Augusto

Aos meus sobrinhos Stefan, Giovana e Clarissa, Enrique, Gabriel, Helena e João Lucas.

À minha irmã Caroline

Aos meus irmãos Augusto César, Víbio, Cláudio e Enrique (*in memoriam*)

A todos que de maneira direta e indireta contribuíram para a realização deste trabalho

Dedico.

AGRADECIMENTO

A Deus... por todo sim, por todo talvez e por todo não!!!

Aos meus pais Maurício e Maria de Lourdes, pelo amor, exemplo de vida e apoio em todos os momentos de minha vida.

Ao meu marido Gilmar e meu filho Augusto César, pelo amor, paciência, apoio e confiança.

A minha irmã Carol, aos meus sobrinhos Stefan e Giovana pelo incentivo e apoio, tia Sueli pelo carinho, a minha prima Maria Auxiliadora (Dorinha) pelo incentivo e ajuda, e a minha irmã Sônia pela referência.

Aos amigos Álvaro Zákha Marani, Aloysio Moura, Dayane Rodarte, Elizangela Costa, José Mourão, Karen Mendes, Matheus Santos e Monaliza Villela, pela ajuda e amizade.

Aos professores Ronaldo Fia, Carlos Volpato, Giovanni Rabelo, Roberto Braga, Carolina Jarochinski e Rosangela Borém, todo carinho, atenção e apoio.

À Aline secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e a Francisca Secretária do Departamento de Ciências Florestais, pela atenção e carinho.

Ao meu coorientador Paulo Trugilho pelo apoio, atenção.

Aos professores Alex Ribeiro pela ajuda e Luciano França, pela colaboração e ajuda.

Ao professor Lucas Gomide pela amizade, atenção, confiança em mim e no meu trabalho e esmero, e que sem a ajuda, este trabalho não seria possível.

Ao meu orientador professor Márcio Montagnana pela orientação, amizade, dedicação acompanhamento e confiança.

A minha família Santos e Valério e aos meus avós (*in memmorian*) Aristides Aureliano e Maria Cândida, Sebastião Valério e Maria Jacinta, pelo exemplo.

A Universidade Federal de Lavras pela oportunidade e excelência na qualidade de ensino.

Epigrafe

...Um dia você aprende.

Que não importa onde já chegou, mas para onde está indo. Aprende que o tempo não é algo que possa voltar. Portanto, plante seu jardim e decore sua alma, em vez de esperar que alguém lhe traga flores. E você aprende que realmente pode suportar... que realmente é forte, e que pode ir muito mais longe depois de pensar que não se pode mais. E que realmente a vida tem valor e que você tem valor diante da vida!

O Menestrel – (William Shakespeare)

RESUMO

O processo de geração bioenergética busca incessantemente por fontes mais sustentáveis. Fontes que contribuam com a diminuição dos impactos negativos ao meio ambiente e que promovam um processo de geração e produção de energia cada vez mais sinérgico e eficaz. Este trabalho objetiva através das metodologias e técnicas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) estabelecer premissas ambientais para a operação, de uma planta florestal para suprimento de uma usina termoelétrica à base de biomassa de eucalipto localizada na Bacia Hidrográfica do Rio Grande no município de São João del Rei no Estado de Minas Gerais. A ACV viabilizou a avaliação dos aspectos ambientais e impactos potenciais associados à implantação em questão, executada do berço ao túmulo. As informações obtidas durante todo o processo foram processadas no software SIMAPRO e tanto as informações obtidas na ACV quanto na Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) resultaram na viabilidade ambiental da implementação da planta termelétrica com capacidade potencial de geração de 50MW de energia.

Palavras-chave: Floresta, Bioenergia, Sustentável.

ABSTRACT

The bioenergy generation process constantly searches for more sustainable sources. Sources that contribute to reducing negative impacts on the environment and that promote an increasingly synergistic and effective energy generation and production process. This work aims, through Life Cycle Assessment (LCA) methodologies and techniques, to establish environmental premises for the operation of a forestry plant to supply a thermoelectric plant based on eucalyptus biomass located in the Rio Grande Hydrographic Basin in the municipality of São João del Rei in the State of Minas Gerais. The LCA made it possible to assess the environmental aspects and potential impacts associated with the implementation in question, carried out from cradle to grave. The information obtained throughout the process was processed in the SIMAPRO software and both the information obtained in the LCA and the Life Cycle Impact Assessment (IACV) resulted in the environmental feasibility of implementing the thermoelectric plant with a potential capacity to generate 50MW of energy.

Keywords: Forest, Bioenergy, Sustainable

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Área de árvores plantadas, 2021 (milhões de hectares).....	20
FIGURA 2 - - Fases da ACV.....	30
FIGURA 3 - Fluxo elementar da ACV da floresta de biomassa de eucalipto.....	33
FIGURA 4 - Localização Regional da Planta Florestal.....	34
FIGURA 5 - Fronteiras do Sistema de uma Planta de Biomassa de Eucalipto.....	38
FIGURA 6 - Fronteiras do Sistema - Termelétrica.....	52
FIGURA 7 - Fluxograma de Impactos da Termelétrica.....	70

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Dependência externa de energia no Brasil.....	24
TABELA 2 - Termelétricas a biomassa de cavaco de madeira ou resíduos florestais...28	
TABELA 3 - Etapas de uma Avaliação de Ciclo de Vida.....	31
TABELA 4 - Informações básicas para a ACV da termoelétrica.....	37
TABELA 5 - Entradas e Saídas para Produção de 1.600 mudas de eucalipto no viveiro.....	41
TABELA 6 - Informações Operacionais da Cultura do Eucalipto – Ano 0.....	43
TABELA 7 - Informações Operacionais da Cultura do Eucalipto.....	46
TABELA 8 - Informações Operacionais da Colheita do Eucalipto.....	49
TABELA 9 - Emissão de poluentes a partir da queima de 1 kg de diesel.....	51
TABELA 10 - Geração de energia - Ciclo de Rankine.....	53
TABELA 11 - Emissões da queima de diesel planta termelétrica – (1 UAP).....	57
TABELA 12 - Emissões da UTE.....	57
TABELA 13 - Principais Emissões Atmosféricas.....	58
TABELA 14 - Principais emissões no solo.....	63
TABELA 15 - Principais Emissões Atmosféricas.....	65
TABELA 16 - Principais emissões no solo.....	71

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparação entre a Matriz Elétrica Brasileira e a Mundial.....	25
Gráfico 2 - Matriz Energética Brasileira 2021.....	25
Gráfico 3 - Capacidade Instalada do SIN (GW).....	26
Gráfico 4 - Crescimento da Matriz Termelétrica Brasileira.....	27
Gráfico 5 - Emissões Atmosféricas – Termelétrica.....	62
Gráfico 6 -Emissões no Solo – Termelétrica.....	64
Gráfico 7 - Emissões no Meio Aquático – Termelétrica.....	68
Gráfico 8 - Categorias de Impacto – Termelétrica.....	69
Gráfico 9 - Depleção Estratosférica.....	72
Gráfico 10 - Formação de Ozônio e Saúde Humana.....	73
Gráfico 11 - Aquecimento Global.....	73
Gráfico 12 - Recursos Fósseis Escassos.....	74
Gráfico 13 - Acidificação Terrestre.....	74
Gráfico 14 - Recursos Minerais Escassos.....	75

SUMÁRIO

RESUMO	8
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE GRÁFICOS.....	12
1 INTRODUÇÃO GERAL	16
2 OBJETIVOS.....	18
2.1 OBJETIVO GERAL.....	18
3 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA.....	18
3.1 EUCALIPTO NO BRASIL.....	18
3.2 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS BIOENERGÉTICAS DO EUCALIPTO	21
3.3 GERAÇÃO DE ENERGIA TERMELÉTRICA NO BRASIL	23
3.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – ACV.....	29
4 METODOLOGIA.....	34
4.1 O PROJETO DA TERMELÉTRICA EM ESTUDO	34
4.2 ESTRATÉGIA DE FORNECIMENTO DE BIOMASSA.....	36
4.3 AVALIAÇÃO AO CICLO DE VIDA (ACV).....	37
4.3.1. INVENTÁRIO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOMASSA.....	39
4.3.1.1 VIVEIRO FLORESTAL	40
4.3.1.2 PLANTIO E PRESCRIÇÃO SILVICULTURAL	42
4.3.1.3 PERÍODO INTERMEDIÁRIO DO PLANTIO	45
4.3.1.3 COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL.....	48
4.3.1.4 TRANSPORTE FLORESTAL.....	50
4.3.1.5 GERAÇÃO DE ENERGIA	51
4.4. A AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA - AICV.....	55
5 RESULTADO	57
6 DISCUSSÃO.....	75
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
8 REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO GERAL

A crise energética atual, o aumento do consumo e o apelo mundial por energia, principalmente no Continente Europeu, indicam que, urge cada vez mais a necessidade de fontes alternativas que permitam o suprimento dessa demanda. As fontes de energia renováveis, principalmente as derivadas de biomassa, surgem como uma opção consistente para atender essa necessidade, e, em substituição ao uso de combustíveis fósseis. A diminuição gradativa do consumo de energia fóssil e aumentando a utilização de fontes renováveis, como a bioenergia. Contudo, tais fontes de energia devem estar consonantes com a legislação vigente, metas e compromissos ambientais nacionais e globais assumidos, voltados para a redução das emissões de gases, poluentes atmosféricos e a diminuição do aquecimento global. Mais do que uma tendência ou necessidade de adequação a um modelo global, o uso sistêmico de fontes de energia renováveis representa uma transição, uma mudança que já faz parte da realidade de muitos.

Segundo Bezerra et al. (2019) a trajetória da produção energética no Brasil, assim como em outros países, seguiu paralelamente à tendência mundial, mesmo que a pequenos passos. A bioenergia proporciona um dos balanços de CO₂ mais favoráveis, especialmente considerando todo o ciclo de vida dos projetos de geração, desde que a biomassa seja obtida de forma renovável e sustentável. Uma fonte é chamada renovável quando a sua taxa de utilização é menor do que a capacidade de regeneração natural deste recurso (DOVICH FILHO, 2022).

O uso da madeira como biomassa para geração de energia objetiva diminuir a dependência energética externa e uma maior segurança quanto ao suprimento da demanda, algo que muitos dos combustíveis hoje empregados não proporcionam. O cavaco de madeira apresenta-se em segundo lugar na geração bioenergética no país. No campo energético, a madeira sempre ofereceu histórica contribuição para o desenvolvimento da humanidade. Ao longo dos tempos, passou a ser utilizada como combustível sólido, líquido e gasoso, em processos para a geração de energia térmica, mecânica e elétrica (BRITO, 2007).

Na matriz energética brasileira, a bioenergia, é uma realidade e vem sendo aprimorada e com um campo de atuação cada vez mais diversificado. De acordo com o (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA- EPE, 2022), o Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica que responde por 53,4% da oferta interna. Considerando que quase a totalidade das

importações são oriundas da usina de Itaipu, a fonte hídrica atinge em torno de 57%. As fontes renováveis representam 78,1% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável. Do lado do consumo final, houve aumento de 5,7%, atingindo um total de 570,8 TWh, com destaque para os setores industrial e residencial, que participaram com 37% e 26% respectivamente.

Para Santos, Rodrigues e Carniello (2021) em uma análise geral desde 2018 o país vem apresentando crescimento da sua independência energética externa. A maior independência e segurança energética, que garante o desenvolvimento e a competitividade tecnológica e industrial de uma nação (PNE-2050, 2020, p. 34). Em suma, as transições energéticas configuram um processo complexo e usualmente longo, envolvem diversas dimensões e trazem transformações amplas nos sistemas socioeconômicos e em suas relações com o meio ambiente.

A geração de energia elétrica a partir de biomassa florestal é uma opção energética atrativa em todas as rotas de sua utilização. A razão para tal, se deve à sua flexibilidade operacional, capacidade de gerar energia de forma despachável. Energia despachável é aquela pela qual sua fonte de energia tenha capacidade de produção, e, não seja condicionada pela disponibilidade do recurso, podendo a potência dos geradores ser ajustada conforme as necessidades, e que por fim, apresente um potencial de integração de diferentes tecnologias e desenvolvimento estratégico. Além de ser renovável, a bioenergia pode também ser sustentável, com menor geração de gases de efeito estufa e outras emissões do que a energia gerada a partir de combustíveis fósseis (DOVICH FILHO, 2022).

A crescente conscientização quanto à importância da proteção ambiental e os possíveis impactos associados aos produtos, serviços, processos, tanto na sua fabricação quanto no consumo, têm aumentado o interesse no desenvolvimento de métodos para melhor compreender e lidar com aqueles impactos.

A ISO 14040:2006 define a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como uma das técnicas em desenvolvimento com esse objetivo. Além de proporcionar a melhoria do desempenho ambiental a ACV inclui técnicas de medição que enfoca os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto.

A ACV) também pode ser definida como a união sistemática de procedimentos para reunir e analisar as entradas e saídas de energia e materiais, bem como as consequências ambientais ou relacionadas à saúde, associadas a produção de um produto ou sistema de serviço ao longo de todo seu ciclo de vida, ou seja, desde a obtenção de matéria-prima até a sua disposição final no pós-consumo (THE GLOBAL DEVELOPMENT RESEARCH CENTER -GDRC [s.d.]).

Almeida, Maciel e Cybis (2017) analisou a influência ambiental desta mudança nas usinas termelétricas, este emprega a metodologia de ACV da eletricidade entregue à rede elétrica pública por uma usina termelétrica.

Dessa forma, diante dos problemas ocasionados pelo esgotamento das fontes já conhecidas de energia, a biomassa de eucalipto se apresenta como uma opção crível e capaz de contribuir positivamente com a redução das emissões de gases de efeito estufa. Pois, apesar de ser o país que possui a matriz energética mais renovável do mundo, o Brasil ainda tem obrigações e metas ambientais a cumprir diante dos acordos internacionais os quais é signatário.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho partiu da prospecção de uma planta florestal com capacidade de produção de biomassa para a geração de bioenergia termelétrica de 50MW de energia. E objetivou a partir da metodologia da ACV avaliar o processo de geração de bioenergia termelétrica a base de biomassa de eucalipto, uma análise do berço ao túmulo. Realizou também Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) que analisou as emissões positivas e negativas desta cadeia produtiva e seus impactos no meio aéreo, aquático e terrestre, culminando na apreciação da viabilidade técnica e ambiental do empreendimento.

3 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

3.1 Eucalipto no Brasil

O eucalipto, que é originário da Oceania, chegou ao Brasil na segunda metade do século XIX, os primeiros exemplares foram plantados nas áreas do Jardim Botânico e do Museu Nacional do Rio de Janeiro, nos anos de 1825 e 1868 desde então, o eucalipto vem

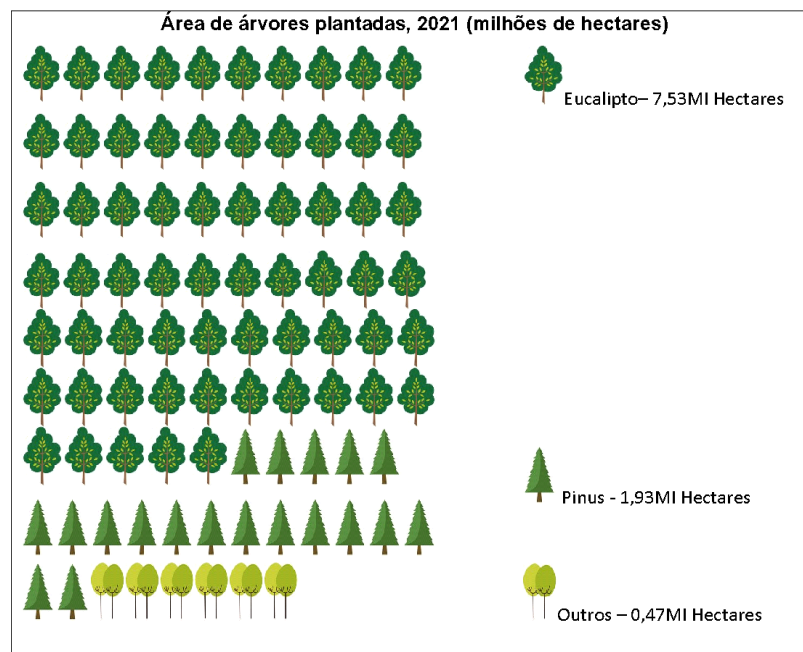
se destacando, em vários setores da economia brasileira (MOREIRA; SIMIONI; BUSCHINELLI, 2021).

Porém, segundo estudo realizado por Foelkel (2010), inicialmente o eucalipto teria sido introduzido no Rio Grande do Sul, via Uruguai, nos meados do século XIX. As plantações de eucalipto inicialmente realizadas em filas na região dos pampas tinham por objetivo a proteção contra o frio no inverno e do calor no verão, além de produzir boa lenha. Com a chegada das ferrovias, a madeira de eucalipto serviu de matéria-prima para a produção de dormentes, postes e como lenha para as locomotivas. Mas somente na década de 60 foi introduzida a cultura extensiva com fins comerciais. Hoje o eucalipto é uma das árvores mais cultivadas no Brasil, mais do que o café e a laranja.

Segundo Coutinho et al. (2017) atualmente o Brasil é um dos maiores praticantes da silvicultura no mundo, com altos níveis de produtividade reflexo da adaptação da cultura às condições climáticas e de solo do país, da disponibilidade de terra e do alto grau de conhecimento técnico-científico. Além dos investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação; técnicas de manejo florestal; melhoramento genético e práticas sustentáveis, Brasil (2020).

No país os estados que lideram a produção silvo-cultural são Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Em 2019, a silvicultura contribuiu com 77,7% (R\$ 15,5 bilhões) do valor da produção florestal (R\$ 20,0 bilhões), com queda de 5,0% em relação a 2018, após três anos consecutivos de crescimento. Já a participação da extração vegetal (coleta de produtos em matas e florestas nativas) foi de 22,3% (R\$ 4,5 bilhões), com alta de 6,4% frente a 2018. Dos nove grupos de produtos que compõem a exploração extrativista, sete tiveram aumento no valor de produção. No ano 2021, por meio da análise de imagens via satélite, evidenciou-se que, entre as espécies cultivadas em florestas plantadas, 75,8% fosse composta de eucalipto, com 7,53 milhões de hectares, 19,4% de pinus, com 1,93 milhão de hectares, como pode ser visto na Figura 1. Além desses cultivos, existem cerca de 475 mil hectares plantados de outras espécies, entre elas a seringueira, acácia, teca e paricá, (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2022).

Figura 1 - Área de árvores plantadas, 2021 (milhões de hectares).



Fonte: IBÁ (2022).

Com isso, a produtividade média do eucalipto no Brasil é de 38,9 m³/há/ano em 2021 e do pinus foi de 29,7m³/há/ano (IBÁ, 2022). O consumo específico de madeira pode variar muito em função de vários fatores, sendo o principal deles a eficiência da fábrica e seu nível tecnológico.

O setor de base florestal se destaca no cenário de uma economia de baixo carbono, haja vista sua alta produtividade, tecnologia incorporada, melhores práticas de manejo florestal, responsabilidade social e modernas instalações produtivas. No Brasil seu destaque é evidente e de grande importância para a econômica do país, principalmente quando os indicadores apontam que ele representou no ano de 2021, o valor agregado da cadeia produtiva florestal cresceu 7,5%, um valor superior ao PIB nacional que foi de 4,6%, atingindo um recorde na receita bruta de R\$ 244,6 bilhões. E para o período de 2022 a 2028, foram anunciados R\$ 60,4 bilhões de aportes para serem investidos em florestas, IBÁ, (2022).

3.2 Propriedades e Características Bioenergéticas do Eucalipto

Para Vital, Carneiro e Pereira (2013) as questões relativas à qualidade, viabilidade e destinação final da biomassa para a geração de energia, estão diretamente relacionadas com suas propriedades energéticas. As propriedades que mais se destacam estão basicamente ligadas a densidade da madeira, poder calorífico, umidade, composição química elementar, imediata e estrutural, teor de inorgânicos e o comportamento térmico da biomassa. O estudo realizado por Silva *et al.* (2015) conclui que o potencial da madeira de eucalipto para ser utilizada como matéria-prima na geração de energia está diretamente ligada ao seu poder calorífico superior que está positivamente correlacionado com o poder calorífico inferior e com a densidade básica da madeira.

Assim sendo, Amaral (2019) define como biomassa florestal para fins energéticos e utilizada como biocombustível, a madeira na forma de carvão vegetal ou consumida diretamente na forma de lenha, cavacos, resíduos florestais e resíduos industriais (licor negro) nos processos de geração de energia térmica, mecânica e elétrica é caracterizada como uma fonte primária de bioenergia.

A casca de eucalipto também pode ser utilizada como biocombustível, por ser rica em carbono. Foelkel (2010) define a casca de uma árvore é a cobertura exterior de toda árvore, desde a raiz até o tronco e os ramos, e em média, os troncos comerciais das espécies de eucalipto de reflorestamento possuem entre 8 e 12%, de casca por árvore, e, 20 a 25% nas partes com maior teor de casca. Ou seja, de 8 a 25% a mais de biomassa de alto carbono capaz de gerar e aumentar a geração de energia a partir de biomassa de eucalipto. Segundo este autor, as principais formas de utilizar a biomassa florestal são através da conversão de energia termoquímica ou pela combustão e queima que são maneiras de aproveitá-la como energia primária, Foelkel (2016).

Com relação à produção de biomassa para fins energéticos a silvicultura brasileira identificou um cenário que hoje já é realidade com o desenvolvimento de plantações energéticas, considerando os avanços tecnológicos conquistados na área da geração de eletricidade, a partir de biomassa. Esse tipo de biomassa apresenta como principais vantagens a: homogeneidade do material, aumento da densidade energética, disponibilidade x distribuição espacial, demanda e oferta, porém dependente apenas de um planejamento da produção florestal e fertilidade do solo, Müller (2005).

O estudo desenvolvido por Neiva, Furtado e Finzer (2018) conclui que o poder calorífico real do cavaco de eucalipto é de 19,17 MJ/kg ou superior. Assim sendo, sua

composição elementar está diretamente relacionada com o poder calorífico, pois fornece os percentuais de massa dos principais elementos formadores da biomassa e, assim, é possível relacionar a quantidade de energia liberada na quebra das ligações químicas desses elementos, Silveira et al. (2021).

Para Brand (2010) o poder calorífico do combustível está relacionado com sua composição química elementar que determina o potencial energético, o volume de ar necessário para a combustão, a quantidade e a entalpia dos gases de combustão, determinando assim o impacto ambiental devido à sua queima. Para o autor o ciclo a vapor Rankine é uma das tecnologias mais bem sucedidas para a geração de energia elétrica através da biomassa, em potências de 200 KW até 100 MW com a queima de resíduos de forma homogênea ou combinada.

Atualmente, é produzido um total de 6.890 TWh de eletricidade a partir de energias renováveis em todo o mundo, (WORD BIOENERGY ASSOCIATION - WBA, 2020). No decorrer dos anos os projetos de geração de energia de biomassa têm sido ampliados no Brasil e a capacidade instalada de geração elétrica foi de 14.978 MW em 2019, WBA, (2019); Segundo o (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2021) em 2020, a produção de eletricidade bioenergética aumentou 53 TWh (+8%) em comparação com 2019, excedendo a taxa de crescimento anual de 7% necessária para 2030 no cenário de metas de emissões líquidas zero até 2050.

Há uma previsão de que até 2050, a demanda anual de madeira para uso energético poderá chegar a entre 6 e 8 bilhões de metros cúbicos, um grande impacto que demandará mais do que o dobro da madeira hoje retirada para todo tipo de uso. Isso representa um desafio para o planejamento florestal e do uso sustentável da terra. Segundo a Rede WWF, a bioenergia tem um importante papel entre as diversas alternativas para combustíveis fósseis, além de oferecer outras fontes de renda e maior segurança energética, WWF (2013).

Várias operações de manejo realizadas em florestas plantadas de eucalipto podem ter impactos ambientais negativos e positivos. Os impactos negativos são principalmente resultantes da liberação de compostos de C, N e S resultantes da queima de diesel e do uso de fertilizantes. Esses fluxos contribuem para várias categorias de impacto, como aquecimento global, eutrofização e acidificação (SARAIVA *et al.*, 2017; MORALES *et al.*, 2015).

Para Pohlmann *et al.* (2016) e Silva e Ataíde (2019) a substituição do carvão mineral por carvão vegetal reduz as emissões de CO₂ em processos siderúrgicos. O uso de derivados de madeira provenientes de florestas plantadas para bioenergia, em comparação com os combustíveis fósseis, diminui as emissões de enxofre e óxido de nitrogênio, reduzindo a ocorrência de chuvas ácidas, obtendo assim, um balanço de carbono positivo (BAKER *et al.*, 2019)

3.3 Geração de Energia Termelétrica no Brasil

A floresta apresenta-se como fonte de biomassa e com um grande potencial na contribuição para os recursos de biocombustíveis de uma nação Ben-Iwo, Manovic e Longhurst (2016). Existe uma perspectiva de aumento de 7% ao ano na geração de energia elétrica gerada a partir da madeira e outras biomassas, Zhang, Gilles e Stewart, (2014). Com base nessa afirmação Timko *et al.* (2018) afirma que a energia da madeira é a fonte mais importante de bioenergia no mundo.

O início do consumo de energia elétrica no Brasil é datado a partir das duas últimas décadas do século XIX e fundamentaram-se em instalações geradoras aplicadas principalmente aos serviços de iluminação pública e particular. Neste período predominou a geração termelétrica – condizente com o padrão tecnológico do período. Foi na “Era Vargas”, a partir da regulamentação do setor de energia elétrica brasileiro que o setor termelétrico no Brasil se consolidou. Neste período foi criado o Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica (CNAEE), que foi o primeiro órgão do governo federal com função reguladora e normatizadora do setor de energia elétrica brasileiro Corrêa, (2005).

No projeto da Reforma do Setor Elétrico Brasileiro (Reseb), o governo FHC, em 1997, traçou alguns princípios básicos para o setor e com base nisso organizou uma estrutura descentralizada por meio de trabalho consultivo para atingir seus objetivos, coordenado por grandes organizações internacionais. Foi estabelecida uma estrutura regulatória composta pela Agência Nacional de Energia Elétrica e Energia (Aneel), órgão regulador e fiscalizador com o objetivo de regular o setor elétrico por meio de resoluções e duas entidades de direito privado relacionadas a concessões. agentes da indústria de energia o Operador Nacional do Sistema (ONS), desenvolve e aplica regras e padrões para gerir a produção e transmissão de energia elétrica de forma mais harmoniosa; e o Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE), que desenvolve um conjunto de negócios regras, todos os agentes ou franqueados que conduzem negociações atacadistas de energia

devem cumprir essas regras. De acordo com estas regras, devem ser registradas as quantidades negociadas em contratos de longo prazo e determinado o preço de venda de eletricidade a curto prazo (spot), GOLDENBERG (2003), regulamentando a gestão energética brasileira até os dias atuais.

O fato é que os impactos causados por questões externas também afetaram a situação do país, seja em produção, oferta, consumo ou dependência externa energética. De toda forma, o Brasil importa energia elétrica do Paraguai, STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY, (2021a). A dependência energética brasileira pode ser acompanhada na Tabela 1, onde observou-se uma melhoria significativa na demanda de petróleo que vem apresentando diminuição da dependência desde 2014 e de eletricidade que acompanha a mesma tendência.

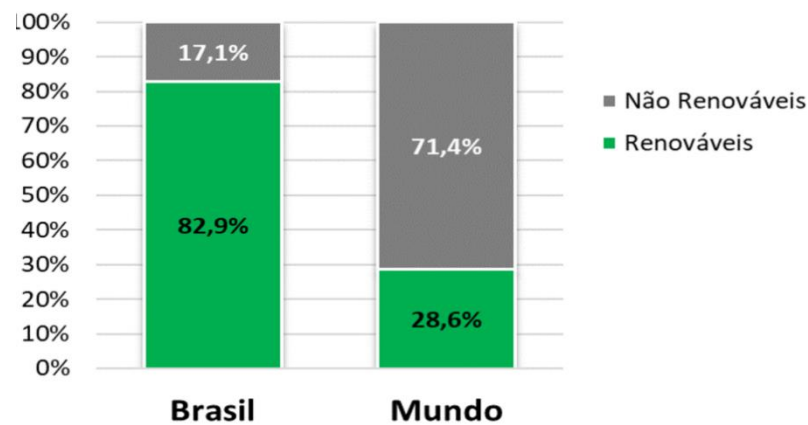
Tabela 1 - Dependência externa de energia no Brasil.

Identificação	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Petróleo	-1,0	5,8	-11,8	2,3	-11,8	-21,9	-26,7	-33,4	-40,8	-56,2
Gás Natural	36,7	38,0	42,3	43,5	41,4	33,4	26,7	29,4	26,4	27,3
Carvão Mineral	80,0	70,8	76,1	75,0	76,1	77,1	83,3	85,4	79,2	74,6
Eletricidade	6,3	6,8	6,6	5,5	5,6	6,6	5,8	5,5	3,8	3,8
TOTAL	7,8	10,5	14,2	12,4	7,3	2,2	0,4	-1,3	-4,9	-10,5

Fonte: Statistical Review of World Energy (2021a, p. 104)

Atualmente no Brasil, segundo o EPE (2021), a matriz energética do Brasil é muito diferente da mundial, conforme Gráfico 1. Apesar do consumo de energia de fontes não renováveis ser maior do que o de renováveis, usou-se mais fontes renováveis que no resto do mundo.

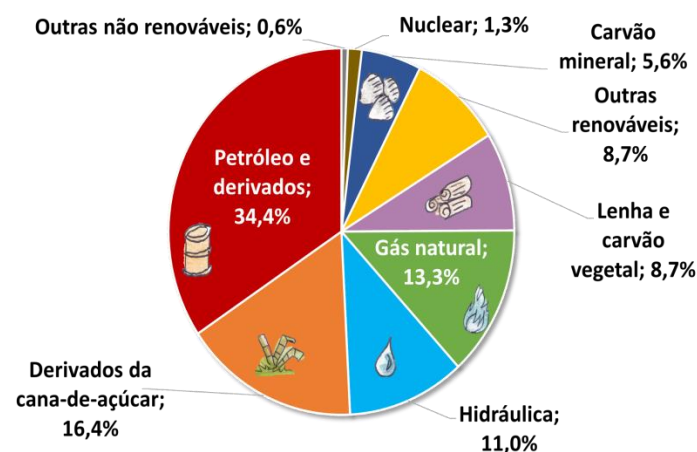
Gráfico 1 - Comparação entre a Matriz Elétrica Brasileira e a Mundial.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE, (2022)

A biomassa fornece cerca de 1% da produção global de eletricidade, e apresenta um potencial para aumentar significativamente o suprimento global de energia Heinimö e Junginger (2009); Bilgili *et al.* (2017). A geração de energia a partir de biomassa no Brasil representa 8,2% da matriz termelétrica do país, conforme podemos observar no Gráfico 2. A bioenergia é uma fonte renovável mais proeminente na atualidade e no futuro em termos de viabilidade técnica e econômica, dado que pode melhorar a indústria e aumentar o crescimento econômico, segundo o EPE (2022).

Gráfico 2 - Matriz Energética Brasileira 2021.

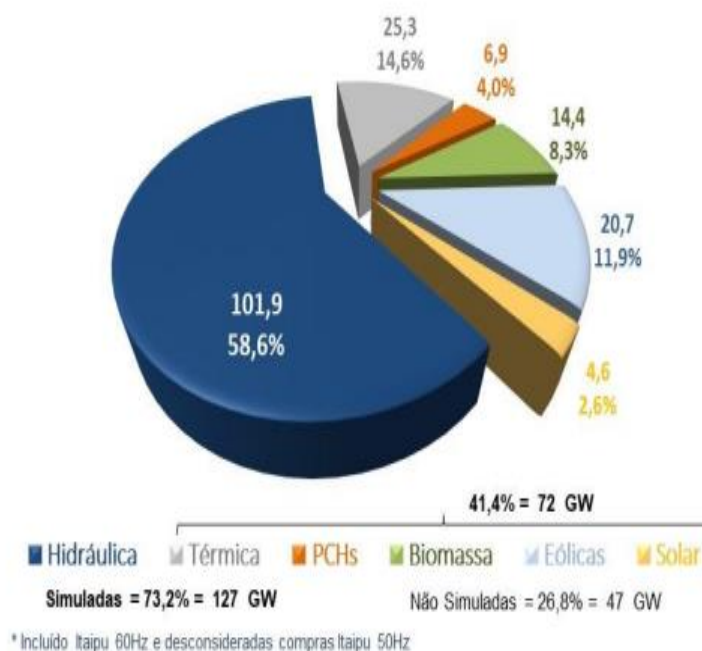


Fonte: (EPE, 2022)

A capacidade instalada em 2021 apresentou um aumento de 4,2% em relação a 2020. Em relação a 2021, no caso da energia elétrica verificou-se um crescimento na oferta interna de 25,7 TWh (+3,9%) em relação a 2020. O principal destaque foi o avanço da geração à base de gás natural (+46,2%). A geração hidráulica reduziu 8,5%, acompanhando a queda na importação (-6,5%), cuja principal origem é Itaipu. Em contrapartida, a geração eólica atingiu 72 TWh – crescimento de 26,7%. A potência eólica alcançou 20.771 MW, expansão de 21,2%. Já a geração solar atingiu 16,8 TWh (geração centralizada e na micro e mini geração distribuída - MMDG), o que representou um avanço de 55,9% em relação ao ano anterior. Com isso, a participação de renováveis na matriz elétrica ficou em 78,1% em 2021 (EPE, 2022).

O Gráfico 3 apresenta a capacidade instalada no SIN (SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL) em 31/12/2021, totalizando cerca de 174 GW, dos quais 101,9 GW (58,6%) em usinas hidroelétricas, 25,3 GW (14,6%) em termelétricas convencionais e nucleares e 46,6 GW (26,8%) em PCHs, usinas a biomassa, eólicas e solares fotovoltaicas.

Gráfico 3 - Capacidade Instalada do SIN (GW).

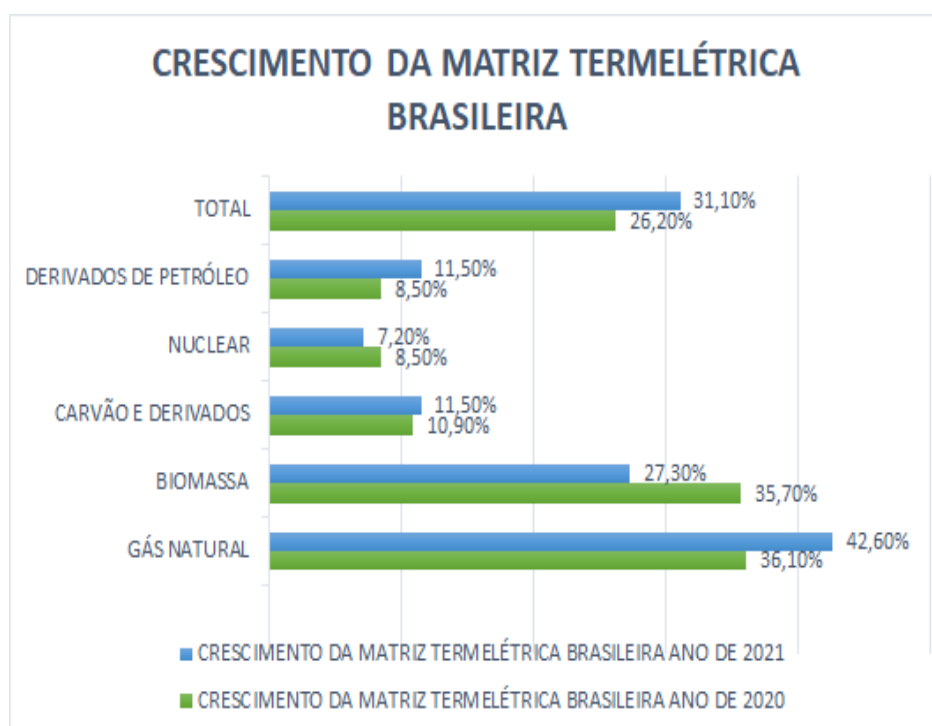


Fonte: EPE (2022).

No estudo realizado por Ribeiro (2018), foi identificada a existência de pouco mais de 4.900 usinas termelétricas em operação, sendo que destas 95 possuíam como fonte de energia a biomassa florestal, o que representava apenas 1,90% da capacidade elétrica total instalada. Das 95 usinas que utilizavam como fonte de energia a biomassa florestal, 55 utilizavam o cavaco de madeira, o que representa apenas 0,26% da oferta total, o que trouxe à tona o reduzido uso da biomassa florestal para produção elétrica no país e, particularmente, no estado mineiro.

De acordo com (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2022) em 2021, houve avanço de 24% na geração termelétrica. Com isso, a participação no total da geração de energia elétrica aumentou, como pode ser visto no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Crescimento da Matriz Termelétrica Brasileira.



Fonte: EPE (2022)

Segundo Dias Junior *et al.* (2017), no ano de 2002, foi instituída por meio da Lei 10.438, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA). Com a intenção de aumentar a participação de pequenos produtores e produtores independentes

de energia elétrica no Brasil. A partir do marco regulatório de 2004, a energia nesse ambiente passou a ser contratada através de leilões simplificados.

Nesse cenário de mercado regulado, os leilões de energia permitem contratos de longo prazo (atualmente 20 ou 25 anos) entre distribuidoras de energia e agentes produtores, que representam um potencial e importante pilar para o desenvolvimento do mercado florestal. Um avanço importante é a inclusão da biomassa nos planos de expansão da matriz energética e, conseqüentemente, na agenda de contratos dos leilões de energia nos mercados regulados. Além dos aspectos ambientais, as usinas de biomassa florestal apresentam algumas vantagens sobre outras fontes de energia fóssil (gás natural e carvão), são bastante competitivas na faixa de baixa potência (por exemplo, menos de 100 MW) e são adequadas para complementar as chamadas de fontes de energia marginal, (MAPA, 2018).

Para cumprir as metas do Brasil (2020). Os projetos contratados localizam-se predominantemente no Sudeste e Centro-Oeste. Usinas a bagaço de cana (1.050 MW), seguidas pelas usinas a base de cavaco de madeira (600 MW), e, por fim biogás (210 MW). O Brasil contratou 6 empreendimentos termelétricos movidos a biomassa de madeira ou resíduos florestais em leilões de energia em 2022, Tabela 2. A expansão tem investimento de referência de aproximadamente R\$ 66 bilhões entre 2021 e 2029.

Tabela 2 - Termelétricas a biomassa de cavaco de madeira ou resíduos florestais.

PROJETO	LOCALIDADE/ SUBSISTEMA	POTÊNCIA (MW)	INFLEXIBILIDADE E DECLARADA (Mwmed)	DISPONIBILIDADE MÁXIMA (Mwmed)	SITUAÇÃO
CIDADE DO LIVRO	Lençóis Paulista - SP/ SE	80	-	74,1	Em operação
CISFRAMA	Canoinha – SC/ S	4,0	-	1,78	-
ERB CANDEIAS	Candeias – BA/ NE	16,8	0,0	10,71	Em operação
ONÇA PINTADA	Três Lagoas – MS/ SE	50	6,86	43,79	Em operação
PREDILECT A	Matão – SP/ SE	5	1	4,69	Em operação
SYKUE I	Jardim Paulista – SP/ SE	30	-	-	-

Fonte: EPE (2022)

Inflexibilidade ou inflexibilidade operacional é a geração mínima anual de energia garantida. Projetos de energia térmica despacháveis, dentro de uma geração. As empresas devem gerar energia independentemente da ordem de mérito. O valor da inflexibilidade

é determinado pelo empreendedor, limitada a 50% da geração anual de energia. Esse recurso tende a ampliar as possibilidades de modelos de negócios de geração de energia, melhorar a previsibilidade da geração. A geração inflexível garante maior previsibilidade de receita e faz parte da receita para projetos de energia térmica em contratos de comercialização de energia, BEN (2019).

O BEN (2019) afirma que para as usinas de cogeração a biomassa, espera-se a instalação de 2,4 GW para os próximos dez anos. Deste total, 584 MW estão contratados, dos quais 398 MW são de usinas de bagaço. Os projetos de contratação estão localizados principalmente nas regiões Sudeste e Centro-Oeste. A expansão indicativa também está concentrada nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, principalmente usinas de bagaço (1.050 MW), seguidas de cavacos (600 MW) e usinas de biogás (210 MW). O EPE (2022) mostra a capacidade instalada do SIN em 31 de dezembro de 2021, totalizou cerca de 174 GW, sendo 101,9 GW (58,6%) para usinas hidrelétricas, 25,3 GW (14,6%) para usinas convencionais e térmicas nucleares e 46,6 PCH, biomassa, GW de usinas eólicas e solares fotovoltaicas (26,8%).

O estudo realizado por Dias Junior *et al.* (2017) afirma que, há um grande interesse pela inserção da biomassa florestal, devido aos incentivos ambientais e econômicos voltados para a geração de termoeletricidade no Brasil. Também há uma grande expectativa com relação ao avanço do setor florestal, com ênfase para o uso de resíduos florestais e do estabelecimento de florestas destinadas à geração de termoeletricidade.

O Brasil possui vasta quantidade de áreas disponíveis para a implantação de empreendimentos florestais, bem como encontra-se disponível um parque tecnológico de alta performance para o plantio de florestas destinadas à produção de madeira. Tais aspectos estão associados a um perceptível e crescente interesse empresarial pela geração de termoeletricidade, mediante o uso dessa biomassa. Para os cenários futuros irão pesar as decisões de ordem governamental relacionada às políticas de ordem tarifárias para geração e distribuição de energia elétrica no país. (DIAS JUNIOR *et al.*, 2017).

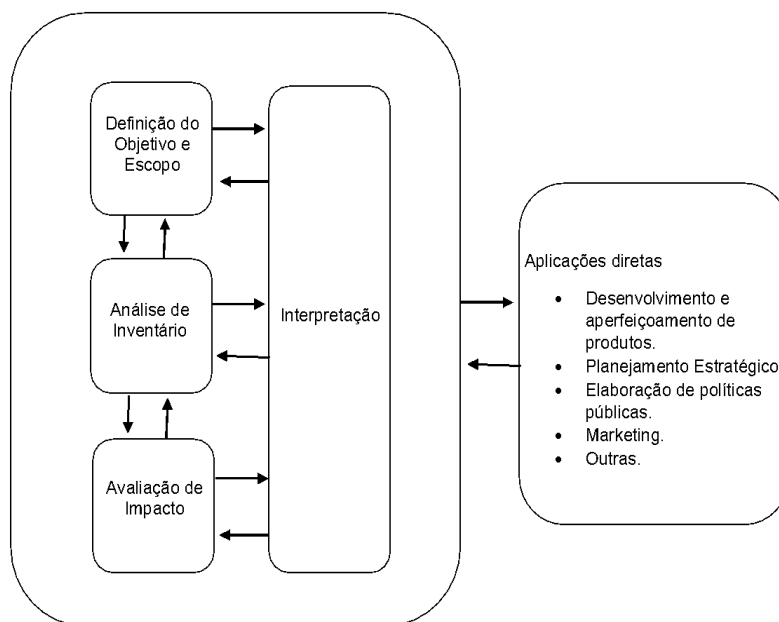
3.4 Avaliação do Ciclo de Vida – ACV.

A (ACV) é uma técnica que pode ser estudada e aplicada em vários campos da ciência uma vez que, seus instrumentos de análise acompanham toda a “vida” de um produto, ou seja, do berço ao túmulo.

Os estudos de ACV no Brasil são regulamentados pela norma ISO 14040:2006 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2009). Os instrumentos normativos que viabilizam a identificação e avaliação de projetos implantação dos objetivos planta florestal em questão, a ISO (*International Organization for Standardization*) instituiu a ISO14040:2006 que estabeleceu as interações entre atividade produtiva e o meio ambiente avaliando o impacto ambiental de todo o sistema. No Brasil ainda existe uma série de desafios para que se construa uma base de dados de ACV com as características das tecnologias, (MIRANDA, 2012).

Segundo o (ACV, 2019) a estrutura, os princípios, os requisitos e as diretrizes que devem constar em um estudo ACV, são definidas por normas ISO. Se caracteriza pelo alto grau de interação entre suas quatro grandes fases: definição de objetivo e escopo, a análise de inventários, avaliação de impactos e interpretação. A metodologia ACV vem sendo desenvolvida ao longo dos últimos 50 anos e continua em processo de desenvolvimento na busca pela melhor compreensão do desempenho ambiental de produtos e processos. que estabelece que a ACV deve ocorrer em quatro etapas, como podemos ver na Figura 2, sendo essas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário (ICV), avaliação de impacto (AICV) e interpretação de resultados.

Figura 2 - Fases da ACV.



Fonte: ABNT (2009).

De acordo com González-García (2018) a ACV é comprovadamente uma ferramenta eficaz e valiosa na avaliação dos aspectos ambientais de um produto (processo e/ou serviço) auxiliando no processo de tomada de decisão objetivando uma melhor sustentabilidade, identificação e implementação de possíveis melhorias das técnicas ambientais.

A ACV é uma ferramenta de apoio que permite a avaliação dos aspectos ambientais e impactos potenciais associados, quando direcionadas à projetos (MIRANDA, 2012).

A metodologia da ACV é essencialmente quantitativa: os resultados numéricos refletem as categorias de impacto e permitem, inclusive, comparações entre produtos semelhantes.

Na área ambiental não poderia ser diferente, dessa forma ela foi utilizada para avaliar os sistemas de geração de bioenergia a partir da biomassa de eucalipto. Surgindo como opção para a análise da sustentabilidade, a ACV é frequentemente aplicada como ferramenta de apoio à tomada de decisão escolha de alternativas que ofertam o mesmo produto ou serviço (TURCONI; BOLDRIN; ASTRUP, 2013).

Tal abordagem permite identificar os pontos críticos no ciclo de vida do produto e assim promover melhorias nos processos produtivos. Desta forma, trata-se de uma ferramenta multidisciplinar, pois abrange várias áreas do conhecimento. Também é multicritério, uma vez que se dedica a muitas categorias de impacto de uma só vez como pode ser observado na Tabela 3 (ACV, 2019).

Tabela 3 - Etapas de uma Avaliação de Ciclo de Vida.

ETAPAS DE UMA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA	
Definição dos Objetivos e Escopo	É o momento em que se determinam as fronteiras do estudo (temporal e geográfica), a quem se destinam os critérios de qualidade, as regras de corte e das categorias de impacto a serem consideradas.
Análise de Inventários	Consiste na coleta dos dados que representam os fluxos de massa e energia que entram e que saem das diversas etapas do ciclo de vida do produto, dentro das fronteiras estabelecidas na fase anterior

Avaliação dos Impactos	Nesta fase, os fluxos definidos no inventário são convertidos em impactos ambientais através da multiplicação dos valores brutos por fatores de equivalência que remetem a resultados em unidades comuns, como por exemplo, kg de gases equivalentes para a categoria de aquecimento global.
Interpretação	Ao final, busca-se identificar as questões significativas do estudo, checar a integridade, a sensibilidade e a consistência dos resultados e definir as conclusões, as limitações e as recomendações do estudo.

Fonte: ACV (2019) - Adaptado pelo autor

O estudo realizado por Miranda (2012) propôs a ACV para cálculo dos fatores de emissão de gases de efeito estufa (GEE) da matriz elétrica brasileira. Estudos selecionados apresentam estimativas de emissões de gases de efeito estufa para a mesma tecnologia em larga escala, à época o fator de emissão estimado para a matriz brasileira é de 125gCO₂eq/kWh.

Delgado e Carvalho (2016) trabalhou com (ACV) para cálculo dos fatores de emissão de gases de efeito estufa (GEE) da matriz elétrica brasileira. Ao aplicar uma revisão sistemática da literatura e meta-análise, estudos que estimam as emissões de gases de efeito estufa durante o ciclo de vida das tecnologias de geração de energia na matriz brasileira pode ser identificados e seus resultados avaliados em conjunto. Estudos selecionados apresentam estimativas de emissões de gases de efeito estufa para a mesma tecnologia em larga escala.

Leme (2018) analisou a produção de carvão vegetal originado de florestas plantadas voltados para a geração de bioenergia. Foi comprovado neste estudo que a tecnologia aplicada atualmente no Brasil para este fim não utiliza gases residuais da pirólise, o que leva à perda de 30% da energia da madeira e diminui a qualidade do ar. Para uma produção combinada de carvão vegetal e eletricidade (S3), foi encontrada uma diferença de razão de 6,9. A oxidação fotoquímica foi o principal impacto que pode ser significativamente reduzido com a adoção da queima de gás. Comprovando assim mais uma forma opcional de utilização da biomassa de eucalipto para a geração de bioenergia, além do cavaco de madeira aqui proposto.

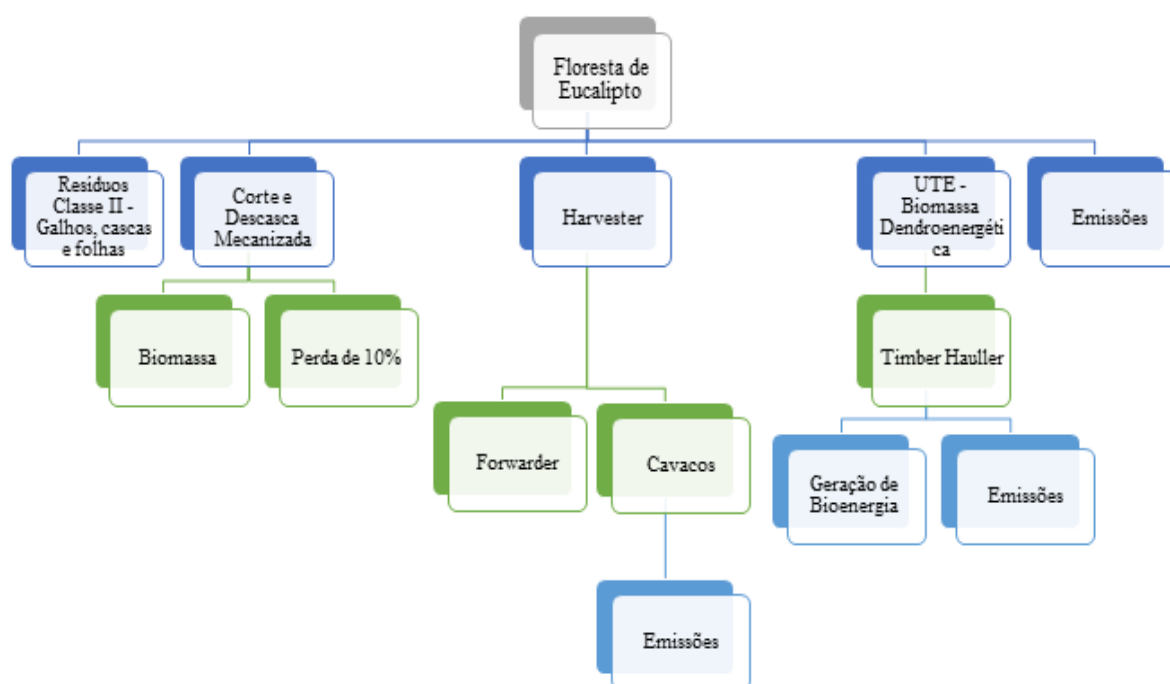
Anater (2022) aplicou a metodologia da ACV para avaliar o desempenho ambiental energético da produção de carvão vegetal para uso doméstico no Brasil. Neste estudo foram verificados os principais impactos ambientais e apontou duas alternativas

promissoras para a geração de biomassa, sendo elas, as florestas plantadas e a recuperação de áreas degradadas. E por fim, comprovou que estas alternativas apresentam um desempenho satisfatório em todas as categorias de impacto analisadas (mudanças climáticas, acidificação, eutrofização, toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre e oxidação fotoquímica).

Pereira (2019) avaliou os impactos ambientais de ciclo de vida (CV) associados à geração de eletricidade na central termoelétrica do Pego após a sua conversão para operar exclusivamente com biomassa florestal. O estudo concluiu que a biomassa florestal deve, por isso, ter em conta a disponibilidade de biomassa endógena de modo a minimizar os impactos ambientais. Justificando assim, a importância de uma planta florestal endógena eficiente para sustentar todo o sistema de geração de bioenergia.

A Figura 3, nos mostra o fluxo elementar da ACV da floresta de biomassa de eucalipto se desenha da seguinte forma:

Figura 3 - Fluxo elementar da ACV da floresta de biomassa de eucalipto.



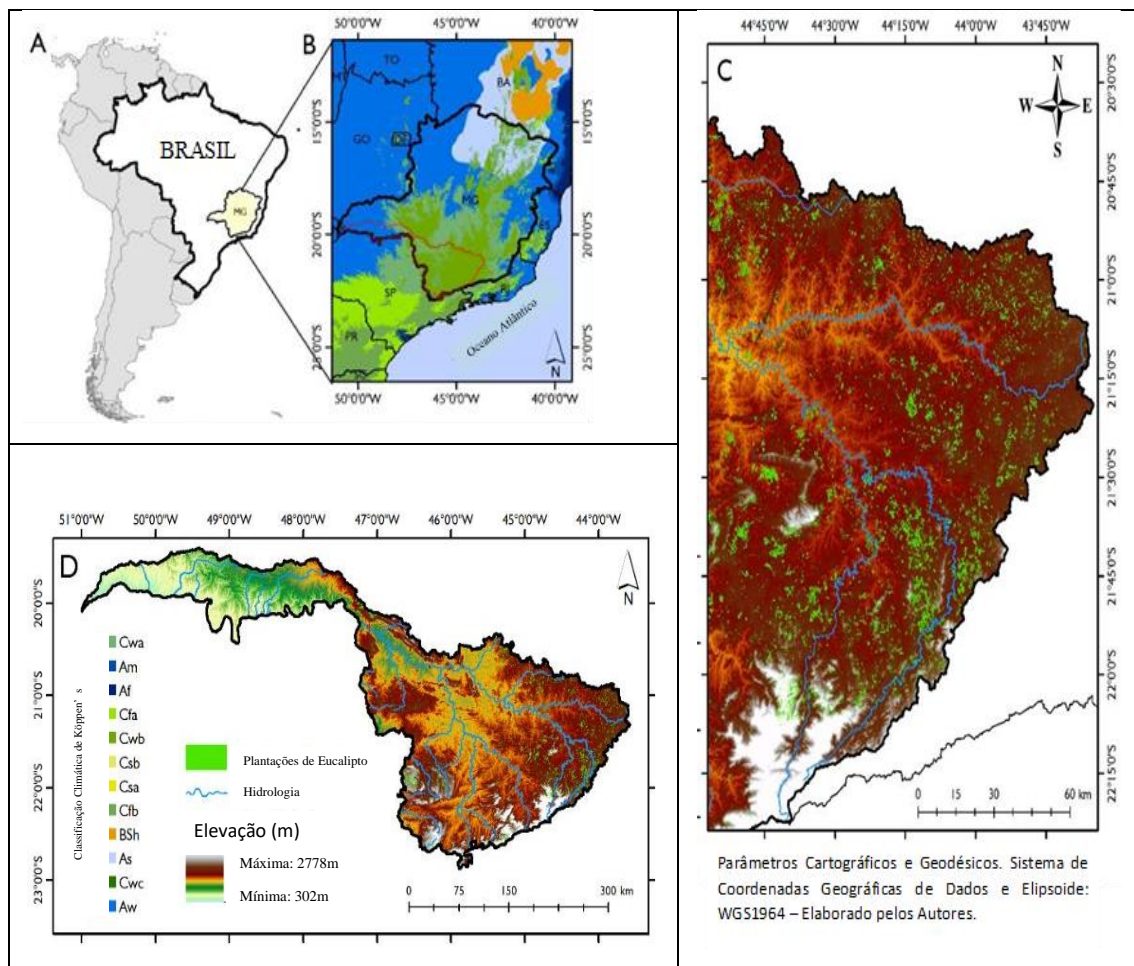
Fonte: Do autor

4 METODOLOGIA

4.1 O Projeto da Termelétrica em Estudo

A metodologia aplicada foi um estudo de caso realizado em uma planta florestal localizada na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, na da cidade de São João del Rei na mesorregião do Campo das Vertentes no Estado de Minas Gerais, como podemos observar na figura, abaixo. Com uma área de drenagem de 8.804 km² e abrangência de 21 municípios com uma população estimada de 101.855 habitantes a mesorregião possui uma extensão territorial de 1.452,002 km², (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2021).

Figura 4 - Localização Regional da Planta Florestal.



Fonte: França (2022)

A disponibilidade de uma subestação de distribuição de energia é de grande importância para a implantação de uma usina termelétrica, uma vez que, a instalação que possui um conjunto de condutores, aparelhos e equipamentos com o objetivo de modificar as características da energia elétrica, permitindo a sua distribuição aos pontos de consumo em níveis adequados de utilização. Elas também são responsáveis pelo chaveamento, proteção, conversão de tensão e corrente, compensação de potência reativa para direcionar e diversificar o fluxo de energia por caminhos alternativos, ou uma combinação dessas funções em um Sistema Elétrico de Potência - EPS (MONTENEGRO, 2016). A cidade de São João del Rei é atendida pelo Sistema Integrado Nacional (SIN) de distribuição de energia, com parte de sua energia proveniente da Usina Hidrelétrica de Itutinga, (LISBÔA, 2008). Na região elencada existe duas subestações de energia que pertencem ao sistema de transmissão de FURNAS Centrais Elétricas. Este sistema abrange atualmente 72 subestações, sendo 55 próprias (15 junto às suas usinas hidrelétricas e termelétricas) e 17 sob o regime de parcerias (NASCIMENTO, 2021).

Com o objetivo de produzir e fornecer biomassa florestal como suprimento de uma usina termelétrica (UTE), esta planta contempla a otimização dos locais de abastecimento (novos plantios e áreas já existentes) para uma melhor alocação de recursos financeiros e a funcionalidade da cadeia de geração de 50 MW de bioenergia.

Inicialmente a partir de uma revisão sistemática de literatura, buscou-se realizar um diagnóstico do perfil energético brasileiro e propor através do estudo de caso a ACV de uma planta florestal destinada a geração de biomassa termelétrica.

Assim, prospectada a planta a ser trabalhada foi estabelecido um regime de cote de 6 em 6 anos. A revisão de literatura também foi utilizada para a obtenção de dados quantitativos que serviram de base para as análises desde a produção de mudas, à geração final de energia subsidiando assim informações para a realização da ACV.

Também com base na literatura a usina termelétrica foi prevista para a geração de 50MW de energia utilizando um sistema de ciclo rankine para esta dada geração de energia com perda média de 5% no resultado final do processo.

Definidos e quantificados os dados a análise dos dados foi realizada no aplicativo SIMAPRO 9.5, que calculou as emissões positivas e negativas do projeto e culminando nos impactos na atmosfera, na água e no solo derivados desta ACV, fechando o ciclo do berço ao túmulo.

4.2 Estratégia de fornecimento de biomassa

A produção de eucalipto está diretamente relacionada à manutenção da mata nativa e, portanto, às funções ecológicas do ecossistema. Diante do agravamento da crise ambiental, é necessário desenvolver estratégias de gestão cada vez mais comprometidas com a preservação ambiental. Florestas plantadas bem manejadas podem compensar a pressão sobre as florestas nativas, favorecendo a sustentação da biodiversidade e o armazenamento de carbono, (LOPES *et al.*, 2022). Assim sendo o Planejamento e Manejo Florestal juntamente com a ACV são ferramentas de suma importância no cultivo e produção de biomassa, a partir de florestas plantadas de curta rotação, para a geração de bioenergia.

O planejamento florestal, também segue a linha estabelecida no trabalho de origem do estudo de caso. A técnica de manejo florestal mais adequada partiu dos métodos de apropriação e uso da terra e apresentou a técnica de planejamento florestal mais adequada para a instalação de uma termelétrica a base de biomassa de Eucalipto na Região do Alto Rio Grande no estado de Minas Gerais. Este cenário de manejo prospecta o consumo de biomassa para a geração de energia dessa planta florestal, com projeção cíclica, de forma que ao fim do processo ele se reinicia.

A área de geração territorial de biomassa para a termelétrica foi dividida em quadrículas que foram consideradas para este estudo como unidades funcionais. O conceito de quadrícula, ou Unidade de Área Padrão (UAP) foi adotado para definição espacial dentro da Bacia do Rio Grande, em formato de malha.

Para estarem aptas a produção as UAPs devem ter área útil para a produção variando de 80ha^{-1} a 100ha^{-1} , respeitando alguns critérios como: potencial de produção, definição dos ciclos de corte e com estabelecimento de um local como epicentro para a instalação da usina termelétrica. Para obter a definição do zoneamento espacial e definição do melhor local para estabelecer a usina termelétrica foi gerada uma matriz para realizar o cálculo da distância euclidiana entre os pontos onde estão localizados os centros de produção e a usina, combinando a melhor distância para o transporte e permitindo maior controle espacial. As informações básicas necessárias para a realização da ACV podem ser visualizadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Informações básicas para a ACV da termelétrica.

Informação	Termelétrica
Unidade Funcional	1 UAP de 96,95 hectares
Emissões	Fertilizantes, pesticidas, VOC's e NVOC's metais pesados.
Cobertura temporal/geográfica	Região sudoeste de Minas Gerais, Bacia do Alto Rio Grande, São João del Rei.
Sistema de Produto	Uso de florestas plantadas de eucalipto nos regimes A e B e posterior queima em termelétrica com ciclo Rankine.
Geração de Energia	Termelétrica com prospecção de produção de 50 MW.

Fonte: O Autor

4.3 Avaliação ao Ciclo de Vida (ACV)

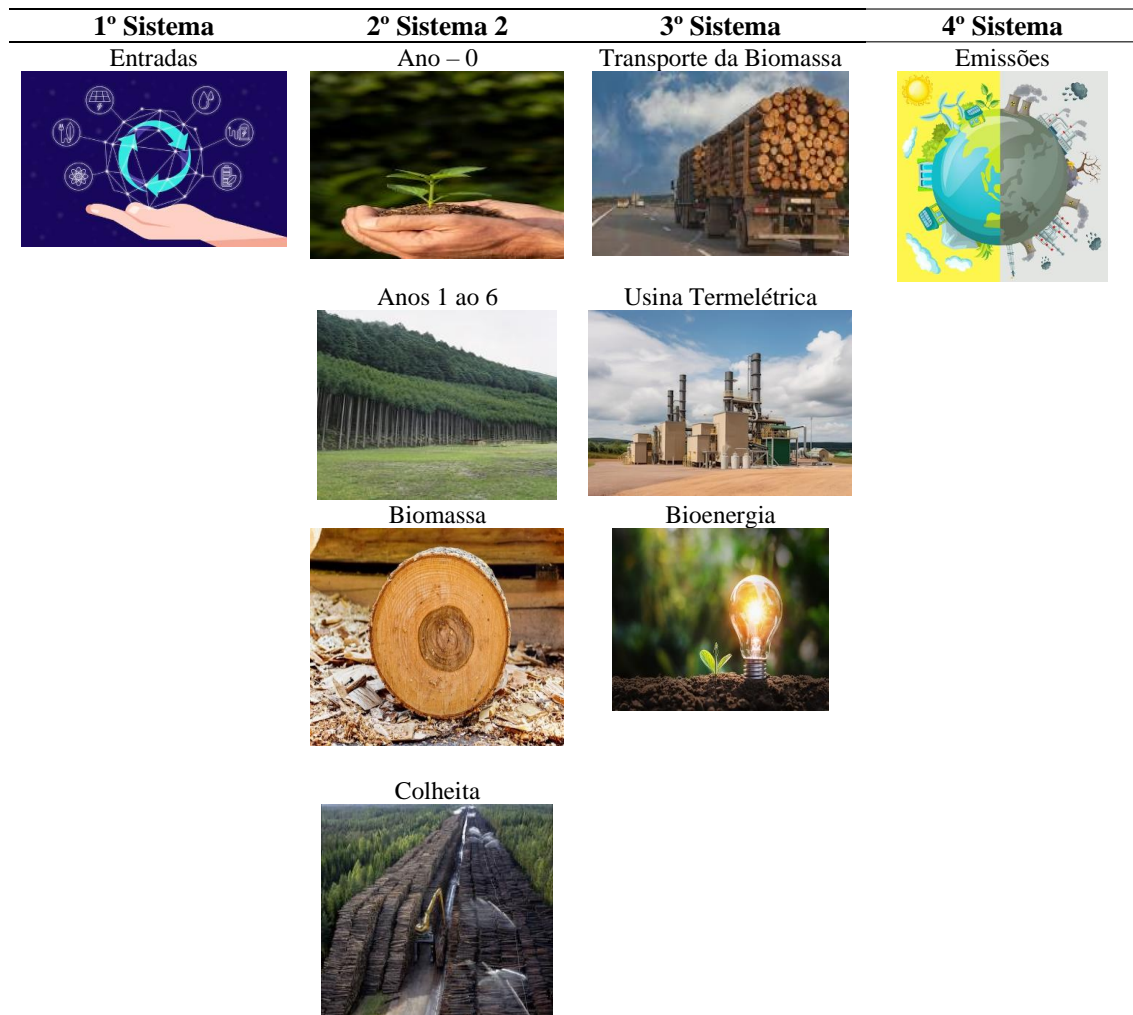
Este trabalho utiliza a metodologia da ACV como instrumento para avaliar o processo de produção e geração de bioenergia termelétrica. Seguindo as diretrizes da ACV temos como função do sistema a geração de bioenergia termelétrica de biomassa de eucalipto. O objetivo foi realizar uma avaliação do berço ao túmulo (cradle to grave), abordando os processos da cadeia produtiva desde a produção de biomassa de eucalipto na planta florestal à usina termelétrica e a disponibilização da bioenergia como produto final.

A ACV foi escolhida por atuar como ferramenta para tomada de decisão pois ela possui várias aplicações direcionadas à melhoria de processos, planejamento e tomada de decisão, rotulagem ambiental, contratos públicos ecológicos e atendimento às políticas ambientais com ênfase na gestão de resíduos.

Para a realização da ACV a unidade funcional utilizada foram as UAPs aptas para a produção de eucalipto com o tamanho médio calculado de 96,95 hectares de área, com uma distância euclidiana média relativa ao local da usina de 72,58 km. Para fins de geração de energia a projeção de produção dos talhões apresentaram em média uma produção de 286,04m³/ha, isso equivale a um volume de 194,5 toneladas biomassa que gera 0,01794 MW de energia cada. Os valores da unidade funcional foram utilizados como base de cálculo das entradas e saídas do sistema. A fronteira temporal foi identificada na fase de produção de biomassa e está definida em um período de 6 e 12 anos, referentes aos cortes das árvores, conforme foi exposto no planejamento florestal e na geração de energia. Um ciclo que compreende a chegada da madeira e seu

encaminhamento para o destino final que foi a geração de bioenergia, como podemos observar na figura 5.

Figura 5 - Fronteiras do Sistema de uma Planta de Biomassa de Eucalipto.



Fonte: O Autor

Permitindo assim, uma Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) sistemática, analisando os impactos ambientais associados a cada etapa deste processo de geração de bioenergia. Além disso, viabiliza a quantificação das emissões para água, solo e ar em cada etapa do processo produtivo, e ainda analisa os impactos ecológicos e antrópicos de todo o processo, (ALMEIDA; MACIEL; CYBIS, 2017).

Há limitações que interferem na exatidão e precisão da AICV. Nessa etapa o enfoque foi direcionado às questões globais ou regionais, podendo suas informações não

serem apropriadas para questões locais. Outra limitação está relacionada com a exatidão dos dados pode ser restrita devido a acessibilidade, disponibilidade ou pela qualidade em razão das falhas, tipos de dados, agregação, média ou especificidades locais. Há também uma carência relacionada a dimensões espaciais e temporais nos dados do inventário induzindo a certas incertezas nos resultados dos impactos (ABNT, 2009).

4.3.1. Inventário do Processo de Produção de Biomassa

O inventário é a fase da ACV, onde são analisadas as entradas e saídas dos sistemas e avaliados os impactos ambientais e a sua influência no processo. Como este estudo aborda uma prospecção de implantação de uma usina de bioenergia termelétrica, os dados que compuseram o inventário foram de base secundária, baseados em pesquisas ou levantamentos diversos já estabelecidos na literatura científica. Foram realizados dois inventários um para a planta florestal e outro para a usina termelétrica e a partir deles obteremos uma base de dados para a AICV.

Para atender o objetivo de gerar 50 MW de geração bioenergética termelétrica foi considerado um ciclo de 12 anos, com dois cortes um no sexto ano e outro no décimo segundo ano. Os dois primeiros anos foram destinados à construção da usina termelétrica e para a formação da floresta plantada, que iniciou com a produção das mudas, e definição do sistema de manejo florestal. Nos anos 3-6 foi consolidado o manejo e as atividades de colheita, transporte da madeira até a usina termelétrica e a geração de bioenergia, desconsiderando opções para o processamento dos coprodutos.

Para atender a demanda de biomassa destinada a alimentação da usina termelétrica a gestão de uso da terra foi dividida de quatro formas denominado Regime A, com a compra (60%), arrendamento (35%) e fomento (5%) de madeira para atender a demanda até o 6º ano, considerando um desconto de taxa anual de 8%. Com a floresta formada foi projetado para os anos de 7 a 12 utilização da biomassa produzida no maciço existente da própria usina, configurando o Regime B de manejo que passou a utilizar 100% da madeira do maciço existente.

A perspectiva considerou a UAP com extensão variando entre mais de 80 ha⁻¹ a 100 ha⁻¹, com um valor padrão médio de 96.95 ha⁻¹. A área total da planta termelétrica, foi composta por 19.154 UAP's. Na mesma planta ocorreu a identificação de UAP's sem habilitação (SH) geo-espacial para a cultura do eucalipto, os critérios estabelecidos para

definição de uma SH foram as áreas abaixo de 80 hectares ou com restrições ambientais ou legais.

4.3.1.1 Viveiro florestal

A produção de mudas foi definida como a primeira fase da produção florestal de eucalipto. As mudas foram cultivadas pela empresa em um viveiro próprio, produzidas em recipientes (tubetes) com substrato e, posteriormente, são transportadas até o local de plantio. A produção de mudas clonadas foi realizada a partir de substratos de alto valor genético, preservados por 4 a 5 anos para fornecer as mudas.

Utilizou-se a metodologia aplicada por Freitas (2007), para a produção das mudas em viveiro se estruturou da seguinte forma:

- Esquema fatorial 2 x 4 x 2 (dois substratos, quatro períodos de permanência no viveiro e duas lâminas de irrigação), constituído de 16 tratamentos e 5 repetições de 96 mudas (bandeja).
- Variação de temperatura para enraizamento variando de 22°C a 34°C, sendo a média de 28°C, umidade relativa do ar entre 51% a 87%, com média de 75%.
- Utilização de materiais orgânicos para formação dos substratos foram o bagaço de cana, a torta de filtro de usina açucareira e fibra de coco, não foram inventariados para neste estudo.
- As mudas foram acondicionadas em bandejas plásticas de 60 x 40 x 20 cm, com capacidade para produção de 96 mudas, sem passar pelo processo de prensagem.

A unidade de hectare foi estabelecida para definir uma produção padrão de árvores. O estudo realizado por (LOPES *et al.*, 2005) é uma referência que estabeleceu a quantidade de 1.600 mudas de eucalipto por hectare. Partindo daí a Tabela 5 apresenta as entradas e saídas por hectare produzido, porém, como a ACV estabelece como valor médio da unidade funcional a Unidade de Área Padrão (UAP) de 96,95ha⁻¹, os dados também foram ponderados para essa demanda específica. As informações sobre os insumos de produção foram obtidas através da literatura, Bellote e Neves, (2001), Ribeiro (2009), Monteiro (2008), Althaus *et al.* (2007). As principais emissões da etapa de produção de mudas podem ser observadas na tabela abaixo, elas foram apontadas no trabalho realizado por Simioni 2018 e calculadas também tanto por hectare quanto por UAP. O único insumo que utilizou uma base de cálculo diferente foi o diesel que foi

calculado sobre a distância euclidiana estabelecida entre o centro de produção e a planta florestal com média de 72,58 km.

Tabela 5 - Entradas e Saídas para Produção de 1.600 mudas de eucalipto no viveiro.

Saídas	Quantidade - ha⁻¹	Quantidade (UAP)
Mudas de eucalipto	1.600	155.120
Entradas	Quantidade - ha⁻¹	Quantidade (UAP)
Superfosfato Simples	1280g	124,096g
PGmix (Fertilizante NPK)	96g	9,3072g
Oscomote (NPK)	192g	18,6144g
Nitrato de Cálcio	8,48 kg	822,136kg
Cloreto de Potássio	5,44 kg	527,408kg
MAP purificado	2,8kg	271,46kg
Sulfato de magnésio	4,96kg	480,872kg
Uréia	4,8 kg	465,36kg
Sulfato de amônio	0,8kg	77,56kg
Kellus Iron	320g	31,024g
Sulfato de manganês	56g	5,4292g
Sulfato de zinco	16g	1,5512g
Sulfato de Cobre	8g	0,7756g
Ácido Bórico	56g	5,4292g
Molibdênio	400g	38,78g
Diesel	0,916kg	6445,5539kg
Água	864,86l	83848,177l
Saídas Quantidade (emissões)		
Compostos - Emissões	Quantidade - ha⁻¹	Quantidade (UAP)
Amônia – NH ₃	0,38464kg	37,290848kg
Óxido Nitroso – N ₂ O	4.012,8kg	389040,96kg

Nitrato – NO ₃	1.176kg	114013,2kg
Pentóxido de Fósforo – P ₂ O ₅	0,1963kg	19,031285kg

Fonte: adaptação de Simioni *et al.* (2018)

4.3.1.2 Plantio e Prescrição Silvicultural

Para Santarosa, Júnior e Goulart (2014) os plantios florestais ocupam, geralmente, solos de baixa fertilidade natural. Por isto, recomenda-se a adubação para possibilitar uma boa produtividade. No Brasil, a adubação é uma prática intensamente utilizada na atividade florestal, principalmente nos plantios de eucaliptos. Além dos fertilizantes químicos, recomenda-se também o uso de resíduos de origem orgânica, que servem como fonte de nutrientes para as plantas e também como matéria orgânica para os solos. Para o eucalipto, a recomendação foi feita com base em análises de textura e fertilidade do solo e da análise foliar já preconizada.

Como estabelecido a unidade funcional estabelecida foi a UAP (Unidade de Área Padrão), que possui valor médio de 96,95 hectares, esta foi definida como parâmetro os cálculos de demanda de insumos, produção e apuração dos resultados de cada atividade.

O processo de implementação da planta florestal foi dividido em fases, as quais, todas relacionadas diretamente com o processo de produção de biomassa. Compreendendo a preparação, correção do solo e adubação pré-plantio, plantio das mudas denominadas neste estudo como Ano 0 (ano zero), os Anos 1 ao 6 (Ano um ao seis) o qual abarcam todos os tratos culturais padronizados desde o primeiro ano de plantio até o ano 6 que se refere ao período do primeiro corte do eucalipto.

Durante os primeiros anos de implantação da cultura do eucalipto, as atividades seguem um padrão de manejo e trato cultural. Estas atividades se apresentam mais intensas nos primeiros anos de cultivo, devido às características da própria cultura utilizou-se dos dados médios analisados por Bellote e Neves (2001).

Com base nos dados acima foram os valores relativos ao índice de fósforo baixo e potássio alto/baixo, estes valores tiveram sua atribuição definida em duas fases, para primeira adubação pré-plantio manual de NPK (30 N – 60 P₂O₅ – 60 K₂O) com formulação de 8-28-16, foi estabelecido um valor de 220 Kg ha⁻¹ g planta⁻¹ para a primeira adubação. Para segunda adubação foi estabelecida uma concentração mais baixa de fósforo e média/alta de potássio onde o NPK (30 N – 120 P₂O₅ – 45 K₂O) com formulação de 10-30-

10, foi estabelecido um valor de e 400 Kg ha⁻¹ g planta⁻¹ para a adubação de cobertura (BELLOTE; NEVES, 2001).

As orientações e recomendações feitas para a cultura abordaram aplicação de calcário (BELLOTE; NEVES, 2001), sulfato de amônio (RIBEIRO, 2009), Superfosfato Simples (MONTEIRO, 2008) e cloreto de potássio (ALTHAUS *et al.*, 2007).

A racionalização e gestão da eficiência operacional e técnica é crucial para o sucesso do empreendimento. Por isso as informações e o acompanhamento das operações devem ser relativos ao processo produtivo da cultura do Eucalipto, e são descritos na tabela 6.

Como podemos ver na tabela 6, o ano zero compreende todas as atividades necessárias pós-viveiro, necessárias para a implantação da cultura do eucalipto, e os demais anos apresentam as atividades culturais relacionadas aos anos subsequentes até a fase de colheita. Como a unidade funcional estabelecida foi a UAP, que possui valor médio de 96,95 hectares, esta, foi definida como referência para o estabelecimento das bases de cálculo e apuração dos resultados de cada atividade. Cada operação realizada foi estratificada em unidade básica e a quantidade de cada insumo consumida respeitou indicações bibliográficas ou do fabricante, viabilizando valores por unidade que nos cálculos da ACV foram dimensionados em UAP.

Segundo Dall’Agnol (2013), para conduzir as operações culturais de controle com herbicida há um consumo médio de 0,6 litros de produto por hectare onde um operador de máquinas gasta em média 1 hora de trabalho para executar cada atividade. No mesmo estudo a autora aponta que as atividades que demandam aplicação ou manutenção manual tem uma demanda média de 9 horas de trabalho para executar a atividade em um hectare.

Tabela 6 - Informações Operacionais da Cultura do Eucalipto – Ano 0.

Implantação (Ano 0)				
OPERAÇÃO	(Unidade de Básica Valor)	Quantia Indicada	Consumo/ha⁻¹	Consumo UAP
Construção de Aceiros, Estradas e Cercas	Combustível	35,0L/h	35L ha ⁻¹	3.396L
Manutenção de Aceiros com Roçadeira	Combustível	35,0L/h	35L ha ⁻¹	3.396L
Manutenção de Aceiros com Herbicidas	Herbicida (Roundup)	0,6 L/ ha ⁻¹	0,6 L ha ⁻¹	58,17L
Retirada de Cupinzeiro	Pesticida (Fipronil)	300 L/ ha ⁻¹	300 L/ ha ⁻¹	29.085L

Limpeza Mecanizada – Pesada	Combustível	35,0L/h	35L ha ⁻¹	3.396L
1º Controle de Formigas (Localizado) eventual	Pesticida (Fipronil)	50 ml/olheiro	Indeterminado	Indeterminado
2º Controle de Formigas Manual (Sistemático e Mecanizado)	Combustível	0,5 L/h	4,5L ha ⁻¹	436,3L
Ronda de Formigas	MDO?	R\$12,50/h	R\$100,00	R\$9.695,00
Controles às Formigas em Reservas	Pesticida	50 ml/olheiro	Indeterminado	Indeterminado
Aplicação de Herbicida Pós-Emergente A.T.	Herbicida (Roundup)	0,6 L/ha ⁻¹	0,6 L/ha ⁻¹	58,17L
Aplicação de Herbicida Pré-Emergente em Faixa	Herbicida (Roundup)	0,6 L/ ha ⁻¹	0,6 L/ ha ⁻¹	58,17L
Roçada Mecanizada em A.T.	Combustível	0,5 L/h	4,5L ha ⁻¹	436,3L
Marcação Manual de Cova	MDO?	R\$12,50/h	R\$100,00	R\$9.695,00
Subsolagem com Afastador de Resíduo e Adubação	Combustível (trator 245cv)	35,0L/h	35L ha ⁻¹	3.396L
Aplicação de Calcário – Mecanizado	CaCO ₃ dose tradicional	200-400Kg/ha ⁻¹	Variável	Variável
Adubação Manual de NPK	NPK	350kg/ ha ⁻¹	350kg/ ha ⁻¹	33.932,5kg
Adubação Manual de NPK de Replanteio	NPK	220kg/ ha ⁻¹	220kg/ ha ⁻¹	21.329Kg
1ª Avaliação de Sobrevivência	MDO	R\$12,50/h	R\$100,00	R\$9.695,00
2ª Avaliação de Sobrevivência	MDO	R\$12,50/h	R\$100,00	R\$9.695,00
3ª Avaliação de Sobrevivência	MDO	R\$12,50/h	R\$100,00	R\$9.695,00

Fonte: Do Autor

As atividades que envolveram a utilização de roçadeira a gasolina, 0,95 cv, 25,4 cm³ (cc) RGO 2540C foi analisadas partindo das informações de consumo de combustível por hora/máquina fornecida pelo fabricante, que estabeleceu um valor médio de consumo de 0,5L/hora de combustível, considerando que no estudo realizado por Dall’Agnoll (2013) um funcionário gasta em média 9 horas de serviço por hectare concluímos que para realizar cada atividade que demanda este implemento, um operador demandou em média 4,5 litros de combustível por hectare, e, por UAP de 436,3L de combustível para trabalhar seu tamanho médio de 96,95 hectare.

A manutenção realizada no controle de ervas daninhas também seguiu a recomendação do glifosato, fabricante Roundup®, em pesquisa realizada via internet, que instruiu a dosagem de 0,6 L/ ha⁻¹ perfazendo por UAP um consumo médio de 58,17 litros de herbicida em cada atividade de controle realizada.

O controle de pragas também foi realizado seguindo a mesma metodologia e instruções orientadas pelo fabricante, o produto utilizado foi o Fipronil Nortox®, a indicação respeitou as instruções da bula do produto que indica a aplicação média de 300 L/ ha⁻¹, prevendo o consumo de 29.085L de pesticida por ação de combate a pragas na UAP.

No balanço do ano 0, foi consumido um total de 38.545,04 quilos de diesel por UAP. O consumo de herbicida está previsto em 32.716,8 litros Nemecek e Kägi (2007). Para o controle de cupins de demais pragas foi previsto um gasto de 29.085 litros de pesticida sem incluir eventuais demandas localizadas de combate direto ao cupim, Jabbar *et al.* (2008). Cada hectare formado por 1600 pés de eucalipto, demandou um total por UAP de 54.292 kg de NPK para a primeira adubação e 34.126Kg para a segunda adubação para o primeiro ano de cultura e 125g por pé para os anos 2 e 3 anos da cultura perfazendo um total de 200kg por hectare ou 19390kg por UAP e o consumo médio de calcário foi de 38.780 quilos considerando uma demanda média de 400 quilos por hectare. Bellote e Neves (2001).

4.3.1.3 Período Intermediário do Plantio

Os tratos culturais necessários para atender a cultura do eucalipto nos Anos 1 ao Ano 6 tiveram o mesmo padrão de cálculos e medidas e estrutura do Ano 0. Podemos observar que com o crescimento e formação das árvores a demanda de manejo e manutenção da plantação vai diminuindo ano após ano, até a fase de corte Tabela 7.

Tabela 7 - Informações Operacionais da Cultura do Eucalipto

OPERAÇÃO	Implantação (Anos 1 ao 6)							(Unidade de Básica Valor)	Valor	Consumo por h ⁻¹ - UAP
	Anos que demandam a operação									
	1	2	3	4	5	6	7-12			
Construção de Aceiros, Estradas e Cercas	X	-	-	-	-	-	-	Combustível	35L ha ⁻¹	3.396L
Manutenção de Aceiros com Roçadeira	X	X	X	X	X	X	X	Combustível	35L ha ⁻¹	3.396L
Manutenção de Aceiros com Herbicidas	X	X	X	X	X	X	X	Herbicida (Roundup)	0,6 L ha ⁻¹	58,17L
Controle de Formigas (Manutenção)	X	X	X	X	X	X	X	Pesticida (Fipronil)	300 L/ha ⁻¹	29.085L
Controle de Formigas (em Reservas)	X	X	X	X	X	X	X	Combustível	35L ha ⁻¹	3.396L
Aplicação de Herbicida Pós-Emergente na Entrelinha	X	X	X	-	-	-	-	Herbicida (Roundup)	0,6 L ha ⁻¹	58,17L
Aplicação de Herbicida Pré-Emergente na Linha	X	X	X	-	-	-	-	Herbicida (Roundup)	0,6 L ha ⁻¹	58,17L
Aplicação de Herbicida Pré-Emergente em Faixa	X	-	-	-	-	-	-	Herbicida (Roundup)	0,6 L ha ⁻¹	58,17L
Capina Manual na Linha	X	-	-	-	-	-	-	MDO	R\$12,50 h	48,475
Coroamento de Mudas	X	-	-	-	-	-	-	MDO	R\$12,50 h	48,475
Roçada Mecanizada Entrelinhas	X	X	X	X	X	X	X	Combustível	35L ha ⁻¹	3.396L
Roçada Manual na Linha	-	X	X	X	X	X	X	MDO	R\$12,50 h	48,475
Aplicação de Calcário Mecanizado	X	-	-	-	-	-	-	Calcário	400Kg ha ⁻¹	38780
Adubação Manual de NPK	X	-	-	-	-	-	-	NPK	350 kg ha ⁻¹	33932,5
Replântio	X	-	-	-	-	-	-	Combustível	35L ha ⁻¹	3.396L
Avaliação de Sobrevivência	X	-	-	-	-	-	-	MDO	R\$12,50 h	48,475
Combate de Pragas	X	X	X	X	X	X	X	Pesticida	300 L/ha ⁻¹	29.085L
Consumo Médio de Água	X	X	X	X	X	X	X	Água	25L/árvore	27.146.000

Fonte: o Autor

As informações referentes à mão de obra, foram citadas, porém não foram incluídas no inventário desenvolvido no software SIMAPRO 9.5.. Estes dados foram baseados em consultas de mercado, onde, tanto trabalhadores rurais quanto empregadores informaram o valor pago por tipo de serviço e a partir daí retirou-se uma média salarial.

Galrão (2004) indicou o manejo da adubação com micronutrientes em plantios de eucalipto estabelecidos em condições de Cerrado. O autor recomenda a correção de micronutrientes aplicando 2 kg ha⁻¹, de boro; 2 kg ha⁻¹ de cobre, ou seja, ou 193,9 Kg de cada fertilizante por UAP; e, 6 kg ha⁻¹ de manganês e 6 kg ha⁻¹ de zinco, ou 581,7 Kg de manganês e zinco, Costa, Tonini e Schwengber (2008). A fórmula para o cálculo das emissões associadas a deposição atmosférica está equação (1):

$$N_2OG = (N_{FERT} + FRAC_{GASF}) \times EF_3 \quad (1)$$

- ***N₂OG*** - representa as emissões associadas à deposição atmosférica em kg *N₂O-N*;
- ***N_{FERT}*** – corresponde à quantidade de nitrogênio aplicada em fertilizantes sintéticos, em kg N/ano;
- ***FRAC_{GASF}*** - fração de N volatilizada como NH₃ e NO_x em fertilizantes sintéticos, em kg NH₃-N e kg NO_x – N emissões, foi utilizado o valor de 0,1 (IPCC, 2006);
- ***EF₃*** - representa o fator de emissão para deposição atmosférica em kg N₂O–N/kg NH₃ e emissões de NO_x-N, foi utilizado o valor de 0,01 (IPCC, 2006).
- Embora as emissões indiretas de N₂O via lixiviação ou escoamento superficial sejam calculadas usando a equação (2), ela ainda é baseada no WRI Brasil (2015):

$$N_2OL = N_{FERT} \times FRAC_{LI} \times EF \quad (2)$$

Sendo que:

- ***N₂OL*** a quantidade de nitrogênio aplicada na forma de fertilizantes sintéticos, em kg N/ano kg N₂O-N;
- ***N_{FERT}*** a quantidade de N aplicado na forma de fertilizantes sintéticos, em kg N/ano;

- $FRAC_{LI}$ a fração de N do fertilizante sintético adicionado ao solo que são perdidos por lixiviação e escoamento, em kg N lixiviado ou escoado/kg de fertilizante, sendo que o valor adotado é de 0,3 (IPCC, 1996);
- EF_4 o fator de emissão de N_2O por lixiviação/escoamento, em kg N_2O-N /kg N lixiviado ou escoado, sendo que o valor adotado é de 0,025 (IPCC, 1996).

4.3.1.3 Colheita e transporte florestal

As operações mecanizadas foram realizadas por um trator harvester, que realizou atividades de derrubada e traçamento das toras. Também utilizou-se o Feller Buncher, um Skidder uma grua e um Timber Hauler Pack. O Feller Buncher é uma máquina que possui a capacidade de acumular troncos em seu cabeçote, aumentando a rentabilidade da produção, ele consegue cortar e processar várias árvores ao mesmo tempo e é indicado para trabalhar com toras compridas. Segundo Nascimento *et al.* (2011) o Feller Buncher tem capacidade de cortar e acumular 48,8 m³ de árvores em 1 hora. Para realizar as duas colheitas (382,02 m³), são necessárias cerca de 7,83 horas e, sabendo que a máquina consome 21,58 L/h, o consumo aproximado de diesel nas colheitas foi de 168,97 litros de diesel/ha.

Os ciclos operacionais foram determinados ciclos mínimos e máximos que pudessem atender às necessidades operacionais com uma margem de erro máxima de 5% utilizou-se a metodologia proposta por Barnes (1977), de conforme a Equação 1:

$$n \geq \frac{T^2 * CV^2}{E^2} \quad (1)$$

Onde:

n = número mínimo de ciclos necessários;

t = valor de t , para o nível de probabilidade desejado e $(n-1)$ graus de liberdade;

CV = coeficiente de variação (%)

E = erro de amostragem admissível a 95% de probabilidade.

A produtividade das máquinas foi estimada em metros cúbicos de madeira com casca (feller-buncher) e sem casca (harvester e forwarder) por hora efetiva de trabalho ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), seguindo a Equação 2:

$$P = \frac{V}{T}$$

Onde:

P = produtividade efetiva ($\text{m}^3 \text{he}^{-1}$);

V = volume da UAP (m^3);

T = tempo gasto na UAP (horas centesimais).

O volume Para as máquinas feller-buncher e harvester, o volume da UAP foi quantificado multiplicando-se o número de árvores da UAP pelo volume médio individual das árvores, obtido por meio do inventário pré-corte.

As atividades que se destacaram a partir do 6º Ano até o 12º Ano, pois, estão diretamente vinculadas ao procedimento de colheita e manejo da biomassa de eucalipto colhida, como podemos ver na tabela 8:

Tabela 8 - Informações Operacionais da Colheita do Eucalipto

Atividades Operacionais de Colheita								
OPERAÇÃO	Anos que demandam a operação					(Unidade de Básica Valor)	Valor	Consumo por h^{-1} - UAP
	3	4	5	6	7-12			
Manutenção de Aceiros com Roçadeira	-	-	-	X	X	Combustível	0,5L/h	96,95
Operações de Colheita Mecanizada (SKIDDER)	-	-	-	X	X	Combustível	21 L/ h^{-1}	4071,9
Operações de Colheita Mecanizada (Feller Buncher)	-	-	-	X	X	Combustível	23L/ h^{-1}	4459,7
Operação de Transporte/Transbordo (Timber hauler)	-	-	-	X	X	Combustível	2,5 km/L	484,75
Transporte de Água – Operadores + Caminhoneiro	-	-	-	X	X	MDO (4SM–R\$5.120,00) +B	R\$21,32/h	R\$16.184

Fonte: o Autor

Um skidder é um trator articulado, com rodas ou esteiras, constituído por garras ou guinchos, responsável por extrair e transportar a madeira da posição de corte. Além disso, você pode contar com pás que auxiliam na movimentação de toras e materiais. Ele foi a máquina mais indicada para transportar toras compridas ou árvores inteiras, ou seja, em sistema de tração. Portanto, funciona melhor em combinação com Feller ou Feller-buncher. O Skidder tem capacidade de transportar cerca de 32 m³ de madeira por hora, com consumo de 21,1 L/h de diesel (SILVA, 2012).

Segundo Linhares *et al.* (2012) o alto custo das atividades de colheita florestal foi o que mais impacta no preço final do produto. O planejamento operacional e o conhecimento das máquinas, seu desempenho e eficácia são fundamentais para minimizar os problemas operacionais e maximizar a eficiência e os custos do processo de colheita. Um dos sistemas de colheita indicados pelo autor foi o sistema de toras curtas, onde, todas as atividades complementares relacionadas ao corte (desgalhamento, derrubada, cerca viva e descascamento) ocorrem no local de corte das árvores. As vantagens do sistema incluem facilidade de movimentação e baixa erosão ambiental, principalmente relacionada à ciclagem de nutrientes no solo.

4.3.1.4 Transporte Florestal

O caminhão Timber Hauler que pode viajar em alta velocidade em vias públicas e até mesmo transportar colheitas para áreas industriais. Na verdade, trata-se de um caminhão equipado com grua, capaz de levantar e transportar grandes cargas (40 a 60 toneladas) (SILVA, 2012). A distância euclidiana definida entre o local onde foi estabelecida a usina da planta termelétrica e as unidades de produção foi utilizada para o cálculo do consumo de combustível relativo às atividades de transporte. Devido a planta ainda não estar estabelecida, critérios práticos como relevo, condição de solo não foram consideradas para base de cálculo do consumo de combustível.

O diesel e a gasolina foram incorporados no mesmo cálculo por se tratar de combustíveis fósseis. As emissões da queima do diesel seguiram, portanto, os fatores de emissão da tabela 15 estimados pelo Proconve (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores, 2012). Foi realizada a conversão de litragem de diesel em KG e utilizada a densidade relativa de 0,834KG/l a (20°C), conforme estabelecido pela

Petrobras Distribuidora S.A. através da Ficha de Informações de Segurança de Produto tabela 9.

Tabela 9 - Emissão de poluentes a partir da queima de 1 kg de diesel.

Emissão	CO	HC	NOX	MP	CO₂	NH₃	SO₂
Quantidade (kg)	0,00140	0,00006	0,0057	0,000059	3,17727	0,04181	0,000444

Fonte: Proconve (2012)

4.3.1.5 Geração de energia

Segundo França (2022), para critérios de cálculo, medidas de volume de madeira precisaram ser convertidas para toneladas, onde, 1 m³ equivale a 0,68 tonelada de toras/madeira para uso energético (SBS, 2008; COELHO *et al.*, 2008). O valor calórico aproximado de 4.500 kcal.kg⁻¹ (JÚNIOR *et al.*, 2015). A conversão de madeira em energia termoelétrica possui uma eficiência de 38,7% (TOMASQUIM, 2016), com o objetivo de geração final de 50MW para retro utilização *on-shore* e distribuição *off-shore*.

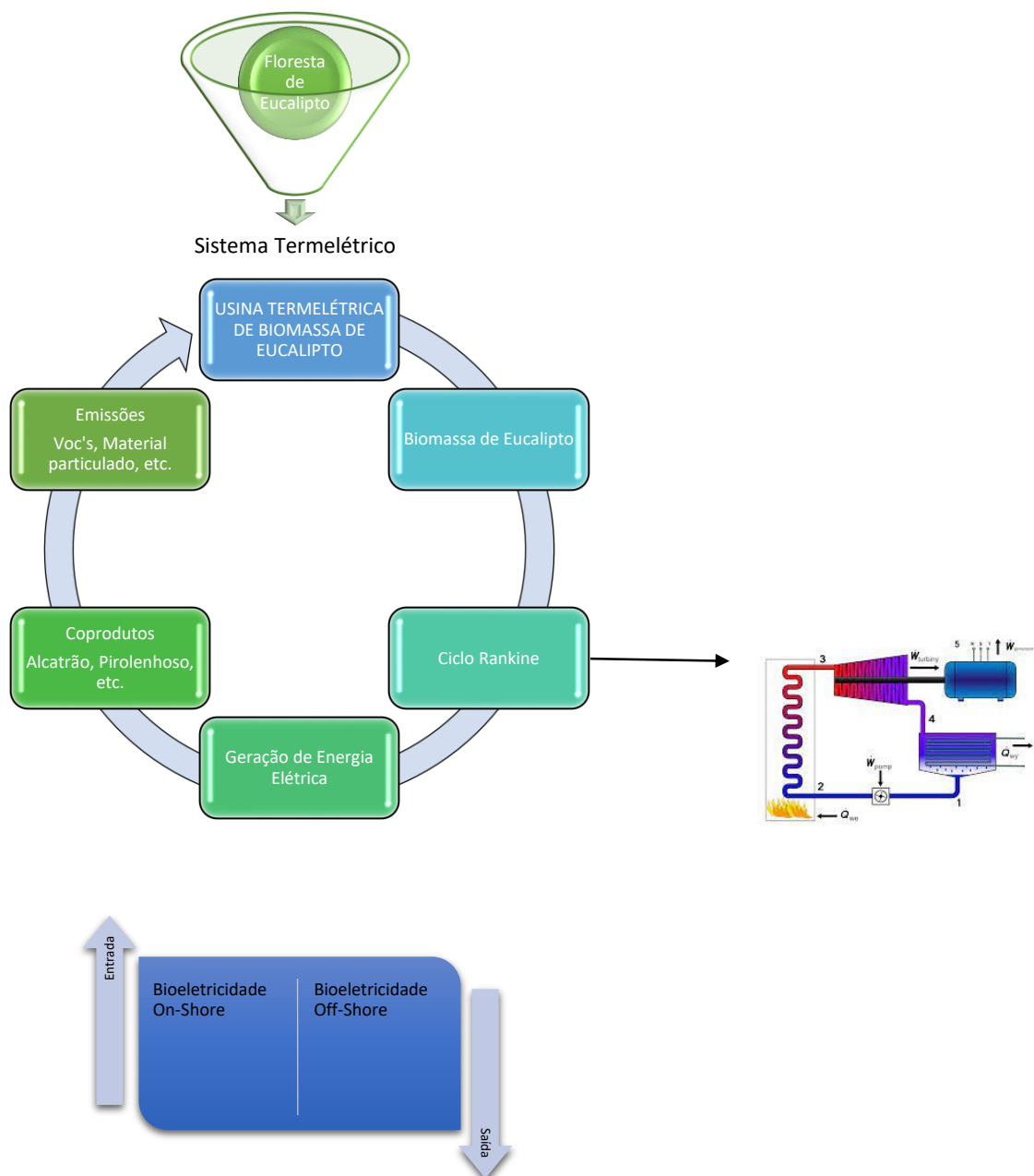
Dessa forma, objetivou-se realizar a ACV da Planta termelétrica para a geração de energia a partir da biomassa prospectando a geração de 50MW de energia como unidade funcional para unificar as informações da ACV foi definida em toneladas (t) de biomassa.

A usina termelétrica foi alimentada com a biomassa, cavacos de madeira, produzida pelo sistema de regime e manejo florestal, já inventariado. Para esta etapa a ACV considerou a avaliação realizada do portão ao túmulo, ou seja, da biomassa gerada pela floresta de eucalipto à rede de distribuição de energia. As etapas partir do fornecimento de energia para a rede de distribuição não foram consideradas bem como o estudo dos coprodutos resultantes da transformação da biomassa em bioenergia, conforme pode ser observado na figura 6.

Para a geração de energia a bibliografia indicou como mais adequado e eficiente o motor de ciclo de Rankine, (Figura 6) é um equipamento de geração e conversão de energia, que apresenta uma eficiência média de aproveitamento de 12%, foi indicado para este perfil de geração de energia. No trabalho realizado por Esteves (2017), aponta que ciclo regenerativo de Rankine é reaquecido após passar pelo condensador, porém para este estudo utilizamos o sistema convencional. Parte da energia térmica, do fluido que

flui na turbina é usado para pré-aquecer o bombeamento. Isso aumenta a temperatura média do fluido de trabalho no ciclo, melhorando assim sua eficiência. O aquecimento do fluido a ser direcionado para a bomba é apenas um aumento da temperatura sem alterar o estado físico do fluido. A água deve passar pela bomba em um estado completamente líquido comprimido, e, a pressão realizada pelo vapor de água aciona a turbina que gerou a energia elétrica esperada.

Figura 6 - Fronteiras do Sistema - Termelétrica.



Fonte: O Autor e Wikimedia Commons

Com base no estudo realizado por Esteves (2017), considerou-se que a termelétrica do presente estudo atendesse a estrutura de geração de ciclo de Rankine regenerativo, para um rendimento de 50 MW, então tem-se a geração conforme descrito na tabela 10.

Tabela 10 - Geração de energia - Ciclo de Rankine.

Poder e Consumo da Turbina	Unidade	Quantidade
Potência nos bornes (quadros elétricos)	MW	50
Consumo interno	MW	5
Potência entregue na UTE	MW	45
Biomassa		
Biomassa	KW/m	1.604.110
Umidade	%	38,7
Poder Calorífico	Kcal/h	4543
Perdas na caldeira		
Perdas por CO	%	0
Perdas por irradiação	%	1,4
Perdas por cinzas	%	0,6
Perdas totais de combustível caldeira	%	2
Consumo		
Biomassa	ton/h	194,5
Razão		
Razão Teórica	bdmt/Mw	1.604,11

Fonte: Adaptado Esteves (2017)

Partindo da premissa que, segundo ANEEL (2022), uma UTE em ciclo simples apresenta uma eficiência de 38,7 %, e os Poderes Caloríficos Inferiores (PCI) do combustível são de 4542 Kcal/kg. Dessa forma para gerar 1 KWh na usina, pode-se encontrar a madeira consumida e madeira pela seguinte equação 3.

$$\eta = \frac{\text{Energia Elétrica}}{\text{Energia Térmica}} = \frac{1 \text{ MWh}}{m_{\text{Combustível}} * \text{PCI}} \quad (3)$$

Assim, para produzir 1 MW de eletricidade, são necessários 1604,11kg de madeira. Para estimar a quantidade de energia elétrica gerada pela usina anualmente deve-se considerar o fator de capacidade da usina, ou seja, o tempo de funcionamento pela

carga anual, para isso, pode-se utilizar a equação 4. Para uma potência (P) de 50MW e um Fator de Capacidade (FC) de 80% estima-se a geração de 350.400 MWh por ano na usina, o que representa um consumo de 562.080 toneladas de madeira equação 3.

$$E = P * FC * 8760 \quad (4)$$

Segundo Engelbrecht (2016) o processo de incineração e queima a céu aberto emite CO₂, CH₄ e N₂O, sendo que o CO₂ o que tem maior índice de emissão, o CH₄ tem maior emissão quando ocorre o processo de queima incompleta à céu aberto e o N₂O foi emitido quando as temperaturas variaram entre 500 a 950°C, que pode ser obtido a partir da equação 5.

$$Emissions_{res} = CO_2Emissions + CH_4Emissions + N_2OEmissions \quad (5)$$

De acordo com o método mais generalista (“Tier 1”), as emissões de CO₂ podem ser estimadas de acordo com a Equação (6), em que:

$$CO_2Emissions = \sum (SW_i \times dm_i \times CF_i \times FCF_i \times OF_i) \times 44/12 \quad (6)$$

Onde:

CO₂Emissions = Emissões anuais de CO₂, Gg/ano;

SW_i = Quantidade total de resíduo sólido tipo i (peso úmido) incinerado ou queimado a céu aberto (fração);

dmi = Conteúdo de matéria no resíduo (peso úmido) incinerado ou queimado a céu aberto (fração);

CF_i = Fração de carbono na matéria (conteúdo de carbono total) (fração);

FCFi = Fração de carbono fóssil no total de carbono (fração);

O_{Fi} = Fator de oxidação (fração);

44/12 = Fator de conversão de C para CO₂; i = Tipo biomassa incinerada/queimada a céu aberto.

4.4. A avaliação de Impacto do Ciclo de Vida - AICV

Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) também é regulamentada pelas ISO:14040 e ISO:14044 ambas de 2009 foram utilizadas para avaliação dos impactos positivos e negativos ao meio ambiente e projeta resultados voltados à tomada de decisão. A combinação dos dados de inventário com as categorias de impacto específicas e indicam direcionamentos a resultados. A AICV também fornece informações para a fase de interpretação do ciclo de vida, podendo incluir um processo literal de revisão de metas e escopo resultados do estudo ACV para determinar se os objetivos do estudo foram alcançados, ou para modificar a avaliação mostrar que as metas e o escopo que não podem ser alcançados (ABNT, 2009).

Os impactos ambientais podem ser classificados como diretos ou indiretos, seu efeito nas categorias de impacto pode ser positivo ou negativo, sua abrangência pode ser local, regional ou estratégica, com duração temporal ou permanente com efeitos reversíveis ou irreversíveis. O prazo para a manifestação de um impacto pode ser imediato, de médio ou de longo prazo. Os tipos de impacto ambiental podem interagir ou ter uma sinergia entre si e sua magnitude definida como fraca, média, forte ou variável, (AVALIAÇÃO E ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS - AAIA, 2017). Seguindo as instruções do AAIA (2017) podemos definir o impacto da Termelétrica como direto, com categoria negativa, de abrangência regional e estratégica, com duração permanente, porém com efeitos reversíveis. Sua manifestação é de médio – longo prazo podendo haver sinergia com magnitude fraca, média e forte; que pode variar com a categoria, tipo e meio de abrangência do impacto ambiental.

Para a análise dos potenciais impactos em ACV, existem hoje, métodos para definição das categorias de impactos de um produto, modelos matemáticos de cálculo dos impactos, guias para elaborações e análise dos impactos, ferramentas computacionais, bancos de dados locais, regionais e globais, plataformas para ensino e construção dos

ICV, AICV e análises finais dos resultados, (LANGER, 2020). Neste sentido este trabalho utilizou como ferramenta de avaliação o software SIMAPRO - Versão 9.5 (SIMAPRO, 2023). No SIMAPRO, um dos parâmetros utilizados como padrão para a modelagem das emissões de pesticidas foi realizada através com cálculo *Ecoinvent*, que considera que 100% do pesticida aplicado fica retido no solo. As análises realizadas dos impactos ambientais para solo, ar e água foram analisados utilizando o método: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H do software SIMAPRO 9.5.

Analisando o estudo realizado por Nemecek e Schnetzer (2007) observou-se o apontamento de taxas de emissões para atmosfera, na forma de Amônia (NH_3), proveniente de alguns tipos de fertilizantes minerais nitrogenados. Para o fertilizante Sulfato de Amônio foi identificada a emissão de 8% da quantidade de N contida nesse elemento como emissão. No caso da Uréia o índice foi de 15% da quantidade de N. O nitrato de cálcio apresentou emissão de 2% de N. O NPK emitiu na forma de NH_3 uma taxa de 4%. Em relação a contaminação da água, o Nitrato (NO_3^-) foi indicado, através de lixiviação, e segundo análise do IPCC (2006), foi apontada uma taxa de 0,3 kg de NO_3^- para cada kg de N, conforme tabela 8. Dessa forma, foram utilizadas essas taxas como parâmetro de cálculo para a planta termelétrica, uma vez que, o uso de fertilizantes nitrogenados resulta em impactos tanto para o solo quanto para a água.

Assim sendo utilizou como ferramenta de cálculo as diretrizes estabelecidas para o cálculo do N_2O normatizadas pela WRI Brasil e colaboradores, relativas ao uso de fertilizantes nitrogenados. Para a emissão de fertilizantes nitrogenados sintéticos estima-se que a emissão de N seja de 0,0113kg para cada kg de N_2O , e que a emissão de Ureia seja de 0,0088 N_2O para cada kg de nitrogênio aplicado. Com base nessas informações foi estipulada a seguinte fórmula, (WRI BRASIL, s.d.):

Para a avaliação do pentóxido de fósforo P_4O_{10} Shigarki (2006) indica que 10% dessa emissão contaminou águas superficiais. As emissões de zinco (Zn), boro(B), cobre (Cu) e demais micronutrientes do NPK, para o ar, água ou solo, não foram considerados para este inventário. Uma vez que a quantidade aplicada foi absorvida pela planta ou fica retida no solo (SILVA, 2012) e (BARRANTES *et al.*, 2016).

Com relação ao solo, Jabbar *et al.* (2008), avaliou os impactos e a contaminação do solo por Glifosato considerou que 0,28% da quantidade aplicada polui as águas por lixiviação.

5 RESULTADO

Os dados obtidos a partir de uma revisão de literatura foram prospectados e dimensionados para a produção de 50MW geração de energia, a partir da biomassa de eucalipto, e, as emissões mais relevantes podem ser observar nas tabelas 11, 12 e 13.

Tabela 11- Emissões da queima de diesel planta termelétrica – (1 UAP).

Emissão	CO	HC	NOX	MP	CO₂	NH₃	SO₂
Quantidade (kg)	53.963, 1	2,312 7	219,70 7	2,2741	122.46 8	1.611,5 7	17,114

Fonte: Proconve (2012) adaptada pelo Autor

As emissões de HC, MP, SO_x e NO_x conforme a biomassa produzida por uma UAP. A biomassa de produzida por uma UAP Dessa forma, foram calculadas para uma demanda de 194,5 toneladas de biomassa conforme estudo de Ferreira (2006) e Engelbrecht (2016), e os resultados obtidos podem ser observados na tabela 18.

Tabela 12 - Emissões da UTE.

Emissão	Valor em kg/t (UAP)	Valor em kg (UAP)
HC	0,11	21,395
MP	4,4	855,8
SO _x	0,037	7,1965
NO _x	0,75	145,88

Fonte: o Autor

A primeira fase da ACV que envolveu a produção de mudas florestais, preparo de solo e plantio das mudas foi a que provocou menos impactos na ACV, seguido da termelétrica, a fase de produção de bioenergia, a planta florestal, foi que mais causou impactos e emissões como podemos observar nas tabelas e gráficos abaixo, que expõem a partir das análises realizadas no SIMAPRO 9.5 a discriminação das emissões e a quantidade de cada substância dispensada no meio ambiente.

O primeiro meio a ser analisado foi o atmosférico

Tabela 13 - Principais Emissões Atmosféricas.

Substância	Ambiente	Unidade	Totalt	Termelétrica	Lorry, 40 metric ton	Diesel, low- sulfur	Planta Florestal	Produção de Mudas
Metano, bromotifluoro-, Halon 1301	Ar	kg	36,87457	0	0,388657	0,036559	34,77302	1,676335
Metano, clorodifluoro-, HCFC-22	Ar	kg	1,349698	0	0,236219	2,12E-05	1,104254	0,009203
Metano, dicloro-, HCC-30	Ar	kg	96,76955	0	0,004915	1,2E-06	96,76436	0,000275
Metano, diclorodifluoro-, CFC-12	Ar	kg	2,764032	0	0,000438	1,2E-07	2,76357	2,46E-05
Metano, diclorofluoro-, HCFC-21	Ar	kg	108,3503	0	4,874273	0,00027	103,225	0,2508
Metano, fossil	Ar	kg	142,4278	0	3,305248	0,023287	137,9304	1,168799
Metano, transformação de terras	Ar	kg	11,13356	0	1,485684	5,49E-05	9,625639	0,02218
Metano, monocloro-, R-40	Ar	kg	406,4017	0	7,066482	0,00103	398,9362	0,397966
Metano, tetracloro-, CFC- 10	Ar	kg	53,06418	0	0,006531	1,89E-06	53,05685	0,000799
Metano, tetrafluoro-, CFC-	Ar	kg	2,38594	0	0,505828	4,59E-06	1,875656	0,004451

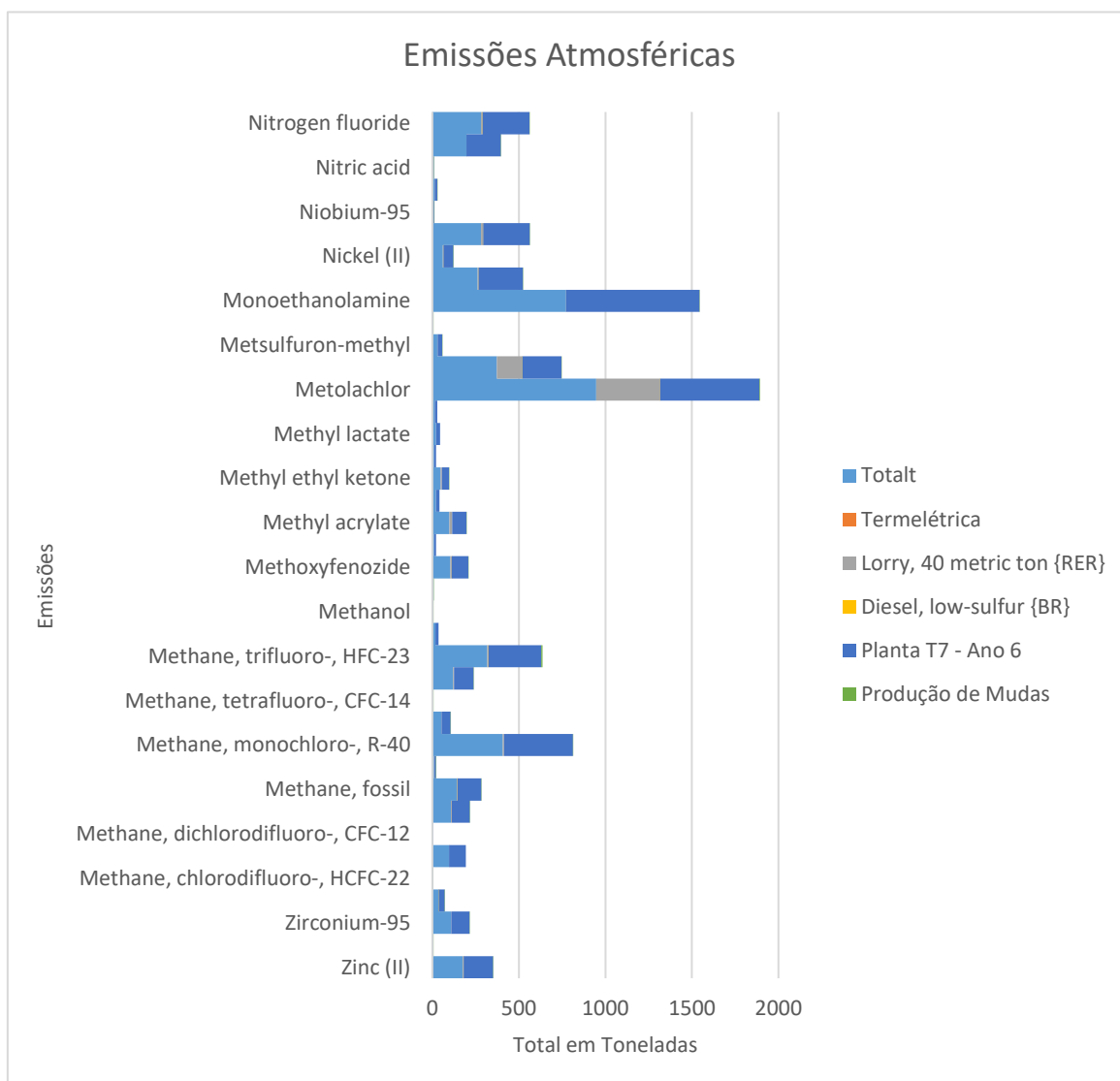
14								
Metano, triclorofluoro-, CFC-11	Ar	kg	119,5343	0	5,377505	0,000298	113,8798	0,276693
Metano, trifluoro-, HFC-23	Ar	kg	318,1242	0	6,639195	0,14651	305,2016	6,136822
Ácido Metanosulfônico	Ar	kg	18,36324	0	1,02E-05	4,3E-10	18,36323	1,14E-07
Metanol	Ar	kg	2,335485	0	0,001804	6,59E-07	2,333334	0,000347
Metomil	Ar	kg	3,781931	0	0,354597	1,79E-05	3,423172	0,004144
Metoxifenoazida	Ar	kg	103,8009	0	9,738255	0,000486	93,94861	0,113547
Acetato de Metila	Ar	kg	10,81304	0	0,000233	3,16E-08	10,8128	4,34E-06
Acrilato de Metila	Ar	kg	98,69101	0	15,63938	5,05E-05	82,78151	0,270077
Borato de Metila	Ar	kg	20,65665	0	2,23E-05	2,73E-09	20,65663	4,79E-07
Metil etil cetona	Ar	kg	48,2188	0	7,64011	2,47E-05	40,44667	0,13199
Formato de metila	Ar	kg	11,14127	0	3,11E-05	6,2E-10	11,14124	5,38E-07
Lactato de Metila	Ar	kg	22,04316	0	1,01E-05	1,15E-09	22,04315	4,26E-07
Metilamina	Ar	kg	14,25673	0	2,84E-05	7,99E-10	14,2567	5,41E-07
Metolacoloro	Ar	kg	946,6592	0	369,0975	0,007484	574,8141	2,740133
Metribuzina	Ar	kg	373,6617	0	145,6759	0,002953	226,9011	1,081676
Metsulfurão-metilo	Ar	kg	28,31115	0	2,656058	0,000132	25,62399	0,030969
Molibdênio (VI)	Ar	kg	2,309801	0	0,067634	6,33E-05	2,233546	0,008558
Monoetanolamina	Ar	kg	772,9458	0	0,510334	0,000181	771,3839	1,051441
Naftaleno	Ar	kg	261,6218	0	4,883911	0,000924	256,6093	0,127702
Niquel (II)	Ar	kg	61,09576	0	3,356742	0,005686	57,36513	0,368201
Nicosulfurão	Ar	kg	281,7143	0	13,24454	0,016092	267,6847	0,768994
Niobio-95	Ar	kg	5,551471	0	0,085766	1,46E-05	5,461668	0,004022

Nitrato	Ar	kg	14,67755	0	0,001543	4,01E-08	14,3658	0,310207
Ácido Nítrico	Ar	kg	4,485256	0	0,023153	1,58E-05	4,4504	0,011687
Nitrobenzeno	Ar	kg	197,9263	0	0,040536	2,35E-05	197,8687	0,01704
Fuoreto de Nitrogenio	Ar	kg	281,0938	0	8,666275	0,001047	271,3716	1,054918

Fonte: o Autor

A emissão mais impactante, na atmosfera foram o fluoreto de nitrogênio (NF₃), a monoetanolamina (C₂H₇NO), metolacoloro (C₁₅H₂₂C₁NO₂) e do metano (CH₄). A principal via de contaminação por estes elementos foi através do processo de incineração da biomassa. Na estação chuvosa o cenário de mudança climática aumenta o excedente hídrico no solo, porém durante a estação seca, ocorre um aumento de deficiência hídrica. Mais especificamente o aumento das concentrações desses elementos na atmosfera pode supostamente prejudicar o equilíbrio estabelecido entre oceanos e biosfera que fazem suas trocas de carbono através da atmosfera, Souza, Morassuti e Deus (2018).

Gráfico 5 - Emissões Atmosféricas – Termelétrica.



Fonte: o Autor (SIMAPRO, 9.5)

A demanda por pesticida no manejo da cultura do eucalipto foi necessária devido aos ataques de formigas, cupins e outros insetos à cultura. Porém o ideal recomendado foi o uso substâncias mais biodegradáveis e com impacto menos negativo ao meio. Principalmente devido às questões microbiológicas do solo e sua biota, as substâncias que causaram mais impacto no solo estão relacionadas na tabela 14.

Tabela 14 - Principais emissões no solo.

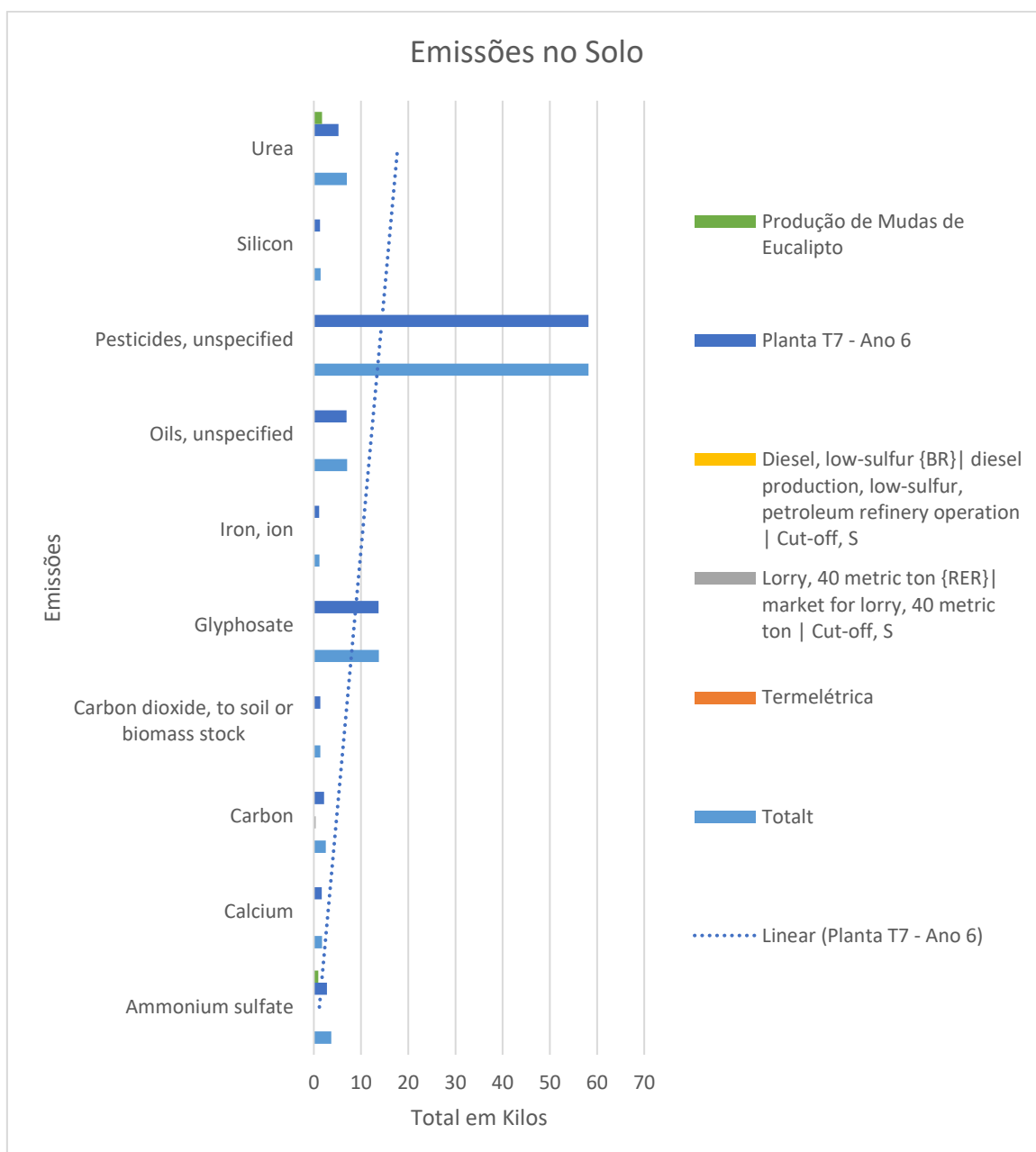
Substância	Ambiente	Unidade	Totalt	Termelétrica	Lorry, 40 metric S	Diesel, low-sulfur {BR}	Planta T7 - Ano 6	Produção de Mudas
Sulfato de Amonio	Solo	kg	3,72252	0	0	0	2,7918	0,93072
Cálcio	Solo	kg	1,746796	0	0,04519	0,000105	1,695098	0,006403
Carbono	Solo	kg	2,539701	0	0,374298	9,62E-05	2,156786	0,008521
Dióxido de Carbono para o Solo ou Estoque de Biomassa	Solo	kg	1,377726	0	0,013606	4,63E-05	1,360459	0,003614
Dicrotofos	Solo	kg	0	0	0	0	0	0
Glifosato	Solo	kg	13,74703	0	0,000483	3,41E-08	13,74654	1,23E-05
Ferro, íon	Solo	kg	1,182063	0	0,037248	5,42E-05	1,140061	0,004699
Metanoarsonato de Ácido Monosódico	Solo	kg	0	0	0	0	0	0
Óleos, não especificados	Solo	kg	7,03063	0	0,013712	0,000171	6,9647	0,052047
Pesticidas, não especificados	Solo	kg	58,17004	0	3,72E-06	2,07E-10	58,17004	1,08E-07
Prometrina	Solo	kg	0	0	0	0	0	0
Sal Sódico de Piritiocac	Solo	kg	0	0	0	0	0	0
Silicone	Solo	kg	1,434275	0	0,090094	1,02E-05	1,340712	0,003459
Tidiazurão	Solo	kg	0	0	0	0	0	0
Tribufos	Solo	kg	0	0	0	0	0	0
Uréia	Solo	kg	6,9801	0	0	0	5,235	1,7451

Fonte: o Autor (SIMAPRO 9.5)

Segundo Henrique (2021), doses de glifosato no solo contendo plantas de eucalipto sob presença de *Ralstonia solanacearum* apresentaram interação, aumentando a população da bactéria no solo. A presença do glifosato também aumentou as taxas de CO₂ na respiração do solo inoculado com a bactéria, além de interferir na atividade das enzimas analisadas, relacionadas ao sistema de defesa das plantas, diminuindo a atividade da FAL (Fenilalanina amônia-liase e aumentando a atividade da POD (Peroxidase).

Segundo Tullio *et al.* (2013) o alto índice de sódio e demais compostos salinos na água foi um dos principais fatores que limitam o crescimento e a produtividade de plantas; esta limitação se dá em condições salinas visto que ocorre redução na disponibilidade de água às plantas em razão da diminuição do potencial osmótico da solução do solo e, assim, as plantas tendem a gastar mais energia para absorver água e nutrientes (LEONARDO *et al.*, 2003).

Gráfico 6 -Emissões no Solo - Termelétrica



Fonte: o Autor (SIMPRO 9.5)

A salinidade pode promover desbalanço nutricional devido ao excesso de sódio na solução de solo que provoca distúrbio na absorção de nutrientes afetando sobretudo as concentrações de Ca, Mg e K na planta (WANDERLEY *et al.*, 2010). O gráfico 5 nos mostra que a partir da normalização dos dados os impactos que demonstraram maior sensibilidade às atividades para a geração de bioenergia da planta termelérica foram o maio aquático, o terrestre, a emissão de combustíveis fósseis e o impacto na saúde humana. Podemos observar na tabela e no gráfico a seguir que as emissões que impactaram o meio aquático foram o sulfato de amônio, o brometo e o dinitrato de cálcio seguido do ferro, da demanda química de oxigênio (DQO) e do carbono orgânico total (TOC). Estes elementos podem causa acidez da água, eutrofização e danos à saúde humana, se estiverem em excesso na água tabela 15.

Tabela 15 - Principais emissões no meio aquático.

Substância	Ambiente	Ud	Totalt	Termelétrica	Lorry, 40 metric ton	Diesel, low-sulfur {BR}	Planta Ano6	Produção de Mudás
Cloreto	Água	ton	3,664025	0	0,00997	0,000252	3,617477	0,036326
Sódio	Água	ton	2,275402	0	0,007835	0,000123	2,247257	0,020187
Sulfato	Água	ton	1,137947	0	0,024281	5,12E-06	1,105173	0,008488
Acetilaldeído	Água	kg	3,448737	0	7,17E-05	5,69E-08	3,448662	3,13E-06
Ácido Acético	Água	kg	18,55116	0	0,000252	6,24E-08	18,5509	6,94E-06
Alumínio (III)	Água	kg	195,3928	0	9,466878	0,000552	185,7664	0,158995
Sulfato de Amônio	Água	kg	49,6384	0	1,69E-09	3,65E-13	37,2288	12,4096
Amônio, ion	Água	kg	27,40295	0	0,035619	0,000584	27,33999	0,026759
AOX, Orgânico Adsorvível Halogênio	Água	kg	5,785069	0	0,000181	2,65E-07	5,784872	1,65E-05
Barita	Água	kg	7,444183	0	0,06451	0,008034	7,040871	0,330768
Bário (II)	Água	kg	3,005059	0	0,1511	0,000458	2,818867	0,034634
Benzeno	Água	kg	12,13335	0	0,001566	1,38E-05	12,13116	0,000611
Benzeno, 1,2-dicloro-	Água	kg	5,534633	0	0,000171	3,24E-09	5,534458	4,07E-06
Benzeno, chloro-	Água	kg	10,49025	0	0,000261	1,29E-08	10,48998	1,2E-05
Bisfenol A	Água	kg	0	0	0	0	0	0
BOD5 (Demanda Biológica de Oxigênio)	Água	kg	65,56919	0	2,462071	0,003984	62,86095	0,242177
Borato	Água	kg	5,941138	0	2,1E-06	1,39E-10	5,941135	7,67E-08
Brometo	Água	kg	368,9646	0	0,000145	1,05E-08	368,9644	2,89E-06

Cálcio	Água	kg	324,6545	0	10,22063	0,031089	312,5737	1,82912
Dinitrato de Cálcio	Água	kg	9,3072	0	0	0	9,3072	0
Carbonato	Água	kg	41,06369	0	0,016505	0,000976	41,00585	0,040357
Cloramina	Água	kg	1,008651	0	3,82E-07	2,74E-11	1,008651	6,25E-09
Clorato	Água	kg	5,005149	0	0,004895	1,97E-06	4,999536	0,000716
Ácido Cloroacético	Água	kg	8,321752	0	4,32E-06	6,32E-10	8,321748	8,38E-08
COD (Demanda Química de Oxigênio)	Água	kg	158,9216	0	8,220859	0,002974	150,4183	0,279498
Cobre, ion	Água	kg	12,91276	0	0,673071	2,84E-05	12,20773	0,031931
DOC, Carbono Orgânico Dissolvido	Água	kg	77,83406	0	6,85005	0,002186	70,78739	0,194435
Epicloridrina	Água	kg	0	0	0	0	0	0
Etanol	Água	kg	5,10851	0	0,000151	3,68E-08	5,108355	3,78E-06
Fluoreto	Água	kg	12,75581	0	0,467949	3,8E-05	12,27136	0,01646
Substância	Ambiente	Ud	Totalt	Termelétrica	Lorry, 40 metric ton	Diesel, low-sulfur {BR} 	Planta Ano6	Produção de Mudás
Formaldeído	Água	kg	2,42405	0	6,85E-05	3,55E-08	2,423971	1,07E-05
Formato	Água	kg	9,81932	0	4,55E-06	2,84E-10	9,819316	6,12E-08
Glifosato	Água	kg	27,49146	0	1,51E-07	2,32E-11	13,7504	13,74106
Sulfato de Hidrogênio	Água	kg	1,588885	0	0,094126	1,3E-05	1,490754	0,003993
Iodeto	Água	kg	41,57767	0	0,003242	0,000204	41,56574	0,008487
Ferro, ion	Água	kg	171,4204	0	8,330659	0,000478	162,655	0,43436
Chumbo (II)	Água	kg	2,133284	0	0,119299	6,55E-06	2,008206	0,005773
Lítio (I)	Água	kg	1,78115	0	0,000725	4,63E-05	1,776846	0,003533
Magnésio	Água	kg	129,6588	0	3,944593	0,00545	124,9021	0,806686
Manganês (II)	Água	kg	9,469378	0	0,32293	4,22E-05	9,12877	0,017636
Metanol	Água	kg	2,762237	0	0,000449	3,76E-08	2,761776	1,21E-05
Niquel (II)	Água	kg	1,392261	0	0,06688	9,05E-06	1,322126	0,003245
Nitrato	Água	kg	43,89557	0	0,424897	4,64E-05	43,44833	0,022299
Compostos de nitrato	Água	kg	6,2048	0	0	0	6,2048	0
Nitrato, BR	Água	kg	26,99084	0	0	0	13,4954	13,49544
Nitrogênio	Água	kg	6,2048	0	0	0	6,2048	0
Nitrogênio, BR	Água	kg	3,1024	0	0	0	3,1024	0
Óleos, não especificados	Água	kg	1,765358	0	0,061973	0,000592	1,666916	0,035877
Pesticidas, não especificados	Água	kg	58,17	0	1,41E-08	7,05E-13	58,17	1,65E-10
Fosfato	Água	kg	49,62658	0	1,471181	0,000141	48,07779	0,077466
Fósforo	Água	kg	9,205161	0	0,006208	2,01E-06	9,198402	0,000549
Potássio (I)	Água	kg	92,42929	0	2,292305	0,003764	89,54465	0,588574

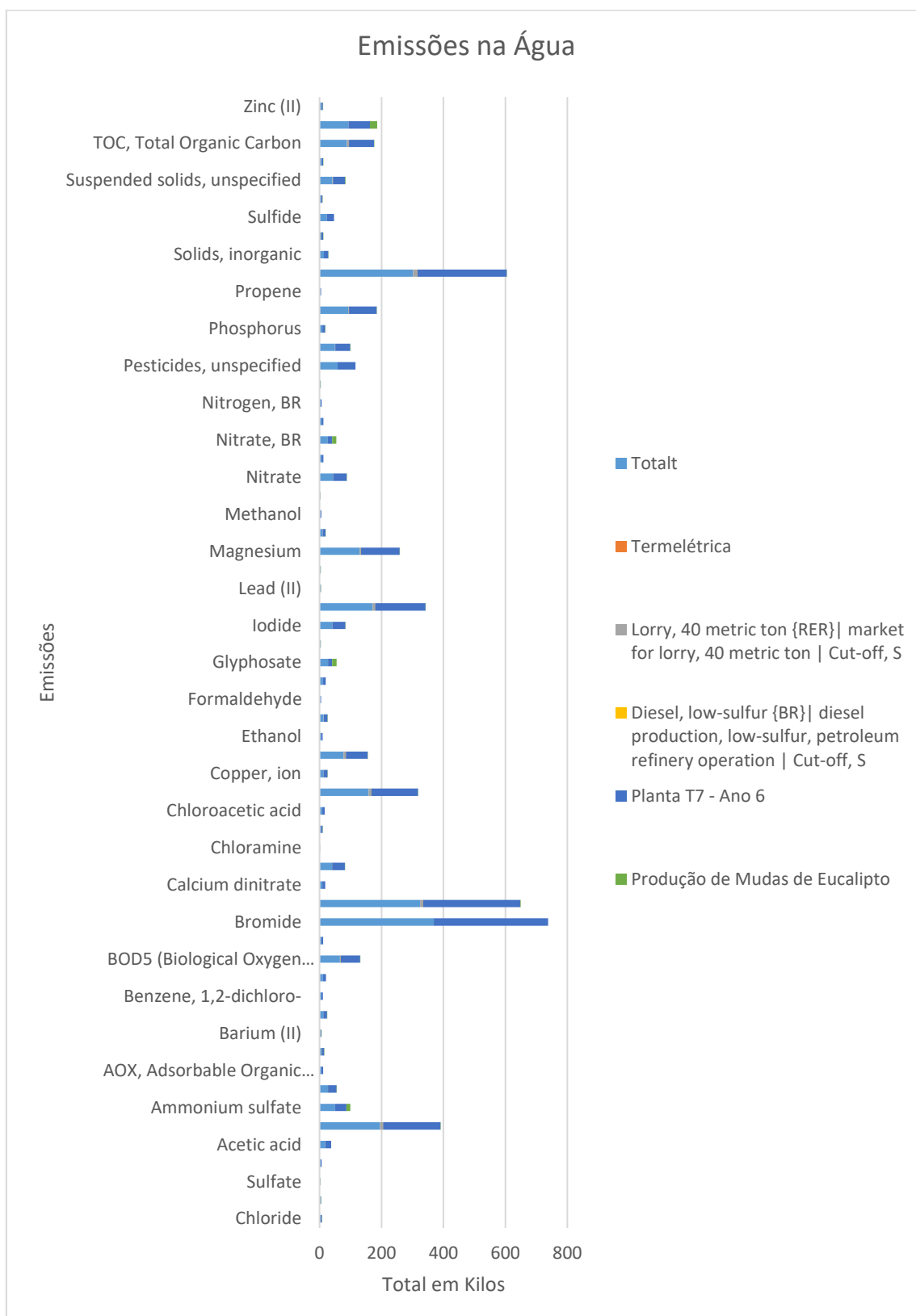
Propano	Água	kg	2,364072	0	0,004831	5,11E-07	2,359185	5,55E-05
Silicone	Água	kg	302,2751	0	13,70623	0,001822	287,9647	0,602347
Cloreto de Sódio	Água	kg	0	0	0	0	0	0
Sólidos Inorgânicos	Água	kg	14,16294	0	0,238846	5,06E-05	13,90551	0,018537
Estrôncio (II)	Água	kg	5,792891	0	0,181016	0,001208	5,552131	0,058537
Sulfureto	Água	kg	23,47378	0	6,94E-05	8,04E-08	23,4737	4,23E-06
Enxofre	Água	kg	4,631626	0	0,010533	3E-06	4,488022	0,133067
Sólidos Suspensos, Não Especificados	Água	kg	42,01045	0	1,509963	0,028579	39,07568	1,396222
Titânio, ion	Água	kg	5,788378	0	0,580373	2,71E-05	5,199659	0,008319
TOC, Carbono Orgânico Total	Água	kg	88,38589	0	7,039866	0,011802	80,73975	0,594475
Uréia	Água	kg	93,17357	0	3,47E-08	2,1E-12	69,90557	23,268
Zinco (II)	Água	kg	5,60202	0	0,859571	5,19E-05	4,731144	0,011254

Fonte: o Autor (SIMAPRO 9.5)

No que diz respeito ao aquecimento global, as etapas do processo produtivo mais impactantes foram a fase de plantio, seguida pelas operações mecanizadas e pela produção de mudas. Silva (2009) afirma que queima da biomassa devolve à atmosfera o CO₂ retido pelas plantas e árvores, que mantêm o ciclo do carbono atmosférico em equilíbrio, através da reabsorção deste CO₂. As análises realizadas desde a produção de mudas, o inventário ano a ano até a colheita da biomassa de eucalipto culminando na geração de energia termelétrica apontam os setores mais impactados desse processo.

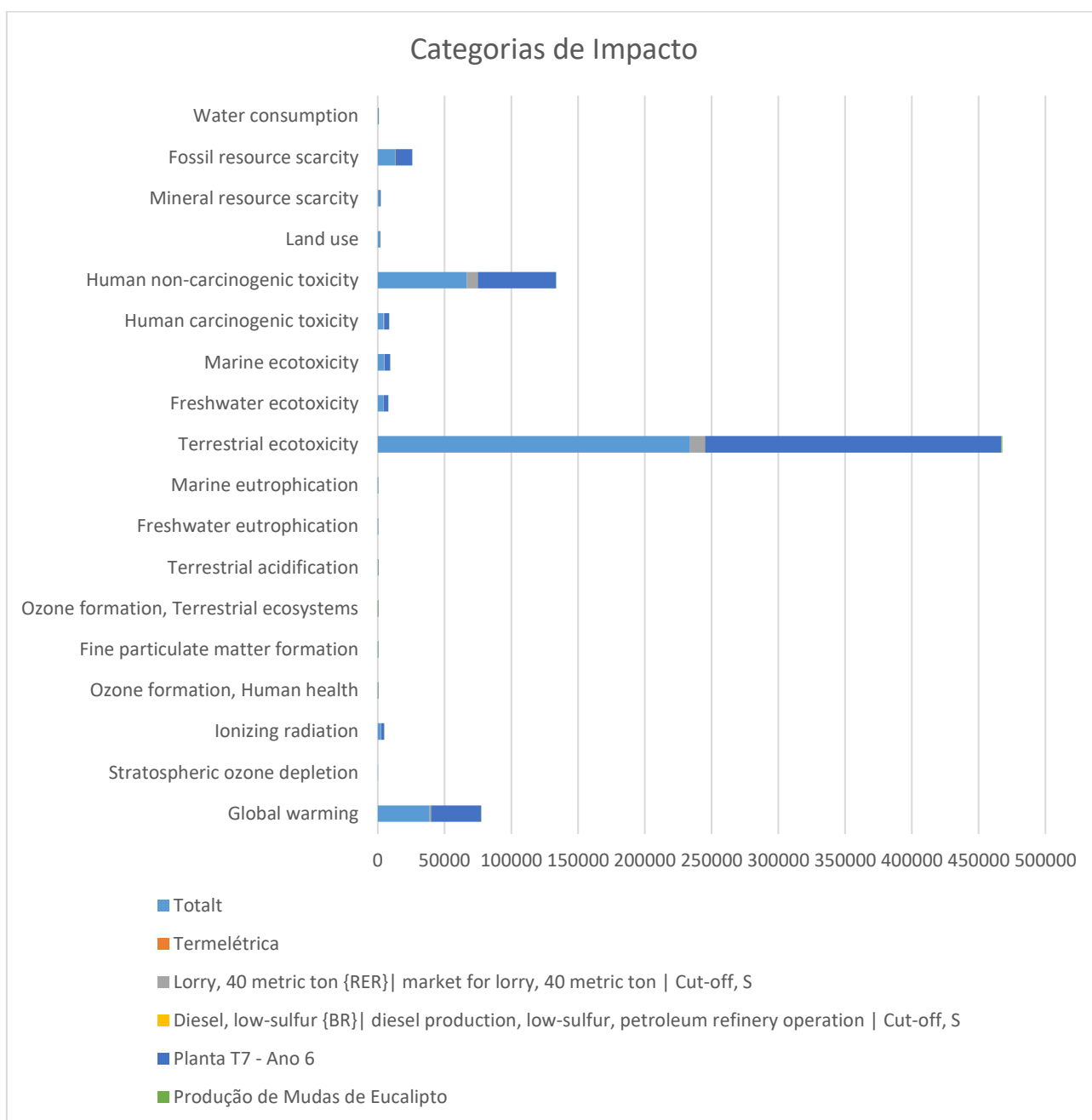
Os dados normalizados nos permitem verificar que o impacto da geração de bioenergia termelétrica causa maior impacto na água, seguido dos danos à saúde humana e da qualidade do solo como podemos, observar na tabela 16 e no gráfico 6.

Gráfico 7 - Emissões no Meio Aquático – Termelétrica.



Fonte: o Autor (SIMAPRO 9.5)

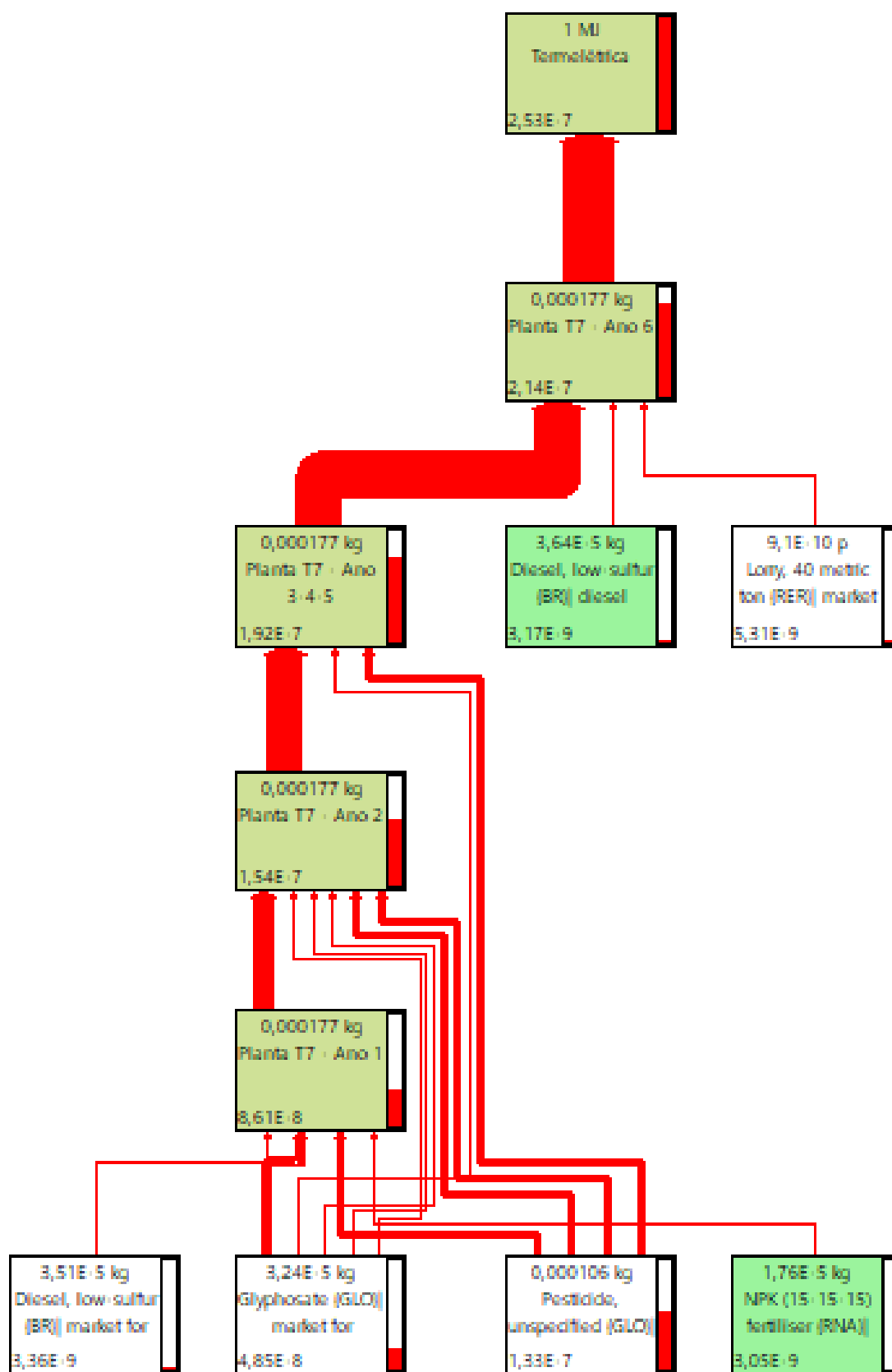
Gráfico 8 - Categorias de Impacto – Termelétrica.



Fonte: o Autor (SIMAPRO 9.5)

Com base nas informações fornecidas acima podemos concluir que as fases menos impactantes do processo de geração de bioenergia termelétrica estão evidenciadas na produção de muda e na UTE. Apesar de podermos observar um efeito cumulativo nos anos de produção, o Ano 1, destaca a grande diferença de emissões em detrimento das fases de produção de mudras e da UTE, como podemos ver na figura 7.

Figura 7- Fluxograma de Impactos da Termelétrica.



Fonte: o Autor (SIMAPRO 9.5)

Porém é importante destacar e apontar que as emissões são mais altas nesta fase e que há a necessidade de buscar insumos menos impactantes e poluentes. Principalmente no que diz respeito ao controle de pragas e fertilizantes. O SIMAPRO 9.5, realizou uma análise conjunta e comparativa das categorias de impacto ambiental abordando todas as fases da cadeia produtiva, desde a produção de mudas até a geração de bioenergia termelétrica, como podemos ver na tabela 16 e no gráfico 5 a seguir. O impacto que apresentou maior magnitude negativa foi de depleção estratosférica da camada de ozônio, provocado pelas atividades mecanizadas, devido a emissão de CO₂ decorrente da queima do diesel. Porém a ecotoxicidade terrestre a toxicidade humana não carcinogênica são destaques que devem ser monitorados e minimizados.

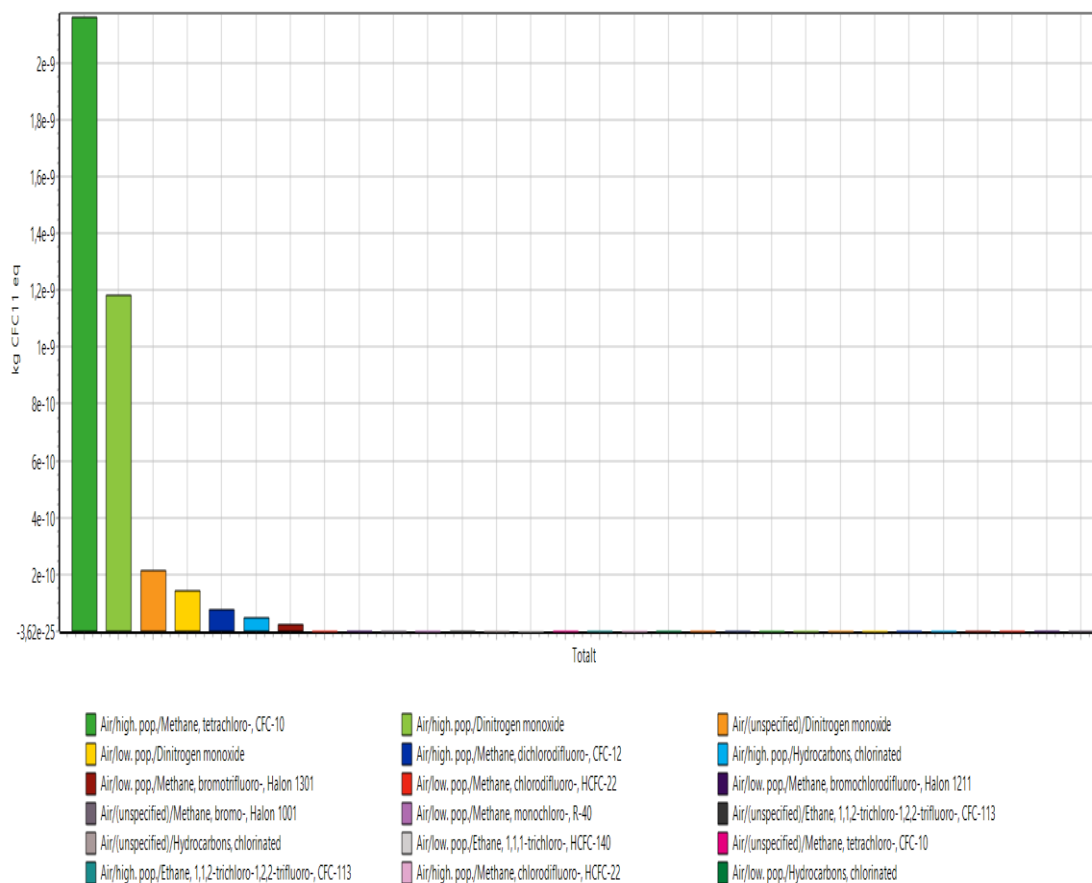
Tabela 16 - Categorias de Impacto Ambiental

Categoria de impacto	Unidade	Totalt	Termelétrica	Lorry, 40 metric, S	Diesel, low-sulfur	Planta T7 - Ano 6	Produção de Mudás
Aquecimento Global	kg CO2 eq	38791,38	0	933,8713	2,108772	37669,23	186,1651
Destruição do Ozônio Estratosférico	kg CFC11 eq	0,084849	0	0,00022	9,24E-07	0,083376	0,001253
Radiação Ionizante	kBq Co-60 eq	2342,702	0	49,27309	0,004871	2291,308	2,116089
Formação da Ozônio, Saúde Humana	kg NOx eq	115,2559	2,42028	2,555337	0,005768	109,5332	0,741334
Formação de Partículas Finas	kg PM2.5 eq	90,32008	0,02399184	1,861792	0,002229	88,16553	0,26654
Formação de Ozônio, Ecossistemas Terrestres	kg NOx eq	116,0413	0,78732	2,746603	0,007064	111,6994	0,800944
Acidificação Terrestre	kg SO2 eq	253,7679	5,0510718	3,816163	0,006482	244,1395	0,754737
Eutrofização de Água Doce	kg P eq	27,12634	0	0,567657	5,92E-05	26,53047	0,028151
Eutrofização Marinha	kg N eq	14,14703	0	0,049777	0,000416	13,16549	0,931345
Eco toxicidade Terrestre	kg 1,4-DCB	233832,8	0	11239,63	4,641773	221804,6	783,9339
Eco toxicidade de Água Doce	kg 1,4-DCB	3953,402	0	316,6933	0,011121	3595,165	41,53274
Eco toxicidade Marinha	kg 1,4-DCB	4657,57	0	429,2521	0,033936	4216,478	11,80613
Toxicidade Carcinogênica Humana	kg 1,4-DCB	4189,48	0	539,0519	0,051312	3644,479	5,898352

Toxicidade Não Carcinogênica Humana	kg 1,4-DCB	66848,74	0	8165,083	0,348298	58522,83	160,479
Uso da Terra	m2a crop eq	961,5988	0	23,71022	0,012739	935,4594	2,41647
Escassez de Recursos Minerais	kg Cu eq	994,5622	0	28,41793	0,003395	964,6492	1,491624
Escassez de Recursos Fósseis	kg oil eq	12953,98	0	255,5223	3,61632	12527,68	167,1567
Consumo de Água	m3	297,268	0	7,115924	0,030521	287,6619	2,459671

Fonte: o Autor (SIMAPRO, 9.5)

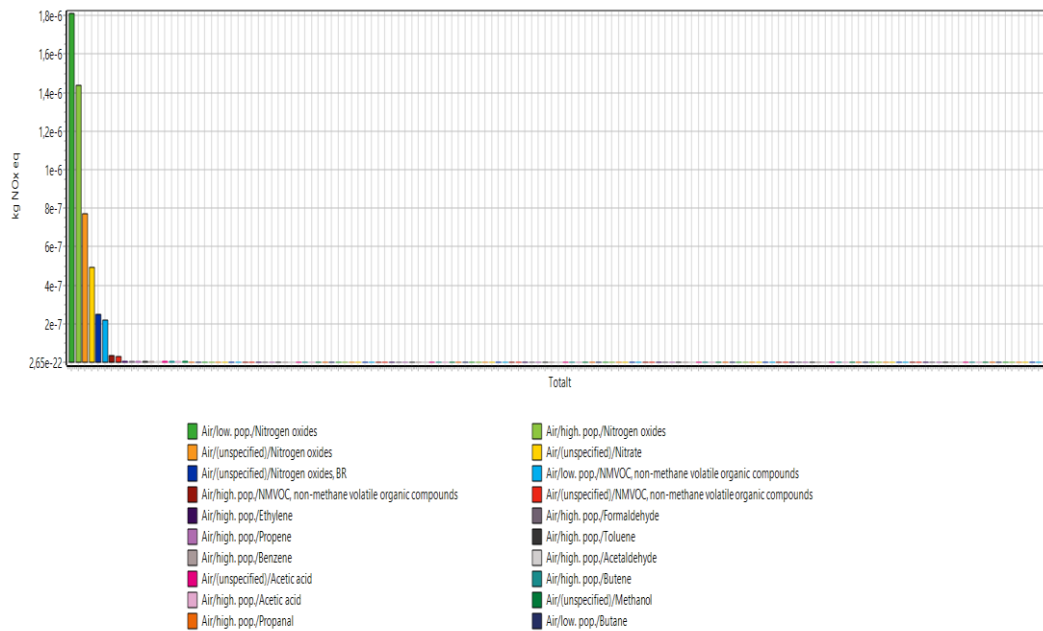
Gráfico 9 - Depleção Estratosférica



A analisar 1 MJ Termelétrica; Método: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H / Caracterização

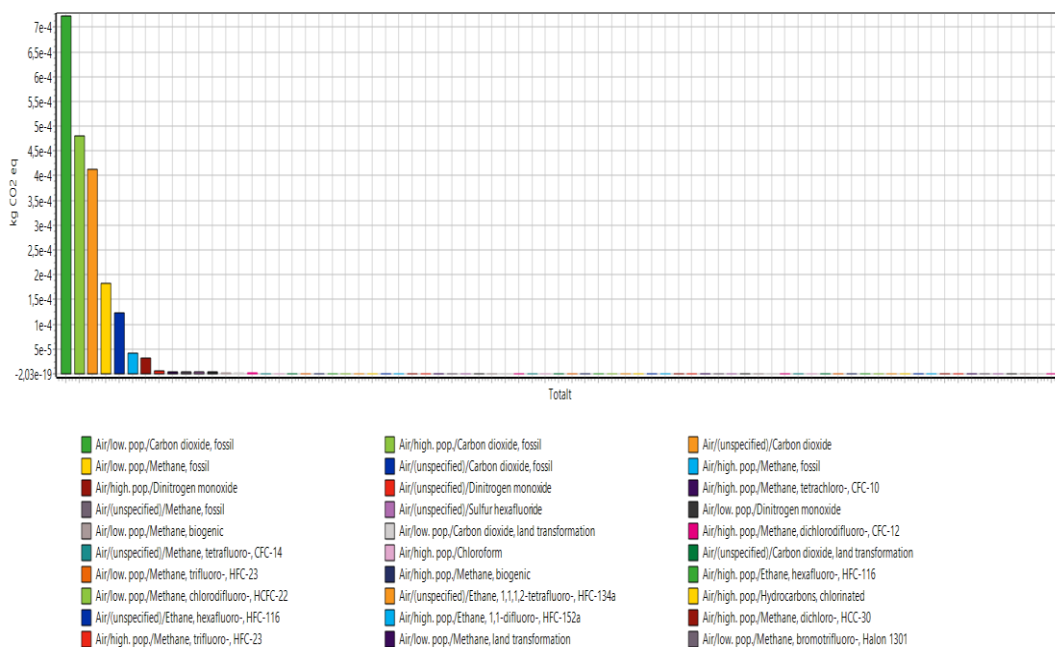
Fonte: o Autor (SIMAPRO, 9.5)

Gráfico 10 - Formação de Ozônio e Saúde Humana



A analisar 1 MJ Termelétrica; Método: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H / Caracterização

Gráfico 11 - Aquecimento Global



A analisar 1 MJ Termelétrica; Método: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H / Caracterização

Fonte: o Autor (SIMAPRO, 9.5)

Gráfico 12 - Recursos Fósseis Escassos

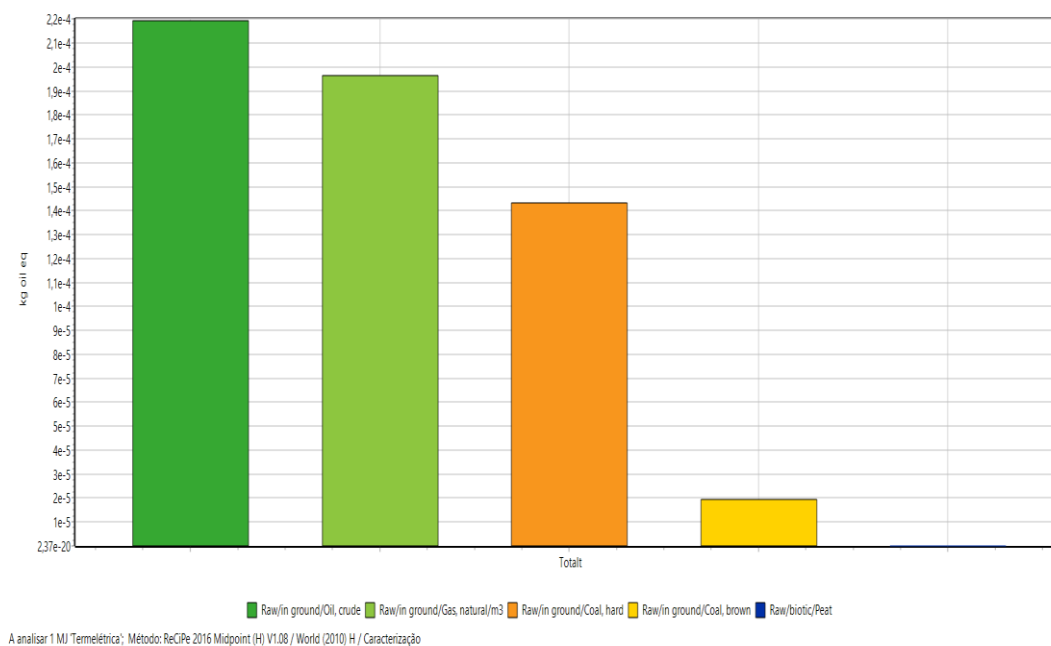
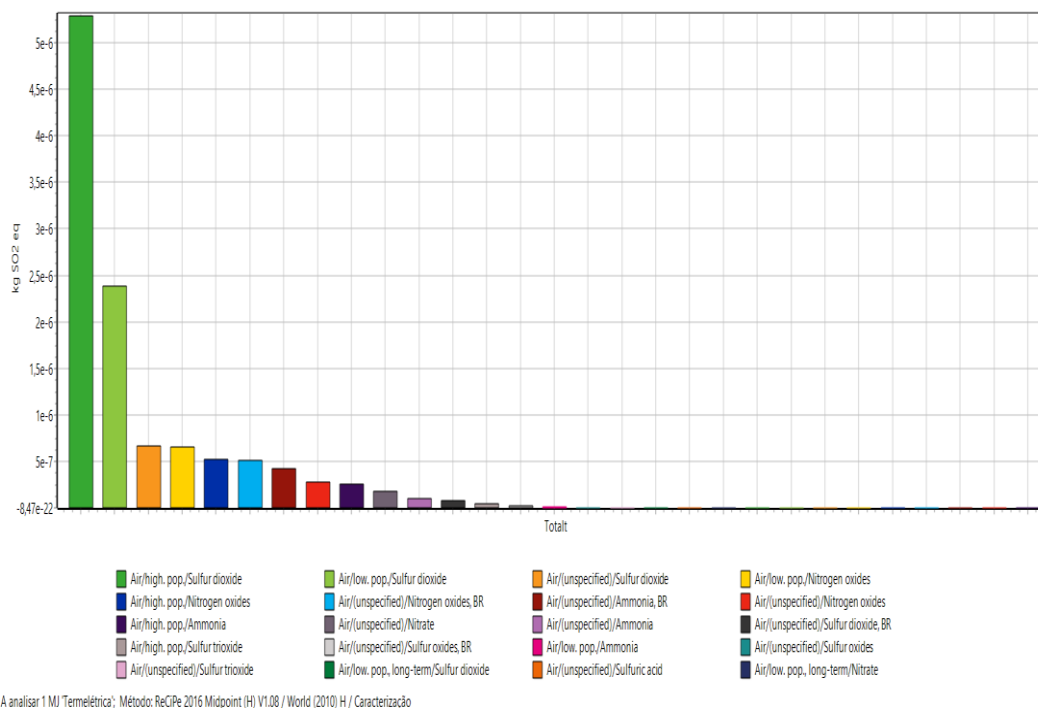
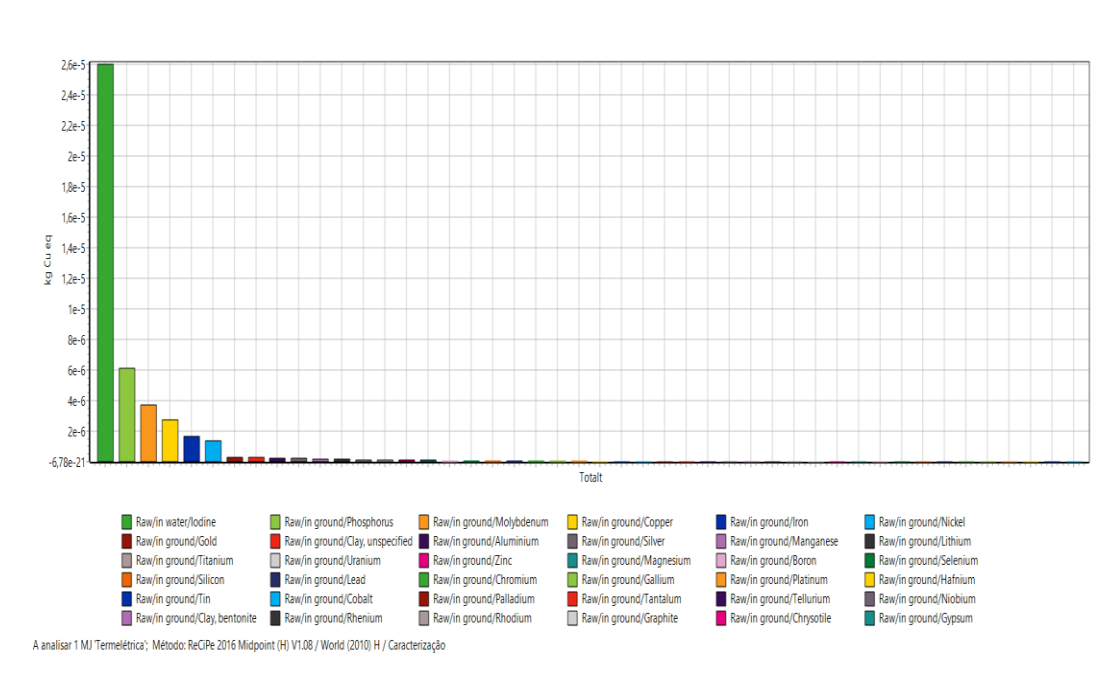


Gráfico 13 - Acidificação Terrestre



Fonte: o Autor (SIMAPRO 9.5)

Gráfico 14 - Recursos Minerais Escassos



Fonte: o Autor (SIMAPRO 9.5)

6 DISCUSSÃO

Na fronteira tecnológica a busca por um desenvolvimento sustentável e tecnológico e melhoria da eficiência energética é uma preocupação constante, pois existe uma grande pressão sobre as florestas naturais remanescentes no mundo (IBÁ, 2022). A saída para este problema está em expandir a área florestal com o estabelecimento de novas plantações para atender às demandas atuais e futuras (HERRERA, 2018). Além disso, segundo (WWF BRASIL, 2013), o uso da madeira como biomassa para a geração de bioenergia pode triplicar a quantidade de madeira que a sociedade retira anualmente das florestas e plantações florestais até 2050.

A geração de bioenergia a partir da biomassa de eucalipto também faz parte das políticas e metas ambientais globais, voltadas para a diminuição das emissões negativas ao meio ambiente, e do cumprimento dos prazos assumidos diante das organizações internacionais.

Para Morales *et al.* (2015), as fases da colheita, fertilização do solo e transporte das toras são os principais responsáveis pelos impactos ambientais avaliados ao longo de todo o manejo florestal, com destaque para a utilização de fertilizantes e o alto consumo de diesel. A avaliação do desempenho ambiental da

produção florestal para energia mostra-se importante, em especial a partir da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que permite a identificação de pontos críticos e a proposição de melhorias ao longo de toda a cadeia produtiva, Barrantes *et al.* (2016). O ciclo de vida do produto, por sua vez, é todas as etapas que incluem: extração e/ou produção de matéria-prima, produção, distribuição, uso e destinação final (AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA - ACV, 2019).

Ao avaliar as categorias de impacto identificamos que o meio que mais impactado foi a eco toxicidade terrestre devido a grande quantidade de herbicidas e pesticidas utilizadas no processo de produção da madeira, seguido da toxicidade humana não carcinogênica que é resultante do aumento da concentração de agentes tóxicos provocado pela poluição, ocasionando, conseqüentemente, potenciais danos à saúde humana, ainda que não carcinogênicos. Além do aquecimento global consequência das emissões de gases na atmosfera.

A pegada bioenergética deixou de ser uma expectativa e passou a ser uma realidade que traz consigo a prática da geração de energia limpa e autossustentável. O uso da madeira como biomassa para o abastecimento de usinas termelétricas no Brasil faz parte de uma estratégia de gestão energética governamental para o atendimento da demanda crescente de energia gerada no país e ao apelo mundial para a utilização de tecnologias mais sustentáveis e de menor impacto negativo ambiental.

Ao equalizar as emissões da cadeia produtiva identificamos que a planta florestal foi o setor de maior impacto ambiental, e esta é considerada carbono neutro pois todo CO₂ emitido por ela é absorvido pela mesma, chegando assim a um saldo é positivo, nas emissões de CO₂.

Para a planta florestal cada UAP apresentou como dados médios de produção 194,5 toneladas de madeira com uma emissão de 122.468 toneladas de CO₂. Baseado no estudo de Silva (2009) após o cálculo da diferença entre emissão e absorção de CO₂ podemos afirmar que há um saldo positivo de 72,03 toneladas disponíveis por cada UAP para serem absorvidos pelo restante do sistema. Considerando que a Planta Florestal possui 19.154 UAP's, e que, o crédito excedente é de 72,03 toneladas de CO₂, teremos um saldo positivo de 1.379.700 toneladas de carbono absorvido para equalizar o restante do sistema a zero emissão de CO₂.

Por fim ao avaliarmos todo o processo de geração de bioenergia a partir de biomassa de eucalipto pudemos considerar que a usina termelétrica de biomassa de eucalipto é carbono neutro ou seja uma indústria verde sustentável.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento da indústria verde tem se mostrado uma realidade promissora na substituição dos combustíveis fósseis. Nesse contexto, a biomassa, especialmente a proveniente do eucalipto, vem ganhando espaço gradualmente como fonte de energia para a geração de termoeletricidade. Um dos principais fatores que contribuem para sua sustentabilidade é o fato de que as emissões de dióxido de carbono (CO₂) provenientes da queima do eucalipto podem ser consideradas neutras uma vez que as árvores absorvem CO₂ da atmosfera durante seu crescimento e isso impacta diretamente na qualidade aumento na densidade da mesma. Assim cabe em estudos futuros identificar qual espécie e cultivar de madeira é mais eficiente neste processo para ser produzida em escala comercial.

Assim sendo, podemos concluir que a prospecção de implantação de uma usina termelétrica abastecida com biomassa de eucalipto, com capacidade de geração de 50MW, na planta termelétrica da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande em Minas Gerais é ambientalmente viável e de zero emissão de CO₂. Dessa forma, foram considerados os benefícios ambientais e a disponibilidade da biomassa de eucalipto, o estudo evidenciou que a geração de bioenergia a partir dessa fonte renovável é uma alternativa real e promissora. O sistema de geração energética proposto foi o de ciclo Rankine convencional, porém com o avanço nas pesquisas outros sistemas poderão apresentar dados mais eficientes contribuindo para uma redução ainda maior nas emissões de gases de efeito estufa.

Partindo de uma perspectiva econômica, social, e espacial, as florestas plantadas apresentam como objetivos básicos: programar uma fonte de renda de longo prazo para o produtor rural; atender e aumentar a oferta de madeira para fins energéticos. Cabe ressaltar que as afirmações positivas deste trabalho apontam para questões relativas às emissões do sistema, deixando ainda questionamentos relativos aos impactos naturais, ecológicos e sociais para estudos futuros.

8 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA -ANEEL. **Banco de Informações de Geração (BIG)**. 2022. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel/resource/11ec447d-698d-4ab8-977f-b424d5deee6a> Acesso em: 28 out. 2023.

ALMEIDA, C.; MACIEL, V.; CYBIS, R. Global warming potential assessment for operation of thermoelectric power plant in Manaus. **LALCA: Revista Latino-Americana Em Avaliação Do Ciclo De Vida**, Brasília, v. 1, n. 1, p. 45-63, jul./dez. 2017.

ALTHAUS H.-J. *et al.* **Life cycle inventories of chemicals**. 2007 ecoinvent report. No. 8, v2.0. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, from. Disponível em: https://db.ecoinvent.org/reports/08_Chemicals.pdf. Acesso em: 29 out. 2023.

AMARAL, D. H. **Potencial de uso da biomassa florestal na geração de energia térmica e elétrica pela indústria do estado do Rio de Janeiro**. 111f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Viçosa - Viçosa, MG, 2019.

ANATER, M. J. N. do. **Desempenho ambiental e energético da produção de carvão vegetal para uso doméstico no Brasil**. 157f. 2022. Tese (Doutorado em Energia) - Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR ISO 14040:2009. **Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. 2009. 30p. Disponível em: file:///C:/Users/Editora_UFLA/Downloads/NBR%20ISO%2014040%20-%20GA-ACV%20-%20Princ%20C3%ADpios%20de%20estrutura.pdf>. Acesso em: 17 out. 2023.

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA - ACV. **Conheça o eBook “Guia Básico de Análise de Ciclo de Vida”**. 2019. Disponível em: <https://acv.ibict.br/comunicacao/noticias/5828-conheca-o-ebook-guia-basico-de-analise-de-ciclo-de-vida/>. Acesso em: 18 de out. 2023.

AVALIAÇÃO E ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS - AAIA. **9. Avaliação e Análise dos Impactos Ambientais**. Relatório Técnico - RT ECV 161/17. 2017. 21p. Disponível em: https://iema.es.gov.br/Media/iema/Downloads/Relatorios_Tecnicos/2017.10.26%20-%209.%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20dos%20Impactos%20Ambientais_Final.pdf ≥. Acesso em: 18 de out. 2023.

BAKER, J. S. *et al.* Potential complementarity between forest carbon sequestration incentives and biomass energy expansion. **Energy Policy**, v. 126, p. 391-401, 2019.

BARNES, R. M. **Estudos de movimentos e de tempos: Projeto e medida do trabalho**. 6. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1977. 635p.

BARRANTES, L. S. de. *et al.* Avaliação do ciclo de vida da madeira de eucalipto para produção de energia no Brasil. In: V Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida, 2016, Fortaleza. **V Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida - Gestão do Ciclo de Vida nos trópicos**. p. 384-390, 2016.

BELLOTE, A. F. J.; NEVES, E. J. M. **Calagem e adubação em espécies florestais plantadas na propriedade rural**. Colombo: Embrapa Florestas, 2001. 6 p. (Embrapa Florestas. Circular Técnica, 54).

BEZERRA, F. N. R. *et al.* Dependência externa E (In) sustentabilidade da matriz energética brasileira entre 1970 e 2014. **Planejamento e Políticas Públicas**, n. 53, p. 43-79, 2019.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2010. 116p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética
BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 185-193, 2007.

BRASIL. Brasil, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética.
Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2020. 393p.

COELHO, S. T. *et al.* **Atlas de bioenergia do Brasil – São Paulo**. Projeto Fortalecimento Institucional do CENBIO, Convênio 007/2005 – MME. 2008. 54p.

CORRÊA, M. L. Contribuição para uma história da regulamentação do setor de energia elétrica no Brasil: O código de águas de 1934 e o conselho nacional de águas e energia elétrica. **Revista Política e Sociedade**, n. 6, p. 255-291, 2005.

COSTA, M. C. G.; TONINI, J.; SCHWENGBER, J. A. M. **Aspectos sobre nutrição e adubação do eucalipto**: Fundamentos para pesquisas em Roraima. Boa Vista, RR: Embrapa Roraima, 2008. 29p. (Embrapa Roraima. Documentos, 03).

COUTINHO, V. M. *et al.* Mapeamento das áreas plantadas com *Eucalyptus* spp. no estado do Paraná. **BIOFIX. Scientific Journal**, Curitiba/PR, v. 2 n. 1 p. 32-43, 2017.

DALL'AGNOL, A. A. **Análise econômica de Eucalipto para fins energéticos no município de Dois Vizinhos - PR. 2013**. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2013.

DELGADO, D. B. M.; CARVALHO, M. **Avaliação do Ciclo de Vida para verificação do potencial da energia solar fotovoltaica em reduzir a pegada de carbono do mix elétrico brasileiro**. In: V – Congresso Brasileiro de Gestão do Ciclo de Vida, 19-22 de setembro de 2016. Fortaleza – CE, 2016. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/84000934.pdf#page=141>. Acesso em: 27 out. 2023.

DIAS JÚNIOR, A. F. *et al.* Madeira, energia e geração de termoeletricidade. **Energia na Agricultura**, Botucatu/SP, v.32, n. 2, p.157-163, 2017.

DOVICH FILHO, F. B. **Determinação dos potenciais técnico e econômico da geração de eletricidade a partir da biomassa**: Estudo de caso do Estado de Minas Gerais. 272f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Premissas para o Caso Base de Cálculo de Garantia Física para o Leilão de Reserva de Capacidade na forma de Energia de 2022**. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-680/EPE-DEE-IT-055-2022_LRCE_2022.pdf>. Acesso em: 17 de out. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA- EPE. **Balanco energético nacional**: Ano base 2020 / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2021. 292p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA- EPE. **Balanco energético nacional**: Ano base 2021/ Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2022. 264p.

Energia) - Universidade Federal de Itajubá Programa de Pós-graduação em engenharia de energia. 2022.

ENERGY INSTITUTE. **Statistical review of world energy 70th edition**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.energyinst.org/statistical-review>. Acesso em: 30 out 2023.

ENGELBRECHT, L. **O inventário das emissões de gases de efeito estufa de 2016 da Engie Brasil Energia S.A.** SGS ICS Certificadora Ltda. 165p. 2016. Inventário Nacional de GEE subsidia planos do governo na área ambiental — Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (www.gov.br).

ESTEVES, R. F. **Cogeração de energia com biomassa**: Balanço energético para diferentes vazões de vapor. 103f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) - Universidade Federal do Pampa, Bagé 2017.

FERREIRA, O. C. Teor de carbono em combustíveis da biomassa economia. **Economia & Energia**, 2005. Disponível em: http://www.ecen.com/eee57/eee57p/teor_de_carbono_em_combustiveis_da_biomassa.htm. Acesso em: 18 de out. 2023.

FOELKEL, C. **Casca da árvore do eucalipto**: Aspectos morfológicos, fisiológicos, florestais, ecológicos e industriais, visando a produção de celulose e papel. 2010. 109p. Disponível em: <https://www.eucalyptus.com.br/capitulos/capitulo_casca.pdf>. Acesso em: 16 de out. 2023.

FOELKEL, C. **Utilização da biomassa do eucalipto para produção de calor, vapor e eletricidade.** 2016. cap. 43p. 239. Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT43_Florestas_Energeticas_Eucaliptos.pdf Acesso em: 17 de out. 2023.

FRANÇA, L. C. J. **Sistemas de apoio à decisão espacial aplicados ao planejamento florestal.** 125f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, 2022.

FREITAS, T. A. **Produção de mudas de eucalipto em recipiente aberto e fechado.** 90 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2007.

GALRÃO, E. Z. Micronutrientes. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: Correção do solo e adubação.** 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, cap. 8, p.185-226, 2004.

GOLDENBERG, J.; PRADO, L. T. S. **Reforma e crise do setor elétrico no período FHC.** 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ts/a/GYPKGxdcKzPW9tFwjJFgzfb/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 30 de out. 2023.

HEINIMÖ, J.; JUNGINGER, M. Production and trading of biomass for energy - An overview of the global status. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 9, p. 1310-1320, 2009.

HENRIQUE, R. L. P. **Comportamento de *Ralstonia Solanacearum* de eucalipto em solo contendo glifosato.** 34f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP. 2021.

HERRERA, F. F. Ecotechnological solutions to satisfy current demands of forest products, a glance beyond the trees. **Forest Policy and Economics**, v. 94, p. 27-31, 2018.
INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório anual.** 2022. 96p. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf> Acesso 19/11/2022. Acesso em: 16 de out. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **População no último censo.** 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/sao-joao-del-rei/panorama>. Acesso em: 27 out. 2023.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. Bacia hidrográfica do Rio Grande. S.d. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/component/content/150?task=view>. Acesso em: 16 de out. 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE- IPCC. **Guidelines for national greenhouse gas inventories.** 1996. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html/>. Acesso em: 28 out. 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE- IPCC. IPCC. **Guidelines for national greenhouse gas inventories**. 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. Acesso em: 28 out. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. Bioenergy power generation. 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/bioenergy-power-generation>>. Acesso em: 16 de out. 2023.

JABBAR, A. A. *et al.* Sorption and leaching of ¹⁴C- glyphosate in agricultural soils. **Agronomy for Sustainable Development**, Springer Verlag, 2008, v. 28, n. 3, p.419-428, 2018.

LANGER, M. **Avaliação do ciclo de vida de produtos florestais e subsídios para elaboração de índice integrado de sustentabilidade de produtos (IISPRO)**. 576f. Tese (Doutorado em Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias) -Universidade Federal do Paraná -UFPR. 2020.

LEME, M. M. V. *et al.* Electricity generation from pyrolysis gas produced in charcoal manufacture: Technical and economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 194, p. 219-242, 2018.

LINHARES, M. *et al.* Eficiência e desempenho operacional de máquinas Harvester e Forwarder na colheita florestal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia-GO, v. 42, n. 2, p. 212-219, 2012.

LISBÔA, L. A. C. **Utilizando redes de petri coloridas hierárquicas no auxílio à recomposição de subestações**. 387f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba Brasil, 2008.

LOPES, J. L. W. *et al.* Efeitos da irrigação na sobrevivência, transpiração e no teor relative de água na folha em mudas de Eucalyptus grandis em diferentes substratos. **Scientia Forestalis**, n. 68, p. 97-106, 2005.

LOPES, J. S. *et al.* Assessing the economic and environmental performance of cleaner production practices in eucalyptus planted forests using life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 380, Part 2, p. 134757, 2022.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. **Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas Plantadas**. 2018 PlantarFlorestas, Brasília. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/acao-ainformacao/participacao-social/consultaspublicas/documentos/PlanoPlantarFlorestasversoconsultapblicas.pdf>>. Acesso em: 26 de out. 2023.

MIRANDA, M. M. de. **Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida**. 72f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MONTEIRO, M. **Avaliação do ciclo de vida do fertilizante superfosfato simples**. 2008. 177f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) –Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

MONTENEGRO, R. O que são subestações? **Universo Elétrico: Aprendendo e Simplificando a Elétrica**. 02 agosto de 2016. Disponível em: <<https://universoeletrico.wordpress.com/2016/08/02/o-que-sao-subestacoes/>> Acesso

MORALES, M. *et al.* Cradle-to-gate life cycle assessment of Eucalyptus globulus short rotation plantations in Chile. **Journal of Cleaner Production**, v. 99, n. 239-249, 2015.

MOREIRA, J. M. M. A. P.; SIMIONI, F. J.; BUSCHINELLI, C. C. de. A. A viabilização econômica da cultura do eucalipto. *In*: OLIVEIRA, E. B. de.; PINTO JUNIOR, J. E. (Ed.). **O eucalipto e a Embrapa: Quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**. Brasília, DF: Embrapa, cap. 25. p. 907-939, 2021.

MÜLLER, M. D. Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba, MG. 109f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) Viçosa: UFV, 2005.

NASCIMENTO, A. C. *et al.* Avaliação técnica e econômica da colheita florestal com Feller-Buncher. **Cerne**, Lavras, v.17, n. 1, p. 9-15, 2011.

NASCIMENTO, P. Y. **Sustentabilidade e desenvolvimento da usina hidrelétrica em Furnas**: Estudo de caso Cota 762. 55f. Trabalho de conclusão (Graduação em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha 2021.

NEIVA, P. S.; FURTADO, D. B.; FINZER, J. R. D. Capacidade térmica e poder calorífico de biomassa eucalipto. *In*: II ENCONTRO DE DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AGROINDUSTRIAIS, 2018, Uberaba. **Anais...** do II Encontro De Desenvolvimento De Processos Agroindustriais. Uberaba: Uniube, p. 1-8, 2018.

NEMECEK, T.; KAGI, T. **Life cycle inventories of agricultural production systems**. Ecoinvent Report No. 15. Zurich e Dubendorf: 2007.

PEREIRA, T. J. P. **Life cycle assessment of electricity generation in a coal fired power plant converted to forest biomass**. 82f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente) Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra julho 2019.

POHLMANN, J. G. *et al.* Combustion of eucalyptus charcoals and coals of similar volatile yields aiming at blast furnace injection in a CO₂ mitigation environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, Pages 1-11, 2016.

RIBEIRO, G. B. D. **Análise técnica e econômica da produção de energia termelétrica a partir da biomassa florestal**. 2018. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2018.

RIBEIRO, P. H. **Contribuição ao banco de dados brasileiro para apoio à avaliação do ciclo de vida: fertilizantes nitrogenados.** 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SANTAROSA, E.; JÚNIOR, J. F. P.; GOULART, I. C. G. R. **Transferência de tecnologia florestal: Cultivo de eucalipto em propriedades rurais: Diversificação da produção e renda.** Brasília, DF: Embrapa, 2014. 138p.

SANTOS, R. M. dos.; RODRIGUES, M. S. de.; CARNIELLO, M. F. Energia e Sustentabilidade: Panorama da Matriz Energética Brasileira. **Scientia: Revista Científica Multidisciplinar**, Bahia, v. 6, n. 1, p. 13-33, 2021.

SARAIVA, A. B. *et al.* Provision of pulpwood and short rotation eucalyptus in Bahia, Brazil – Environmental impacts based on lifecycle assessment methodology. **Biomass and Bioenergy**, v. 105, p. 41-50, 2017.

SILVA, D. A. *et al.* Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 35, n. 84, p. 481-485, 2015.

SILVA, F. T. M.; ATAÍDE, C. H. Valorization of eucalyptus *urograndis* wood via carbonization: Product yields and characterization. **Energy**, v. 172, p. 509-516, 2019.

SILVA, M. J. da. *et al.* Motor gerador ciclo diesel sob cinco proporções de biodiesel com óleo diesel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 3, p. 320-326, 2012.

SILVA, S. A. **Avaliação dos impactos ambientais da produção de carvão vegetal: Um estudo de caso.** 155f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Itajubá Programa de Pós-graduação em engenharia de energia. 2022.

SILVEIRA, J. H. *et al.* Caracterização da biomassa residual da colheita de *Eucalyptus saligna* para processos de conversão térmica. Cap. I. – Livro Recursos Naturais: Energia de Biomassa Florestal - Volume 2 2021. DOI:

SIMAPRO. **LCA software for informed changemakers.** 2023. Disponível em: <https://simapro.com/>. Acesso em: 18 de out. 2023.

SIMIONI, F. J. *et al.* Cadeia produtiva de energia de biomassa florestal: O caso da lenha de eucalipto no polo produtivo de Itapeva - SP. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 310-323, 2018.

SOUZA, A. K. R.; MORASSUTI, C. Y.; DEUS, W. B. Poluição do ambiente por metais pesados e utilização de vegetais como bioindicadores. **Acta Biomedica Brasiliensia**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 3, p. 95-106, 2018.

THE GLOBAL DEVELOPMENT RESEARCH CENTER - GDRC. **Defining life cycle assessment**. [s.d.]. Disponível em: <http://www.gdrc.org/uem/lca/lca-define.html>. Acesso em: 16 de out. 2023.

TIMKO, J. *et al.* A policy nexus approach to forests and the SDGs: Tradeoffs and synergies. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 34, p. 7-12, 2018.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia termelétrica**: Gás natural, biomassa, carvão, nuclear. EPE: Rio de Janeiro, 2016. 417p.

TULLIO, J. A. *et al.* Cultivo de beterraba em ambientes protegido e natural na época de verão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 10, p. 1074-1079, 2013.

TURCONI, R.; BOLDRIN, A.; ASTRUP, T. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 555-565, 2013.

VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C.; PEREIRA, B. L. Qualidade da madeira para fins energéticos. *In*: SANTOS, F. (Ed.). **Bioenergia e biorrefinaria**: Cana de açúcar e espécies florestais. Viçosa: Editora da UFV, p. 322-354, 2013.

WORD BIOENERGY ASSOCIATION - WBA. **Biogas**: Pathways to 2030 - Report. 2021. Disponível em: <https://www.worldbiogasassociation.org/biogas-pathways-to-2030-report/>. Acesso em: 28 out. 2023.

WORD BIOENERGY ASSOCIATION - WBA. **Global bioenergy statistics 2020**: World bioenergy association. 2020. Disponível em: <https://www.worldbioenergy.org/uploads/201210%20WBA%20GBS%202020.pdf>. Acesso em: 28 out. 2023.

WRI BRASIL. **GHG Protocol**: O padrão global para que empresas e organizações mensurem e gerenciem emissões de gases de efeito estufa. S.d. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/projetos/ghg-protoc>>. Acesso em: 17 de out. 2023.

WWF BRASIL. **Demanda por madeira deve triplicar até 2050**. 2013. Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/?33562/Demanda-por-madeira-deve-triplicar-at-2050>>. Acesso em: 17 de out. 2023.

ZHANG, S.; GILLESS, J. K.; STEWART, W. Modeling price-driven interactions between wood bioenergy and global wood product markets. **Biomass and Bioenergy**, v. 60, p. 68-78, 2014.