



Universidade Federal do Rio de Janeiro

Escola Politécnica e Escola de Química

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

Rafael de Freitas Moura

PRODUÇÃO DE DIESEL VERDE APROVEITANDO INSUMOS GERADOS A
PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS E EFLUENTES URBANOS: Uma Avaliação
Ambiental do Ciclo de Vida

Rio de Janeiro

2024



Rafael de Freitas Moura

PRODUÇÃO DE DIESEL VERDE APROVEITANDO INSUMOS GERADOS A
PARTIR DE RESÍDUOS E EFLUENTES URBANOS: Uma Avaliação Ambiental do
Ciclo de Vida

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Bettina Susanne Hoffmann

Co-orientadora: Yordanka Reyes Cruz

Rio de Janeiro

2024

Ficha catalográfica

CIP - Catalogação na Publicação

M929p Moura, Rafael de Freitas
PRODUÇÃO DE DIESEL VERDE APROVEITANDO INSUMOS
GERADOS A PARTIR DE RESÍDUOS E EFLUENTES URBANOS:
Uma Avaliação Ambiental do Ciclo de Vida / Rafael de
Freitas Moura. -- Rio de Janeiro, 2024.
157 f.

Orientadora: Bettina Susanne Hoffmann.
Coorientadora: Yordanka Reyes Cruz.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Escola de
Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Ambiental, 2024.

1. Avaliação do Ciclo de Vida. 2. Diesel Verde.
3. Gaseificação. 4. Resíduos Sólidos Urbanos. 5.
Tratamento de Esgoto Doméstico. I. Hoffmann,
Bettina Susanne, orient. II. Cruz, Yordanka Reyes,
coorient. III. Título.

PRODUÇÃO DE DIESEL VERDE APROVEITANDO INSUMOS GERADOS A
PARTIR DE RESÍDUOS E EFLUENTES URBANOS: Uma Avaliação Ambiental do
Ciclo de Vida


Rafael de Freitas Moura

Orientadora: D.Sc Bettina Susanne Hoffmann

Co-orientadora: D.Sc Yordanka Reyes Cruz


Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela Banca:

Documento assinado digitalmente
 **ELEN BEATRIZ ACORDI VASQUES PACHECO**
Data: 05/03/2024 16:19:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco, DSc, UFRJ

Prof. Fabio de Almeida Oroski, DSc, UFRJ

Documento assinado digitalmente
 **LEONARDO BRANTES BACELLAR MENDES**
Data: 06/03/2024 07:55:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Leonardo Brantes Bacellar Mendes, DSc, Petrobras

Rio de Janeiro

2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, aos Orixás, aos Guias e à TUCZ pelo acolhimento, pela força, pela potência, pela serenidade, pela sabedoria e conselhos dados para que eu pudesse chegar até aqui.

Posteriormente, agradeço aos familiares que me ajudaram nessa caminhada e que principalmente entenderam à minha ausência em alguns momentos.

Agradeço, de forma grandiosa às minhas orientadoras, Professora Susanne Hoffmann e Professora Yordanka Cruz, que foram mais que Professoras nesse período de convivência do mestrado. Pude ouvir delas em diversas oportunidades uma avaliação sobre o meu desempenho acadêmico e isso é fundamental para que eu também pudesse realizar uma autoavaliação. Gratidão pelos ensinamentos e confiança que foram fundamentais para desenvolver a pesquisa e que também irão me acompanhar em minha trajetória profissional.

Agradeço ao Centro de Atividades Comunitárias – CAC e a Rede Ecológica Rio, por compreender o meu processo e minhas ausências em reuniões. Agradeço aos amigos, Adriana, Lúcia, Jussara, Késia, Jussara, Edinalva, Dona Vera, Dona Sandra, Juan, Jamile, Seu Cláudio, Milca, Bibi, Sol, Bete, Miriam, Ítalo, Bia, Letícia, Érika, Sérgio, Flora, Marcelo, Suh, Mariana, Mari e demais.

Agradeço ao apoio da DIASE-UFRJ e toda a sua equipe pelo cuidado com a saúde mental dos estudantes da UFRJ.

Agradeço ao Clube da Escrita do CT pelos ensinamentos das oficinas de escrita acadêmica, pois pude aprender e fazer a gestão do processo da escrita de forma mais organizada e harmônica.

Agradeço ao PRH 17, na figura da Elisa, George, Ofélia, Lídia, Kárida, ao PEA/EQ/Poli, na figura da Professora Ana Lúcia, Andreia e demais Professores que tive a oportunidade de aprender. Agradeço aos funcionários dos serviços gerais da UFRJ.

Agradeço, aos amigos e amigas pela compreensão em relação aos momentos que estive ausente, pelas faltas nos sambas da vida e das cervejas em bares de procedência duvidosa (risos...).

EPÍGRAFE

“O importante não é ser o primeiro ou primeira, o importante é abrir caminhos.” **Conceição Evaristo.**

“O que se aprende no caminho importa mais do que a chegada.” **Djonga.**

RESUMO

MOURA, Rafael de Freitas. **Produção de diesel verde aproveitando insumos gerados a partir de resíduos e efluentes urbanos: Uma Avaliação Ambiental do Ciclo de Vida.** Rio de Janeiro, 2024. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

O conflito entre a Rússia e a Ucrânia afetou diretamente os preços do petróleo e do gás, reacendendo o debate sobre a política de segurança energética e a transição energética. Em paralelo, os efeitos das mudanças climáticas causadas pelas emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE), oriundos também da queima de combustíveis fósseis impulsiona a construção de uma economia de baixo carbono. Em 2021, o setor de transporte no Brasil foi responsável por 32,0% do consumo final de energia, sendo esse segmento um dos principais causadores de emissões de GEE no Brasil. A eficiência energética torna-se um mecanismo fundamental para a redução das emissões de GEE e diminuição da dependência de combustíveis fósseis, colaborando assim para um melhor desempenho da matriz energética do Brasil. Uma alternativa à utilização dos combustíveis fósseis é a produção de biocombustíveis gerados a partir de fontes renováveis, como por exemplo, a biomassa de microalgas para a produção de diesel verde. O objetivo do estudo foi calcular os potenciais impactos ambientais oriundos da produção de diesel verde produzido via rota de hidrotreamento de óleo de microalgas, partindo de resíduos sólidos urbanos, para a produção de hidrogênio e efluentes domésticos para o cultivo de microalgas. Após o dimensionamento da biorrefinaria, os dados de insumos e resíduos alimentaram o programa OpenLCA com o auxílio da base de dados Ecoinvent e para a realização dos cálculos foi utilizada a metodologia Recipe Midpoint (H). A análise dos potenciais impactos ambientais dos processos da proposta da biorrefinaria aponta que o uso dos solventes hexano e acetato de etila são os principais responsáveis pelos impactos ambientais modelados. Dentre as categorias de impacto em que os solventes mais impactam estão a formação de material particulado fino (75,57%), escassez de recurso fóssil (95,85%), eutrofização de água doce (48,27%), aquecimento global (88,98%), toxicidade humana carcinogênica (70,99%), radiação ionizante (78,92%), uso da terra (67,45%), eutrofização marinha (53,57%), formação de ozônio com danos ao ecossistema terrestre (86,73%), depleção do ozônio estratosférico (86,26%), acidificação terrestre (75,32%) e consumo de água (65,80%). Recomenda-se utilizar outros solventes para a extração do óleo da biomassa de microalgas, bem como buscar outras tecnologias mais eficientes de recuperação dos solventes, uma vez que a perda de 4% é significativa e se reflete nos impactos ambientais.

Palavra-chave: Avaliação do Ciclo de Vida, Diesel Verde, Gaseificação, Resíduos Sólidos Urbanos, Tratamento de Esgoto Doméstico

ABSTRACT

MOURA, Rafael de Freitas. **Production of green diesel using inputs generated from municipal solid waste and urban effluents: An Environmental Life Cycle Assessment.** Rio de Janeiro, 2024. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The conflict between Russia and Ukraine has directly affected oil and gas prices, reigniting the debate on energy security policy and the energy transition. In parallel, the effects of climate change caused by anthropogenic emissions of greenhouse gases (GHG), also arising from the burning of fossil fuels, drive the construction of a low-carbon economy. In 2021, the transport sector in Brazil was responsible for 32.0% of final energy consumption, with this segment being one of the main causes of GHG emissions in Brazil. Energy efficiency becomes a fundamental mechanism for reducing GHG emissions and reducing dependence on fossil fuels, thus contributing to the better performance of Brazil's energy matrix. An alternative to the use of fossil fuels is the production of biofuels generated from renewable sources, such as microalgal biomass, to produce green diesel. The objective of the study was to calculate the potential environmental impacts arising from the production of green diesel produced via the microalgae oil hydrotreatment route, starting from urban solid waste to produce hydrogen and domestic effluents for the cultivation of microalgae. The objective of the study was to calculate the potential environmental impacts arising from the production of green diesel produced via the microalgae oil hydrotreatment route, starting from urban solid waste, to produce hydrogen and domestic effluents for the cultivation of microalgae. After sizing the biorefinery, the input and waste data were fed into the OpenLCA program with the help of the Ecoinvent database, and the Recipe Midpoint (H) methodology was used to carry out the calculations. The analysis of the potential environmental impacts of the proposed biorefinery processes indicates that the use of the solvents hexane and ethyl acetate is mainly responsible for the modeled environmental impacts. Among the impact categories in which solvents have the greatest impact are the formation of fine particulate matter (75.57%), scarcity of fossil resources (95.85%), eutrophication of fresh water (48.27%), global warming (88.98%), carcinogenic human toxicity (70.99%), ionizing radiation (78.92%), land use (67.45%), marine eutrophication (53.57%), ozone formation with damage to the terrestrial ecosystem (86.73%), stratospheric ozone depletion (86.26%), terrestrial acidification (75.32%), and water consumption (65.80%). It is recommended to use other solvents to extract oil from microalgae biomass, as well as seeking other more efficient solvent recovery technologies, since the 4% loss is significant and is reflected in environmental impacts.

Keywords: Life Cycle Assessment, Green Diesel, Gasification, Municipal Solid Waste, Wastewater Treatment

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	15
1.2	RELEVÂNCIA DO TEMA/JUSTIFICATIVA.....	17
2	OBJETIVOS.....	19
2.1	OBJETIVO GERAL.....	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	REFERENCIAL TEÓRICO	20
3.1	BIORREFINARIA	20
3.2	DIESEL VERDE.....	21
3.3	PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO PARA ALIMENTAÇÃO DA ROTA HEFA	25
3.4	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS COMO MATÉRIA-PRIMA PARA A GASEIFICAÇÃO E OCORRÊNCIA EM TERRITÓRIO NACIONAL	29
3.4.1	Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos	31
3.4.2	Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil	33
3.4.3	Tecnologia de produção de combustível derivado de resíduos (CDR)	34
3.4.4	Linha de produção do CDR.....	35
3.5	PRODUÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE.....	39
3.5.1	Reatores termoquímicos.....	43
3.5.2	Reação Water-Gas Shift	46
3.5.3	Remoção de gases ácidos - Processo Selexol	47
3.6	MICROALGAS	48
3.6.1	Utilização de microalgas para o tratamento de esgoto.....	48
3.6.2	Sistemas de cultivo	50
3.6.3	Colheita	56
3.6.4	Sedimentação	58
3.6.5	Centrifugação.....	59
3.6.6	Floculação e coagulação química.....	59
3.6.7	Autofloculação e biofloculação.....	60
3.6.8	Filtração.....	60
3.6.9	Flotação.....	61
3.6.10	Rompimento e extração	61

4	METODOLOGIA.....	67
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
6	CONCLUSÃO.....	93
	REFERÊNCIAS.....	96
	APÊNDICE.....	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Estrutura da biorrefinaria na bioeconomia circular	20
Figura 2 Diferença entre biodiesel e diesel verde.....	21
Figura 3 Rotas de obtenção de biocombustíveis drop-in utilizando diferentes matérias-primas.....	22
Figura 4 Fluxograma do processo HEFA.	23
Figura 5 Geração de RSU no Brasil e regiões - comparativo dos anos de 2021 e 2021	30
Figura 6 Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil (t/ano e %) - comparativo 2021 e 2022.....	31
Figura 7 Composição gravimétrica dos RSU em território nacional.....	32
Figura 8 Layout da unidade de pré-tratamento dos RSU	37
Figura 9 Processos de gaseificação direta e indireta.....	40
Figura 10 Aplicações do gás de síntese	42
Figura 11 Layout de gaseificadores de leito fixo. a) contracorrente e b) co-corrente.....	43
Figura 12 Gaseificadores de leito fluidizado. a) borbulhante e b) circulante	45
Figura 13 Tecnologias de remoção de gases ácidos.....	48
Figura 14 Classificação dos sistemas de cultivo de microalgas	51
Figura 15 Esquema de um sistema Raceway e suas estruturas principais.....	52
Figura 16 Tipos de fotobiorreatores tubulares: (A) fotobiorreator tubular horizontal, (B) reator de painel plano e (C) reator fermentador.....	54
Figura 17 Representação esquemática dos fotobiorreatores tubulares: horizontal com distribuição vertical (A1), horizontal com distribuição horizontal (A2), inclinado (A3) e helicoidal (A4)	55
Figura 18 Diagrama dos métodos de adensamento e desidratação da biomassa.....	57
Figura 19 Morfologia da membrana celular das espécies Spirulina, Scenedesmus, Nannochloropsis e Chlorella	62
Figura 20 Diagrama caixa da proposta de biorrefinaria	77
Figura 21 Resultados das categorias de impacto de formação de material particulado fino e escassez de recurso fóssil	79
Figura 22 Resultados das categorias de impacto de ecotoxicidade de água doce e eutrofização de água doce.....	80
Figura 23 Resultados das categorias de impacto de aquecimento global e toxicidade humana carcinogênica.	81
Figura 24 Resultados das categorias de impacto de toxicidade humana não-carcinogênica e radiação ionizante.	82
Figura 25 Resultados das categorias de impacto de uso da terra e ecotoxicidade marinha.	83
Figura 26 Resultados das categorias de impacto de eutrofização marinha e escassez de recurso mineral.	84
Figura 27 Resultados das categorias de impacto de formação de O ₃ com efeitos na saúde humana e no ecossistema terrestre.	85
Figura 28 Resultados das categorias de impacto de depleção do O ₃ estratosférico e acidificação terrestre.....	86
Figura 29 Resultados das categorias de impacto de ecotoxicidade terrestre e consumo de água.....	87
Figura 39 Modelagem utilizando a metodologia Recipe Midpoint (H) para os grupos HDO, Microalgas e Gaseificação.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Características do RSU e CDR.....	38
Tabela 2 Reações envolvidas no processo de gaseificação	41
Tabela 3 Eficiência de remoção de compostos do efluente por sistemas de cultivo de microalgas	53
Tabela 4 Dados de entrada e saída utilizados no software OpenLCA.....	72
Tabela 5 Resumo dos resultados dos impactos ambientais.....	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Categorização do hidrogênio por cor, processo produtivo e respectivas definições	26
Quadro 2 Linha de produção do Combustível Derivado de Resíduos CDR.....	35
Quadro 3 Tipos de agentes gaseificadores - vantagens e desvantagens.....	40
Quadro 4 Tipos de cultivo de microalgas - vantagens e desvantagens	56
Quadro 5 Métodos de colheita de microalgas	58
Quadro 6 Técnicas de ruptura celular - vantagens e desvantagens das tecnologias disponíveis.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AICV – Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Biocombustível e Gás Natural

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

CCUS – *Carbon Capture, Utilisation and Storage* = Captura, utilização e estocagem de carbono

HEFA - *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ODM - Objetivos de Desenvolvimento do Milênio

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

HVO – *Hydrotreated vegetable oil*

RSU - Resíduo Sólido Urbano

CDR – Combustível Derivado de Resíduo

RENOVABIO – Política Nacional de Biocombustíveis

GEE – Gases de efeito estufa

LTS – *Low Temperature Shift*

HTS – *High Temperature Shift*

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

No ano 2000, as Nações Unidas criaram os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), constituídos de 8 objetivos internacionais para serem alcançados até 2015. Com o avanço dos objetivos e consequente avaliação dos resultados obtidos ao longo desses 15 anos, em setembro de 2015, uma nova meta entrou em vigor, agora com 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas integradas por políticas ambientais, sociais, econômicas e humanitárias, para serem atingidos até 2030. Dentre esses objetivos, dois indicam a necessidade do desenvolvimento de combustíveis alternativos e limpos, o ODS 7 – energia limpa e acessível e o ODS 13 - ação contra a mudança global do clima.

Em relação ao ODS 13, seu objetivo é a adoção de medidas para combater a mudança do clima e seus impactos através de cinco metas: (1) reforçar a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos associados ao clima e catástrofes naturais; (2) integrar medidas de mudança do clima nas políticas, estratégias e planos nacionais; (3) melhorar a educação, a conscientização, a capacidade humana e institucional para mitigar os efeitos climáticos mediante adaptação, redução de impacto e alerta à mudança do clima; (4) investimento no Fundo Verde para o Clima, como forma de auxiliar os países em desenvolvimento para a tomada de ações de mitigação e operacionalização contra à mudança do clima; e (5) promoção de mecanismos de planejamento referente à mudança do clima e à gestão eficaz nos países menos desenvolvidos (ONU, 2017).

A crescente preocupação mundial com as questões ambientais, dependência externa de produtos derivados do petróleo e as tensões geopolíticas existentes entre as regiões produtoras de petróleo fazem aumentar o interesse em substituir os combustíveis fósseis por combustíveis renováveis. Devido às suas condições de solo e clima, o Brasil tem um grande potencial para produzir biomassa e como consequência, essa condição representa uma grande vantagem em comparação aos demais países. O aumento da produção de combustíveis a partir de fontes renováveis é a alternativa com maior viabilidade no curto e médio prazo e esse fator coloca luz sobre o efeito dessa transição energética no que diz respeito a sustentabilidade desse novo modelo (MELO, 2018).

Nesse sentido, o diesel verde vem sendo estudado como potencial substituto ao diesel fóssil, pois este biocombustível é composto de hidrocarbonetos parafínicos tal qual o seu correspondente fóssil e diferente do biodiesel que é composto por uma mistura de ésteres metílicos de ácidos graxos. Os combustíveis renováveis que são compatíveis com os fósseis são chamados de *drop-in* e possuem grande interesse da indústria pela possibilidade de uso diretamente na infraestrutura atual. Atualmente, o diesel verde é produzido principalmente pelo hidrotreamento de óleo vegetais (*hydrotreated vegetable oil* – HVO, do termo em inglês), com uma ampla gama de matérias-primas e uso de gás hidrogênio no processo de conversão desses óleos em hidrocarbonetos parafínicos (BARROS et al., 2021).

No Brasil, como país em desenvolvimento, diversos outros ODS possuem também grande relevância, considerando que a situação atual ainda se encontra longe de uma situação ideal. Assim, o ODS 6 – Saneamento e Água Potável, possui uma relevância considerável no contexto regional, visto que, somente cerca de 55% da população tem seu esgoto coletado, e somente 50,8% das águas residuais são tratadas (SNIS, 2020). Outro pilar do saneamento ainda precário no Brasil é a gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU), onde 60% dos resíduos totais do país são destinados de forma adequada, ou seja, enviados para os aterros sanitários e a fração restante é destinada em lixões, o que configura uma destinação inadequada e consequentemente impactos ambientais e sociais de alta magnitude (ABRELPE, 2021).

Diante da problemática da destinação inadequada dos RSU e da coleta e tratamento das águas residuais urbanas, urge a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias que possam minimizar os impactos ambientais desses pilares do saneamento. O aproveitamento energético desses resíduos poderia valorizar esses resíduos e, portanto, facilitar a viabilização do seu tratamento. Duas formas de aproveitamento de resíduos e efluentes seriam a produção de biomassa de microalgas, cultivadas em efluente urbano e a produção de hidrogênio a partir da pirólise ou gasificação de RSU.

Esses dois produtos intermediários podem, em seguida, ser utilizados para a produção de diesel verde através da hidrogenação dos óleos recuperados das microalgas. Vale notar que um grande benefício das microalgas é o fato de ser considerada uma matéria-prima promissora para a produção de biocombustíveis, especialmente porque não gera uma competição direta com a produção de alimentos

(SHUBA; KIFLE, 2018b; SINGH; BAUDDH; BUX, 2015). Este estudo tem como objetivo estudar os impactos ambientais da rota da produção de diesel verde a partir das matérias supracitadas numa perspectiva de ciclo de vida e discutir as principais vantagens e desvantagens desse tipo de combinação tecnológica numa biorrefinaria.

1.2 RELEVÂNCIA DO TEMA/JUSTIFICATIVA

Desde o século XVIII, período marcado pela revolução industrial, em qual, como sociedade, estabelecemos um novo modelo de desenvolvimento econômico, a temperatura média da Terra tem aumentado de forma significativa devido, em especial, à queima de combustíveis fósseis (IPCC, 2007; IEA, 2021; EPA, 2020). Entre 1750 e 2021, os principais gases que contribuem para o aumento do efeito estufa sofreram um acréscimo em suas concentrações na atmosfera, o CO₂ de 47%, o metano (CH₄) de 156% e o óxido nitroso (N₂O) de 23% (PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA - IPCC, 2021).

Uma alternativa à utilização dos combustíveis fósseis é a produção de biocombustíveis gerados a partir de fontes renováveis, por exemplo, biomassa de microalgas. As microalgas produzem lipídios, substância rica em energia que favorece a produção de biocombustíveis (diesel verde, biodiesel, bioquerosene, biogás) (SOARES; MARTINS; GONÇALVES, 2019a), especialmente porque não gera uma competição direta com a produção de alimentos (SHUBA; KIFLE, 2018b; SINGH; BAUDDH; BUX, 2015).

Atualmente, as políticas de baixo carbono tem motivado claramente o uso de matérias-primas residuais para a produção de biocombustíveis (CAPAZ et al., 2021). Nesse sentido, a Resolução ANP nº 842, de 14 de maio de 2021, estabelece especificações para a comercialização do diesel verde em território nacional. A proposta da Agência Nacional do Petróleo (ANP) está em conformidade com Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituída pela Lei 13.576 de 2017. Entre seus objetivos, estão a contribuição para o cumprimento dos compromissos assumidos pelo país no Acordo de Paris e a promoção da ampliação dos biocombustíveis na matriz energética, mantendo o foco no seu abastecimento de forma regular. Além disso, o programa também visa garantir previsibilidade para o mercado de combustíveis, provocando ganhos de eficiência energética e de redução de emissões de GEE na cadeia de suprimentos dos biocombustíveis (ANP, 2021).

O presente estudo caminha em consonância com atuais tendências de pesquisa do setor de biocombustíveis, principalmente, no que tange à produção do Diesel Verde a partir de microalgas. Como forma de contribuir no âmbito social e científico, a pesquisa é direcionada a investigar os impactos ambientais na cadeia produtiva do diesel verde através da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

No campo social, os resultados poderão demonstrar quais serão os potenciais impactos ambientais em que a população do entorno estará exposta e quais serão os benefícios ambientais do emprego da biorrefinaria. Como forma de contribuição acadêmica, os resultados obtidos poderão servir como fonte de consulta para estudos futuros, pois serão levantados dados primários e secundários dos processos, sendo assim, servirão de contraponto à carência de um banco de dados nacional robusto.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo sugerir uma biorrefinaria para produção de 100.000 toneladas/ano de diesel verde identificar os potenciais impactos ambientais da rota proposta.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Dimensionar a quantidade de insumos, resíduos e produtos gerados pela biorrefinaria através de dados secundários da literatura.
- Realizar o inventário do uso de insumos, resíduos e produtos gerados pela biorrefinaria.
- Identificar as rotas de obtenção de diesel verde e coprodutos.
- Modelar e analisar os impactos ambientais da biorrefinaria.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

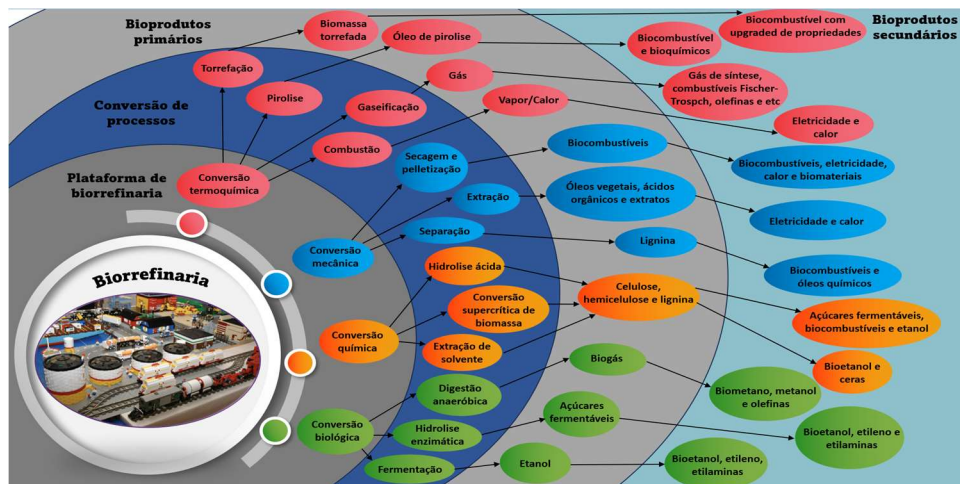
3.1 BIORREFINARIA

De acordo com Souza (2022), uma definição para biorrefinaria pode ser entendida com uma instalação que integra processos de conversão com o objetivo de aproveitar de forma total os resíduos de biomassa para a produção de biocombustíveis, insumos químicos, materiais e energia. O processamento dos resíduos pode gerar outros co-produtos mais sustentáveis, como exemplos de processos de uma biorrefinaria, é possível citar os métodos termoquímicos de combustão, pirólise e gaseificação.

A combinação de processos e tecnologias que irão converter a biomassa em produtos de valor agregado, gerando uma quantidade pequena de resíduos e ao mesmo tempo reduzindo os impactos ambientais e contribuindo para o desenvolvimento sustentável da indústria, é uma outra definição abordada por Forte (2022).

A biorrefinaria possui um papel importante e eficaz para o desenvolvimento da economia circular, pois transforma os resíduos em bioprodutos, como por exemplo rações, combustíveis e energia, o que torna os bioprodutos com alto valor agregado (ROMERO, 2022). Mas recentemente, o uso o conceito de biorrefinaria deu suporte a criação de um novo termo que é a bioeconomia circular, que tem como base os conceitos da economia circular, porém, utiliza a matéria-prima de biomassa. A Figura 1 apresenta rotas tecnológicas possíveis para uma biorrefinaria.

Figura 1 Estrutura da biorrefinaria na bioeconomia circular

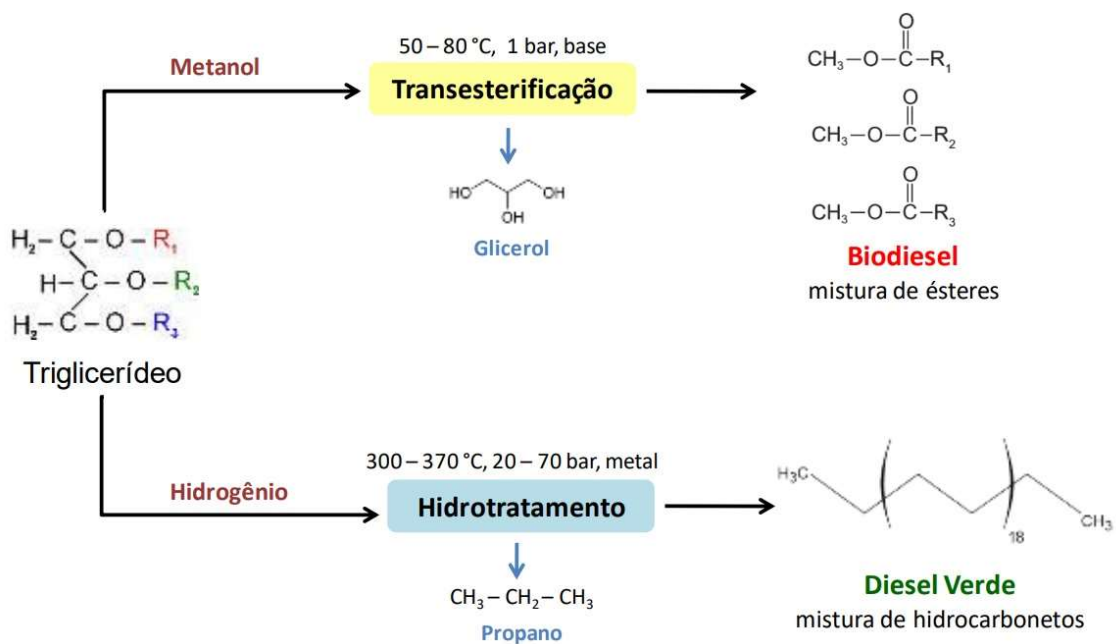


Fonte: Autor, 2024.

3.2 DIESEL VERDE

Uma alternativa ao uso de combustíveis fósseis é a utilização de combustíveis renováveis podendo ser produzidos a partir de óleos vegetais. Nesse contexto, o uso do óleo diesel possui opções compatíveis de serem usadas como substitutas ou complementares, como por exemplo o biodiesel e o diesel verde ou diesel renovável. O biodiesel é um éster monoalquílico produzido via transesterificação, enquanto o diesel verde é produzido por hidrotreatamento de óleos vegetais para formar uma mistura de hidrocarbonetos parafínicos de cadeia linear, quimicamente semelhante ao diesel fóssil e com uma cadeia de carbono ramificada entre C15 e C18 (CAVALCANTI, 2022). A diferença entre esses biocombustíveis é apresentada na Figura 2.

Figura 2 Diferença entre biodiesel e diesel verde.

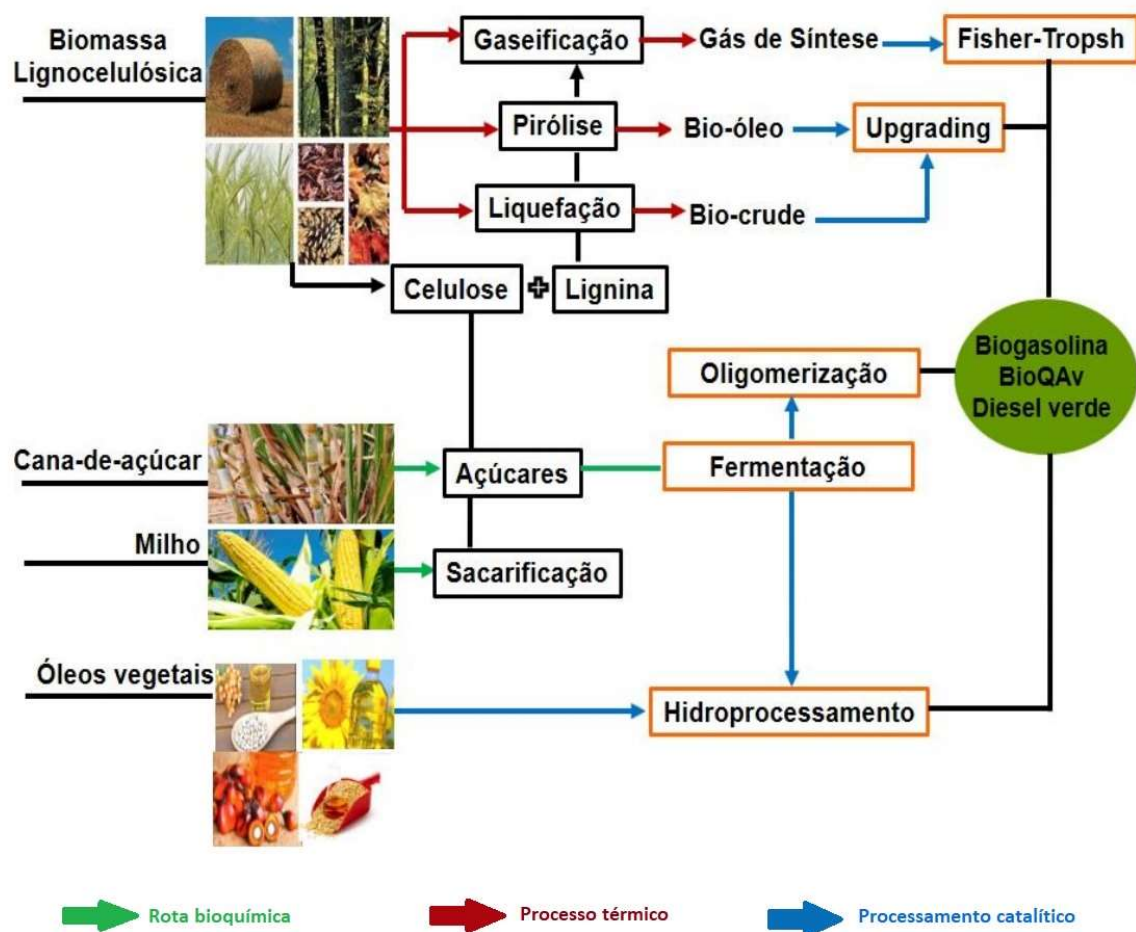


Fonte: CAVALCANTI, 2022.

O diesel verde pode ser adicionado em qualquer quantidade, ou até mesmo utilizado puro, sem nenhum prejuízo aos motores de ciclo diesel. Esse combustível é caracterizado como sendo *drop-in*, ou seja, pode ser utilizado nos veículos atuais sem qualquer adaptação tecnológica. Já para o biodiesel, no Brasil, existem restrições quanto à adição desse combustível no diesel, o limite estabelecido é de 10% para o ano de 2022, essa condição visa proteger o motor da formação de borra, resina ou umidade (BNDES, 2022).

Para a produção de combustíveis *drop-in* podem ser consideradas várias fontes de matérias-primas, como por exemplo de biomassa, através dos lipídios – óleos vegetais, algas, gorduras animais e graxas – e de material lignocelulósico – resíduos de culturas, biomassa lenhosa e cultura energéticas dedicadas. Entre as tecnologias amplamente estudadas que incluem a combinação de diferentes processos, as rotas mais promissoras são apresentadas na Figura 3 (SCALDAFERRI, 2019).

Figura 3 Rotas de obtenção de biocombustíveis drop-in utilizando diferentes matérias-primas.



Fonte: Adaptado de Scaldaferrri, 2019.

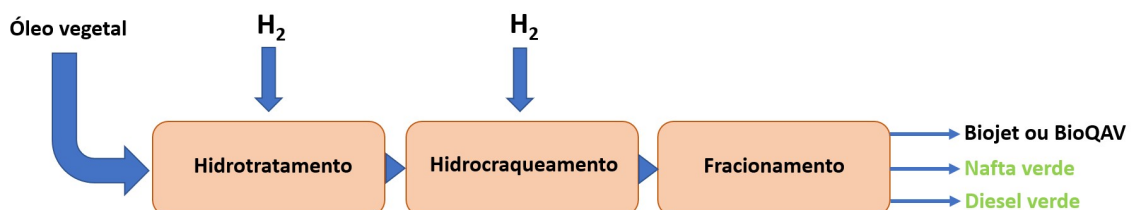
O processo mais comum para a produção de diesel verde é hidrotreatamento de óleo vegetal ou gordura vegetal, conhecido de forma ampla como processo HEFA (HEFA – *Hydro-processed Esters and Fatty Acids*), já contemplado pela Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), além dos processos *Fischer-Tropsch*, dos processos fermentativos ou ainda, a partir da oligomerização de álcoois, em que ao

final do processo resultarão também no diesel verde (CAVALCANTI, 2022; EPE, 2020).

A tecnologia HEFA possui semelhança com o hidrotreamento utilizado nas refinarias de petróleo e a infraestrutura necessária para realizar o processo pode ser construída com esse objetivo, ou ainda, pode ser realizado nas unidades já existentes na planta, durante ou após o refino do petróleo. O hidrotreamento de ésteres e ácidos graxos envolve, principalmente, reações de desoxigenação dos triglicerídeos, em condições de pressão de hidrogênio entre 10 e 300 bar, de temperatura entre 250 e 450°C, além do tipo e configuração do reator e do catalisador utilizado (SCALDAFERRI, 2019).

A Figura 4 apresenta o fluxograma do processo HEFA. Esse processo é dividido em 3 etapas: hidrotreamento (HDT), hidrocraqueamento e fracionamento. Na etapa de hidrotreamento são adicionados o hidrogênio, a matéria-prima e um catalisador no reator, o catalisador remove o oxigênio e converte as moléculas de triglicerídeos em hidrocarbonetos parafínicos. No hidrotreamento, ocorrem três reações principais, sendo elas: a hidrodessoxigenação (HDO), a descarbonilação (DCN) e, a descarboxilação (DCX), essas reações têm como objetivo remover o oxigênio, o monóxido de carbono e água e o dióxido de carbono, respectivamente (SONTHALIA; KUMAR, 2019).

Figura 4 Fluxograma do processo HEFA.



Fonte: Adaptado de Monteiro et al., 2022.

No processo HEFA, comumente são realizadas diversas reações catalíticas além da desoxigenação, como por exemplo o craqueamento, alquilação, hidrogenação, oligomerização dentre outros, todos esses processos são denominados de processos de *upgrading*, reações de melhoramento

(SCALDAFERRI, 2019). Normalmente, no processamento de frações derivadas do petróleo verifica-se um menor interesse pelas reações de HDO em comparação às demais reações de HDT, em virtude da baixa concentração de compostos oxigenados com até 2%. No entanto, as frações de asfaltenos e resinas – mais densas – chegam a conter 8% de compostos oxigenados, o que torna a HDO uma opção para o processamento (SOUZA, 2009).

O hidrotreamento (HDT) é um processo usado pelas refinarias de petróleo para remover contaminantes como enxofre, nitrogênio e anéis aromáticos condensados e metais. No decorrer desse processo, a matéria-prima reage com o hidrogênio sob alta temperatura e pressão para alterar a composição química. No entanto, ao considerar a produção do diesel verde, o hidrogênio é adicionado na matéria-prima na presença de um catalisador que remove o oxigênio e converte as moléculas de triglicerídeos em hidrocarbonetos parafínicos (SONTHALIA e KUMAR, 2019).

O hidrotreamento (HDT) envolve a ocorrência de diversos tipos de reações químicas simultâneas, de forma que as condições operacionais e o tipo de catalisador utilizado deverão ser definidos em função do objetivo a ser alcançado. Entre as reações existentes durante o HDT, é possível destacar a hidrodessulfurização (HDS), a hidrodesnitrogenação (HDN), a hidrodesoxigenação (HDO), a hidrodesmetalização (HDM), a hidrogenação de olefinas (HO) e a hidrodesaromatização (HDA), nas quais ocorre, respectivamente, a remoção de compostos sulfurados, nitrogenados, oxigenados e metais (níquel e vanádio), e a saturação de olefinas e a hidrogenação de anéis aromáticos. (FURIMSKY, 2000).

Ao selecionar a matéria-prima de biomassa para a produção de combustíveis, faz-se necessário utilizar o hidrotreamento como uma etapa essencial da cadeia produtiva, pois a biomassa normalmente apresenta elevados teores de oxigênio. E assim, o consumo de hidrogênio (H_2) e a severidade da operação necessários para a obtenção de altas conversões de HDO dependem do conteúdo e da composição da matéria-prima (FURIMSKY, 2000).

3.3 PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO PARA ALIMENTAÇÃO DA ROTA HEFA

Para manter o aumento da temperatura média global abaixo de 2°C, principal objetivo alinhado no Acordo de Paris, a meta exige alcançar um equilíbrio entre emissões e remoções de gases de efeito estufa (GEE) da atmosfera em cerca de 50 anos. Diante desse desafio, impõe-se a transição energética, modelo que amplia o uso de energia de fontes renováveis e a reduz do uso de combustíveis fósseis, bem como promove ações para aumentar a eficiência energética (EPE, 2022).

A utilização do hidrogênio como uma opção disruptiva em meio ao contexto da transição energética, vem ganhando destaque em todo o mundo pela sua diversidade de aplicações industriais e seu grande potencial de contribuição na redução de emissões de GEE (CNT, 2023). Ao considerar o hidrogênio renovável ou hidrogênio verde como um dos caminhos da transição para uma economia de baixo carbono, esse combustível será responsável por cerca de 4% da redução de emissões somente no setor de energia entre 2021 e 2050 (IEA, 2023).

De acordo com a CNT (2003), a produção do hidrogênio pode ser classificada de acordo com a principal matéria-prima utilizada, com o processo empregado ou com a ocorrência de emissões de dióxido de carbono (CO₂) durante a obtenção de hidrogênio, recebendo o nome de uma cor para facilitar a referência em estudos internacionais, conforme as definições apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 Categorização do hidrogênio por cor, processo produtivo e respectivas definições

Cor	Processo	Resumo do processo
H₂ preto	Gaseificação de carvão mineral do tipo antracito, sem CCUS.	Conversão termoquímica de carvão, com teor de carbono superior a 90% (antracito), mediante a aplicação de calor na presença de água e oxigênio. O processo transforma o antracito em gases combustíveis, sendo, um deles o H ₂ preto. Durante o seu processo produtivo, a técnica de CCUS não é utilizada.
H₂ marrom	Gaseificação do carvão mineral do tipo hulha, sem CCUS.	Conversão termoquímica de carvão, com teor de carbono entre 75% e 85% (hulha), mediante a aplicação de calor na presença de água e oxigênio. O processo transforma a hulha em gases combustíveis, sendo, um deles o H ₂ marrom. Durante o seu processo produtivo, a técnica de CCUS não é utilizada.
H₂ cinza	Reforma a vapor do gás natural, sem CCUS.	Reação química entre o gás natural e o vapor d'água em reatores industriais, na presença de calor e catalisadores. O gás natural, após a reação, é convertido em outros gases, tais como: monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrogênio cinza. Durante o seu processo produtivo, a técnica de CCUS não é utilizada.
H₂ azul	Reforma a vapor do gás natural, com CCUS.	Reação química entre o gás natural e o vapor d'água em reatores industriais, na presença de calor e catalisadores. O gás natural, após a reação, é convertido em outros gases, tais como: monóxido de carbono, dióxido de carbono e H ₂ azul. Neste processo, a técnica de CCUS é utilizada para diminuir as emissões de gases poluentes.
H₂ verde	Eletrólise da água utilizando fontes renováveis de energia.	Reação eletroquímica em que a energia elétrica renovável (solar, eólica, biomassa ou hidráulica) é aplicada em equipamentos eletrolisadores, com objetivo de separar as moléculas presentes na água, gerando o H ₂ verde e O ₂ .
H₂ branco	Extração natural ou de origem geológica	Extração de hidrogênio natural localizado no solo ou em poços mais profundos. O H ₂ branco é produzido naturalmente em reservatórios, mediante a decomposição de suas formações geológicas em gases.

Continuação		
H₂ turquesa	Pirólise de gás metano, sem geração de CO ₂ .	Quebra da molécula de CH ₄ por meio da aplicação de calor, proveniente de fontes limpas, como a eólica ou solar, e catalisadores, para melhorar a taxa de conversão da reação. No processo, o gás metano é convertido em H ₂ turquesa e carbono na forma sólida – pode ser utilizado na indústria siderúrgica e na produção de pneus, grafite, corante e condicionadores de solo. Durante este processo, a técnica de CCUS não é utilizada.
H₂ musgo	Gaseificação de plásticos residuais, gaseificação de biomassa ou biodigestão de biomassa, com ou sem CCUS.	Conversão termoquímica de plásticos residuais ou biomassa, a partir da aplicação de fonte de calor com a presença de oxigênio, transformando-os em gases, tais como: CO, CO ₂ e H ₂ musgo. Considera-se, também, o hidrogênio obtido a partir da decomposição de material orgânico (biomassa) por microrganismos. Durante estes processos, a técnica de CCUS é facultativa.
H₂ rosa	Eletrólise da água utilizando fonte de energia nuclear.	Reação eletroquímica em que a energia nuclear é aplicada em equipamentos eletrolisadores, com o objetivo de separar as moléculas presentes na água, gerando o H ₂ rosa e O ₂ .

Fonte: Adaptado de CNT, 2023.

Um aspecto importante a se considerar na cadeia produtiva do hidrogênio são o transporte e a distribuição. De acordo com Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), ao considerar uma distância menor do que 1.500 quilômetros, o transporte do hidrogênio através de gasodutos locais é a opção que possui a vantagem econômica em relação ao demais métodos de transporte. Para distâncias superiores a 1.500 quilômetros, a liquefação e a regaseificação de hidrogênio transformado em amônia tornam-se a opção econômica mais adequada (CNT, 2023; IPEA, 2022).

O processo de liquefação do hidrogênio ocorre a -250 °C, demandando bastante energia e ainda há uma perda de 30% do PCI do gás no processo. Uma das alternativas viáveis para o transporte do hidrogênio é a conversão de H₂ em NH₃ (amônia). Essa medida aumenta a eficiência do transporte do hidrogênio, pois o transporte da amônia é menos intenso energeticamente em relação ao hidrogênio puro o que facilita o armazenamento para transporte, não é inflamável no ar e a forma

do transporte é bem desenvolvido e maduro, onde a NH_3 é mantida a uma pressão de 1 bar e em $-33\text{ }^\circ\text{C}$, para quantidade de até 50 toneladas (AMARAL, 2021).

A depender da distância entre a biorrefinaria e o *hub* de produção do hidrogênio, existem três alternativas para o transporte do hidrogênio, sendo elas: condução marítima por navios, gasodutos e caminhões. Cada opção possui vantagens e desvantagens e a escolha mais viável poderá variar de acordo com geografia, distância, escala e o uso pretendido do hidrogênio (IEA, 2019).

As plantas industriais com elevado consumo de hidrogênio poderão sofrer com os elevados custos para a implantação de dutos para o escoamento hidrogênio, além do tempo necessário para avançar, em escala comercial, o transporte marítimo do H_2 . Sendo assim, a demanda de hidrogênio necessária para atender a rota HEFA será dada a partir da produção local ou geração *on-site*, através da gaseificação de resíduos sólidos urbanos (RSUs).

Sendo assim, para este trabalho é escolhido o H_2 musgo para suprir a demanda de hidrogênio para atender a rota HEFA. A produção hidrogênio a partir de resíduos plásticos presentes nos RSU tem a vantagem da abundância desta matéria-prima nas proximidades de todos os grandes centros urbanos. Assim, pode-se contar com produção local ou geração *on-site*, através da gaseificação de resíduos sólidos urbanos.

Os RSUs são considerados uma fonte com um grande potencial de geração de energia térmica e elétrica via recuperação energética, ou também conhecido como *Waste-to-Energy* (WTE), do termo em inglês. Entre os processos mais conhecidos de recuperação energética é possível destacar a biodigestão anaeróbica e a fermentação, como sendo processos biológicos e, a incineração, a combustão, a pirólise, a gaseificação e a liquefação, que são processos termoquímicos (FERREIRA, 2021).

3.4 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS COMO MATÉRIA-PRIMA PARA A GASEIFICAÇÃO E OCORRÊNCIA EM TERRITÓRIO NACIONAL

A lei nº 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), contém importantes diretrizes para enfrentar as principais demandas de sustentabilidade decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos (LIMA; ABREU, 2022). Em seu artigo 18, a lei determina que os municípios tenham um plano de gestão integrada de resíduos sólidos e só assim poderão ter acesso aos recursos da União direcionados para os serviços de limpeza urbana e ao manejo de resíduos sólidos (BRASIL, 2010a).

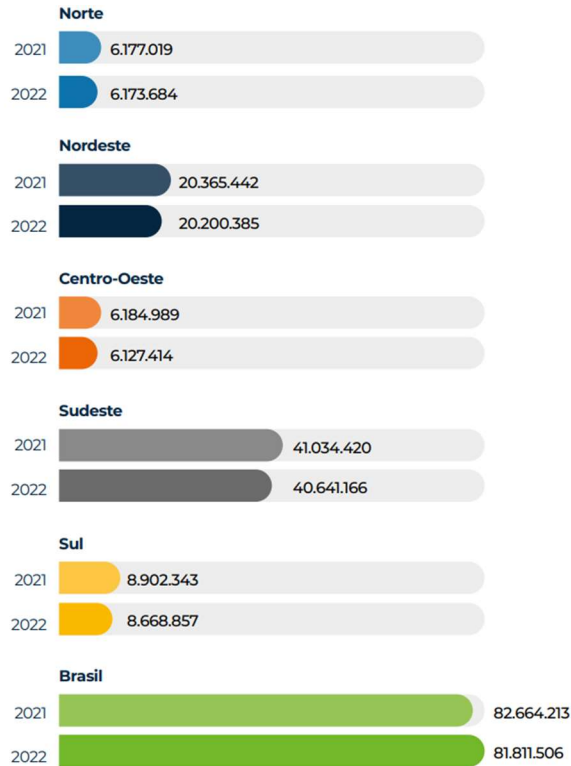
Os resíduos sólidos são considerados todo e qualquer refugo, sobra ou detrito resultante da atividade humana, exceto dejetos e outros materiais sólidos ou semissólidos. Os resíduos sólidos podem ser classificados de acordo com a sua natureza física (seco ou molhado), sua composição química (orgânico ou inorgânico) e sua fonte geradora (domiciliar, industrial, hospitalar e outros). Uma classificação que se sobrepõe a todas as demais é aquela que considera os riscos potenciais dos resíduos ao ambiente, dividindo-os em perigosos, inertes e não inertes (ABNT, 2004).

Em função do rápido crescimento populacional urbano aliado ao alto estilo de vida de consumo similar ao dos países desenvolvidos, cinco países em desenvolvimento estão entre os dez países que mais geram resíduos sólidos urbanos, sendo eles: China, Índia, Brasil, Indonésia e México (BATISTA et al., 2021). Em todo o mundo há uma expectativa para o aumento na geração de resíduos, que em 2016 foi de 2 bilhões de toneladas/ano para 3,4 bilhões de toneladas/ano em 2050. Segundo essa estimativa, o aumento mais significativo será em países de baixa renda, onde a geração de resíduos deverá triplicar (ISWA, 2022).

De acordo com os dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2022), durante o ano de 2022, no Brasil, foram gerados aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de RSU, o que corresponde a 224 mil toneladas por dia, ou ainda, em média, cada brasileiro produziu 1,043 kg de resíduos/dia. Ainda segundo a Abrelpe, foi identificado uma redução na geração de RSU de 2022 em relação a 2021, conforme a Figura 5. A justificativa pode estar relacionada às novas dinâmicas sociais após a Pandemia de COVID-19, onde ocorre o retorno da geração de resíduos nas empresas e escolas, a redução na

utilização de serviços de delivery e em função da variação do poder de compra de parte da população (ABRELPE, 2022).

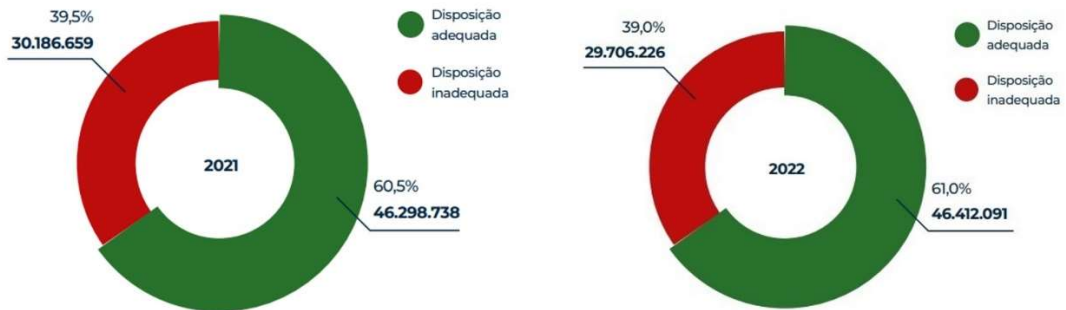
Figura 5 Geração de RSU no Brasil e regiões - comparativo dos anos de 2021 e 2021



Fonte: ABRELPE, 2022.

Em relação a coleta de RSU, em 2022, a cobertura foi igual a 93% no país, o que significa que 76,1 milhões de toneladas de resíduos foram coletadas. As regiões do Sudeste, Sul e Centro-Oeste apresentam valores superiores à média nacional, com 98,6%, 97% e 95%, respectivamente, enquanto as regiões Norte e Nordeste apresentam 82,78% e 82,70%, nessa ordem. Em 2022, a disposição final dos resíduos em aterro sanitário apresentou um aumento sutil de 0,5% em relação ao ano anterior de acordo com a Figura 6 (ABRELPE, 2022).

Figura 6 Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil (t/ano e %) - comparativo 2021 e 2022



Fonte: ABRELPE, 2022.

É importante ressaltar que, o envio dos RSU para um aterro sanitário é a opção prevista na PNRS como sendo a forma ambientalmente adequada (BRASIL, 2010a). Entende-se como sendo disposição inadequada o envio dos resíduos para os lixões e aterros controlados. Segundo Leite (2019), o lixão é uma área sem controle sobre a qualidade e quantidade dos resíduos, provocando assim a contaminação do solo, da água e do ar em decorrência do lançamento do lixiviado (chorume) e dos gases decorrentes da decomposição dos resíduos. Já o aterro controlado possui algum tipo de controle operacional ou ambiental, no entanto, não possui o rigor de um aterro sanitário (LEITE et al., 2019).

3.4.1 Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos

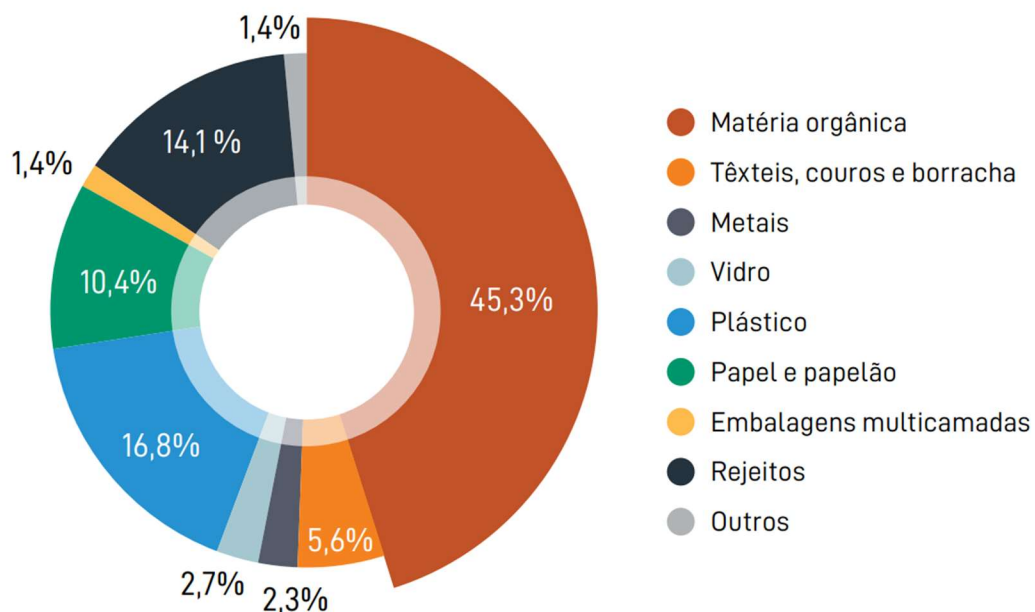
Como forma de entender qual é a composição dos resíduos urbanos, a ABNT 10.004, define como sendo a determinação de seus constituintes e de suas respectivas porcentagens, em volume e massa, em uma amostra de resíduos sólidos, que pode ser físico, químico e biológico. Para determinar essa composição é utilizada a ferramenta de análise gravimétrica ou gravimetria, que é capaz de apontar em níveis qualitativos e quantitativos a composição dos resíduos sólidos urbanos (SOUZA et al., 2020).

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Gestão de Resíduos – SINIR, a caracterização e a análise dos componentes dos resíduos sólidos urbanos pelos municípios são fundamentais para a adequada gestão e para o

gerenciamento dos RSU (SNIR, 2022). A utilização da gravimetria auxilia na determinação justa de tarifas de coleta, definição e dimensionamento de rotas de coleta seletiva e da coleta convencional (MENEZES et al., 2019).

A ABRELPE (2020), estimou a gravimetria nacional através de uma média ponderada a partir da geração total de RSU por receita dos municípios e suas gravimetrias, considerando a população e geração de resíduo per capita, o resultado do estudo é apresentado na Figura 7 (ABRELPE, 2020).

Figura 7 Composição gravimétrica dos RSU em território nacional



Fonte: ABRELPE, 2020.

O resultado do estudo aponta que 45,3% da composição dos RSU representa a fração orgânica putrescível (sobra e perdas de alimentos, resíduos de poda e madeiras). Com um total de 33,6%, os resíduos recicláveis secos representam a segunda maior parcela de contribuição na caracterização dos resíduos sólidos, cuja composição é plásticos (16,8%), papel e papelão (10,4%), vidros (2,7%), metais (2,3%) e embalagens multicamadas (1,4%). Por fim, 21,1% dos resíduos identificados são os resíduos têxteis, couros e borrachas com 5,6% e rejeitos, principalmente sanitários, com 15,5%.

Segundo o SINIR (2022), o resultado observado apresenta uma oportunidade de equacionar o problema dos RSU em função da adoção de medidas e práticas de valorização dos resíduos sólidos, em especial os recicláveis secos e orgânicos de acordo com as especificidades de cada região. Ainda de acordo com o SINIR, para que se torne viável a valorização dos resíduos sólidos recicláveis secos e orgânicos, as políticas públicas devem ter um foco nas etapas hierárquicas e na gestão dos resíduos sólidos (SINIR, 2022).

3.4.2 Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

A destinação de resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário possui um destaque por ser uma tecnologia de menor custo de operação e manutenção em relação às tecnologias de incineração, tratamento biológico e entre outras (OLIVEIRA; MEDEIROS, 2019). No entanto, ao considerar o contexto da transição energética, limitar-se apenas a recuperação do gás metano (biogás) em aterros e biodigestores torna incipiente o potencial que os RSU apresentam (OLIVEIRA; CARNEIRO, 2020).

Nesse sentido, em 2002, o governo federal havia lançado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA). O programa tem como objetivos, diversificar a matriz energética e impulsionar fontes de energia renovável e limpa no país (BRASIL, 2022). A Lei Federal nº 13.305/2010, institui a utilização de resíduos sólidos visando à recuperação energética e em seu Art. 9º, dentre as disposições preliminares estão a comprovação da viabilidade técnica e ambiental com implantação do programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos (BRASIL, 2010b).

A NBR 16.849 (ABNT, 2020) estabelece as condições para o aproveitamento energético de resíduo sólido urbano com uso sustentável e seguro, por meio do uso racional de RSU na preparação e o emprego de tecnologias adequadas de queima. Com o objetivo de explorar as potencialidades no aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, num cenário em que as políticas públicas oferecem condições para a exploração da atividade, a gaseificação de combustível derivado de resíduos sólidos urbano tem uma oportunidade para se desenvolver como uma alternativa na recuperação energética de RSU (OLIVEIRA; CARNEIRO, 2020).

3.4.3 Tecnologia de produção de combustível derivado de resíduos (CDR)

A produção do CDR consiste no tratamento mecânico – seleção, separação e trituração de resíduos não perigosos com valor energético (FERREIRA, 2021). Esse método tem como objetivo melhorar o rendimento do resíduo como combustível através da redução da umidade e uniformização do tamanho resíduo, conseqüentemente, reduz-se a quantidade de componentes nocivos como o potássio, o sódio, o flúor e o cloro, com isso, há também a redução dos impactos ambientais causados por esses elementos (SAMPAIO, 2014).

O combustível derivado de resíduo é composto predominantemente por plástico, papel, borracha, madeira, panos e outros materiais rejeitados no processo de reciclagem. A qualidade e o valor do CDR são classificados considerando suas características, como homogeneidade, quantidade oferecida de forma regular, poder calorífico, teor de umidade, granulometria, teor de cloro, enxofre e metais (FERREIRA, 2021).

Uma linha de produção de CDR é composta por processos em série para que haja uma separação mais eficiente e por conseguinte se obtenha um combustível com características mais homogêneas. Os sucessivos estágios de tratamento do resíduo, como classificação, separação, trituração, peneiramento, secagem e densificação são as etapas que podem constituir uma linha de produção de CDR e o tipo, quantidade e ordem dos equipamentos podem afetar a qualidade do produto final bem como o balanço de massa (MAMEDE, 2013).

O CDR pode ser classificado de três formas, sendo elas do tipo CDR desagregado, CDR pellets e CDR briquetes. O primeiro é um produto livre, possui uma baixa densidade e pode ser disperso fácil pelo ar. O segundo, é um CDR aglomerado com diâmetro inferior a 25 mm. Por fim, o último, possui uma forma de bloco ou cilindro com diâmetro superior a 25 mm (MARQUES, 2020).

A escolha do tipo de CDR possui vantagens e desvantagens, os CDR's densificados podem ser armazenados por até 3 meses com um teor de umidade em torno de 12%, porém, necessitam de uma quantidade significativa de energia para a secagem e peletização, em contrapartida, o tipo CDR solto não exige o gasto de energia, porém, possuem um teor de umidade de até 30% e precisam ser usados no menor espaço de tempo possível (FERREIRA, 2021; MAMEDE, 2013).

O Quadro 2 apresenta algumas etapas de uma linha de produção de CDR com os seus respectivos objetivos.

Quadro 2 Linha de produção do Combustível Derivado de Resíduos CDR

Etapa	Objetivo	Comentários
Separação mecânica	Separar a fração orgânica; Separar possíveis recicláveis não contaminados (papelão, plástico, metais); Separar os contaminados (PVC, Eletrônicos)	As tecnologias comumente empregadas são crivagem em tambor rotativo, triagem manual, separação por infravermelho.
Redução da granulometria	Aumentar a homogeneidade; Facilitar o transporte e o armazenamento.	As tecnologias comumente empregadas são a trituração, a compactação e o enfardamento.
Secagem	Redução do teor de umidade para aumentar o poder calorífico e reduzir a atividade biológica.	Pode ser mecanicamente por meio de secadores ou biologicamente por intermédio de compostagem.
Separação mecânica	Separação de materiais recicláveis e contaminantes	Uso de equipamentos industriais, para a retirada de metais ferrosos e não ferrosos.

Fonte: Adaptado de Ferreira, 2021.

3.4.4 Linha de produção do CDR

A transformação dos resíduos sólidos urbanos em combustível derivado de resíduo possui uma série de etapas que serão descritas a seguir. Para a produção de CDR é considerada uma quantidade de aproximadamente 1.300.000,00 toneladas/ano de RSU, que é equivalente a uma cidade com 960.000 habitantes, com uma produção média per capita de 1,35 kg/dia de RSU.

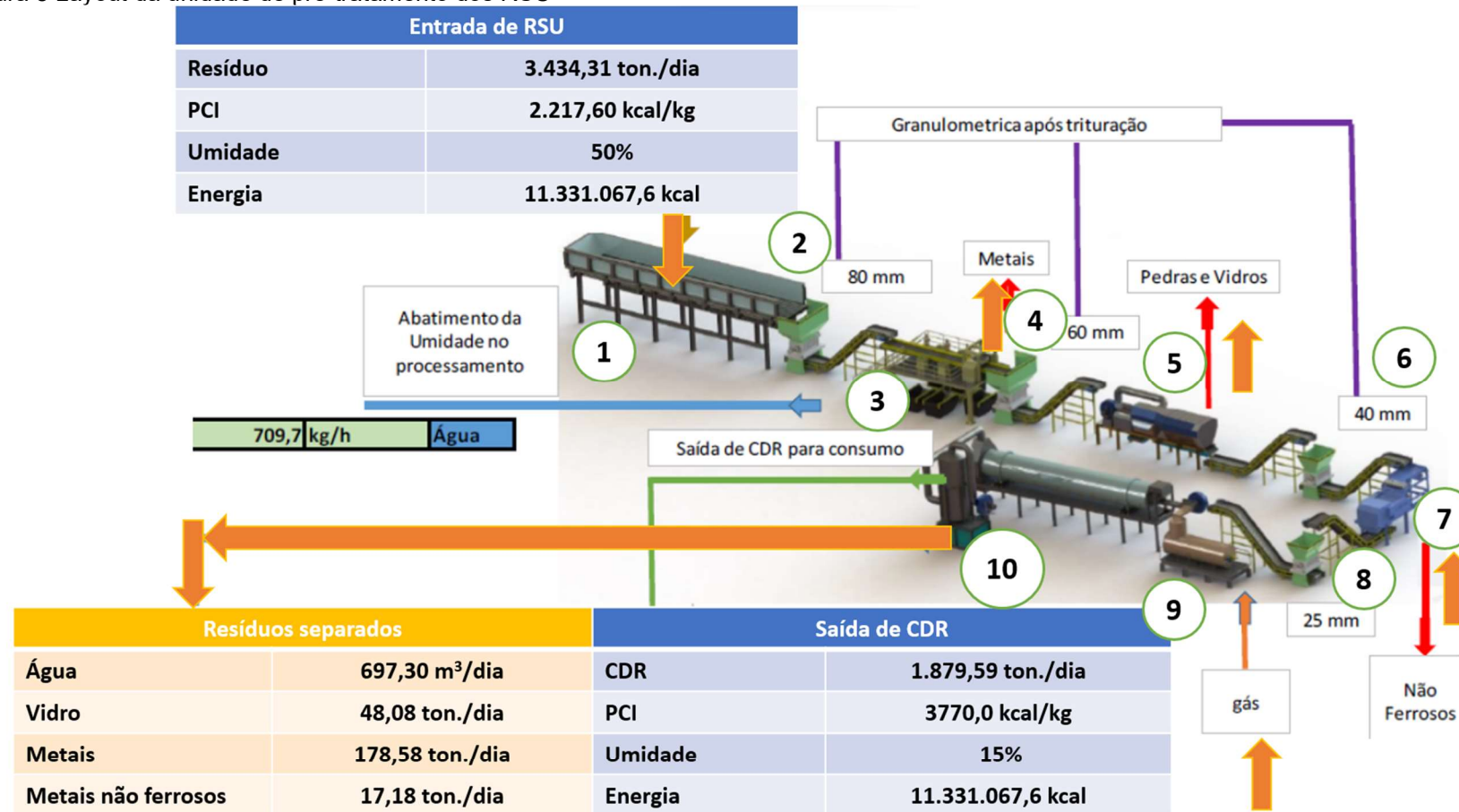
O início do processo acontece com o recebimento dos caminhões que transportam os RSU, em seguida eles são pesados e na sequência ocorre o transbordo de todo o material em um silo com esteira que realiza movimentos repetitivos para trás. Ainda nesta fase, o chorume ou lixiviado é drenado através da esteira que possui furos para que, em seguida, esse líquido seja bombeado para o tratamento. Na sequência, o triturador primário irá processar o resíduo bruto, ou seja, sem uma pré-seleção anterior e na saída do processo o RSU terá uma granulometria de 80 mm. Nesta primeira etapa os processos são automatizados e livres de intervenção humana para evitar o contato direto com o chorume (FERREIRA, 2021).

Os resíduos triturados são enviados para uma plataforma onde serão coletados os materiais recicláveis por operadores e ao final os materiais ferrosos são segregados por um separador magnético. Novamente o resíduo é triturado, agora o triturador secundário reduz as partículas para um tamanho de 60 mm. O RSU segue através de uma correia transportadora para a etapa onde serão retirados os materiais que apresentam uma alta densidade, como pedras, pilhas, vidros e outros resíduos não orgânicos e o equipamento que realiza esta função é o separador a ar densimétrico (FERREIRA, 2021).

A próxima etapa em que o RSU passará, é o triturador terciário, onde a partícula será reduzida a um diâmetro de 40 mm. Na sequência, passa pelo separador de metais não ferrosos, onde a separação ocorre em função de uma corrente induzida e metais ferrosos remanescentes são retirados através de um eletroímã. Posteriormente, o resíduo é enviado para o triturador quaternário onde acontece a redução de 40 mm para 25 mm e, em seguida, é encaminhado para o secador rotativo tubular horizontal para a redução de umidade. Nessa etapa, o material chega tipicamente com 30% de umidade e sai com o teor de umidade de 15% (FERREIRA, 2021).

A linha de produção utilizada como referência no estudo é apresentada na Figura 8, a numeração sequencial destacada é equivalente a ordem das etapas, bem como a ordem dos equipamentos considerados. Posterior a apresentação do esquema de produção do CDR, na página seguinte, são consideradas as características dos resíduos sólidos urbanos e do combustível derivado de resíduo. É possível verificar que ocorre o aumento do Poder Calorífico Inferior e redução do teor de umidade após a transformação do RSU em CDR, conforme é apresentado na Tabela 1.

Figura 8 Layout da unidade de pré-tratamento dos RSU



Fonte: Adaptado de Ferreira, 2021.

Tabela 1 Características do RSU e CDR

Amostras					
Composição	Peso (%)	RSU (50% de umidade)		CDR (15% de umidade)	
		Fluxo de massa (kg/h)	PCI (MJ/kg)	Fluxo de massa (kg/h)	PCI (MJ/kg)
Matéria orgânica	35,2	806,7	3,3	474,5	5,6
Partículas finas	3,0	68,8	0,3	40,4	0,5
Papel	6,4	147,8	0,5	86,9	0,8
Embalagens	6,0	137,5	0,5	80,9	0,8
Sintéticos	8,8	200,5	0,9	118,0	1,6
Textil	10,0	229,2	1,0	134,8	1,6
Tecidos hospitalares	12,2	281,9	1,1	165,8	1,9
Plásticos	8,8	201,7	1,5	118,6	2,5
Vidros	1,4	32,1	0	0	0
Metais	5,2	119,2	0	0	0
Sem classificação	2,9	66,4	0,2	32,4	0,5
Total	100	2291,8	9,3	1252,3	15,8

Fonte: Adaptado de Ferreira, 2021.

O CDR possui um uso considerável em processos termoquímicos – incineração > pirólise > gaseificação – onde ocorre uma reação de oxirredução do combustível em uma atmosfera desprovida de oxigênio (MARQUES, 2020; SAMPAIO, 2014). Segundo Ferreira (2021), o uso do CDR em processos termoquímicos com produção do gás de síntese em regiões próximas ao consumo, reduz os custos operacionais do projeto.

A definição de qual tipo – em formato de pellets, briquetes ou soltos – de CDR adotar está diretamente ligada ao tipo de tecnologia que será aplicada na gaseificação do CDR, podendo ser de leito fixo, leito fluidizado, leito fluidizado circulante e entre outros, além disso, deve ser considerada a localização da unidade de produção do CDR em relação à planta de gaseificação (FERREIRA, 2021).

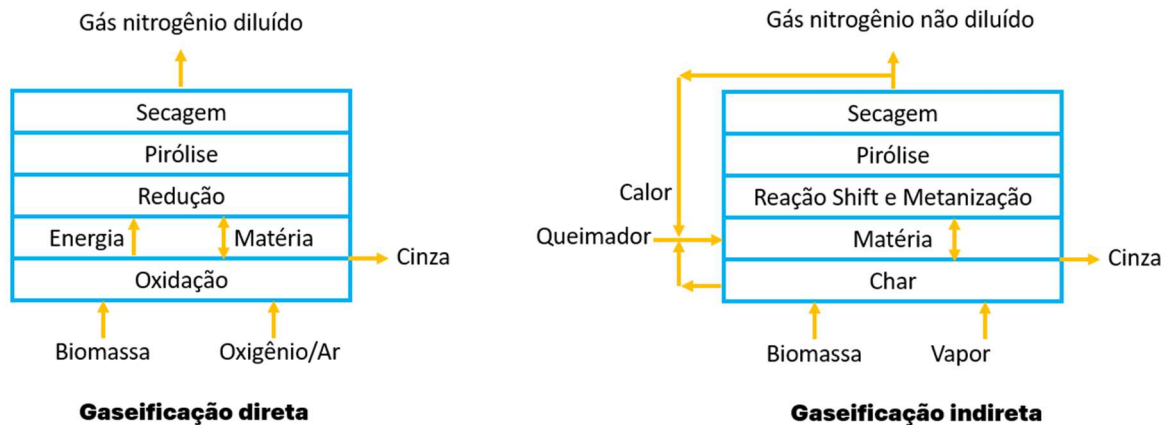
3.5 PRODUÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE

O gás de síntese é oriundo do processo de gaseificação e é definido como sendo a oxidação parcial de material sólido carbonáceo – biomassa, carvão, coque e entre outros materiais ricos em carbono – na presença limitada de oxigênio conduzida em altas temperaturas (TAGOMORI, 2017). O gás combustível produzido é formado por gás hidrogênio (H_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), este não é combustível e, se o ar for utilizado como agente oxidante, o gás de síntese irá conter gás nitrogênio (N_2) (MONTEIRO, 2019).

A depender do agente de gaseificação ou agente oxidante, o processo de gaseificação pode ser de dois tipos: gaseificação direta ou gaseificação indireta. Na gaseificação direta a própria reação de oxidação fornece a energia necessária para manter a temperatura do processo com oxidação parcial do material de alimentação. Já na gaseificação indireta, o agente de gaseificação não possui oxigênio, sendo assim, faz-se necessário o uso de uma fonte de alimentação de calor (DE PAULO, 2022; NAKYAI et al., 2020; SEO et al., 2018).

O processo de gaseificação indireta não utiliza ar ou oxigênio injetado, com isso, a ausência de nitrogênio no processo de gaseificação indireta apresenta uma elevada eficiência volumétrica e um alto valor de aquecimento do gás, diminuindo assim o custo de limpeza do gás e da recuperação de energia. A gaseificação direta com oxigênio puro possui os mesmos pontos positivo da gaseificação indireta, porém, o custo é mais elevado em função do custo de produção do oxigênio puro (SEO et al., 2018). A Figura 9 apresenta os esquemas de gaseificação direta e indireta. No Quadro 3 são apresentadas as vantagens e desvantagens dos agentes de gaseificação utilizados.

Figura 9 Processos de gaseificação direta e indireta



Fonte: Autor, 2024.

Quadro 3 Tipos de agentes gaseificadores - vantagens e desvantagens

Agentes de gaseificação	Vantagens	Desvantagens
Ar	Baixo custo; Combustão parcial da biomassa para fornecimento da energia para o processo; Teor de particulados e alcatrão moderados.	Baixo poder calorífico do gás produzido
O₂	Gás de síntese não diluído por N ₂ ; Ausência de alcatrão; Permissão de gaseificação da biomassa em estado líquido.	Necessidade de purificação do ar; Temperaturas elevadas de operação; Restrição ao uso de gaseificadores de leitos arrastados.
CO₂	Alto poder calorífico do gás produzido; Elevadores teores de H ₂ e CO no gás.	Exigência de aquecimento indireto de altas temperaturas para ativar o CO ₂ ; Necessidade de limpeza catalítica do gás.
Vapor superaquecido	Alto poder calorífico e elevado teor de hidrogênio no gás produzido	Requer fornecimento de calor externo – gerador de vapor; Necessidade de limpeza catalítica; Aumento do teor de alcatrão no gás produzido.

Fonte: Adaptado De Paulo, 2022.

O processo de gaseificação é composto basicamente por quatro etapas principais:

1 – Secagem – vaporização da umidade contida no material;

2 – Pirólise ou desvolatilização – decomposição do material em componentes voláteis e char (fração sólida);

3 – Oxidação ou combustão parcial do material – ocorre em presença limitada de oxigênio, sob a forma de oxigênio puro, ar ou vapor;

4 – Redução – ocorrência de uma série reações que geram majoritariamente gás de síntese.

As reações que ocorrem dentro do reator termoquímico e que fazem parte do processo de gaseificação são apresentadas na Tabela 2 (HOFFMANN, 2010; NREL, 2010; TAGOMORI, 2017).

Tabela 2 Reações envolvidas no processo de gaseificação

Título da Reação	Reação	Entalpia da Reação**
Combustão completa (Gás-Sólido)	$C+O_2 \leftrightarrow CO_2$	$\Delta H = -393,5 \text{ kJ/mol}$
Combustão parcial (Gás-Sólido)	$C+1/2 O_2 \leftrightarrow CO$	$\Delta H = -123,1 \text{ kJ/mol}$
Reação de Water-Gas (Gás-Sólido)	$C+H_2O \leftrightarrow CO+H_2$	$\Delta H = +118,5 \text{ kJ/mol}$
Reação de Boudouard (Gás-Sólido)	$C+CO_2 \leftrightarrow 2CO$	$\Delta H = +159,9 \text{ kJ/mol}$
Reação de Metanação (Gás-Sólido)	$C+2H_2 \leftrightarrow CH_4$	$\Delta H = -87,5 \text{ kJ/mol}$
Reação de Water-Gas-Shift (Gás-Gás)	$CO+H_2O \leftrightarrow CO_2+H_2$	$\Delta H = -40,9 \text{ kJ/mol}$
Reação de Metanação (Gás-Gás)	$CO+3H_2 \leftrightarrow CH_4+H_2O$	$\Delta H = -203,0 \text{ kJ/mol}$

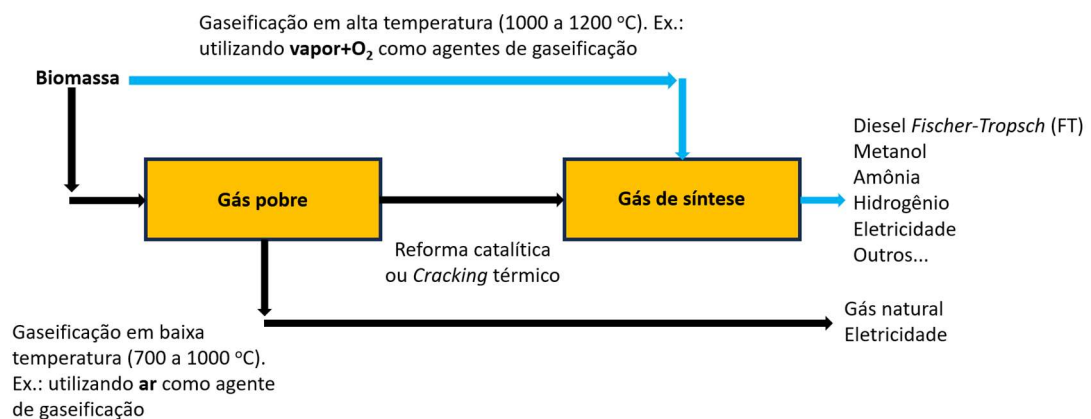
** As entalpias de reação correspondem a condições normais de temperatura e pressão.

Fonte: Adaptado de Tagomori, 2017.

O produto gasoso derivado do processo de gaseificação que utiliza como agente de gaseificação o ar e opera em uma faixa de temperatura entre 770 °C e 1000

°C, é denominado por alguns autores como gás pobre, conforme é demonstrado na Figura 10. Em contrapartida, o gás oriundo da gaseificação que usa mistura de ar com oxigênio, vapor ou oxigênio puro em temperaturas entre 1000 °C e 1200 °C, possui um maior valor agregado e é chamado de gás de síntese ou do termo em inglês *synthesis gas* ou ainda *syngas* (MARQUES, 2020).

Figura 10 Aplicações do gás de síntese



Fonte: Autor, 2024.

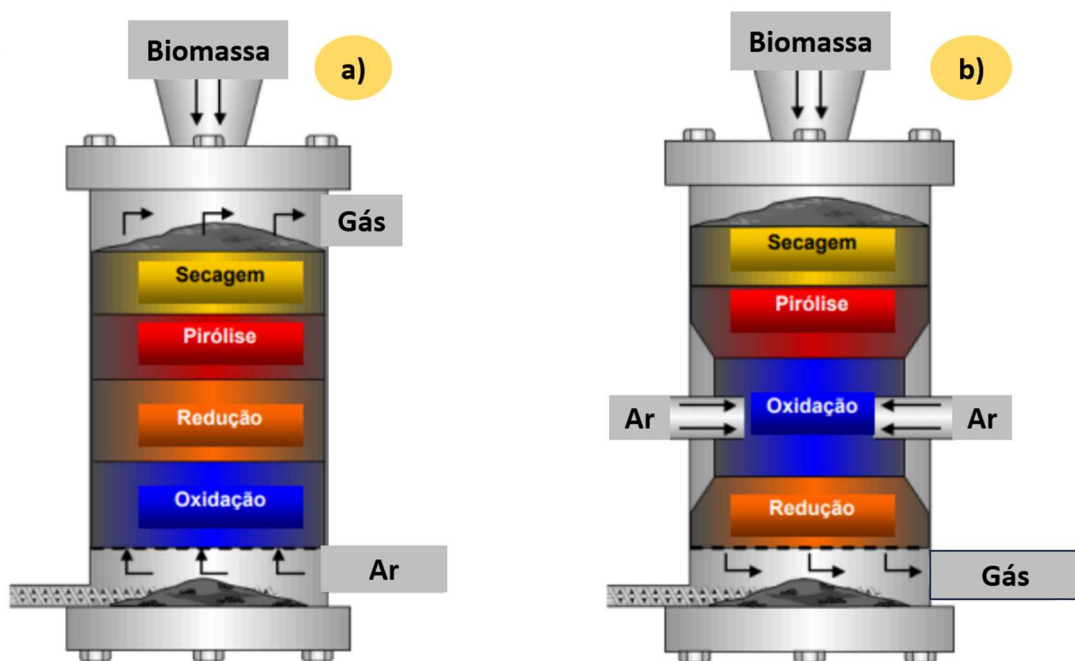
Conforme argumentado por Tagomori (2017) e Hoffmann (2010), a composição do gás de síntese depende diretamente das condições em que a gaseificação foi realizada e assim os fatores de temperatura, pressão, taxa de aquecimento, tempo de residência, tipo de gaseificador, agente de gaseificação, tipo e composição da biomassa possuem influência do combustível, mesmo assim, prever a composição exata do gás é difícil.

3.5.1 Reatores termoquímicos

3.5.1.1 Gaseificadores co-corrente e contracorrente

Os reatores termoquímicos ou gaseificadores convertem uma matéria-prima em gás combustível e podem ser divididos em duas categorias principais de acordo com o tipo de leito, sendo eles: leito fixo e leito fluidizado. A partir destas categorias principais existem duas subcategorias, sendo elas: reatores de leito fixo co-corrente (*downdraft*) e contracorrente (*updraft*) e reatores de leito fluidizados borbulhantes e circulantes, conforme é apresentado na Figura 11 (MARQUES, 2020).

Figura 11 Layout de gaseificadores de leito fixo. a) contracorrente e b) co-corrente



Fonte: Adaptado de Marques, 2020.

A alimentação com matéria-prima em um gaseificador de leito fixo ocorre pela parte de cima do equipamento e o agente gaseificação é inserido pela parte lateral do equipamento tipo co-corrente ou pela parte de baixo, em tipo contracorrente. Em ambos, a temperatura de operação na zona de combustão é igual, variando de 800 °C até 1200 °C (BELGIORNO et al., 2003; MARQUES, 2020; XIANG et al., 2021).

Conforme é apresentado na Figura 11 a), em gaseificador de leito fixo contracorrente (*updraft*), a sequência de reações começa no topo, nessa ordem,

secagem, pirólise, redução e zona de oxidação, sendo assim, a conversão do material sólido em gás combustível ocorre de forma descendente. Na zona de oxidação ou zona de combustão a temperatura parte de 800 °C pode chegar até a 1200 °C, como a configuração do gás acontece de forma ascendente, o alcatrão oriundo da zona de pirólise é carregado para cima em função de gás quente, com isso o gás combustível contém um alto teor de alcatrão (BELGIORNO et al., 2003; MARTIN et al., 2010; XIANG et al., 2021).

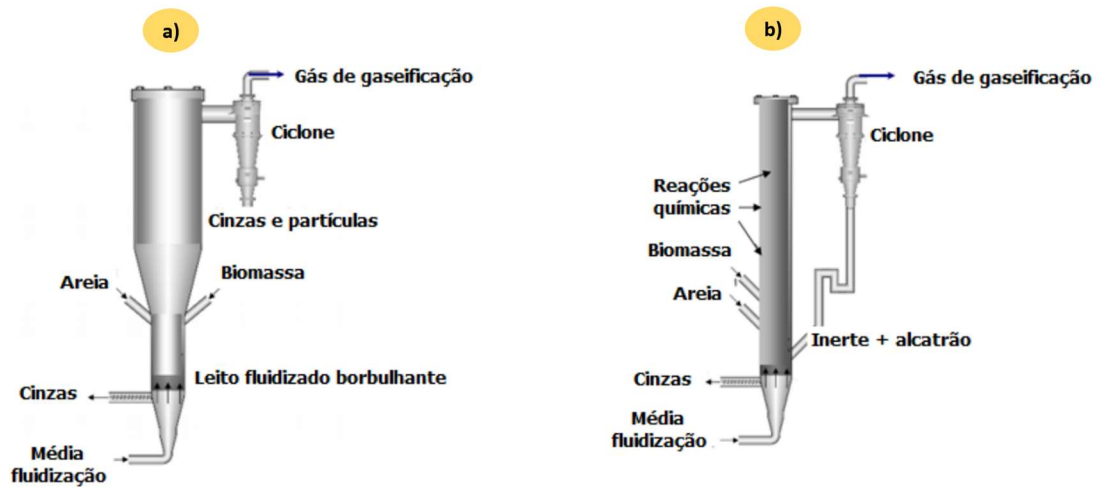
Para reatores tipo co-corrente (*downdraft*), Figura 11 b), a alimentação é realizada na parte superior do equipamento, o agente de gaseificação é inserido através da lateral do reator e o gás combustível gerado é retirado por baixo da grelha no fundo do equipamento. Em função da dinâmica ocorrida dentro do reator *downdraft*, os vapores derivados da pirólise funcionam com um melhor desempenho no craqueamento térmico do alcatrão e a quantidade de cinzas também é reduzida. Porém a troca de calor que ocorre dentro do reator não é tão eficiente em relação ao reator tipo contracorrente (BELGIORNO et al., 2003; SATO, 2019; XIANG et al., 2021).

3.5.1.2 Gaseificadores de leito fluidizado

Em gaseificadores de leito fluidizado o agente de gaseificação é inserido na base do equipamento, isso faz com que a matéria-prima fique constantemente suspensa, essa dinâmica garante o máximo de contato entre o combustível e o fluxo do agente de gaseificação (SATO, 2019). Em função da alta temperatura mantida de forma constante no equipamento, os processos de aquecimento, secagem e pirólise da biomassa ocorrem de forma rápida e eficiente na conversão do carbono e na redução do alcatrão e dos hidrocarbonetos leves (LIAN et al., 2021; MARQUES, 2020).

A faixa de temperatura no leito – normalmente composto por areia de quartzo ou partículas catalíticas – do gaseificador varia entre 700 °C e 1000 °C, isso significa que os valores estão abaixo do ponto fusão das cinzas, sendo assim, durante a operação não irá ocorrer a aglomeração das cinzas e conseqüentemente não haverá o bloqueio do leito (LIAN et al., 2021). Os reatores termoquímicos podem ser de dois modelos, sendo eles: leito borbulhante ou leito circular, conforme é apresentado na Figura 12 (MARQUES, 2020).

Figura 12 Gaseificadores de leito fluidizado. a) borbulhante e b) circulante



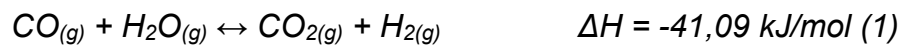
Fonte: Adaptado de Marques, 2020.

No gaseificador de leito fluidizado borbulhante, Figura 12 a), a biomassa é inserida pelo fundo ou pelo lado do leito. O efeito que caracteriza o equipamento com borbulhante, ocorre quando a velocidade do agente de gaseificação é maior do que a velocidade mínima de fluidização. O gás de síntese produzido é limpo e extraído por um ciclone e as cinzas e partículas são removidas pela parte de baixo do ciclone (LIAN et al., 2021).

O outro tipo de gaseificador contém duas unidades operacionais, um reator de alta velocidade e um ciclone circulante, Figura 12 b). Na primeira etapa, o combustível é submetido a uma velocidade de 5 a 10 m/s durante as reações termoquímicas, – enquanto em reator de leito fluidizado borbulhante a velocidade atingida é de aproximadamente de 2 a 3 m/s – posteriormente, o gás de síntese produzido juntamente com as partículas do leito alcança o topo do equipamento onde há a separação no ciclone, aonde as partículas retornam para a primeira etapa e o gás de síntese é retirado (BELGIORNO et al., 2003; LIAN et al., 2021).

3.5.2 Reação Water-Gas Shift

Os reatores de Shift ou reação *Water-Gas Shift* (WGS) tem como objetivos: converter o monóxido de carbono (CO) em dióxido de carbono (CO₂). Com isso, o CO₂ pode ser capturado, aumentando a produção de hidrogênio. As reações ocorrem de forma simultânea, conforme é apresentada na **equação (1)** (ROCHEDO, 2011). Este processo catalítico e moderadamente exotérmico é comumente utilizado na reforma a vapor, em oxidação parcial, na reforma auto térmica, na gaseificação, na síntese de metanol e dimetil éster (DME), na fabricação de amônia, no processo *Fischer-Tropsch* e entre outros (BARAJ et al., 2021; CHEN et al., 2020; LEE et al., 2023).



Especialmente para a produção de hidrogênio a partir da reforma do gás natural, a reação *Water Gas Shift* possui um papel importante. Ademais, a reação WGS também possui destaque na remoção de CO₂ e aumento da relação molar H₂/CO no gás de síntese oriundo de resíduos, biomassa, carvão e outras matérias-primas (LEE et al., 2023). A reação WGS é exotérmica, ou seja, libera energia – calor – durante a reação e, termodinamicamente não é favorável em altas temperaturas, o que tornando a utilização de baixas temperaturas favoráveis as reações e assim, o vapor e o CO são convertidos em H₂ e CO₂ (FRANCO, 2021).

A reação WGS pode ocorrer com uma multiplicidade de reatores podendo variar em função da temperatura e o tipo de catalisador, entre 180 e 230 °C – reatores de baixa temperatura (*Low Temperature Shift* – LTS) e entre 340 e 530 °C – reatores de alta temperatura (*High Temperature Shift* – HTS) (NREL, 2010). Nos reatores LTS, normalmente são utilizados catalisadores de Cu-Zn (cobre-zinco), a pressão no reator gira em torno de 20 e 30 bar e a concentração de monóxido de carbono decresce de 10 a 13% para cerca de 2 e 3%. Já para os reatores HTS, os catalisadores comumente utilizados são de Fe-Cr (ferro-cromo), a pressão de operação pode variar de 10 a 30 bar e concentração de monóxido de carbono diminui para 0,2 a 0,4% (FRANCO, 2021).

Em menores temperaturas de operação, a reação WGS favorece a formação de hidrogênio, porém há uma limitação de rendimento ocasionada pelo equilíbrio químico. Sendo assim, a utilização do reator WGS em escala industrial para produção de hidrogênio, normalmente utiliza-se mais de um reator, geralmente, nesta ordem,

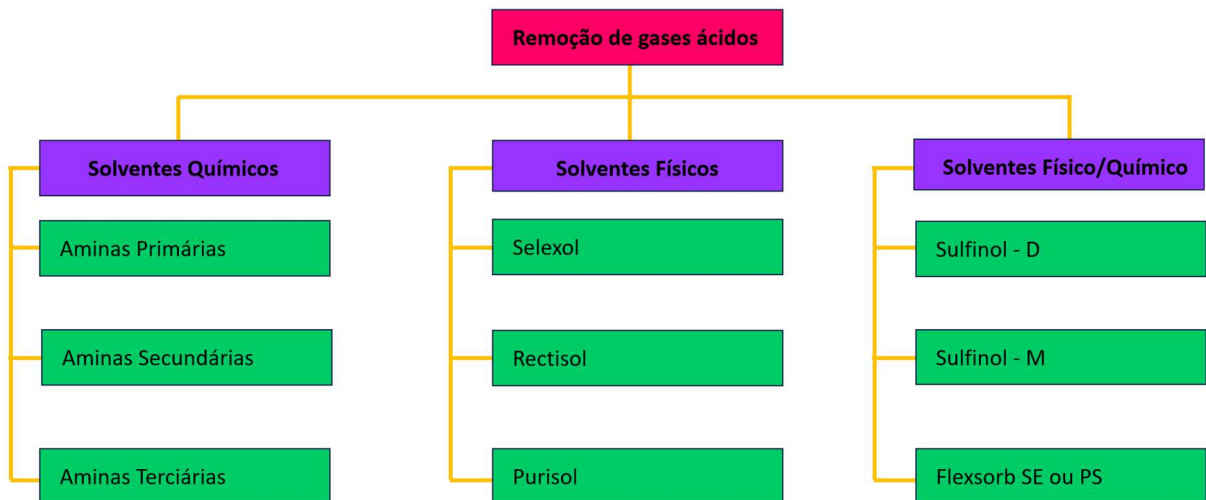
sendo um HTS e um LTS. Essa combinação favorece o equilíbrio das reações e favorece o maior rendimento na produção de hidrogênio (ROCHEDO, 2011).

3.5.3 Remoção de gases ácidos - Processo Selexol

O processo Selexol é um solvente físico a base de dimetil éter polietilenoglicol desenvolvido no final da década de 70. O processo tem como objetivo a remoção de gases ácidos como o sulfeto de hidrogênio (H_2S), o sulfeto de carbonil (COS) e o dióxido de carbono (CO_2) do gás de síntese. Como ponto positivo, o solvente Selexol opera com uma pressão de vapor baixa, isso significa que as perdas são pequenas, além da ótima estabilidade química e térmica. Um ponto negativo deste método é o preço elevado ao comparar com alternativas tecnológicas, porém, ele se torna mais atrativo se houver uma alta remoção de H_2S (ROCHEDO, 2011).

Os processos tradicionais de remoção de gases ácidos geralmente estão relacionados a absorção em contracorrente do gás de síntese com o uso de um solvente regenerativo em uma coluna absorvedora. Porém, a depender das diferentes concentrações de gases ácidos, a escolha do solvente ideal pode variar de forma significativa. Para valores menores do que 1 ppmv (parte por milhão por volume) de enxofre, normalmente são usados os processos físicos como o Selexol ou o Rectisol, para concentrações de 10 a 30 ppmv de enxofre, os processos químicos são os mais indicados, como por exemplo o metil dietanolamina (MDEA) (NREL, 2010). A Figura 13 apresenta alguns desses processos.

Figura 13 Tecnologias de remoção de gases ácidos



Fonte: Autor, 2024.

Após do gás de síntese ser limpo via processo de absorção física e/ou química, o combustível sem sulfeto de hidrogênio é enviado para os sistemas *downstream* para processamento adicional. O solvente que agora contém o gás ácido é encaminhado para um regenerador, onde o solvente é removido com vapor sob baixa pressão e o H₂S que foi absorvido sai pelo topo do regenerador. Posteriormente, o sulfeto de hidrogênio é enviado para uma Unidade de Recuperação de Enxofre, onde o H₂S é convertido em enxofre (S) para se tornar um subproduto comercializável. Por sua vez, o solvente recuperado é resfriado antes de retornar ao ciclo (NREL, 2010).

3.6 MICROALGAS

3.6.1 Utilização de microalgas para o tratamento de esgoto

O uso de microalgas para o tratamento de esgoto foi proposto em 1950, no entanto, somente em 1957 foi provada a eficiência na remoção de nitrogênio e fósforo deste tipo de efluente, e resultados preliminares positivos para a produção de biodiesel oriundo de microalgas foram reportados (MARTÍNEZ-ROLDÁN; CAÑIZARES-VILLANUEVA, 2020; POSADAS et al., 2017).

Em 1960, foi desenvolvido o processo denominado lagoas de microalgas de alta taxa, cujo formato é de uma lagoa oval com profundidade abaixo de 50 cm e que utilizam pás rotativas para movimentar o efluente. Os resultados produzidos por este

novo formato foram mais significativos do que o formato anterior, feito em 1957, onde a lagoa era profunda e sem um misturador (MARTÍNEZ-ROLDÁN; CAÑIZARES-VILLANUEVA, 2020).

A remoção dos nutrientes do efluente é dada pela simbiose das microalgas com bactérias aeróbicas na coluna d'água, onde as microalgas produzem oxigênio. As bactérias, por sua vez, consomem esse oxigênio disponível para a mineralização da matéria orgânica e libera dióxido de carbono, que é utilizado no processo de respiração das microalgas na fotossíntese (KOHLHEB et al., 2020; MARTÍNEZ-ROLDÁN; CAÑIZARES-VILLANUEVA, 2020; SOARES, 2019b).

Segundo Acién et al., (2017), a composição da biomassa é constituída em peso seco de 30-50% de carbono, 30-50% de oxigênio, 3-7% de hidrogênio, 4-9% de nitrogênio, 1-3% de fósforo e em menores quantidades os compostos de potássio, magnésio, cálcio e enxofre. Ainda de acordo com os autores, a composição da biomassa pode variar em função da espécie de microalga utilizada, bem como a variação do pH – 7.0 e 10.0, neutro a levemente alcalino – e temperatura, onde os valores ideais se encontram entre 20°C e 35°C.

Estima-se que serão capturadas 750.000 toneladas de CO₂ por ano durante o cultivo das microalgas e 29 toneladas de nitrogênio e fósforo removidos no efluente para a produção de 416.667 toneladas de biomassa de microalgas. Vale ressaltar a limitação da produção dos nutrientes N e P. A produção de 1 kg de amônia (NH₃) consome 10 kWh de energia elétrica, ou seja, a utilização de fertilizantes para a produção de microalgas diminui a sustentabilidade cultivo. Portanto, a utilização das microalgas para o tratamento das águas residuais urbanas é justificada, uma vez que o efluente possui os nutrientes de carbono, nitrogênio e fósforo que são fundamentais para o crescimento das microalgas e bactérias no meio de cultivo (PAZ; VICENTE, 2017; POSADAS et al., 2017).

Além dos compostos de carbono, nitrogênio e fósforo, as microalgas podem reter metais pesados – zinco, cobre, níquel, cromo, mercúrio, cádmio e entre outros – corantes – anilina e seus derivados – poluentes emergentes – hormônios, antibióticos, antifúngicos, surfactantes e entre outros – todos estes compostos apresentam um grande risco para o meio ambiente, principalmente para o meio aquático, pois podem ser cumulativos, tóxicos, cancerígenos, reduzem o fluxo de nutrientes para o meio

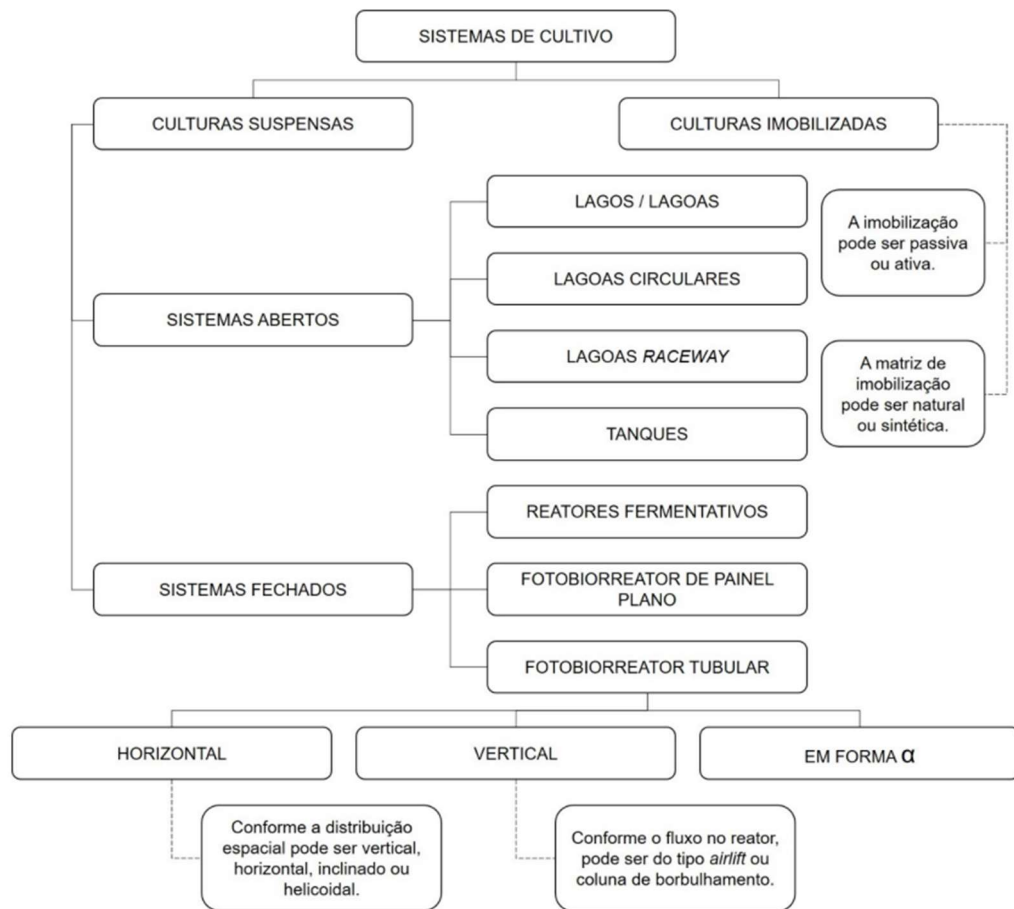
aquático e possuem uma alta complexidade em se degradar (MARTÍNEZ-ROLDÁN; CAÑIZARES-VILLANUEVA, 2020).

3.6.2 Sistemas de cultivo

Os sistemas de cultivos de microalgas – denominados fotobiorreatores – passaram por uma evolução ao longo dos anos, tornando-os mais otimizados e sustentáveis, aumentando assim a produção de biomassa de microalgas, o que tornou a tecnologia viável economicamente para algumas aplicações. A escolha do melhor sistema cultivo depende de alguns fatores como, objetivo do cultivo, espécie de microalga utilizada, fatores geográficos (região/país) e climáticos (MATTHIENSEN; MICHELON, 2022; RODRIGUES, 2022).

Para o tratamento de esgoto sanitário, os sistemas de cultivo de microalgas comumente utilizados são por células imobilizadas ou em suspensão, onde os parâmetros de temperatura, pH, disponibilidade de nutrientes, salinidade e troca de gasosa podem ser controlados de forma sistêmica. Os sistemas de cultivo supracitados ainda podem ser subdivididos em sistema fechado ou aberto, sendo a principal diferença entre eles a exposição das microalgas ao ambiente, conforme é apresentado na Figura 14 (BOLZANI, 2023).

Figura 14 Classificação dos sistemas de cultivo de microalgas

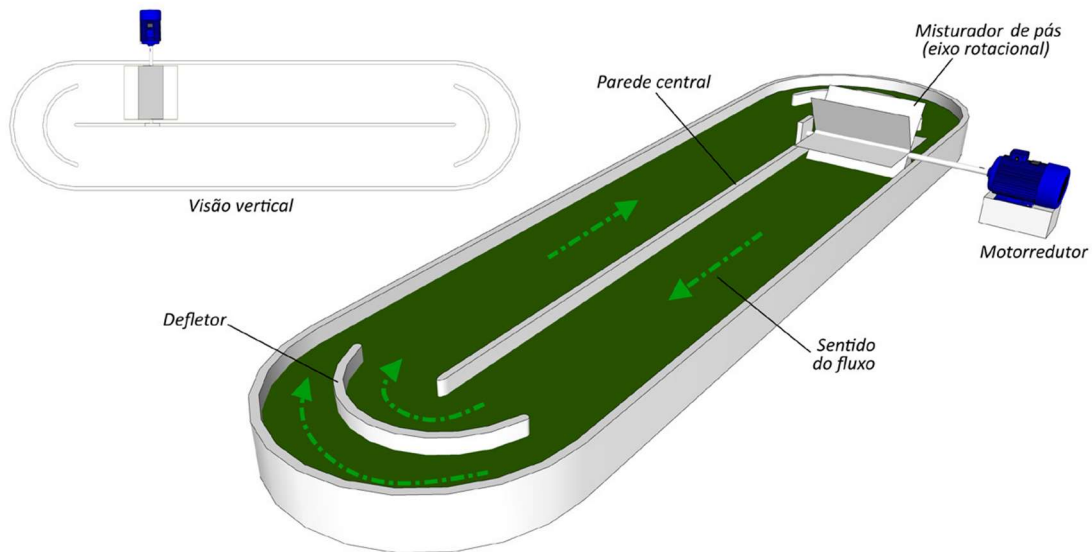


Fonte: Rodrigues, 2022.

3.6.2.1 Sistemas abertos

O sistema aberto do tipo lagoa *Raceway* é o formato mais utilizado em todo o mundo, sendo responsável por cerca de 90% de todo o cultivo de microalgas. A escolha desta tecnologia se deve ao baixo custo despendido para a construção (FERNÁNDEZ et al., 2020). A concentração de biomassa alcançada por meio desta opção de cultivo é em torno de 0,5 g/L com produtividade de 9 a 25 g/m²/dia. Vale notar que os valores de produtividade dependem das condições ambientais e operacionais (MORILLAS-ESPAÑA et al., 2021). A Figura 15 apresenta o esquema de um sistema *Raceway* e suas estruturas principais.

Figura 15 Esquema de um sistema *Raceway* e suas estruturas principais



Fonte: Matthiensen & Michelon, 2022.

O fotobiorreator tipo *Raceway* possui circulação contínua, ou seja, o cultivo é mantido em movimento e as microalgas completam seu ciclo de crescimento até chegar na densidade desejada. A circulação do meio de cultura é feita por meio de pás giratórias – do termo em inglês *paddle wheels* – em aço inox, fixadas em um eixo rotacional movido por um motor elétrico. A estrutura do fotobiorreator pode ser construída em alvenaria, fibra de vidro, policloreto de vinila (PVC) e entre outros (MATTHIENSEN; MICHELON, 2022).

Segundo RAYEN et al., (2019), a profundidade do sistema *Raceway*, usualmente, encontra-se entre 12 e 40 cm e a maior eficiência da incidência solar no sistema ocorre entre 12 e 15 cm de profundidade. No entanto, com a diminuição da profundidade, pode ser necessário aumentar da largura e/ou comprimento do sistema, causando assim uma perda maior por evaporação. Ainda de acordo com os autores, a agitação criada pelas pás giratórias cria um fluxo turbulento na cultura com uma velocidade em torno de 0,15 e 0,4 m/s. Esse fluxo turbulento é importante para manter a cultura homogênea e assim gerar uma penetração eficiente da luz do sol na lâmina d'água potencializando a fotossíntese, além de evitar a sedimentação das células no fundo do sistema.

Tabela 3 Eficiência de remoção de compostos do efluente por sistemas de cultivo de microalgas

Parâmetro x Eficiência de remoção	Sistema aberto	Sistema fechado
DQO	86%*	65-70%****
Nitrogênio total	93%*	99%***
Fósforo total	83%*	-
NH₄	96%**	98-99%****
PO₄³⁻	71%**	69-77%****

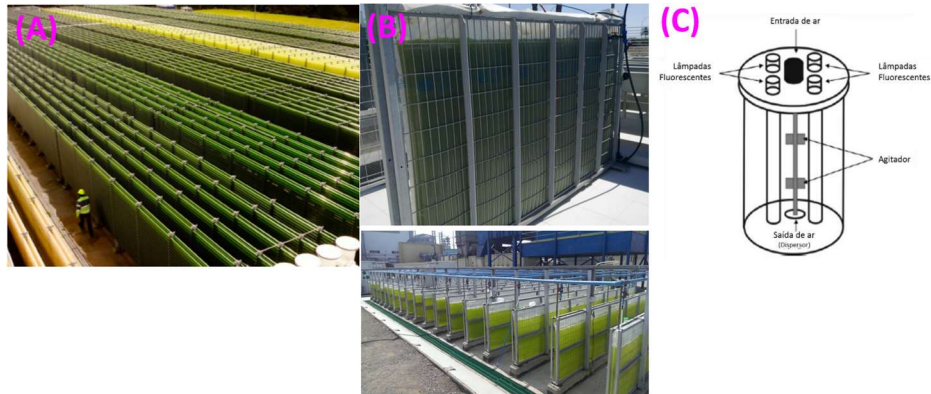
*Kim et al., 2014; **Mantovani et al., 2020; ***Heistad e Heidorn, 2020; ****Mendonça et al., 2018.

3.6.2.2 Sistemas fechados

O fotobiorreatores possuem uma alta produção de biomassa e esse resultado é obtido em função do rigoroso controle ambiental, que evita a contaminação do cultivo, além da melhor condição de gerenciamento de fatores como a troca gasosa (O₂ e CO₂), pH, temperatura, redução de evaporação e entre outras. No entanto, esses sistemas possuem um custo elevado de investimento, operação e manutenção e, podem ser até 10 vezes mais caros do que o sistema aberto com o mesmo volume de produção (RODRIGUES, 2022; VIANA, 2020).

Dentre os sistemas fechados mais utilizados atualmente, os tipos mais comuns são: os fotobiorreatores tubulares, os fotobiorreatores de painel plano e os reatores fermentativos, sendo o formato tubular o difundido (RODRIGUES, 2022). A Figura 16, apresenta os exemplos de sistemas fechados.

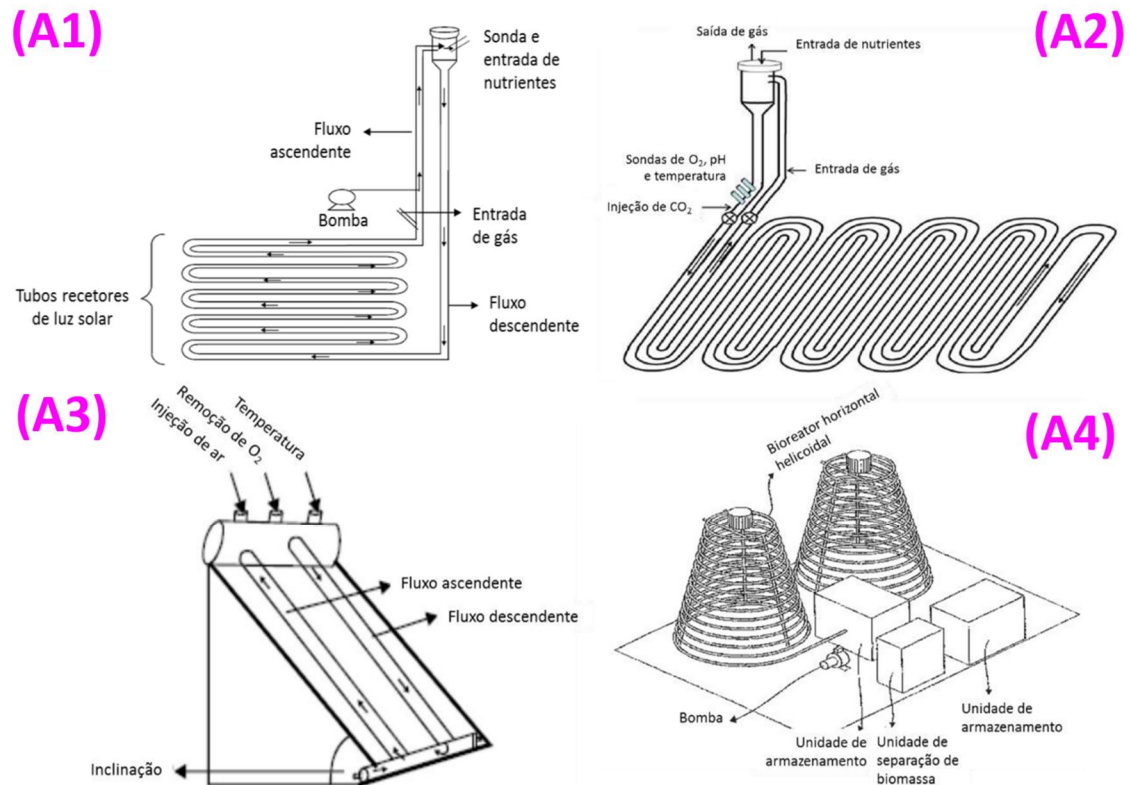
Figura 16 Tipos de fotobiorreatores tubulares: (A) fotobiorreator tubular horizontal, (B) reator de painel plano e (C) reator fermentador



Fonte: Adaptado de Ación (2017) e True algae (2023).

Segundo Ación et al., (2017b) e Bolzani (2023), estes sistemas geralmente são construídos de tubos de vidro ou de cloreto de polivinila (PVC), ou ainda de polimetilmetacrilato (acrílico). Em relação a distribuição do fluxo, os fotobiorreatores tubulares podem ser de forma vertical, horizontal, inclinada ou em espiral, onde a cultura circula através do bombeamento ou por correntes de ar injetadas no sistema. A Figura 17 apresenta as disposições dos fotobiorreatores tubulares.

Figura 17 Representação esquemática dos fotobiorreatores tubulares: horizontal com distribuição vertical (A1), horizontal com distribuição horizontal (A2), inclinado (A3) e helicoidal (A4)



Fonte: Adaptado de Santos, 2017.

Os fotobiorreatores tubulares podem ser ainda do tipo horizontal, vertical e em forma α . O tipo horizontal pode ser dividido em 4 formas, são elas: vertical, horizontal, inclinado e helicoidal. A escolha do método de cultivo de microalgas é baseada em diferentes critérios para obter o melhor rendimento da biomassa, sendo assim, cada forma de cultivo irá possuir vantagens e desvantagens, conforme o Quadro 4 (SANTOS, 2017).

Quadro 4 Tipos de cultivo de microalgas - vantagens e desvantagens

Tecnologia de cultivo	Vantagens	Limitações
Lagoa aberta (Raceway)	Facilidade na construção e operação; sistema mais econômico; elevada capacidade de produção	Baixa condição de controle da cultura; limitada a algumas espécies; suscetível a contaminação; baixa produtividade; dificuldade de produção por longos períodos de tempo; necessidade de uma elevada área de terreno
Reator tubular vertical	Compactos; elevada área de transferência de massa; baixo consumo de energia;	Elevada refração da luz incidente; diminuição da área de iluminação no aumento de escala
Reator tubular horizontal	Boa produtividade de biomassa; elevadas áreas de iluminação; adequado para culturas exteriores	Pequena área de transferência de massa; suscetível a foto inibição; dificuldade no controle de temperatura; necessidade de elevada área de terreno
Reator de painel plano	Elevadas áreas de iluminação; adequado para culturas exteriores; boa produtividade de biomassa; fácil manutenção, baixa acumulação de oxigênio	Dificuldade de aumento de escala; dificuldade de controle de temperatura
Fermentador	Facilidade de manter ótimas condições de cultivo; prevenção de contaminação; obtenção de elevadas concentrações de biomassa	Custo e disponibilidade de matéria-prima; competição pela matéria-prima com outras tecnologias de produção de combustíveis

Fonte: Adaptado de Santos, 2017.

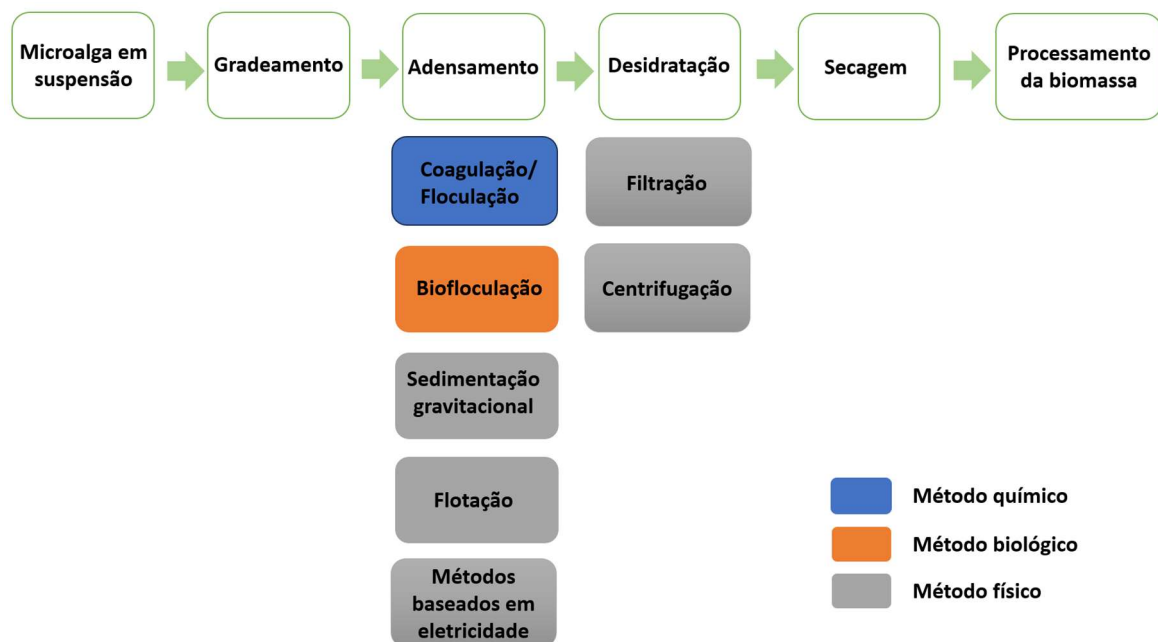
3.6.3 Colheita

A colheita da biomassa de microalga requer uma tecnologia eficiente de separação líquido-sólido. Dentre os desafios a serem superados em função das características das microalgas, estão: o tamanho da célula da microalga, que pode variar de 3 a 50 μm de diâmetro, a pequena concentração de biomassa (0,5 a 10 g/L), a densidade e gravidade específica e a carga superficial que é eletronegativa (-40 mV) (GRIMA et al., 2003; MUYLAERT et al., 2017; VIANA, 2020).

Dentre os métodos amplamente utilizados para a colheita da biomassa, a floculação, a sedimentação por gravidade, a filtração, a ultra filtração, a flotação, ou uma combinação entre elas (CRUZ, 2019; MOHAN et al., 2019). Em relação a produtividade, cada método possui um rendimento que é medido através do percentual da concentração de matéria seca, por exemplo, a sedimentação rende de 0,1 a 3%, a filtração de 2 a 27%, a centrifugação de 10 a 22% de concentração (AMARO et al., 2017).

Segundo Barros et al., (2015), a colheita da biomassa pode ser realizada em duas ou uma etapa, sendo elas: o adensamento da biomassa e posterior desidratação ou apenas o processo de concentração. Ainda de acordo com o autor, a colheita normalmente envolve processos mecânicos, químicos, biológicos ou elétricos, conforme demonstrado na Figura 18.

Figura 18 Diagrama dos métodos de adensamento e desidratação da biomassa



Fonte: Autor, 2024.

A escolha do melhor método para a colheita, leva em consideração a capacidade de produzir uma alta concentração de biomassa, baixo custo operacional, baixo custo energético e de manutenção (CRUZ, 2019). Cada método possui

vantagens e desvantagens, assim o Quadro 5 apresenta a comparação dos principais métodos de colheita.

Quadro 5 Métodos de colheita de microalgas

Método	Tipo	Processo	Vantagens	Desvantagens
Base química	Floculação e Coagulação Química	Aplicação de Sulfato de alumínio e/ou Cloreto férrico	Confiabilidade	Inibição da atividade metanogênica específica de bactérias metanogênicas e acetogênicas alimentadas com lodo de águas residuais. Aumento da captação de metais pesados e podendo causar deficiência de fósforo nas plantas.
Base mecânica	Centrifugação	Centrífugas de disco do tipo bico	Rápido, confiável, com alto teor de sólidos	Intensivo em energia, alto custo de investimento e operação
	Filtração tangencial	Filtragem por membranas de fluxo tangencial	Confiável, com alto teor de sólidos	Incrustação de membrana levando a alto custo; requisitos de energia são altos
	Sedimentação por gravidade		Baixo custo	Lento (grande parte da biomassa pode se deteriorar durante o tempo de decantação)
	Flotação por ar dissolvido	Incremento de ar dissolvido	Comprovado em larga escala	Floculantes geralmente necessários, causando problemas na fase de produção/crescimento da biomassa (upstream)
Base elétrica	Eletroforese	As células de algas podem ser concentradas pelo movimento em um campo elétrico	Nenhuma adição química é necessária	Os altos requisitos de energia e os custos dos eletrodos; não indicado para larga escala
Base biológica	Autofloculação	Ocorre em altas níveis de pH	Não causa poluição secundária	Pode não ser possível sua aplicação em todas as águas
	Biofloculação	Floculação causada por biopolímeros secretados	Não causa poluição secundária	Condições de luz e temperatura também afetem a biofloculação
	Floculação microbiana	Adição de micróbios floculantes	Não causa poluição secundária	Condições de cultivo (culturas imobilizadas)

Fonte: Adaptado de Castro, 2020.

3.6.4 Sedimentação

O processo de sedimentação utiliza a força gravitacional para separar a parte líquida da parte sólida, mas esse processo pode ser extremamente lento, principalmente se a diferença de densidade ou tamanho da partícula for pequeno. A velocidade de sedimentação pode ser calculada através da Lei de Stokes, onde utiliza-

se a densidade e o diâmetro da microalga, a densidade, temperatura e viscosidade do meio líquido (AMARO et al., 2017).

Peperzak (2003), avaliou a sedimentação de 24 tipos de microalgas autotróficas com tamanho variando entre 10 e 1000 μm e o resultado apresentou uma sedimentação com variação de 0,4 a 2,2 m/dia. O processo de sedimentação pode mudar entre diferentes espécies ou ainda pode ocorrer diferença entre as mesmas espécies. Os principais fatores que influenciam o processo são a intensidade de luminosidade, deficiência nutricional e a idade das células (AMARO et al., 2017).

3.6.5 Centrifugação

Esse método é considerado o mais caro em comparação aos demais em função do alto consumo de energia elétrica, em contrapartida, pode-se recuperar de 80 a 90% da biomassa de microalgas de 2 a 5 minutos (CRUZ et al., 2019; PRAGYA et al., 2013). Normalmente, esse método é utilizado para a produção de commodities de alto valor agregado, como por exemplo, ácidos graxos altamente insaturados e produtos farmacêuticos (BARROS et al., 2015).

A utilização da centrifugação como único método para colher a biomassa consome 20 kWh/m³, pois é necessário trabalhar em baixa vazão (0,94 L/min), para obtenção de 94% de concentração de biomassa (BARROS et al., 2015). Segundo Gerardo et al., (2015), concentração de biomassa de 150 vezes e eficiência de colheita superior a 95% possuem uma viabilidade técnica, o que demonstra que a centrifugação está próxima de alcançar o potencial.

3.6.6 Flocculação e coagulação química

O processo de flocculação é uma técnica de baixo custo. Emprega-se normalmente em processos de remoção de partículas coloidais presentes na água ou no esgoto e pode ser utilizada como uma etapa na colheita de diferentes tipos de microalgas (ESTEVES et al., 2020). As células das microalgas possuem carga negativa o que dificulta a agregação das células em suspensão, portanto, a adição de floculante – como cátion multivalente ou polímero catiônico – neutraliza a carga superficial da célula facilitando o aumento das partículas de microalga (GRIMA et al., 2003).

A coagulação utiliza coagulantes químicos, geralmente inorgânicos, para formar uma matéria suspensa, coloidal e dissolvida para processamento subsequente (AMARO et al., 2017). Para realizar a floculação ou coagulação, normalmente utiliza-se sais metálicos multivalentes, como por exemplo o cloreto férrico (FeCl_3), o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) ou o sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) (GRIMA et al., 2003). O tempo necessário para realizar os processos são diferentes, enquanto a coagulação ocorre em 10 segundos, a floculação geralmente acontece entre 20 e 45 minutos (AMARO et al., 2017).

3.6.7 Autofloculação e biofloculação

A autofloculação ou biofloculação ocorre de forma espontânea com as microalgas sem que seja necessário utilizar floculantes ou coagulantes (CASTRO et al., 2020). O fenômeno ocorre em função do aumento do pH (8,5 e 9), que pode ser ocasionado pelo consumo de CO_2 no processo de fotossíntese, pela coprecipitação de sais de magnésio e cálcio – esses sais possuem carga superficial positiva – e pela interação entre as próprias células das microalgas (ESTEVES et al., 2020).

3.6.8 Filtração

O processo de filtração é baseado na separação líquido-sólido por filtro semipermeável que funciona como uma barreira para reter a biomassa de microalgas (ESTEVES et al., 2020; GERARDO et al., 2015). Existem diferentes métodos para realizar a filtração, dentre eles, os mais comuns são: a microfiltração, filtração a vácuo, filtração pressurizada, ultrafiltração, filtração de fluxo tangencial e filtração sem saída ou *dead-end* (PRAGYA, 2013).

A escolha do método mais adequado é baseada no volume a ser processado e no tamanho das células de microalgas. O método de filtração *dead-end* é eficiente para a retenção de microalgas a partir 70 μm de diâmetro, em contrapartida, a microfiltração é capaz de reter células de 0,1 a 10 μm de diâmetro. O consumo de eletricidade é um outro ponto importante, por exemplo, a filtração por vácuo para a espécie *Coelastrum proboscideum* consumiu 5,9 kWh/m^3 de biomassa, já a filtração por pressão com peneira cilíndrica rotatória consome 0,3 kWh/m^3 de biomassa (BARROS et al., 2015; GRIMA et al., 2003).

3.6.9 Flotação

A técnica de flotação aplicada às microalgas ocorre com a inserção de microbolhas de ar no cultivo com posterior adesão das bolhas em partículas sólidas. Após ocorrer a retenção das partículas, elas são levadas para superfície do líquido (CRUZ et al., 2019). Atualmente, existem quatro formas de flotação, são elas: flotação por ar dissolvido (diâmetro das bolhas menor do 100 μm), flotação por ar disperso (diâmetro das bolhas entre 100 e 1000 μm), flotação eletrolítica (eletrólise) e flotação por ozônio (BARROS et al., 2015).

A atração das bolhas de ar com as partículas depende de vários fatores, tais como o tamanho da partícula, a probabilidade de colisão e a probabilidade de adesão. A redução do tamanho da partícula aumenta a chance de a partícula ser enviada para a superfície, em contrapartida, a diminuição do tamanho da partícula diminui a probabilidade de as células colidirem com as bolhas de ar (GERARDO et al., 2015).

O método de flotação pode ser combinado com a técnica da floculação, utilizando-se coagulantes ou surfactantes como $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, Chitosan e entre outros. A eficiência do processo de flotação é variável, podendo ser de 95-99% para a microflotação com o uso de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ em pH 5 para a espécie de microalga *Dunaliella salina* ou de 81% para a flotação de ar dissolvido com uso do Chitosan em pH para o cultivo da *C. zofingiensis* (GERARDO et al., 2015; MUYLAERT et al., 2017).

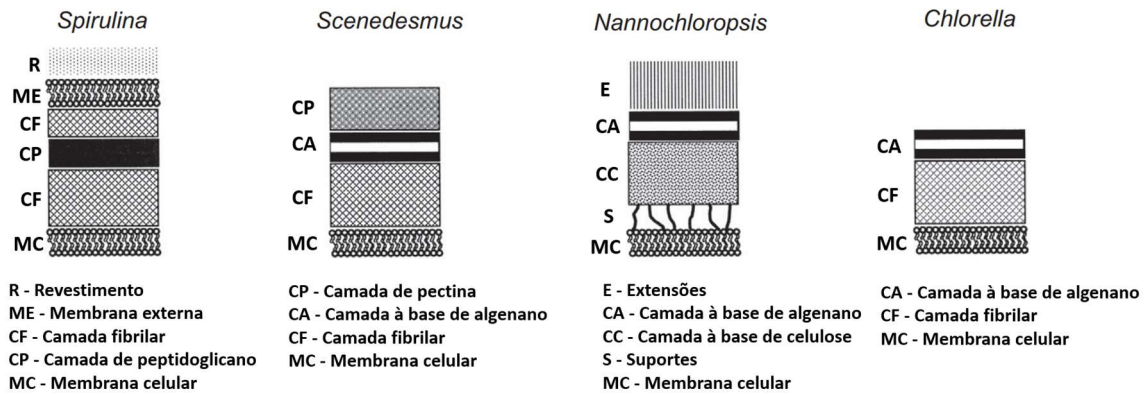
3.6.10 Rompimento e extração

O rompimento das células é considerado uma etapa de pré-tratamento, cujo objetivo é aumentar a recuperação de produtos em processos *downstream* – como por exemplo, a extração – de uma biorrefinaria de microalgas (D'HONDT et al., 2017). Os métodos para realizar o rompimento celular são divididos em mecânicos e não mecânicos e ainda podem utilizar biomassa úmida ou seca (MENEGAZZO, 2017; PEREIRA et al., 2012).

O produto resultado da etapa de pré-tratamento possui duas formas a depender do método escolhido, sendo elas uma pasta concentrada ou um pó seco. Em ambas as formas existem desafios a serem superados, para o estado de pó seco, a demanda de energia inviabiliza o processo, para a pasta concentrada, a eficiência é prejudicada pela dificuldade na transferência de massa (NASCIMENTO JR., 2021). A

eficiência do método também depende da espécie de microalga, da composição e da morfologia da membrana celular, conforme a Figura 19 (MENEGAZZO, 2017).

Figura 19 Morfologia da membrana celular das espécies *Spirulina*, *Scenedesmus*, *Nannochloropsis* e *Chlorella*



Fonte: Adaptado de D'hondt et al., 2017.

Os métodos de ruptura da parede celular podem ser utilizados de maneira separada ou combinada, para aumentar a eficiência do rompimento. O método mecânico de rompimento quebra a parede celular de forma genérica e brusca, enquanto o método não mecânico rompe a estrutura celular de forma específica e suave (MACHADO JR., 2014).

Ao considerar a escala industrial de produção, os métodos mecânicos são mais vantajosos ao comparar com os não mecânicos, pois são rápidos, passíveis de monitoramento e não geram um fluxo de resíduos para o meio ambiente. No entanto, o seu consumo energético é mais elevado (HU; BASSI, 2020; MENEGAZZO, 2017). O Quadro 6 apresenta de forma resumida as vantagens e desvantagens das tecnologias disponíveis de ruptura celular.

Quadro 6 Técnicas de ruptura celular - vantagens e desvantagens das tecnologias disponíveis

Técnica	Vantagens	Desvantagens
Mecânica		
Moinho de esferas	Alta eficiência de ruptura em apenas uma única passagem; alta concentração de biomassa; facilidade no controle da temperatura de reação; facilidade no escalonamento (<i>scale up</i>)	Alta demanda de eletricidade; calor pode ser gerado e com isso danificar moléculas bioativas;
Homogeneização de alta pressão	Boa eficiência de ruptura; facilidade de escalonamento	Baixo carregamento de biomassa; liberação não seletiva intramolecular
Ultrassom	Eficiência superior de ruptura; tempo curto de processamento; baixa toxicidade, operação simples	É necessário controlar a temperatura; alta demanda de eletricidade
Campo elétrico pulsado	Pode ser combinado com outros métodos de pré-tratamento; facilidade de escalonamento	É necessário adicionar os processos de pré-lavagem e deionização; alta demanda de eletricidade
Micro-ondas	Alta eficiência de ruptura; facilidade de escalonamento; requer uma quantidade pequena de solvente	Controle de temperatura; necessidade de redesenho para reatores grandes
Não mecânico		
Química	Maior seletividade; baixo consumo de energia	Geração de resíduos químicos; contaminação de produtos; desnaturação de proteínas e degradação de pigmentos
Enzimática	Alta seletividade; condições moderadas de processamento; não possui problemas de corrosão; facilidade no aumento de escala	Alto custo das enzimas; tempo de processamento; exige manter condições estáveis de processamento

Fonte: Adaptado de Hu & Bassi (2020) e Rocha (2023).

3.6.10.1 Moinho de esferas

O moinho de esferas é constituído por uma câmara fechada que contém esferas e que durante uma forte agitação em que é submetida, as esferas colidem entre si e com a biomassa das microalgas, gerando assim o rompimento das células. A câmara pode ter formato quadrado ou cilíndrico, as esferas podem ser de vidro, cerâmica, plástico, ferro ou inox e ainda possuírem tamanhos diferentes (HU; BASSI, 2020).

A eficiência de ruptura relacionada a esta tecnologia de pré-tratamento possui muitas variáveis, como por exemplo, a espécie das microalgas, pressão utilizada no moinho, velocidade do agitador, tempo de residência da biomassa no equipamento, tamanho das esferas, entre outras. A eficiência de ruptura consequentemente irá variar, no entanto, estudos reportam valores entre 32 e 42% de eficiência com um consumo de energia de $2,9 \text{ MJ kg}^{-1}$ de biomassa seca para a espécie *Chlorella vulgaris* (ROCHA, 2023; VIEIRA, 2019).

3.6.10.2 Homogeneização sob alta pressão

A homogeneização sob alta pressão ou prensa francesa, tem como premissa de funcionamento a ruptura de células através de força de cisalhamento hidráulica, que é gerada após a biomassa, sob alta pressão, ser pulverizada para dentro da câmara através pequenos orifícios (MENEGAZZO, 2017). Essa tecnologia apresenta uma boa eficiência na ruptura de células e facilidade para o escalonamento, apesar das limitações, como o baixo carregamento de biomassa no equipamento (HU; BASSI, 2020).

A eficiência de ruptura, assim como em outras técnicas, dependerá de muitos fatores, conforme mencionado na anteriormente. Estudos apontam que a utilização desta tecnologia tem uma eficiência 90% de rompimento para a espécie *Desmodesmus sp.* e um consumo de energia de $82,7 \text{ MJ kg}^{-1}$ de biomassa seca e 91% de rompimento para a espécie *Haematococcus pluvialis* (ROCHA, 2023).

3.6.10.3 Ultrassom

Essa técnica é baseada na ação de ondas ultrassônicas dissipadas em meio aquoso com ciclos variados de baixa e alta pressão que, durante a baixa pressão, são produzidas microbolhas de vácuo e no decorrer da alta pressão, essas microbolhas

colidem com biomassa quebrando a estrutura das células e conseqüentemente libera os compostos intracelulares (MENEGAZZO, 2017).

Segundo Rocha (2023), o consumo de energia demandado para obter 1 kg de biomassa seca foi de 1.400 MJ para o rompimento da espécie *Tetraselmis suecica* e *Chlorella sp.*, utilizando uma potência de 1.000W e frequência de 20 kHz. A eficiência observada foi de 99% para a *Tetraselmis suecica* e de 75% para a *Chlorella sp.* O choque entre as microbolhas e as células é conhecido como cavitação ultrassônica e a sua maior intensidade ocorre em baixa frequência, entre 18 e 40 kHz.

3.6.10.4 Campo elétrico pulsado

O rompimento celular utilizando essa técnica ocorre com a passagem de corrente elétrica na forma de pulsos de alta intensidade com curta duração por meio de dois eletrodos. A corrente elétrica atravessa a célula que está situada entre os eletrodos e com o decorrer do tempo a membrana celular sofre danos (JAESCHKE, 2019). O consumo de energia para a extração de lipídios da espécie *Auxenochlorella protothecoides* foi de 1,5 MJ kg⁻¹ de biomassa seca e concentração de 10% (m v⁻¹), ou seja, essa técnica possui um baixo consumo de energia (ROCHA, 2023).

3.6.10.5 Micro-ondas

O funcionamento dessa técnica ocorre pela geração de calor em decorrência da irradiação de micro-ondas, conseqüentemente acontece o aumento da pressão interna da célula gerando assim o rompimento. O rompimento celular via micro-ondas é fácil de operar, mesmo sendo necessário uma pequena quantidade de solvente no processo, no entanto, é importante melhorar a tecnologia, principalmente no projeto do reator (HU; BASSI, 2020).

Em relação a eficiência de rompimento, ao utilizar a espécie *Scenedesmus quadricauda* para a extração de lipídios, o resultado encontrado foi de 49% de rompimento, utilizando uma potência de 600 W por 8 minutos (ROCHA, 2023). Outro estudo reportou a eficiência de 33,7% de rompimento utilizando uma mistura de espécies de microalgas, o que representou o melhor desempenho dentre os diferentes métodos para extração de lipídios selecionados (MENEGAZZO, 2017).

3.6.10.6 Química

O rompimento da parede celular com uso de substâncias químicas pode ocorrer de diferentes maneiras, pois a forma de desintegrar a estrutura da célula depende do tipo de composto químico que será utilizado e da composição estrutural da célula. Por exemplo, o uso de antibiótico inibe a produção de componentes da membrana celular, os solventes dissolvem ou aumentam a estrutura porosa da microalga. Dentre os compostos químicos mais comuns para esse tipo de pré-tratamento, existem os antibióticos, agentes quelantes, agentes caotrópicos, detergentes, solventes, hipocloritos, ácidos e bases (ROCHA, 2023).

Para a extração do lipídio utilizando o solvente n-hexano após a ruptura via homogeneização sob alta pressão, com razão 2:1 de solvente:biomassa por dois estágios, foi possível recuperar 70% dos lipídios com a microalga *Nannochloropsis* sp. A utilização de solvente deve atender algumas premissas básicas para além da obtenção de um bom resultado de recuperação dos lipídios, são elas: imiscibilidade em água, seletividade, facilidade de recuperação, baixo custo e não nocivo à saúde humana e ao meio ambiente (NASCIMENTO JR., 2021).

3.6.10.7 Enzimática

O método consiste na degradação de uma ligação química específica através da ação enzimática, podendo utilizar uma ou mais enzimas. Em função da porosidade da parede celular é possível acessar os produtos intracelulares sem romper a parede, o que torna essa técnica muito interessante a partir do ponto de vista da seletividade dos compostos de interesse (CASOTTO, 2022). As enzimas mais utilizadas são: celulases, pectinases, xilanases, lisozimas, amilase, protease neutra e papaína (ROCHA, 2023).

4 METODOLOGIA

4.1 VISÃO GERAL

Para a criar a proposta da rota de produção de diesel verde, o ponto de partida foi buscar propor soluções para dois problemas do saneamento básico no Brasil, que são os déficits no tratamento dos resíduos sólidos urbanos e no tratamento do esgoto doméstico. Posteriormente, foi realizado um estudo para entender o cenário atual de cada problema selecionado dentro do país, quais são as tecnologias utilizadas atualmente e quais são as opções tecnológicas avançadas que ainda não existem ou existe em escala piloto ou experimental no Brasil e perspectivas futuras em relação ao desenvolvimento tecnológico para tratar cada problema.

Para os resíduos sólidos urbanos, foi constatado que a destinação final é feita em lixões e aterros sanitários, salvo, em alguns estados em que há uma destinação consolidada de frações dos resíduos que são encaminhadas para a compostagem (resíduos de alimentos e poda) e reciclagem (papel, plástico, madeira, metais, vidro). O RSU possui um potencial energético grande e não aproveitado de forma extensiva no país, essa verificação abre caminho para a implementação de novas tecnologias, principalmente, pelo contexto global da transição energética e redução incisiva das emissões de CO₂.

Dentre as possibilidades de recuperação energética através do uso do RSU, é possível destacar as técnicas de coprocessamento em fornos de clínquer, incineração, combustão, liquefação, pirólise, gaseificação, digestão anaeróbia e fermentação. No Brasil, as tecnologias de pirólise e gaseificação ainda são incipientes, o que fomenta o aprofundamento em estudos sobre os temas. Nesse sentido, foi escolhida a gaseificação como forma de entender a aplicação e os impactos ambientais da adoção dessa tecnologia como uma opção para o tratamento do RSU.

Para a fundamentação da tecnologia de gaseificação, foi selecionada para este estudo a Usina Termoquímica de Geração de Energia de Boa Esperança, instalada no município de Mauá – SP. A planta experimental da Carbogas Energia tem como capacidade mínima de geração 1MWh e máxima de 1,5 MWh de eletricidade. A Usina converte os resíduos sólidos urbanos em combustível derivado de resíduo (CDR), que por sua vez alimenta um reator termoquímico de leito fluidizado para a

produção do gás de síntese e o gás combustível é consumido por uma caldeira a vapor para fins de geração térmica e elétrica.

Os dados utilizados para o dimensionamento do pré-tratamento do RSU e gaseificação tem como base a tese e os artigos de Ferreira (2021), cujo objetivo foi analisar teoricamente e experimentalmente os parâmetros operacionais da Usina supracitada.

Para o tratamento do esgoto doméstico, a escolha da técnica teve como base dois pilares: o primeiro, é o fato de que os sistemas utilizados no país possuem um foco na remoção do carbono do efluente e essas mesmas técnicas possuem uma eficiência razoável na remoção dos compostos de nitrogênio e fósforo, e o segundo pilar é a importância desses compostos no contexto da economia circular e da transição energética.

O nitrogênio e o fósforo são compostos integrantes dos ciclos biogeoquímicos, por sua vez, são monitorados desde 2009 pelo *Stockholm Resilience Center* e atualmente possuem um alto risco de escassez. Vale ressaltar que, esses dois compostos são fundamentais para a agricultura, pois são a base para a produção de fertilizantes.

Assim, foi escolhida a tecnologia de cultivo aberto de microalgas – formato *Raceways*. A escolha deste tipo de cultivo foi ocasionada pela simplicidade na construção, na manutenção e possui um alto rendimento na remoção dos compostos de nitrogênio e fósforo, além do fato que é a forma que possui um baixo custo de construção em relação aos outros tipos de cultivo de microalgas. Para embasar os aspectos de eficiência de remoção dos contaminantes do efluente foi utilizado o estudo de Paz e Vicente (2017) e Mello (2018), para o processamento da biomassa úmida de microalgas.

Para dimensionar os insumos, os resíduos e os produtos gerados pela proposta da biorrefinaria, utilizou-se o arcabouço científico como base para efetuar os cálculos de acordo com a demanda pré-estabelecida de produção de diesel verde, que é de 100.000 toneladas por ano. A partir desta demanda, foram efetuados os demais cálculos de insumos, resíduos e produtos gerados utilizando regra de três no Microsoft Excel.

A modelagem e a análise dos impactos ambientais, bem como a construção do inventário da biorrefinaria utiliza o método de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), cujos princípios são recomendados pela série NBR ISO 14.040 e 14.044 (2006) da Associação de Normas Técnicas (ABNT) no Brasil. De acordo com essas normas, a metodologia para estudos de ACV é dividida em quatro fases: definição do objetivo e escopo, análise do inventário do ciclo de vida, avaliação do impacto do ciclo de vida e interpretação de resultados.

A primeira fase do estudo de ACV consiste em declarar as aplicações pretendidas, as razões para a realização do estudo e assim o objetivo da ACV é definido de acordo com o objetivo da pesquisa. Posteriormente, ocorre a definição do escopo da ACV que conta com os seguintes aspectos de acordo com a ABNT: sistema de produto, funções do sistema de produto, fronteira do sistema, unidade funcional, procedimento de alocação, método de Avaliação do Inventário do Ciclo de Vida (AICV) e tipos de impactos, interpretação, requisitos dos dados, pressupostos, limitações e revisão crítica.

Na segunda fase, que é a análise do inventário do ciclo de vida (ICV), a condução desse procedimento ocorre de acordo com os objetivos e escopo do estudo, definidos na primeira fase. Depois de definir o esquema tecnológico são realizados os cálculos de balanço de massa e energia, levando em consideração dados da literatura e/ou da base de dados *ecoinvent*, com preferência de origem regional, para que exista uma maior representatividade para realidade do país.

A avaliação do impacto do ciclo de vida, terceira fase, é constituída pela seleção das categorias de impacto. No presente estudo aplicar é aplicada a metodologia *ReCiPe Midpoint (H)*, sendo a mais representativa em escala global com foco nas questões ambientais, tornando-o, o método mais qualificado para este estudo. Ao todo, o método dispõe de 18 categorias de impacto ambiental, sendo elas: acidificação terrestre, depleção da camada de ozônio, depleção de água, depleção de combustíveis fósseis, depleção de recursos minerais, ecotoxicidade em água doce, ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade terrestre, eutrofização de água doce, eutrofização marinha, formação de material particulado, formação de oxidantes fotoquímicos, mudanças climáticas, ocupação de solo agrícola, ocupação de solo, radiação ionizante, toxicidade humana e transformação de solo natural. O presente

estudo pretende trabalhar com as 18 categorias como forma de alcançar uma maior abrangência dos possíveis impactos ambientais da proposta de biorrefinaria.

Por fim, será realizada a interpretação dos resultados obtidos nas fases de análise de inventário e de avaliação de impacto do ciclo de vida. Nesta fase, será verificada a consistência dos resultados do modelo e em caso de inconsistência as etapas anteriores deverão ser revisadas para ajuste, conforme definido na norma ISO 14040.

4.2 ESCOPO DO ESTUDO

A modelagem do ciclo de vida da tecnologia proposta para produzir diesel verde (rota HEFA) parte do óleo extraído de microalgas cultivadas durante a biorremediação de águas residuais urbanas e hidrogênio produzido por gaseificação de resíduos sólidos urbanos. Para o desenvolvimento do presente estudo, foram contemplados para o ICV a tecnologia proposta para o tratamento de águas residuais urbanas, que inclui as etapas de biorremediação do efluente a partir do cultivo de microalgas em sistemas abertos – Raceways –, floculação e centrifugação do cultivo, rompimento celular e extração e aproveitamento dos lipídios para produção de diesel verde via hidroximetilação. Nessa tecnologia, o hidrogênio demandado para hidroximetilar os triglicerídeos do óleo, extraído das microalgas, será produzido a partir da gaseificação de resíduos sólidos urbanos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO

Para o dimensionamento da biorrefinaria foram utilizados dados da literatura e da base de dados *Ecoinvent* versão 3.8. Foram utilizados dados calculados através do *MS Excel* utilizando regra de três para os parâmetros mencionados conforme demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 Dados de entrada e saída utilizados no software OpenLCA

	Parâmetro	Quantidade	Unidade	Referência
Pré-tratamento do efluente				
Entrada	Eletricidade	2.985.853,28	Kwh/ano	Mundim, 2022
	Esgoto bruto	57.870.000,00	m ³ /ano	Calculado
Saída	Resíduos sólidos	54.769,96	Toneladas/ano	Mundim, 2022
	Transporte dos resíduos sólidos até o aterro	2.190.798,72	Toneladas*km	Mundim, 2022
	Efluente	57.815.230,03	m ³ /ano	Calculado
Raceways				
Entrada	Eletricidade	3.208.891,50	Kwh/ano	Colzi, 2018
	Inóculo Scenedesmus sp.	25,064E14	células/mês	Calculado
	Efluente	57.815.230,03	m ³ /ano	Calculado
Saída	Efluente tratado	57.815.230,03	m ³ /ano	Calculado
Floculação e Centrifugação				
Entrada	Efluente tratado	57.815.230,03	m ³ /ano	Calculado
	Eletricidade	776.000,00	Kwh/ano	Togarcheti, 2017
	Poliacrilamida	289,35	Toneladas/ano	Calculado
Saída	Efluente tratado	57.814.073,72	m ³ /ano	Calculado
	Biomassa de microalga	416.667,00	Tonelada/ano	Calculado

Homogeneização

Entrada	Eletricidade	14.733.720,1203E7	Kwh/ano	Calculado
	Biomassa de microalga	416.667,00	Tonelada/ano	Calculado
Saída	Biomassa rompida	416.667,00	Tonelada/ano	Calculado

Extração

Entrada	Eletricidade	394.875,00	Kwh/ano	Gao, 2013
	Acetato de etileno	19.001,14	Tonelada/ano	Calculado
	Hexano	76.000,03	Tonelada/ano	Calculado
	Biomassa rompida	416.667,00	Tonelada/ano	Calculado
Saída	Óleo de microalga	125.000,00	Tonelada/ano	Calculado
	Biomassa - resíduo	291.667,00	Tonelada/ano	Calculado

Pré-tratamento do RSU

Entrada	Eletricidade	120.338,32	Kwh/ano	Ferreira, 2021
	Calor	64,50	MJ/ano	Ferreira, 2021
	Resíduo sólido urbano	1.253.524,13	Toneladas/ano	Ferreira, 2021
Saída	Combustível derivado de resíduo	686.053,76	Tonelada/ano	Calculado
	Metal não ferroso	65.183,25	Tonelada/ano	Ferreira, 2021
	Alumínio	3.133,81	Tonelada/ano	Ferreira, 2021
	Cobre	3.133,81	Tonelada/ano	Ferreira, 2021
	Vidro	17.549,33	Tonelada/ano	Ferreira, 2021

Gaseificação

Entrada	Combustível derivado de resíduo	686.053,76	Tonelada/ano	Calculado
	Cal	3.302,27	Tonelada/ano	Ferreira, 2021
	Vapor	274.407,83	Tonelada/ano	Ferreira, 2021
Saída	Gás de síntese	1.274.722,93	Tonelada/ano	Ferreira, 2021
	Óxido de alumínio	7.981,57	Tonelada/ano	Ferreira, 2021
	Óxido de magnésio	1.780,62	Tonelada/ano	Ferreira, 2021
	Óxido de sódio	3.053,61	Tonelada/ano	Ferreira, 2021
	Trióxido de enxofre	4.092,31	Tonelada/ano	Ferreira, 2021
Reator Shift				
Entrada	Gás de síntese	1.274.251,94	Toneladas/ano	Calculado
	Água deionizada	20.475,00	Toneladas/ano	Calculado
Saída	Gás de síntese	1.241.943,35	Toneladas/ano	Calculado
Selexol				
Entrada	Dimetil éter etileno glicol	90.590,642	Toneladas/ano	Calculado
	Gás de síntese	1.241.943,35	Toneladas/ano	Calculado
Saída	CO ₂	887.140,03	Toneladas/ano	Calculado
	H ₂ S	3.669,64	Toneladas/ano	Calculado
	Gás de síntese	351.133,67	Toneladas/ano	Calculado
Hidrodessoxigenação (HDO)				
Entrada	Eletricidade	3.875.000,00	Kwh/ano	Calculado
	Óleo de microalgas	125.000,0	Toneladas/ano	Calculado

	Molibdênio	1.687,5	Toneladas/ano	Calculado
	Níquel	1.687,5	Toneladas/ano	Calculado
	Vapor	400,0	Toneladas/ano	Calculado
	Gás de síntese	4.550,0	Toneladas/ano	Calculado
	Água deionizada	2.500,0	Toneladas/ano	Calculado
Saída	Diesel verde	100.000,00	Toneladas/ano	Calculado
	Nafta	6.250,00	Toneladas/ano	Calculado
	Propano	15.000,00	Toneladas/ano	Calculado

Fonte: Autor, 2024.

5.2 ELABORAÇÃO DO LAYOUT DA BIORREFINARIA

Para realizar a elaboração da proposta da biorrefinaria cujo objetivo principal é produzir diesel verde, foi definido que o processo de hidrocessamento de ésteres e ácidos graxos (SPK-HEFA) é o mais adequado, uma vez que, o óleo utilizado é oriundo da biomassa de microalgas. A rota HEFA é aprovada pelo *American Society for Testing and Materials* (ASTM), o que certificada que o combustível cumpre às normas para uso comercial.

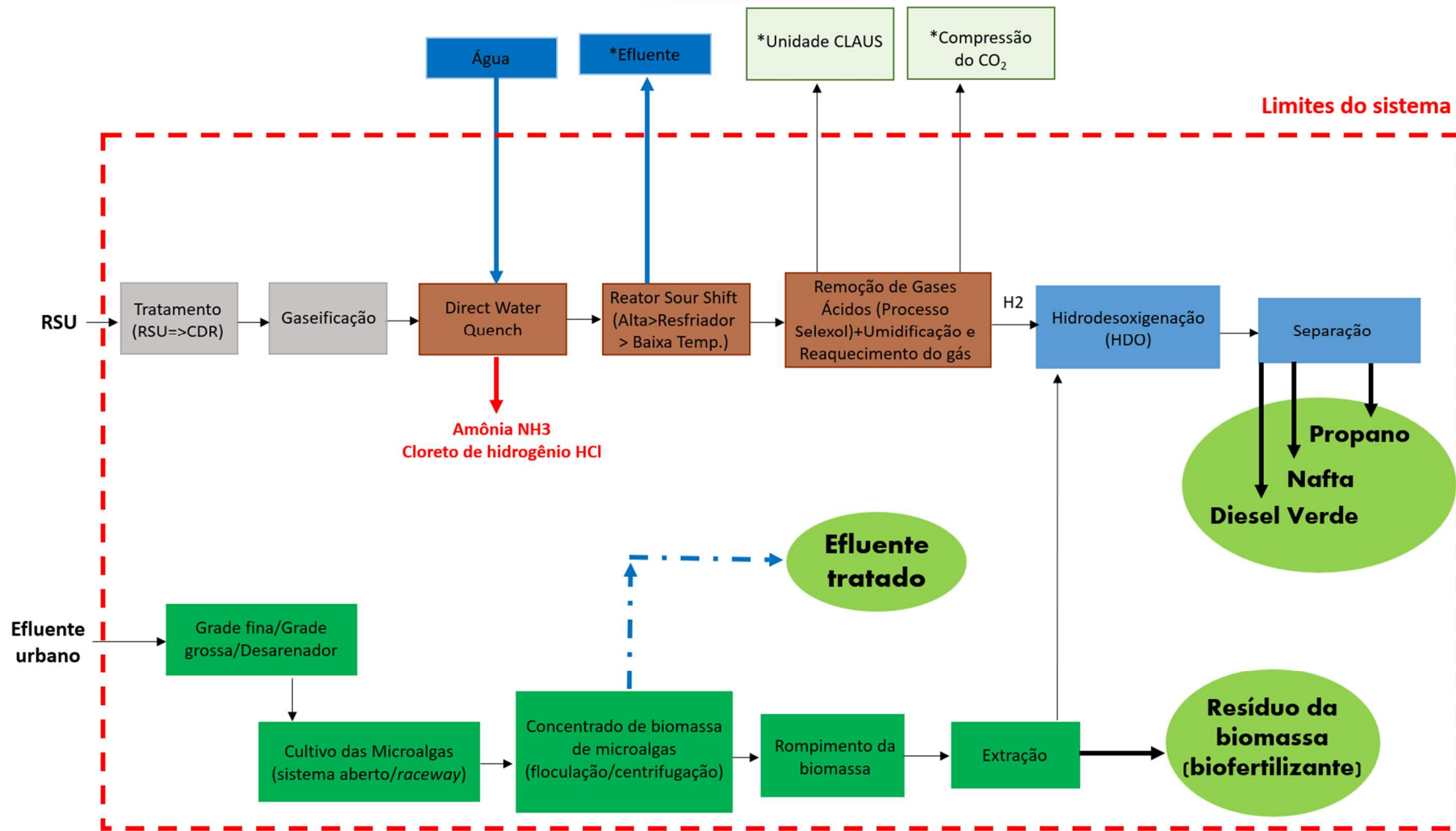
Para realizar o hidrocessamento do óleo vegetal, faz-se necessário o uso de hidrogênio, além do uso de catalisadores que irão acelerar as reações nos reatores. A origem do hidrogênio utilizado na proposta é do gás de síntese, gás esse que é produzido através da gaseificação do combustível derivado de resíduos (CDR), o CDR é derivado dos resíduos sólidos urbanos que já passaram por reciclagem.

A origem do óleo a ser hidrocessado é oriundo da biorremediação do esgoto doméstico com uso de microalgas em sistema aberto do tipo Raceways, onde o efluente bruto irá receber uma pré-tratamento antes de prosseguir para as Raceways. Após a etapa de cultivo, a biomassa será concentrada por floculação e posteriormente irá passar por centrifugas para remover a umidade. Na sequência, a biomassa segue para os processos simultâneos de rompimento e extração via homogeneização de alta pressão com uso de solventes (hexano e acetato de etila), por fim, o óleo é encaminhado para o hidrotreamento.

Em relação a ACV, o sistema de produto e a fronteira do sistema foi delimitada como sendo do portão ao portão, conforme é demonstrado na Figura 20. A fronteira considera as etapas de recebimento das matérias-primas, no caso, o esgoto urbano e os resíduos sólidos urbanos até a produção do diesel verde. A unidade funcional do sistema é a produção de 100.000 toneladas de diesel verde por ano. Para o estudo não foram realizadas as etapas de alocação e normalização dos resultados.

A compilação do inventário e cálculo dos impactos ambientais são realizados com o auxílio do software *OpenLCA*, programa especializado em avaliação do ciclo de vida, desenvolvido pela consultoria alemã *GreenDelta* e disponibilizado de forma gratuita na internet. Os balanços de massa e energia foram realizados com o auxílio do programa *Microsoft Excel*.

Figura 20 Diagrama caixa da proposta de biorrefinaria



Fonte: Autor, 2024.

5.3 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA

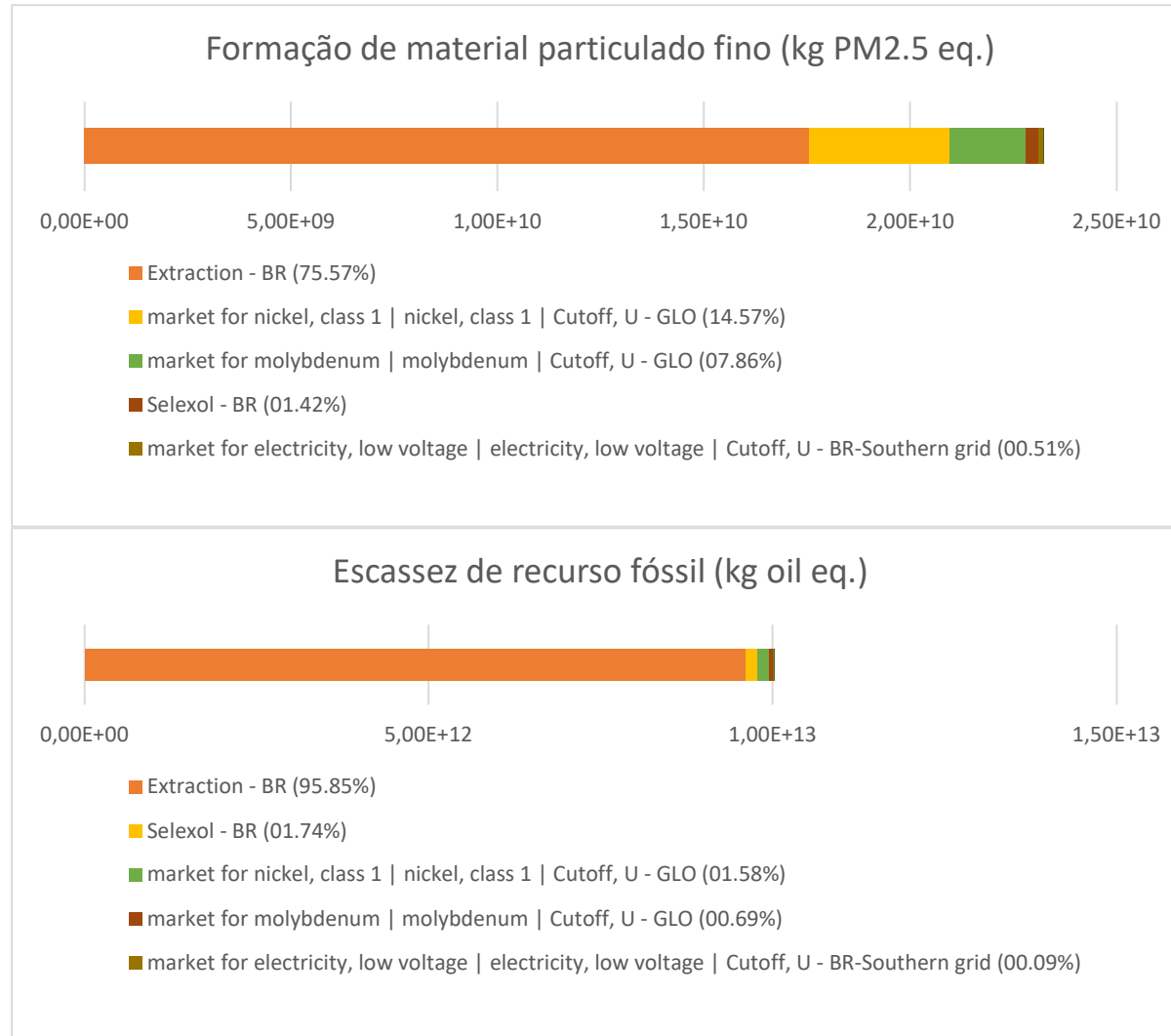
Os resultados modelados pelo software *OpenLCA* utilizando método *Recipe Midpoint* (H) e suas dezoito categorias de impacto ambiental serão apresentados a seguir. Os impactos avaliados no *Midpoint* refletem os potenciais efeitos – positivos ou negativos – no meio ambiente que irão ocorrer devido as emissões da proposta da biorrefinaria.

Para a análise da modelagem serão considerados os resultados da árvore de contribuição da biorrefinaria, que refletem quais são os processos da biorrefinaria e quais são as cadeias produtivas dos insumos utilizados na proposta contribuem para os impactos ambientais. Esse nível de detalhamento é importante para a compreensão geral da proposta e para investigar possíveis inconsistências nas cadeias produtivas consideradas pelo programa.

Outro ponto considerado nos resultados é a análise por grupos de tecnologias utilizadas na proposta da biorrefinaria. A separação por grupos que tem como objetivo identificar qual tecnologia possui a maior contribuição em impacto ambiental, auxiliando assim, na criação de novas rotas, substituição de tecnologias e até mesmo na comparação de tecnologias.

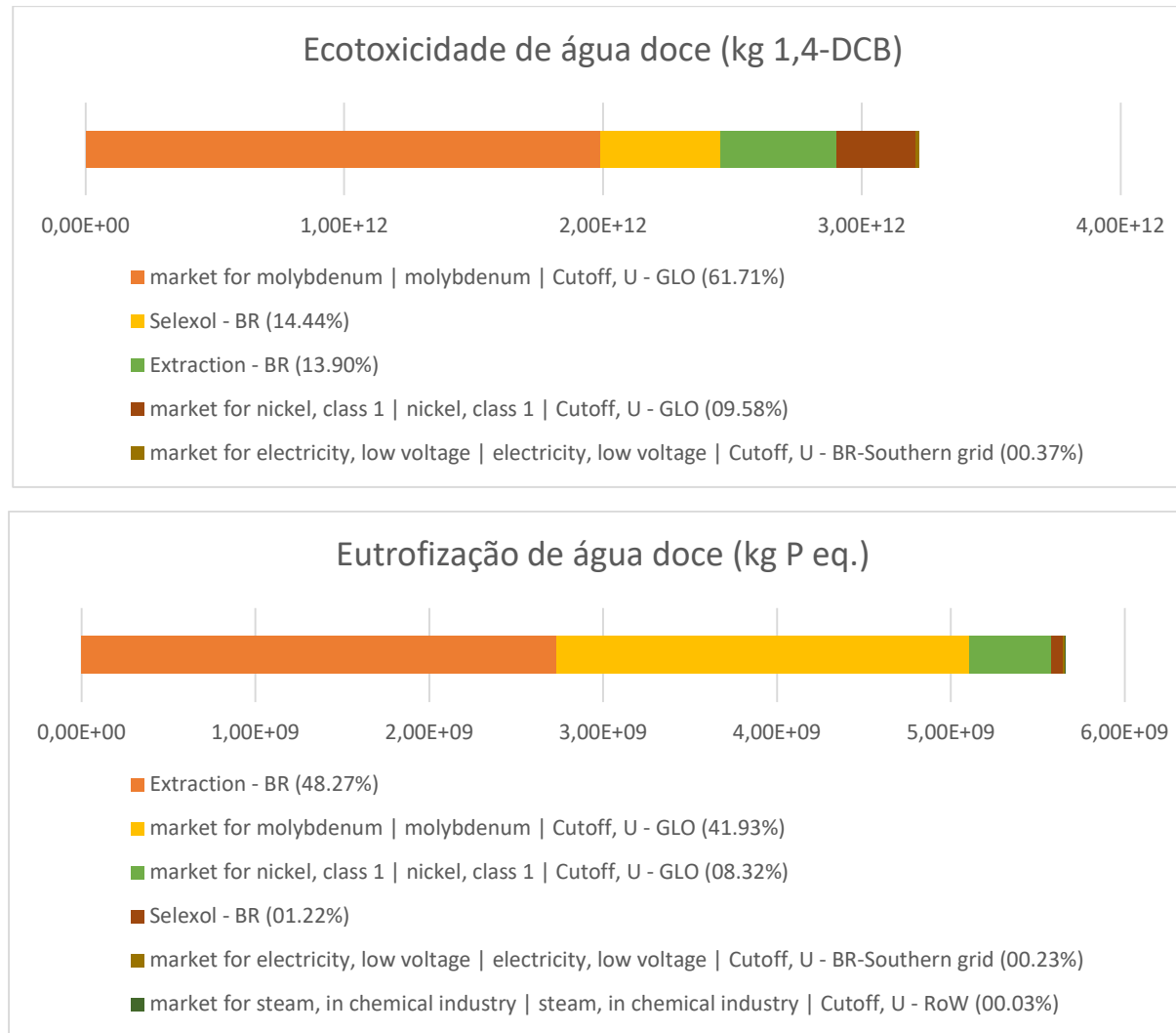
As Figuras 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 e 29 apresentam os resultados modelados e posteriormente é apresentado um resumo dos resultados observados na análise.

Figura 21 Resultados das categorias de impacto de formação de material particulado fino e escassez de recurso fóssil.



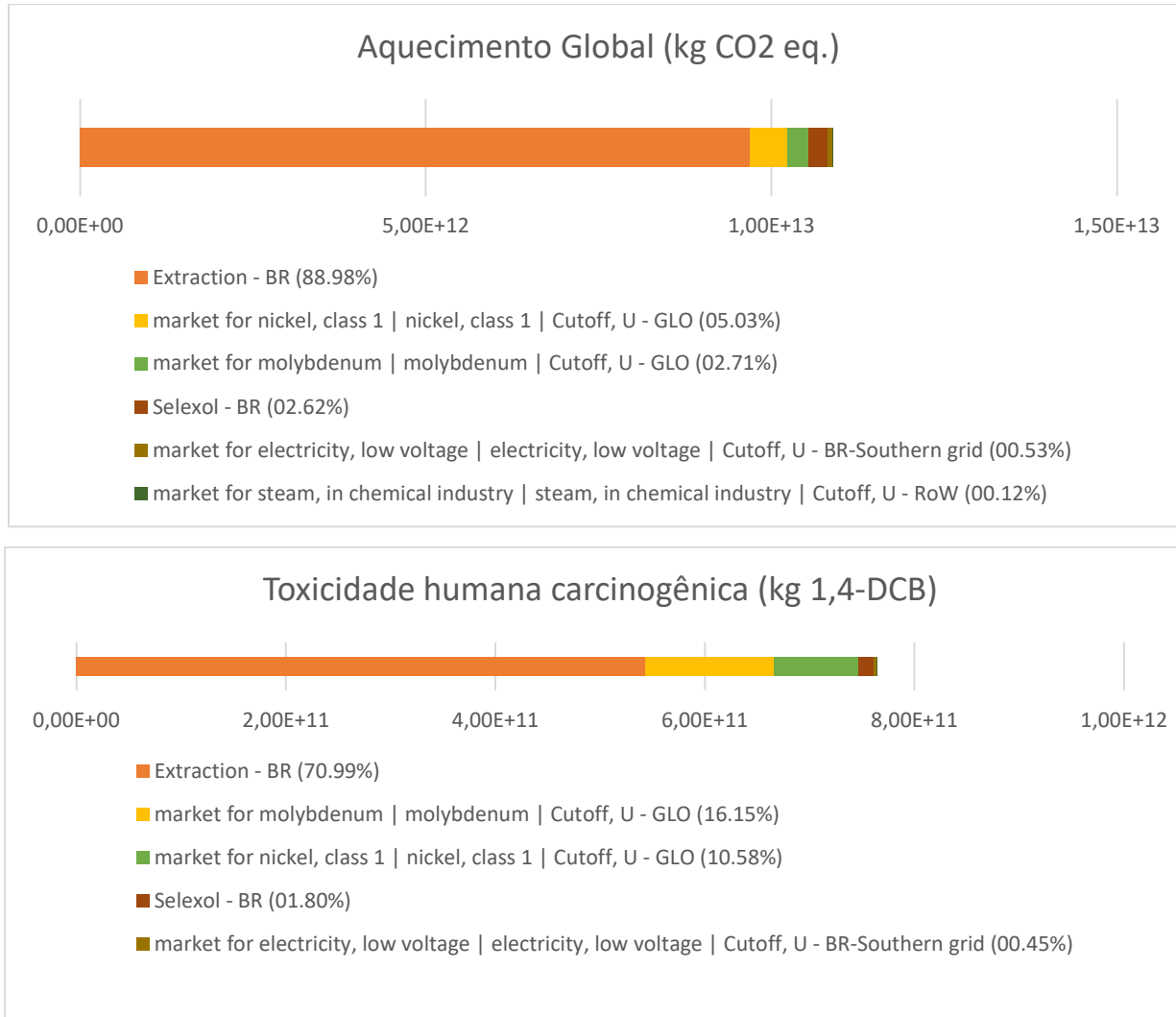
Fonte: Autor, 2024.

Figura 22 Resultados das categorias de impacto de ecotoxicidade de água doce e eutrofização de água doce.



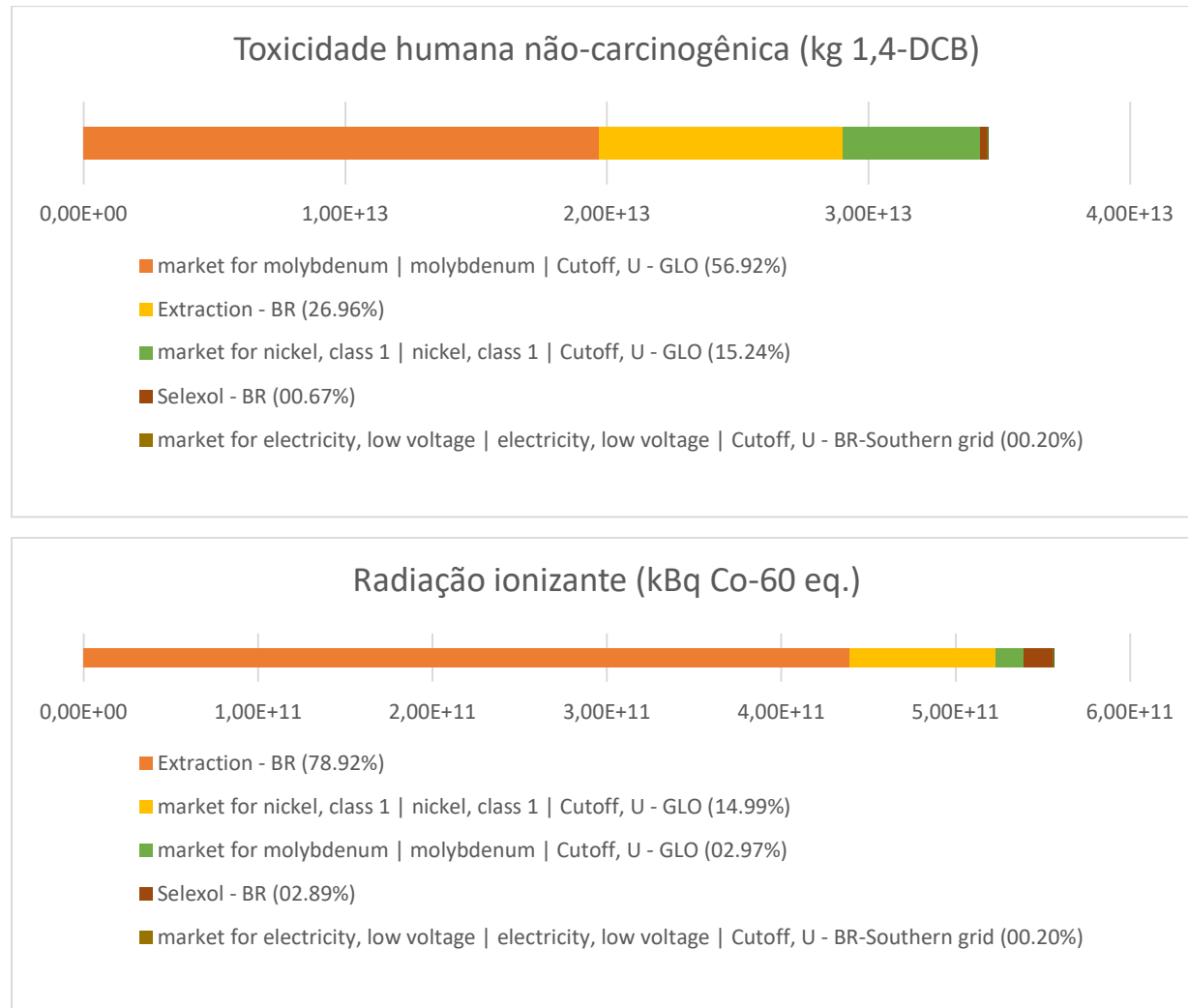
Fonte: Autor, 2024.

Figura 23 Resultados das categorias de impacto de aquecimento global e toxicidade humana carcinogênica.



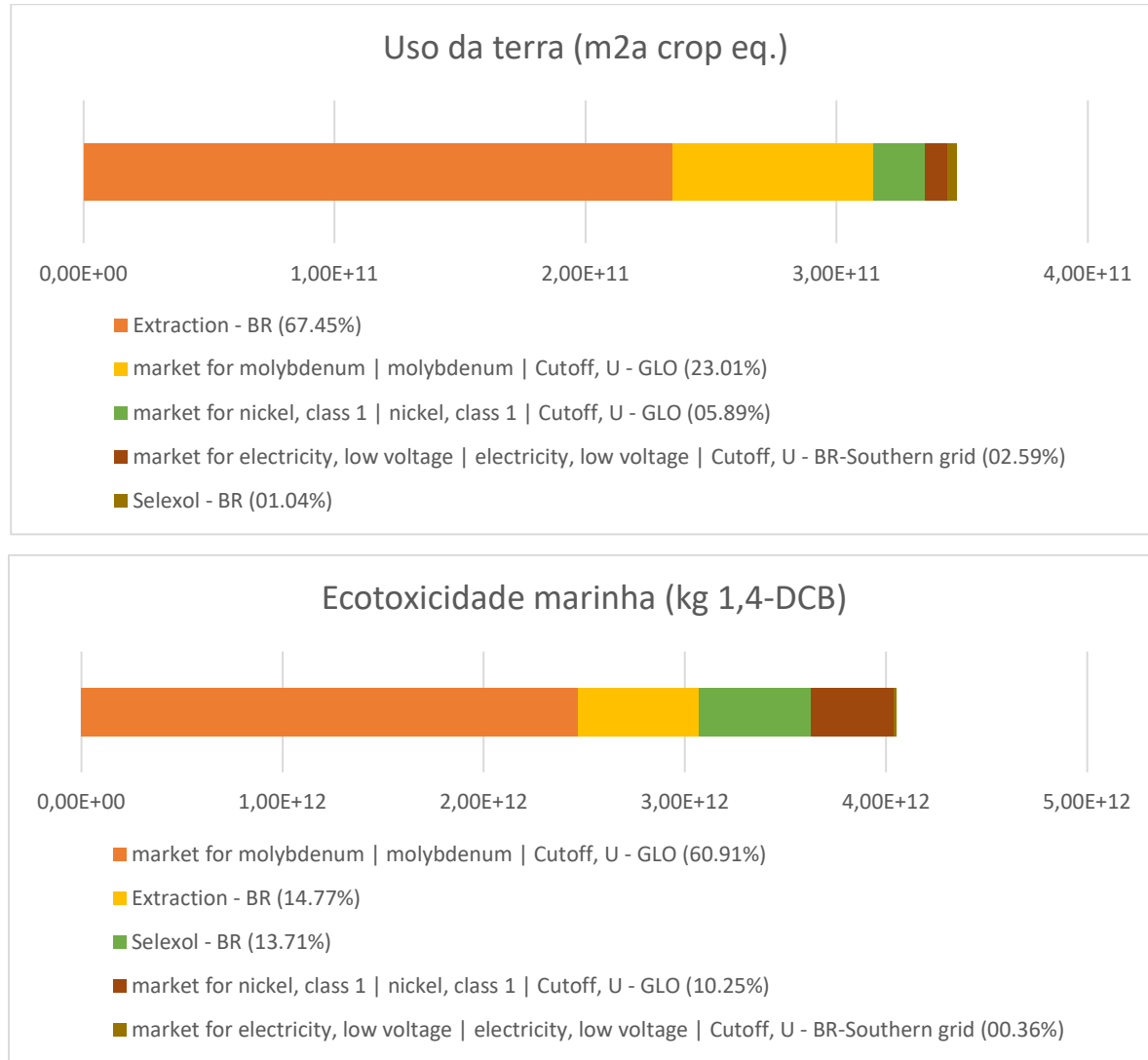
Fonte: Autor, 2024.

Figura 24 Resultados das categorias de impacto de toxicidade humana não-carcinogênica e radiação ionizante.



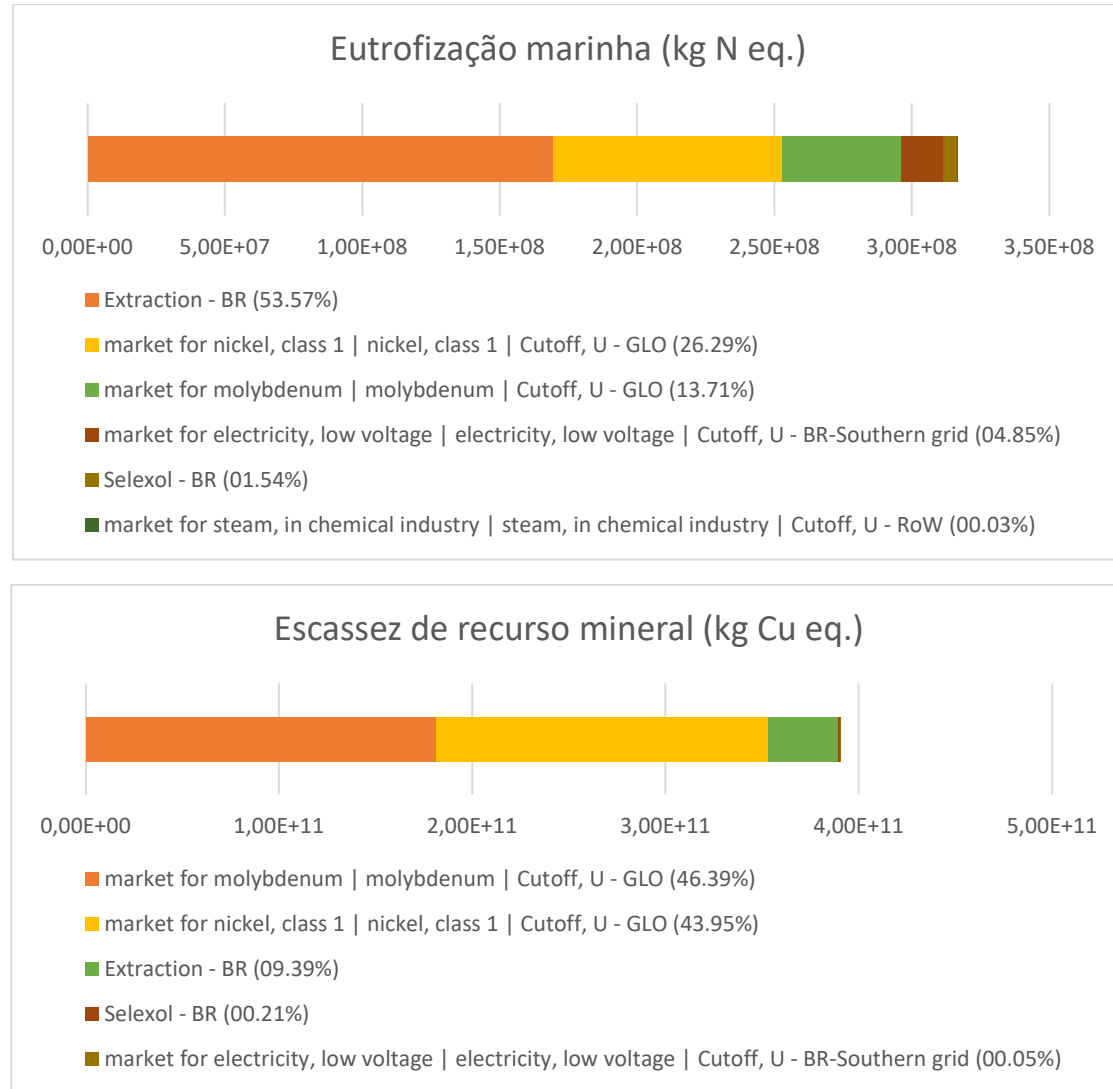
Fonte: Autor, 2024.

Figura 25 Resultados das categorias de impacto de uso da terra e ecotoxicidade marinha.



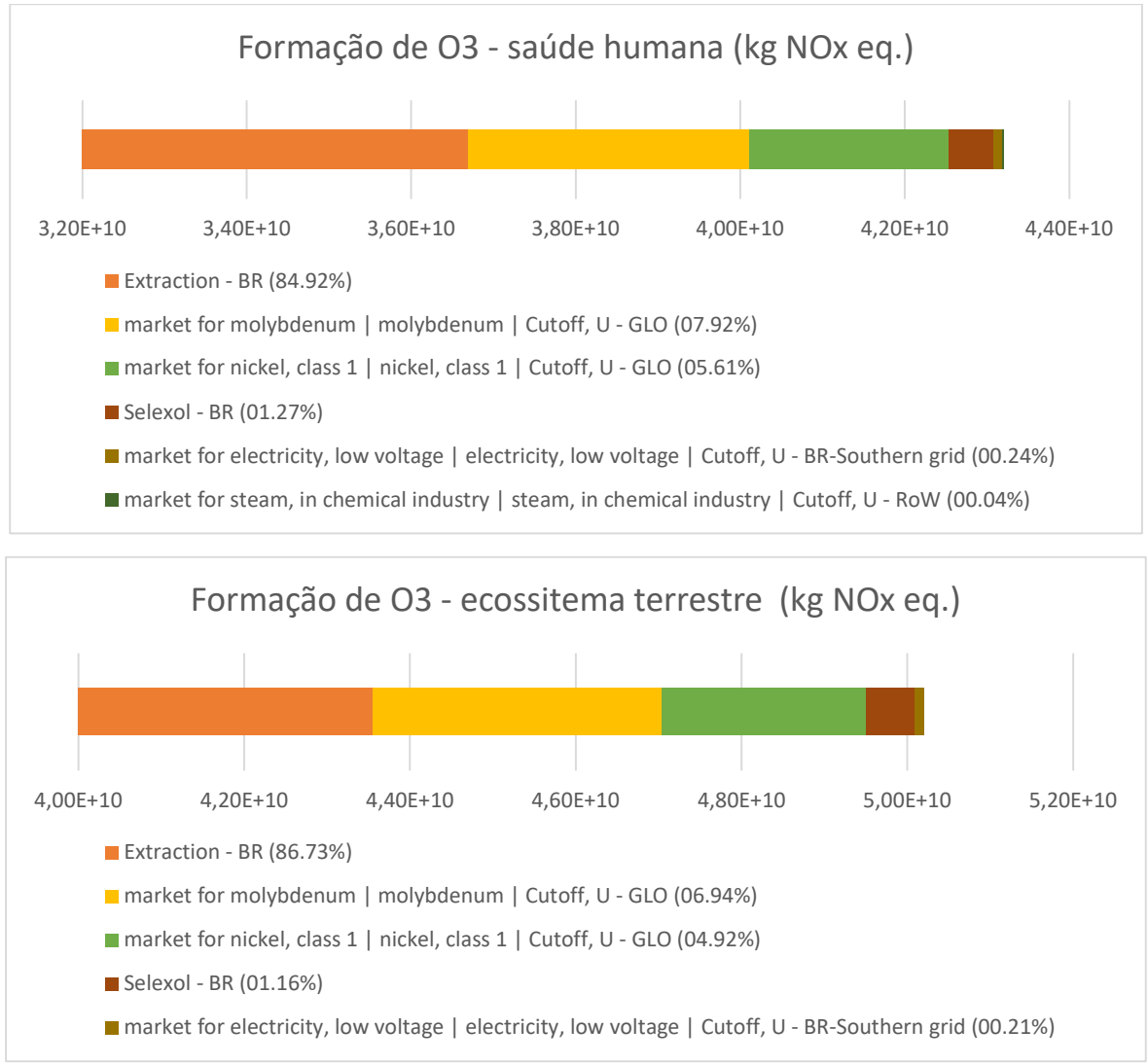
Fonte: Autor, 2024.

Figura 26 Resultados das categorias de impacto de eutrofização marinha e escassez de recurso mineral.



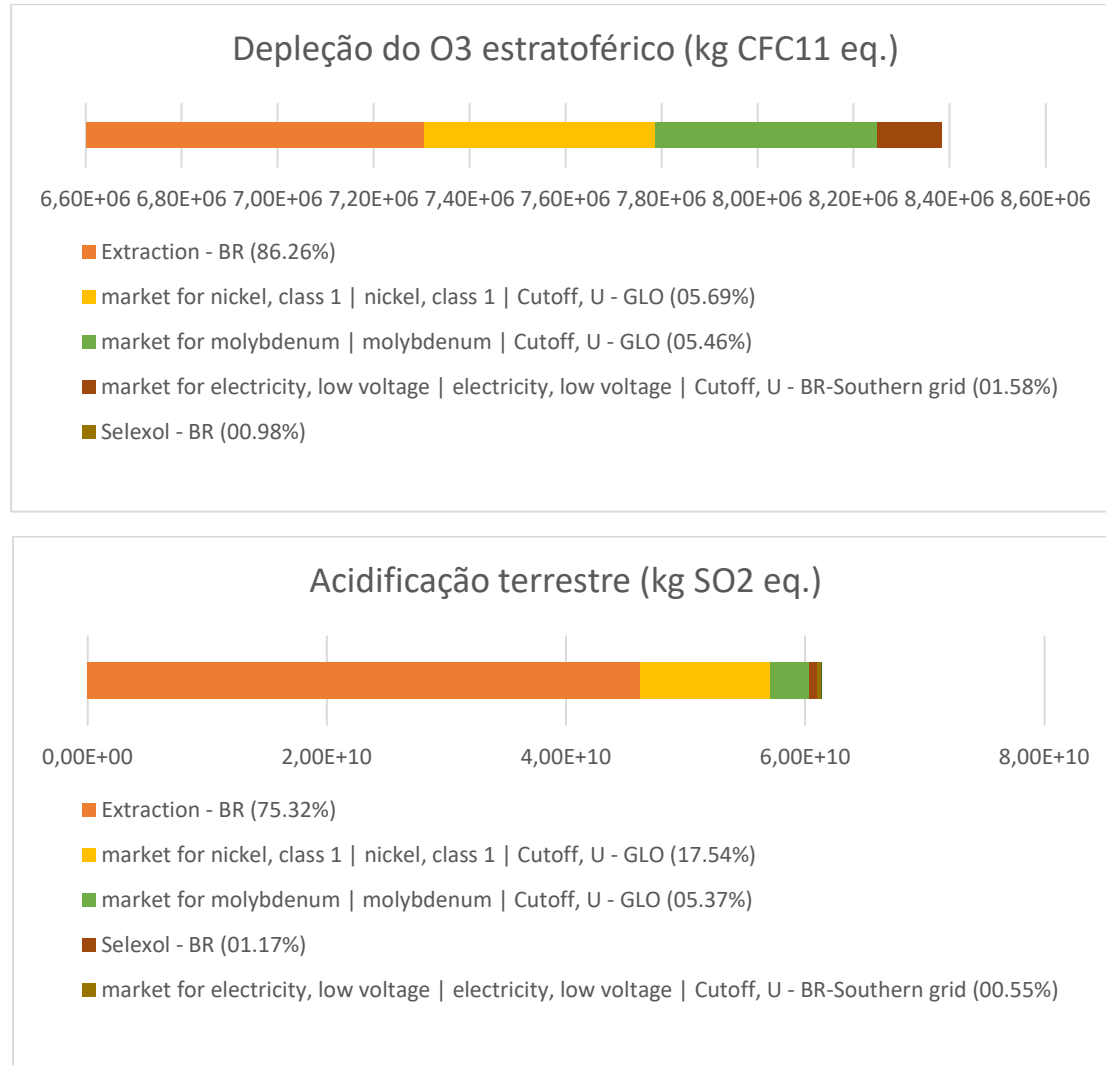
Fonte: Autor, 2024.

Figura 27 Resultados das categorias de impacto de formação de O3 com efeitos na saúde humana e no ecossistema terrestre.



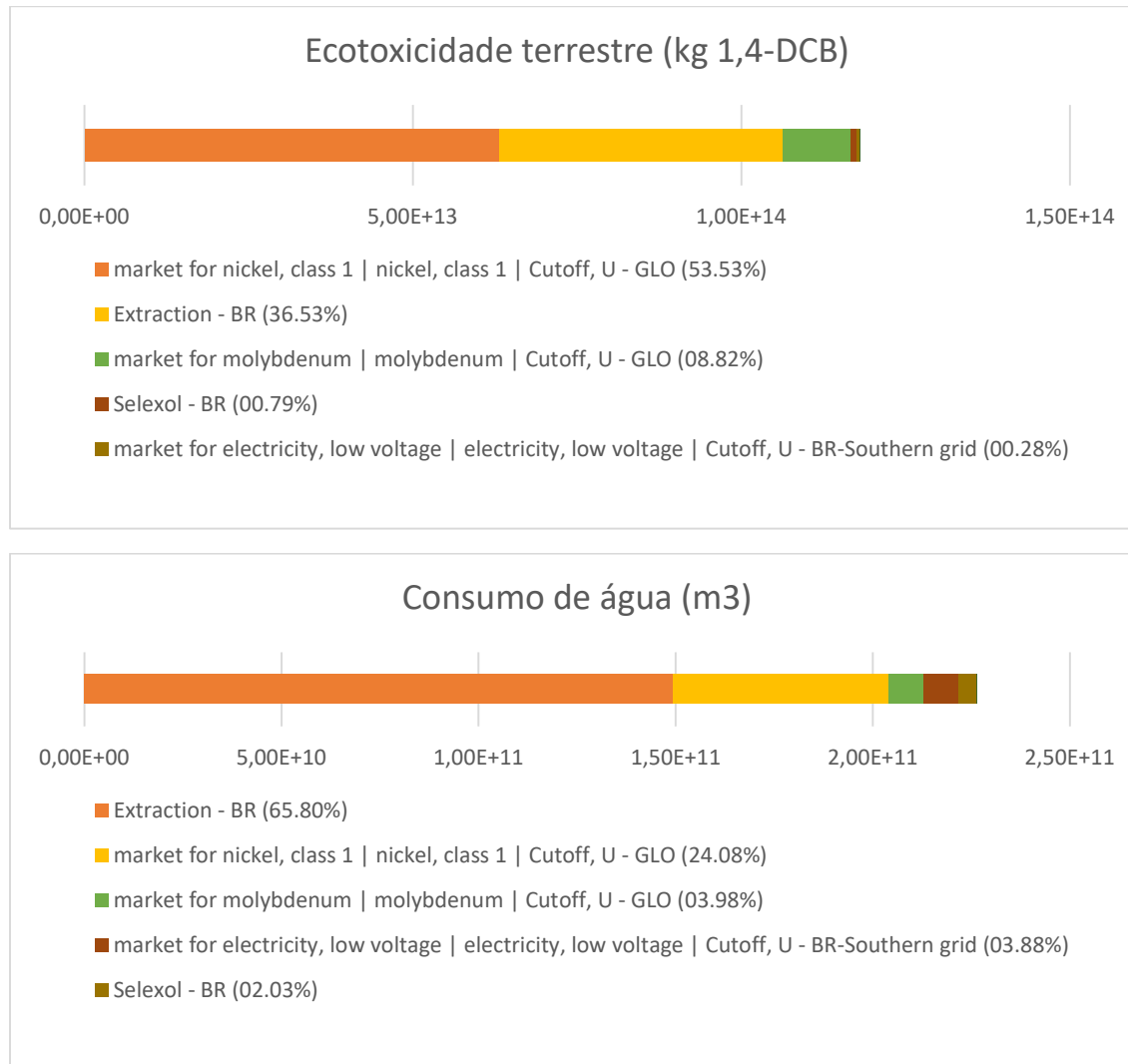
Fonte: Autor, 2024.

Figura 28 Resultados das categorias de impacto de depleção do O3 estratosférico e acidificação terrestre.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 29 Resultados das categorias de impacto de ecotoxicidade terrestre e consumo de água.



Fonte: Autor, 2024.

Resumo dos resultados

Após analisar os resultados contabilizados pelo programa utilizando o método *Recipe Midpoint* (H), ao verificar as contribuições em impactos da árvore de contribuição da biorrefinaria, foi possível identificar uma repetição com alternância entre os mesmos processos e/ou insumos nas dezoito categorias de impactos ambientais avaliadas. A Tabela 5 apresenta o resumo dos resultados modelados no OpenLCA, com destaque para os valores em negrito, que representam o processo ou insumo com o maior impacto ambiental observado.

Tabela 5 Resumo dos resultados dos impactos ambientais

Categoria de impacto vs Contribuição	Seleção (%)	Extração (%)	Ni (%)	Mo (%)	Eletricidade (%)
<i>Formação de material particulado fino (kg PM2.5 eq.)</i>	1,42	75,57	14,57	0,08	0,51
<i>Escassez de recurso fóssil (kg oil eq.)</i>	1,74	95,85	1,58	0,01	0,09
<i>Ecotoxicidade de água doce (kg 1,4-DCB)</i>	14,44	13,90	9,58	61,71	0,37
<i>Eutrofização de água doce (kg P eq.)</i>	1,22	48,27	8,32	41,93	0,23
<i>Aquecimento Global (kg CO2 eq.)</i>	2,62	88,98	5,03	2,71	0,53
<i>Toxicidade humana carcinogênica (kg 1,4-DCB)</i>	1,80	70,99	10,58	16,15	0,45
<i>Toxicidade humana não-carcinogênica (kg 1,4-DCB)</i>	0,67	26,96	15,24	56,92	0,20
<i>Radiação ionizante (kBq Co-60 eq.)</i>	2,89	78,92	14,99	2,97	0,20
<i>Uso da terra (m2a crop eq.)</i>	1,04	67,45	5,89	23,01	2,59
<i>Ecotoxicidade marinha (kg 1,4-DCB)</i>	13,71	14,77	10,25	60,91	0,36
<i>Eutrofização marinha (kg N eq.)</i>	1,54	53,57	26,29	13,71	4,85
<i>Escassez de recurso mineral (kg Cu eq.)</i>	0,21	9,39	43,95	46,39	0,05
<i>Formação de O3 - saúde humana (kg NOx eq.)</i>	1,27	84,92	5,61	7,92	0,24
<i>Formação de O3 - ecossistema terrestre (kg NOx eq.)</i>	1,16	86,73	4,92	6,94	0,21
<i>Depleção do O3 estratosférico (kg CFC11 eq.)</i>	0,98	86,26	5,69	5,46	1,58
<i>Acidificação terrestre (kg SO2 eq.)</i>	1,17	75,32	17,54	5,37	0,55
<i>Ecotoxicidade terrestre (kg 1,4-DCB)</i>	0,79	36,53	53,53	8,82	0,28
<i>Consumo de água (m3)</i>	2,03	65,80	24,08	3,98	3,88

Fonte: Autor, 2024.

O processo de extração dos lipídios da biomassa úmida de microalgas utiliza como solventes o hexano e o acetato de etila para realizar a remoção do composto

de interesse com uma maior eficiência. O hexano é um subproduto da nafta, que por sua vez é derivado do processo de refino do petróleo, portanto, possui origem fóssil.

De acordo com (CHIUMENTO et al., 2015), o reciclo do hexano é importante para a redução dos impactos ambientais atrelados ao uso do solvente na produção de diesel verde a partir da biomassa de microalgas. No entanto, mesmo recuperando o solvente existe uma perda e que neste estudo foi de 4% do total utilizado, essa porcentagem também foi considerada para o acetato de etila.

Deuber et al., (2023), realizaram uma avaliação técnico-econômica e ambiental para a produção de SAF (*sustainable aviation fuels* – combustível sustentável de aviação) no Brasil, o estudo aponta penalidades ambientais do uso de solventes nos processos para a geração do combustível. A rota tecnológica utilizada no estudo é semelhante a utilizada na proposta de biorrefinaria.

As cadeias produtivas (mercados) do níquel e do molibdênio tiveram participações em destaque na análise de árvore de contribuição dos processos da biorrefinaria. A mineração da molibdenita e o seu beneficiamento são responsáveis pelas maiores emissões em impactos ambientais observados nos resultados da modelagem.

Posteriormente, a manufatura do níquel, que utiliza o cobalto e a platina, que por sua vez apresentam utilizam processos complexos de mineração e beneficiamento, originando assim impactos ambientais significativos. Vale ressaltar que, o uso desses metais na proposta de biorrefinaria está relacionado ao processo de hidrodessoxigenação, onde utiliza-se o catalisador de Ni-Mo suportado em alumina.

Guimarães et al., (2021), avaliaram a produção de biocombustíveis via gaseificação de biomassa lignocelulósica (bagaço de cana) para geração do combustível sustentável de aviação. Os autores ressaltam o alto consumo de catalisadores metálicos para a planta termoquímica, além expressivo custo para a aquisição deste insumo.

O terceiro processo da biorrefinaria que apresentou destaque em contribuições significativas para os impactos ambientais, foi o processo Selexol. O processo Selexol tem como objetivo remover os gases ácidos oriundos do processo de gaseificação dos resíduos sólidos urbanos. Para a remoção dos gases CO₂ e H₂S,

foi utilizado o insumo éter dimetílico de etilenoglicol e a cadeia produtiva deste componente obteve os maiores impactos nas categorias de impactos avaliadas.

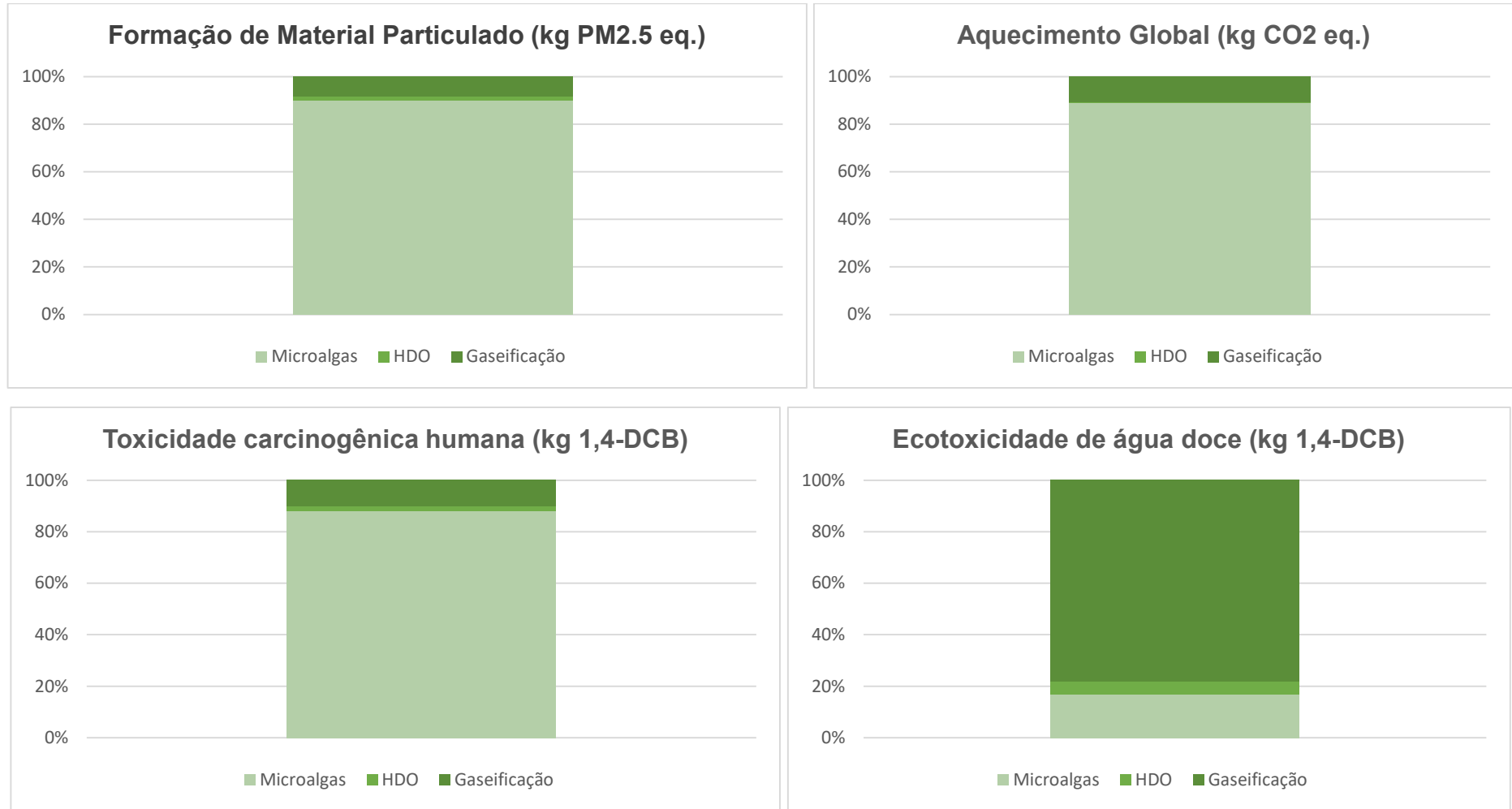
Em relação a modelagem, como os dados utilizados são de origem secundária – *Ecoinvent* –, portanto, há limitações e incertezas nos resultados dos potenciais impactos ambientais atribuídos à biorrefinaria. A utilização da base de dados *Ecoinvent* é comum em diversos estudos, porém, como os fatores de caracterização dos impactos, regionalização e os próprios processos são em sua maioria de origem do Norte Global.

Sendo assim, os resultados podem não refletir necessariamente o contexto brasileiro, que por si só deve ter dados específicos para cada região do país, visto que, a extensão territorial é comparada a um continente e a variações são consideráveis para esse tipo de estudo. Essas limitações e incertezas tendem a diminuir com o passar do tempo e com o investimento em pesquisa para o desenvolvimento de inventários, fatores de caracterização e regionalização condizentes com a realidade do Brasil.

5.4 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA POR GRUPOS

Com a utilização de diversas tecnologias para a proposta da biorrefinaria, torna-se interessante realizar recortes em grupos de tecnologias para entender quais e o quanto esses grupos impactam o meio ambiente utilizando a metodologia *Recipe Midpoint* (H). Sendo assim, foi definido que os grupos analisados serão: produção de hidrogênio (**Gaseificação**), cultivo de microalgas (**Microalgas**) e hidrodessoroxigenação (**HDO**), conforme é demonstrado na Figura 39.

Figura 30 Modelagem utilizando a metodologia Recipe Midpoint (H) para os grupos HDO, Microalgas e Gaseificação.



Fonte: Autor, 2024.

Os resultados obtidos com a modelagem apontam que o grupo das microalgas é responsável pelos maiores impactos ambientais. A etapa de extração do óleo da biomassa é o maior representante dentre todos os outros processos considerados, pois nesse processo utiliza-se os solventes hexano e acetato de etila, o primeiro de origem fóssil e o segundo derivado da produção de etanol.

Durante o dimensionamento da etapa de extração do óleo da biomassa foi considerado que haverá uma perda de 4% na recuperação desses solventes. Com o resultado da modelagem é possível concluir que a perda precisa ser reduzida ou ainda, pode-se utilizar outros solventes para a extração do óleo e posteriormente é necessário rodar outra modelagem com o intuito de comparar o resultado dos impactos ambientais.

Para a produção de hidrogênio (Gaseificação), pode-se observar que esse grupo é o maior contribuinte em impactos ambientais relacionados à ecotoxicidade. A utilização do éter dimetílico de etilenoglicol e toda sua cadeia produtiva é o responsável pelos resultados observados. Essa identificação abre caminho para testar outras opções na remoção dos gases ácidos do gás de síntese.

O grupo da produção do diesel verde (HDO) obteve os melhores resultados dentre os grupos avaliados. Um ponto a ser observado, são os insumos de níquel e molibdênio utilizados como catalisador que aparecem como os principais insumos com valores relevantes em impactos ambientais da biorrefinaria.

Outro fator importante observado após a modelagem dos resultados é de que a base de dados *Ecoinvent* versão 3.8, utiliza em sua maioria dados oriundos dos processos realizados no Norte Global, esse fato pode não ser tão representativo para a nossa realidade. Ainda sobre a base de dados, muitos dados utilizados possuem um limite de processos considerados para efeito de cálculo (*cut-off*), como não é possível ter acesso ao arcabouço dos dados brutos e eventuais cálculos utilizados, esse fato carrega incerteza nos resultados modelados.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo teve por objetivo sugerir uma proposta de biorrefinaria com produção anual de 100.000 toneladas de diesel verde e realizar uma Avaliação do Ciclo de Vida, a fim de identificar os potenciais impactos ambientais da proposta, utilizando dezoito categorias de impacto ambiental do método *Recipe Midpoint* (H). O estudo aponta que para os processos da biorrefinaria, a extração e manufatura dos metais como o níquel e o molibdênio, que são utilizados como catalisadores no processo de hidrodessoxigenação, o uso do hexano e do acetato de etila utilizados na extração dos lipídios da biomassa de microalgas e o uso do éter dimetílico de etilenoglicol utilizado no processo Selexol aparecem como os maiores contribuintes em impactos ambientais.

O processo de extração do óleo da biomassa de microalgas aparece de forma recorrente como sendo o processo mais impactante da biorrefinaria. Dentre as categorias estão: formação de material particulado fino (75,57% de contribuição em impactos ambientais), escassez de recurso fóssil (95,85%), eutrofização de água doce (48,27%), aquecimento global (88,98%), toxicidade humana carcinogênica (70,99%), radiação ionizante (78,92%), uso da terra (67,45%), eutrofização marinha (53,57%), formação de ozônio com danos ao ecossistema terrestre (86,73%), depleção do ozônio estratosférico (86,26%), acidificação terrestre (75,32%) e consumo de água (65,80%).

Posteriormente, a hidrodessoxigenação (HDO), que utiliza o níquel e o molibdênio como catalisadores, para as categorias de impacto de ecotoxicidade de água doce (61,71%), toxicidade humana não-carcinogênica (56,92%), ecotoxicidade marinha (60,91%), escassez de recurso mineral (46,39%) e ecotoxicidade terrestre (53,53%).

Os solventes possuem uma gama de opções para serem utilizados na extração do óleo da biomassa de microalga. Recomenda-se que outros tipos de solventes sejam utilizados na modelagem dos impactos ambientais e ainda, recomenda-se que a perda de 4% durante a recuperação dos solventes seja reduzida, pois a quantidade de solvente utilizado é significativamente grande. Assim como os solventes, os catalisadores são diversos e é aconselhável usar outros tipos de

catalisadores na modelagem com forma de comparação e identificação dos impactos ambientais do uso de um determinado catalisador.

Em relação ao dimensionamento, foi possível cumprir o objetivo utilizando os dados obtidos através da literatura. Vale ressaltar que, o método utilizado pode gerar dados subestimados ou superestimados e que podem ser melhor dimensionados utilizando softwares específicos para este fim, como por exemplo o *Aspen PLUS*. A proposta contempla a geração de um inventário da biorrefinaria que é apresentado no Apêndice e que somado aos dados calculados e com o uso do diagrama caixa facilita à reprodução do estudo e conseqüentemente a inserção de novos processos não abordados neste estudo.

SUGESTÕES

A atual proposta da biorrefinaria pode sofrer modificações em seus processos com o intuito buscar a eficiência e eficácia em cada etapa proposta agregando ao máximo o conceito de economia circular. Dentre as modificações que podem ser propostas para um novo estudo, estão:

1. Utilizar outros solventes na extração de lipídios da biomassa e avaliar os potenciais impactos ambientais através da ACV;
2. Utilizar outros catalisadores e avaliar os potenciais impactos ambientais através da ACV;
3. Analisar profundamente a qualidade do efluente tratado em relação aos fatores físico-químicos para investigar se existe a possibilidade do efluente ser reciclado internamente e conseqüentemente reduzir a Pegada Hídrica;
4. Incluir de separação e utilização do dióxido de carbono (CO₂) nas lagoas de alta taxa (Raceways);
5. Utilizar os resíduos das industriais sucoenergéticas – vinhaça, torta de filtro e bagaço – para geração de biometano e posterior reforma, ao invés das unidades de pré-tratamento de RSU e gaseificação.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10.004. Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. Disponível em: <www.abnt.org.br>. Acesso em: 7 mar 2023.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 19.849. Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. Disponível em: <www.abnt.org.br>. Acesso em: 7 mar 2023.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2020**. São Paulo: ABRELPE, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/>. Acesso em: 10 jan 2023.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2021**. São Paulo: ABRELPE, 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/>. Acesso em: 10 jan 2023.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2022**. São Paulo: ABRELPE, 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/>. Acesso em: 10 jan 2023.

ACIÉN, F. G. et al. Photobioreactors for the production of microalgae. Em: **Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts: From Feedstock Cultivation to End-Products**. Elsevier Inc., 2017a. p. 1–44.

ACIÉN, F. G. et al. Photobioreactors for the production of microalgae. **Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts: From Feedstock Cultivation to End-Products**. Elsevier Inc., 2017b. p. 1–44.

AMARAL, M. M. **Avaliação técnica do transporte e do armazenamento de hidrogênio visando a descarbonização do sistema energético nacional**. Dissertação (mestrado)—Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2021.

AMARO, H. M. et al. Microalgal fatty acids-From harvesting until extraction. **Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts: From Feedstock Cultivation to End-Products**. Elsevier Inc., 2017. p. 369–400.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **ABNT NBR 16849:2020**. 2020.

BARAJ, E.; CIAHOTNÝ, K.; HLINČÍK, T. The water gas shift reaction: Catalysts and reaction mechanism. **Fuel**, v. 288, 15 mar. 2021.

BARROS, A. I. et al. Harvesting techniques applied to microalgae: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 1489–1500, 2015.

BARROS, T. M.; ARAÚJO, A. M. M.; GONDIM, A. D. **Produção de diesel verde a partir de desoxigenação catalítica em atmosfera livre de hidrogênio**. In: 4º

CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. 4. 2021. Anais eletrônicos [...]. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/edicao/detalhes/anais-do-iv-conepetro-e-vi-wepetro>. Acesso em: 09 mai., 2023.

BATISTA, M. et al. A framework for sustainable and integrated municipal solid waste management: Barriers and critical factors to developing countries. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, 20 ago. 2021.

BELGIORNO, V. et al. Energy from gasification of solid wastes. **Waste Management**, v. 23, n. 1, p. 1–15, 2003.

BNDES - BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Biodiesel and renewable diesel in brazil: recent overview and perspectives**. Rio de Janeiro. 2022. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/22585>>. Acesso em: 9 maio. 2023.

BOLZANI, H. R. **Fotobioreator flat panel e lagoa raceway: avaliação do cultivo de microalgas nativas para tratamento e recuperação de nutrientes de esgoto sanitário anaeróbico de alta carga**. Tese—Bauru: Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2023.

BRASIL. **LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010**. Brasil, 2010a. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 13 jul. 2023

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. 2010b. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 23 jul. 2023

BRASIL. **Lei nº 10. 438 de 26 de abril de 2022**. 2022. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/l10438.htm>. Acesso em: 23 jul. 2023

CAPAZ, R. S. et al. Mitigating carbon emissions through sustainable aviation fuels: costs and potential. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 15, n. 2, p. 502–524, 16 mar. 2021.

CASOTTO, T. V. **Avaliação da eficiência de pré-tratamentos físicos e enzimáticos para processamento de biomassa de microalgas**. Dissertação—Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2022.

CASTRO, A. A. et al. Cultivo de microalgas para tratamento de águas residuais: revisão de literatura. **Scientific Journal of Environmental Sciences and Biotechnology**. Disponível em: <www.sciencedirect.com>.

CAVALCANTI, C. J. S. **Simulação e otimização de processos para obtenção de biocombustíveis: etanol, bioquerosene de aviação e diesel verde**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal de Pernambuco - Pernambuco, 2022.

CHEN, W. H.; CHEN, C. Y. Water gas shift reaction for hydrogen production and carbon dioxide capture: A review. **Applied Energy**, v. 258, n. 114078, p. 1–25, 15 jan. 2020.

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Hidrogênio Renovável. Uma das rotas para descarbonizar o transporte rodoviário.** Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <<https://cnt.org.br/documento/d0b37807-75c4-494d-a296-1e050d5755b3>>. Acesso em: 4 jul. 2023.

CRUZ, R. P.; SANTIAGO, B. L. S.; PEREIRA, E. L. Microalgas como matéria-prima na produção de biodiesel: uma revisão. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 5, n. 3, p. 0244–0256, 28 jun. 2019.

DE PAULO, L. F. **Estudo das diferentes tecnologias de gaseificação de biomassa.** Graduação—Cachoeira do Sul: Universidade Federal de Santa Maria, 2022.

D'HONDT, E. et al. Cell disruption technologies. Em: **Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts: From Feedstock Cultivation to End-Products.** Elsevier Inc., 2017. p. 133–154.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2021 – Main Text.** Washington, D.C., EUA, 2023. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and->>. Acesso em: 4 maio. 2023.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Hidrogênio Turquesa: Produção a partir da pirólise do gás natural.** Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Combustíveis renováveis para uso em motores do ciclo diesel.** Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 4 maio. 2023.

ESTEVES, A. F. et al. Microalgae harvesting techniques. Em: **Handbook of Microalgae-Based Processes and Products: Fundamentals and Advances in Energy, Food, Feed, Fertilizer, and Bioactive Compounds.** Elsevier, 2020. p. 225–281.

FERNÁNDEZ, F. G. A. et al. Microalgae production systems. Em: **Handbook of Microalgae-Based Processes and Products: Fundamentals and Advances in Energy, Food, Feed, Fertilizer, and Bioactive Compounds.** Elsevier, 2020. p. 127–163.

FERREIRA, C. R. N. **Projeto de linha industrial para o processamento de resíduos sólidos urbanos e produção de combustível derivado de resíduos para a gaseificação em reator termoquímico: análise experimental do syngas para a produção de energia térmica e elétrica.** Tese—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2021.

FRANCO, A. M. G. **Produção de hidrogênio verde a partir da reação de deslocamento gás água.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia – MG, 2021.

FURIMSKY, E. Catalytic hydrodeoxygenation. **Applied Catalysis A: General**, v. 199, p. 147–190, 2000.

GERARDO, M. L. et al. **Harvesting of microalgae within a biorefinery approach: A review of the developments and case studies from pilot-plants Algal Research**. Elsevier B.V., 1 set. 2015.

GRIMA, E. M. et al. **Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics** *Biotechnology Advances*. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/biotechadv>.

HOFFMANN, B. S. **O ciclo combinado com gaseificação integrada e a captura de CO₂: uma solução para mitigar as emissões de CO₂ em termelétricas a carvão em larga escala no curto prazo?** Dissertação—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

HU, Y.; BASSI, A. Extraction of biomolecules from microalgae. Em: **Handbook of Microalgae-Based Processes and Products: Fundamentals and Advances in Energy, Food, Feed, Fertilizer, and Bioactive Compounds**. Elsevier, 2020. p. 283–308.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The Future of Hydrogen**. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2023.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Technology Perspectives 2023**. Disponível em: <www.iea.org>.

IEA - THE INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Statistics report Key World Energy Statistics 2021**. Paris, France, 2023: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021>>. Acesso em: 26 fev. 2023.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: the physical science basis**. Geneva, Switzerland, 2023: Cambridge University Press, 2007. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>>. Acesso em: 6 abr. 2023.

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Panorama do hidrogênio no Brasil** *Texto para Discussão*. Rio de Janeiro, 2022: Instituto de Pesquisa Economica Aplicada - IPEA, 4 ago. 2022. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2023.

ISWA. **THE FUTURE OF THE WASTE MANAGEMENT SECTOR TRENDS, OPPORTUNITIES AND CHALLENGES FOR THE DECADE**. Rotterdam: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.iswa.org/knowledge-base/the-future-of-the-waste-management-sector-trends-opportunities-and-challenges-for-the-decade-2021-2030/?v=19d3326f3137>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

JAESCHKE, D. P. **Aplicação de tecnologias emergentes na extração de compostos de interesse a partir de microalgas**. Tese—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

KOHLHEB, N. et al. Assessing the life-cycle sustainability of algae and bacteria-based wastewater treatment systems: High-rate algae pond and sequencing batch reactor. **Journal of Environmental Management**, v. 264, 15 jun. 2020.

LEE, Y. L. et al. Target-oriented water–gas shift reactions with customized reaction conditions and catalysts. **Chemical Engineering Journal**, v. 458, n. 141422, p. 1–12, 15 fev. 2023.

LEITE et al. LIXÕES, ATERROS CONTROLADOS E ATERROS SANITÁRIOS: O QUE MUDOU NO BRASIL APÓS A PUBLICAÇÃO DA LEI FEDERAL 12.305/2010? p. 1–10, jul. 2019.

LIAN, Z. et al. Hydrogen production by fluidized bed reactors: A quantitative perspective using the supervised machine learning approach. **J**, v. 4, n. 3, p. 266–287, 7 jul. 2021.

LIMA; ABREU. AVALIAÇÃO DA CONSCIENTIZAÇÃO SOBRE A DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NAS UNIVERSIDADES EM BELÉM (PA). v. 1, p. 300–314, 2022.

MACHADO JR., F. R. S. **Ruptura celular, extração e encapsulamento de astaxantina de Haematococcus pluvialis (Volvocales, Chlorophyta)**. Tese—Rio Grande - RS: Universidade Federal do Rio Grande, 2014.

MAMEDE, M. C. DOS S. **Avaliação Econômica e Ambiental do Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos no Brasil**. Dissertação—Campinas: UNICAMP, 2013.

MARQUES, T. E. **Avaliação Técnica e Ambiental da Gaseificação do Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos**. Dissertação—Itajubá: UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2020.

MARTIN, S. et al. Tensão térmica e taxa de reação em um reator para gaseificação de biomassa do tipo concorrente. **Revista Ceres**, v. 57, n. 2, p. 168–174, 2010.

MARTÍNEZ-ROLDÁN, A. DE J.; CAÑIZARES-VILLANUEVA, R. O. Wastewater treatment based in microalgae. Em: **Handbook of Microalgae-Based Processes and Products: Fundamentals and Advances in Energy, Food, Feed, Fertilizer, and Bioactive Compounds**. Elsevier, 2020. p. 165–184.

MATTHIENSEN, A.; MICHELON, W. **Produção de microalgas em sistema semiaberto: estrutura e funcionamento de tanques semicirculares (raceway tanks)**. Concórdia: 2022.

MELO, M. C. R. E. **Políticas públicas brasileiras de biocombustíveis: estudo comparativo entre os programas de incentivos à produção, com ênfase em etanol e biodiesel**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis) - Universidade Federal de Uberlândia - Minas Gerais, 2018.

MENEGAZZO, M. L. **Cultivo de Chlorella sorokiniana para extração de óleo e produção de biodiesel**. Tese—Dourados: Universidade Federal da Grande Dourados, 2017.

- MENEZES, R. O. et al. Statistical analysis of the gravimetric characterization of household solid waste: A case study from the city of Juiz de Fora, Minas Gerais, Brazil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 271–282, 1 mar. 2019.
- MOHAN, S. V. et al. Algal oils as biodiesel. Em: **Biomass, Biofuels, Biochemicals: Biofuels from Algae, Second Edition**. Elsevier, 2019. p. 287–323.
- MONTEIRO, V. A. L. **Modelagem termodinâmica de gás de síntese de combustível derivado de resíduos sólidos urbanos com simulações em ciclos de potência a gás e vapor**. Dissertação—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2019.
- MORILLAS-ESPAÑA, A. et al. Year-long evaluation of microalgae production in wastewater using pilot-scale raceway photobioreactors: Assessment of biomass productivity and nutrient recovery capacity. **Algal Research**, v. 60, 1 dez. 2021.
- MUYLAERT, K. et al. Harvesting of microalgae: Overview of process options and their strengths and drawbacks. Em: **Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts: From Feedstock Cultivation to End-Products**. Elsevier Inc., 2017. p. 113–132.
- NAKYAI, T. et al. Comparative exergoeconomic analysis of indirect and direct bio-dimethyl ether syntheses based on air-steam biomass gasification with CO₂ utilization. **Energy**, v. 209, n. 118322, 15 out. 2020.
- NASCIMENTO JR., F. A. **Avaliação computacional de solventes para extração de lipídios de microalgas**. Dissertação—São Paulo: Universidade de São Paulo - USP, 2021.
- NREL, N. R. E. L. **Techno-Economic Analysis of Biofuels Production Based on Gasification**. Colorado: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/46587.pdf>>. Acesso em: 7 ago. 2023.
- OLIVEIRA, B. O. S.; MEDEIROS, G. A. EVOLUTION AND CHALLENGES IN THE MANAGEMENT OF WASTE SOLID URBAN IN THE STATES REGION NORTE, BRAZIL. **Revista Valore**, v. 4, n. 1, p. 749–761, jan. 2019.
- OLIVEIRA, L. M. F.; CARNEIRO, R. Políticas públicas e geração de energia através da biomassa dos resíduos sólidos no Brasil. **Energia na Agricultura**, v. 35, n. 3, p. 370–387, jul. 2020.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **Glossário de termos do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 13: Tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos**. 2017.
- PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA - IPCC. **Mudança do Clima 2021 - a base científica**. 2021.
- CHIUMENTO, G.; MARIANO, J. V. C. B. “CLEANER PRODUCTION TOWARDS A SUSTAINABLE TRANSITION” Comparação do Desempenho Ambiental de Duas Rotas de Produção de Óleo de Microalgas. 2015.
- PAZ, A. P.; VICENTE, M. DA S. **Tratamento de efluente doméstico utilizando a microalga *Scenedesmus sp.*** Graduação—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

PEPERZAK, L. Climate change and harmful algal blooms in the North Sea. **International Journal of Ecology Acta Oecologica**, v. 24, n. SUPPL. 1, p. 139–144, 2003.

PEREIRA, C. M. P. et al. BIODIESEL RENOVÁVEL DERIVADO DE MICROALGAS: AVANÇOS E PERSPECTIVAS TECNOLÓGICAS. **Química Nova**, v. 35, n. 10, p. 2013–2018, 2012.

POSADAS, E. et al. Microalgae cultivation in wastewater. Em: **Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts: From Feedstock Cultivation to End-Products**. Elsevier Inc., 2017. p. 67–91.

PRAGYA, N.; PANDEY, K. K.; SAHOO, P. K. **A review on harvesting, oil extraction and biofuels production technologies from microalgae Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Elsevier, 2013.

RAYEN, F.; TAIDI, B.; PAREAU, D. Optimization of a raceway pond system for wastewater treatment: a review. **Biotechnology**, v. 39, n. 3, p. 422–435, 2019.

GUIMARÃES, H. et al. Bottlenecks and potentials for the gasification of lignocellulosic biomasses and Fischer-Tropsch synthesis: A case study on the production of advanced liquid biofuels in Brazil. **Energy Conversion and Management**, v. 245, 1 out. 2021.

ROCHA, D. N. **Recuperação de recursos e racionalização de energia do processamento de *Scenedesmus obliquus* BR003 para produção de combustíveis e alimentos**. Tese—Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa, 2 mar. 2023.

ROCHEDO, P. R. R. **Análise econômica sob incerteza da captura de carbono em termoelétricas a carvão: retrofitting e capture-ready**. Dissertação—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

RODRIGUES, L. **Aplicações da tecnologia de cultivo de microalgas verdes com vistas à biorremediação de efluentes e produção de bioativos**. Monografia—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2022.

SAMPAIO, R. P. **Estudo de caso dos possíveis efeitos deletérios causados pelo combustível derivado de resíduo (CDR) em caldeiras voltadas a produção de energia elétrica queimando principalmente bagaço de cana**. Dissertação—São Carlos: UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2014.

SANTOS, F. M. L. F. **Crescimento de microalgas e remoção de nutrientes em ambientes poluídos com metais pesados**. Tese—Porto: Universidade do Porto, 2017.

SATO, A. K. C. **Gaseificação de coque na indústria de refino de petróleo: Uma análise termodinâmica e econômica**. Dissertação—Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista - UNESP, 2019.

SCALDAFERRI. **Síntese de bio-hidrocarbonetos via catálise heterogênea para a produção de bioquerosene de aviação e diesel verde belo horizonte**. Disponível

em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/SFSA-BAUPRS>>. Acesso em: 2 jul. 2023.

SEO, Y.-C.; ALAM, M. T.; YANG, W.-S. Gasification of Municipal Solid Waste. Em: **Gasification for Low-grade Feedstock**. InTech, 2018.

SHUBA, E. S.; KIFLE, D. Microalgae to biofuels: 'Promising' alternative and renewable energy, review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. April 2016, p. 743–755, 2018a.

SHUBA, E. S.; KIFLE, D. Microalgae to biofuels: 'Promising' alternative and renewable energy, review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. Parte 1, p. 743–755, 1 jan. 2018b.

SINGH; B.; BAUDDH; K.; BUX; F. Developments in Applied Phycology 7. **Algae and Environmental Sustainability**, v. 7, p. 1–165, 2015.

SINGH, B.; BAUDDH, K.; BUX, F. **Algae and Environmental Sustainability**. Springer, 2015. v. 7

SINIR. **Resíduos Sólidos Urbanos**. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-solidos-urbanos/>>. Acesso em: 23 jul. 2023.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico temático: serviço de água e esgoto**. Brasília, 2021: [s.n.]. Disponível em: <www.snis.gov.br>. Acesso em: 6 abr. 2023.

SOARES, R. B.; MARTINS, M. F.; GONÇALVES, R. F. A conceptual scenario for the use of microalgae biomass for microgeneration in wastewater treatment plants. **Journal of Environmental Management**, v. 252, n. September, p. 109639, 2019a.

SOARES, R. B.; MARTINS, M. F.; GONÇALVES, R. F. A conceptual scenario for the use of microalgae biomass for microgeneration in wastewater treatment plants. **Journal of Environmental Management**, v. 252, 15 dez. 2019b.

SONTHALIA, A.; KUMAR, N. Hydroprocessed vegetable oil as a fuel for transportation sector: A review. **Journal of the Energy Institute**, v. 92, n. 1, p. 1–17, 1 fev. 2019.

SOUZA, A. G. F. **Hidrodesoxigenação (hdo) do anisol em catalisadores de Ni-Mo suportados**. Rio de Janeiro: Tese (doutorado). UFRJ/COPPE, 2009.

SOUZA; MOURA; MACHADO. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares dispostos no lixão do município de Mineiros - Goiás. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 31392–31401, maio 2020.

TAGOMORI, I. S. **Potencial técnico e econômico para a produção de Fischer-Tropsch diesel a partir de biomassa (FT-BTL) associada à captura de carbono no Brasil**. Dissertação—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2017.

VIANA, C. R. DE A. **Sistema sustentáveis de cultivo de *Chorella Vulgaris* a partir de efluentes de aquicultura**. Tese—Rio Claro: Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2020.

VIEIRA, B. B. **Indicadores de rompimento mecânico de células visando a extração de biocompostos de *Scenedesmus obliquus***. Dissertação—Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa, 2019.

XIANG, X. et al. Exergy analysis of updraft and downdraft fixed bed gasification of village-level solid waste. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 1, p. 221–233, 1 jan. 2021.

APÊNDICE

Apêndice A – 6th *Workshop on Environmental Engineering* (PEA/UFRJ)

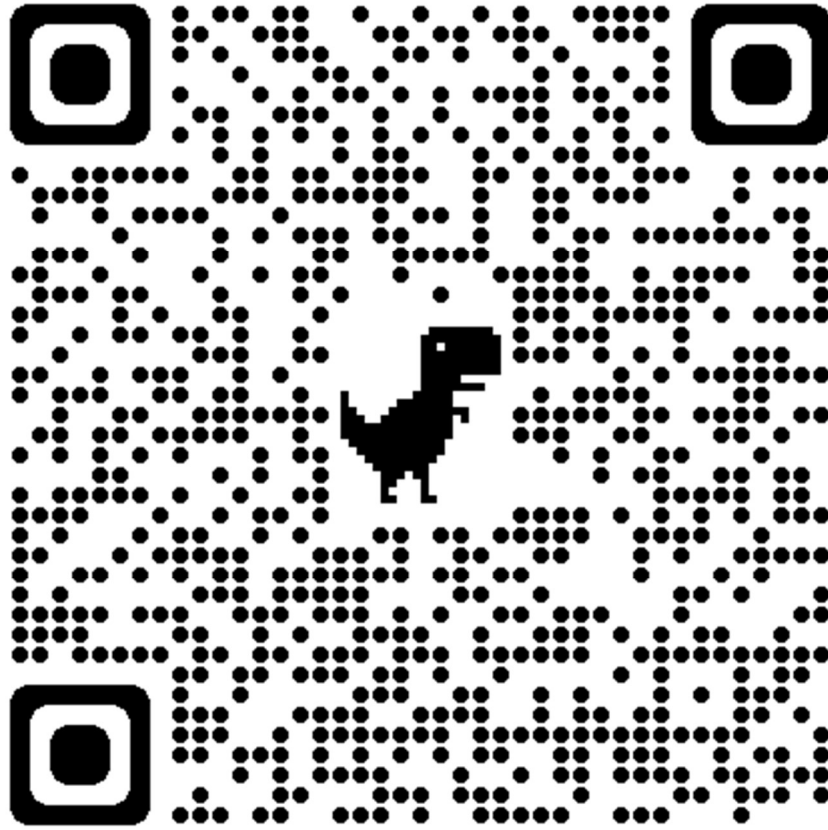
Apêndice B – 8º Congresso Brasileiro de Ciclo de Vida

Apêndice C – 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ)

Apêndice D – Inventário da biorrefinaria

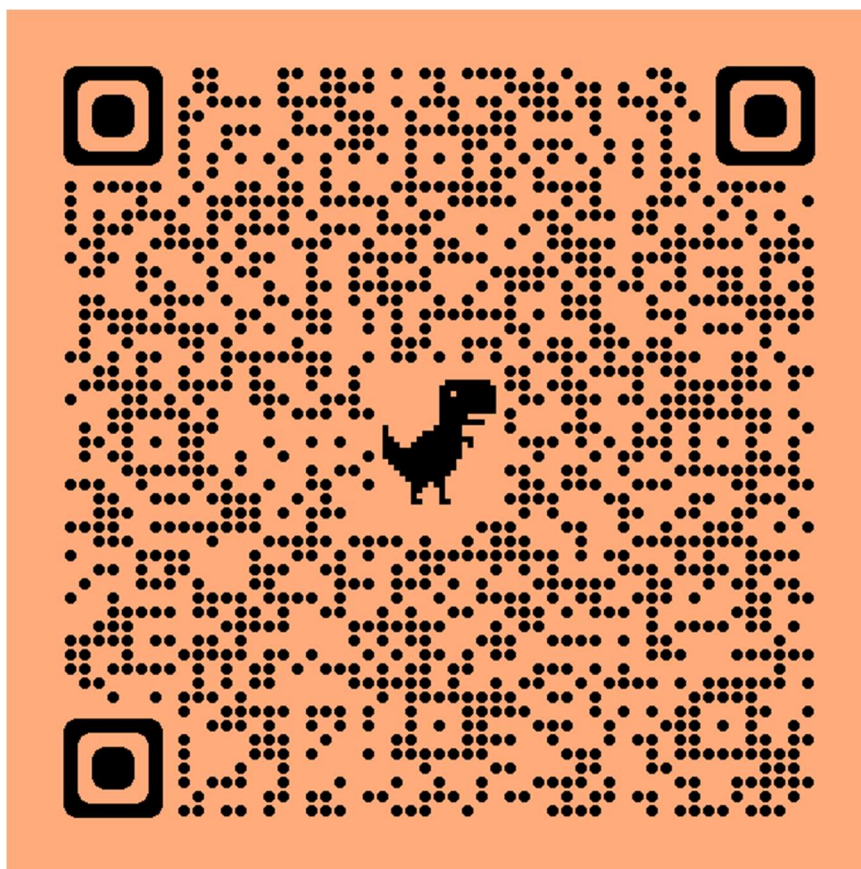
Apêndice E – Resultados da AICV

Apêndice A – 6th Workshop on Environmental Engineering (PEA/UFRJ)



Apêndice B – 8º Congresso Brasileiro de Ciclo de Vida

Apêndice C – 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ)



Apêndice D – Inventário da biorrefinaria

Process	Product	Amount	Unit
electricity production, cobalt industry electricity, high voltage, cobalt industry Cutoff, U - GLO	electricity, high voltage, cobalt industry	3,66E+13	MJ
market for electricity, high voltage, cobalt industry electricity, high voltage, cobalt industry Cutoff, U - GLO	electricity, high voltage, cobalt industry	3,53E+13	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage, cobalt industry electricity, medium voltage, cobalt industry Cutoff, U - GLO	electricity, medium voltage, cobalt industry	3,51E+13	MJ
market for electricity, medium voltage, cobalt industry electricity, medium voltage, cobalt industry Cutoff, U - GLO	electricity, medium voltage, cobalt industry	3,49E+13	MJ
market for transport, freight, sea, tanker for petroleum transport, freight, sea, tanker for petroleum Cutoff, U - GLO	transport, freight, sea, tanker for petroleum	3,38E+13	t*km
transport, freight, sea, tanker for petroleum transport, freight, sea, tanker for petroleum Cutoff, U - GLO	transport, freight, sea, tanker for petroleum	3,38E+13	t*km
electricity production, hydro, reservoir, alpine region electricity, high voltage Cutoff, U - RoW	electricity, high voltage	3,27E+13	MJ
market for heat, district or industrial, natural gas heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, natural gas	2,90E+13	MJ
market for heat, district or industrial, other than natural gas heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	1,68E+13	MJ
heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	1,27E+13	MJ
Extraction - BR	Microalgae oil	1,25E+13	kg
market for heat, district or industrial, natural gas heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - Europe without Switzerland	heat, district or industrial, natural gas	1,07E+13	MJ
market group for heat, district or industrial, natural gas heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - RER	heat, district or industrial, natural gas	1,06E+13	MJ
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - RU	heat, district or industrial, natural gas	1,05E+13	MJ
Hydrodeoxygenation - BR	Green Diesel	1,00E+13	kg
market group for heat, district or industrial, natural gas heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - GLO	heat, district or industrial, natural gas	8,08E+12	MJ
market for hexane hexane Cutoff, U - GLO	hexane	7,60E+12	kg

heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, natural gas	6,91E+12	MJ
market for petroleum petroleum Cutoff, U - GLO	petroleum	6,88E+12	kg
market for transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods Cutoff, U - GLO	transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods	6,81E+12	t*km
transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods Cutoff, U - GLO	transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods	6,81E+12	t*km
heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - Europe without Switzerland	heat, district or industrial, natural gas	5,59E+12	MJ
market group for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - RAS	electricity, medium voltage	5,18E+12	MJ
molecular sieve separation of naphtha hexane Cutoff, U - RoW	hexane	5,07E+12	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - CN-SGCC	electricity, high voltage	5,02E+12	MJ
market group for heat, district or industrial, other than natural gas heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RER	heat, district or industrial, other than natural gas	4,97E+12	MJ
market for heat, district or industrial, other than natural gas heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - Europe without Switzerland	heat, district or industrial, other than natural gas	4,96E+12	MJ
market for water, deionised water, deionised Cutoff, U - RoW	water, deionised	4,71E+12	kg
water production, deionised water, deionised Cutoff, U - RoW	water, deionised	4,71E+12	kg
sweet gas, burned in gas turbine sweet gas, burned in gas turbine Cutoff, U - RoW	sweet gas, burned in gas turbine	4,56E+12	MJ
market for sweet gas, burned in gas turbine sweet gas, burned in gas turbine Cutoff, U - GLO	sweet gas, burned in gas turbine	4,56E+12	MJ
market for water, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - CN	water, decarbonised	4,53E+12	kg
water production, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - CN	water, decarbonised	4,53E+12	kg
market for water, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - RoW	water, decarbonised	4,08E+12	kg
water production, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - RoW	water, decarbonised	4,08E+12	kg
market for transport, freight, sea, container ship transport, freight, sea, container ship Cutoff, U - GLO	transport, freight, sea, container ship	3,71E+12	t*km
transport, freight, sea, container ship transport, freight, sea, container ship Cutoff, U - GLO	transport, freight, sea, container ship	3,71E+12	t*km
market group for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - CN	electricity, medium voltage	3,49E+12	MJ
transport, passenger car transport, passenger car Cutoff, U - RoW	transport, passenger car	3,30E+12	m

market for transport, passenger car transport, passenger car Cutoff, U - RoW	transport, passenger car	3,30E+12	m
market for transport, passenger car with internal combustion engine transport, passenger car with internal combustion engine Cutoff, U - RoW	transport, passenger car with internal combustion engine	3,30E+12	m
transport, passenger car with internal combustion engine transport, passenger car with internal combustion engine Cutoff, U - RoW	transport, passenger car with internal combustion engine	3,30E+12	m
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - CN-SGCC	electricity, medium voltage	3,29E+12	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - CN-SGCC	electricity, medium voltage	3,28E+12	MJ
market for tap water tap water Cutoff, U - RoW	tap water	3,23E+12	kg
water production, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - US	water, decarbonised	3,22E+12	kg
market for water, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - US	water, decarbonised	3,22E+12	kg
naphtha production, petroleum refinery operation naphtha Cutoff, U - RoW	naphtha	3,07E+12	kg
market for naphtha naphtha Cutoff, U - RoW	naphtha	2,93E+12	kg
heat and power co-generation, natural gas, 1MW electrical, lean burn heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, natural gas	2,90E+12	MJ
tap water production, conventional treatment tap water Cutoff, U - RoW	tap water	2,90E+12	kg
market group for heat, district or industrial, other than natural gas heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - GLO	heat, district or industrial, other than natural gas	2,88E+12	MJ
market group for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - Europe without Switzerland	electricity, medium voltage	2,86E+12	MJ
market group for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - RER	electricity, medium voltage	2,81E+12	MJ
market group for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - US	electricity, medium voltage	2,63E+12	MJ
electricity production, hydro, run-of-river electricity, high voltage Cutoff, U - RoW	electricity, high voltage	2,62E+12	MJ
market group for tap water tap water Cutoff, U - GLO	tap water	2,54E+12	kg
molecular sieve separation of naphtha hexane Cutoff, U - RER	hexane	2,53E+12	kg
market for transport, freight, lorry, unspecified transport, freight, lorry, unspecified Cutoff, U - RoW	transport, freight, lorry, unspecified	2,49E+12	t*km
transport, pipeline, onshore, petroleum transport, pipeline, onshore, petroleum Cutoff, U - RoW	transport, pipeline, onshore, petroleum	2,37E+12	t*km
market for transport, pipeline, onshore, petroleum transport, pipeline, onshore, petroleum Cutoff, U - RoW	transport, pipeline, onshore, petroleum	2,37E+12	t*km

market for diesel, burned in building machine diesel, burned in building machine Cutoff, U - GLO	diesel, burned in building machine	2,31E+12	MJ
diesel, burned in building machine diesel, burned in building machine Cutoff, U - GLO	diesel, burned in building machine	2,31E+12	MJ
diesel, burned in diesel-electric generating set, 10MW diesel, burned in diesel-electric generating set, 10MW Cutoff, U - GLO	diesel, burned in diesel-electric generating set, 10MW	2,26E+12	MJ
market for diesel, burned in diesel-electric generating set, 10MW diesel, burned in diesel-electric generating set, 10MW Cutoff, U - GLO	diesel, burned in diesel-electric generating set, 10MW	2,26E+12	MJ
petroleum and gas production, on-shore petroleum Cutoff, U - RoW	petroleum	2,20E+12	kg
market group for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - RNA	electricity, medium voltage	2,15E+12	MJ
market group for transport, freight train transport, freight train Cutoff, U - GLO	transport, freight train	2,11E+12	t*km
water production, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - RU	water, decarbonised	2,11E+12	kg
market for water, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - RU	water, decarbonised	2,11E+12	kg
petroleum production, onshore petroleum Cutoff, U - RME	petroleum	2,07E+12	kg
market for coke coke Cutoff, U - GLO	coke	2,04E+12	MJ
coking coke Cutoff, U - RoW	coke	2,02E+12	MJ
market for ethyl acetate ethyl acetate Cutoff, U - GLO	ethyl acetate	1,90E+12	kg
market group for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - CN	electricity, high voltage	1,86E+12	MJ
market for naphtha naphtha Cutoff, U - RER	naphtha	1,81E+12	kg
naphtha production, petroleum refinery operation naphtha Cutoff, U - Europe without Switzerland	naphtha	1,80E+12	kg
market group for transport, freight, lorry, unspecified transport, freight, lorry, unspecified Cutoff, U - GLO	transport, freight, lorry, unspecified	1,80E+12	t*km
market for transport, freight train transport, freight train Cutoff, U - CN	transport, freight train	1,79E+12	t*km
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - BR-Southern grid	electricity, high voltage	1,72E+12	MJ
market group for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - GLO	electricity, medium voltage	1,68E+12	MJ
market for tap water tap water Cutoff, U - Europe without Switzerland	tap water	1,68E+12	kg
Gasification - BR	Synthesis Gas from Gasification	1,65E+12	kg
Direct Water Quench - BR	Syngas from Direct Water Quench	1,65E+12	kg

heat production, wood chips from industry, at furnace 300kW heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	1,63E+12	MJ
market group for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - US	electricity, high voltage	1,62E+12	MJ
Sour Water Gas Shift - BR	Syngas from Sour Water Gas Shift	1,61E+12	kg
market for process-specific burdens, residual material landfill process-specific burdens, residual material landfill Cutoff, U - RoW	process-specific burdens, residual material landfill	1,60E+12	kg
process-specific burdens, residual material landfill process-specific burdens, residual material landfill Cutoff, U - RoW	process-specific burdens, residual material landfill	1,60E+12	kg
market group for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - RAS	electricity, high voltage	1,60E+12	MJ
heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - Europe without Switzerland	heat, district or industrial, other than natural gas	1,55E+12	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR-Southern grid	electricity, medium voltage	1,53E+12	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR-Southern grid	electricity, medium voltage	1,52E+12	MJ
heat and power co-generation, natural gas, 200kW electrical, lean burn heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, natural gas	1,50E+12	MJ
heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	1,44E+12	MJ
electricity production, nuclear, pressure water reactor, heavy water moderated electricity, high voltage Cutoff, U - RoW	electricity, high voltage	1,43E+12	MJ
electricity voltage transformation from medium to low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - BR-Southern grid	electricity, low voltage	1,43E+12	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - US-SERC	electricity, high voltage	1,42E+12	MJ
market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - BR-Southern grid	electricity, low voltage	1,40E+12	MJ
market for hard coal hard coal Cutoff, U - CN	hard coal	1,38E+12	kg
tap water production, conventional treatment tap water Cutoff, U - ZA	tap water	1,38E+12	kg
market group for tap water tap water Cutoff, U - RER	tap water	1,36E+12	kg
hard coal mine operation and hard coal preparation hard coal Cutoff, U - CN	hard coal	1,34E+12	kg
transport, passenger car, EURO 3 transport, passenger car, EURO 3 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, EURO 3	1,30E+12	m

market for transport, passenger car, EURO 3 transport, passenger car, EURO 3 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, EURO 3	1,30E+12	m
ethyl acetate production ethyl acetate Cutoff, U - RoW	ethyl acetate	1,29E+12	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - CL	electricity, high voltage	1,28E+12	MJ
water production, deionised water, deionised Cutoff, U - Europe without Switzerland	water, deionised	1,28E+12	kg
market for water, deionised water, deionised Cutoff, U - Europe without Switzerland	water, deionised	1,28E+12	kg
transport, freight, sea, tanker for liquefied natural gas transport, freight, sea, tanker for liquefied natural gas Cutoff, U - GLO	transport, freight, sea, tanker for liquefied natural gas	1,27E+12	t*km
market for transport, freight, sea, tanker for liquefied natural gas transport, freight, sea, tanker for liquefied natural gas Cutoff, U - GLO	transport, freight, sea, tanker for liquefied natural gas	1,27E+12	t*km
transport, freight train, diesel transport, freight train Cutoff, U - CN	transport, freight train	1,25E+12	t*km
electricity production, hydro, reservoir, tropical region electricity, high voltage Cutoff, U - BR-Southern grid	electricity, high voltage	1,25E+12	MJ
heat and power co-generation, natural gas, 500kW electrical, lean burn heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, natural gas	1,22E+12	MJ
market for acetic acid, without water, in 98% solution state acetic acid, without water, in 98% solution state Cutoff, U - GLO	acetic acid, without water, in 98% solution state	1,19E+12	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - ZA	electricity, high voltage	1,17E+12	MJ
water production, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - ZA	water, decarbonised	1,15E+12	kg
market for water, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - ZA	water, decarbonised	1,15E+12	kg
process-specific burdens, inert material landfill process-specific burdens, inert material landfill Cutoff, U - RoW	process-specific burdens, inert material landfill	1,15E+12	kg
market for process-specific burdens, inert material landfill process-specific burdens, inert material landfill Cutoff, U - RoW	process-specific burdens, inert material landfill	1,15E+12	kg
tap water production, underground water with chemical treatment tap water Cutoff, U - RoW	tap water	1,14E+12	kg
market for transport, passenger car, EURO 4 transport, passenger car, EURO 4 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, EURO 4	1,13E+12	m
transport, passenger car, EURO 4 transport, passenger car, EURO 4 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, EURO 4	1,13E+12	m
tap water production, conventional with biological treatment tap water Cutoff, U - RoW	tap water	1,12E+12	kg
process-specific burdens, sanitary landfill process-specific burdens, sanitary landfill Cutoff, U - RoW	process-specific burdens, sanitary landfill	1,12E+12	kg

market for process-specific burdens, sanitary landfill process-specific burdens, sanitary landfill Cutoff, U - RoW	process-specific burdens, sanitary landfill	1,12E+12	kg
market for transport, pipeline, onshore, petroleum transport, pipeline, onshore, petroleum Cutoff, U - RER	transport, pipeline, onshore, petroleum	1,09E+12	t*km
transport, pipeline, onshore, petroleum transport, pipeline, onshore, petroleum Cutoff, U - RER	transport, pipeline, onshore, petroleum	1,09E+12	t*km
market for transport, freight train transport, freight train Cutoff, U - RoW	transport, freight train	1,09E+12	t*km
market for sand sand Cutoff, U - RoW	sand	1,08E+12	kg
electricity production, hard coal, conventional electricity, high voltage Cutoff, U - ZA	electricity, high voltage	1,05E+12	MJ
heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, natural gas	1,05E+12	MJ
market for gravel, round gravel, round Cutoff, U - RoW	gravel, round	1,04E+12	kg
gravel and sand quarry operation gravel, round Cutoff, U - RoW	gravel, round	1,04E+12	kg
transport, pipeline, long distance, natural gas transport, pipeline, long distance, natural gas Cutoff, U - RU	transport, pipeline, long distance, natural gas	1,03E+12	t*km
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - ZA	electricity, medium voltage	1,03E+12	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - ZA	electricity, medium voltage	1,02E+12	MJ
transport, freight, lorry, all sizes, EURO3 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified transport, freight, lorry, unspecified Cutoff, U - RoW	transport, freight, lorry, unspecified	1,01E+12	t*km
market for transport, passenger car transport, passenger car Cutoff, U - RER	transport, passenger car	1,00E+12	m
transport, passenger car transport, passenger car Cutoff, U - RER	transport, passenger car	1,00E+12	m
market for transport, passenger car with internal combustion engine transport, passenger car with internal combustion engine Cutoff, U - RER	transport, passenger car with internal combustion engine	1,00E+12	m
transport, passenger car with internal combustion engine transport, passenger car with internal combustion engine Cutoff, U - RER	transport, passenger car with internal combustion engine	1,00E+12	m
market for water, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - IN	water, decarbonised	9,92E+11	kg
water production, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - IN	water, decarbonised	9,92E+11	kg
electricity production, natural gas, conventional power plant electricity, high voltage Cutoff, U - RoW	electricity, high voltage	9,80E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - US-RFC	electricity, high voltage	9,75E+11	MJ

market group for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - GLO	electricity, high voltage	9,44E+11	MJ
market for transport, freight train transport, freight train Cutoff, U - US	transport, freight train	9,37E+11	t*km
transport, freight train, diesel transport, freight train Cutoff, U - US	transport, freight train	9,37E+11	t*km
market for drying, natural gas drying, natural gas Cutoff, U - GLO	drying, natural gas	9,36E+11	m3
drying, natural gas drying, natural gas Cutoff, U - RoW	drying, natural gas	9,30E+11	m3
tap water production, underground water without treatment tap water Cutoff, U - RoW	tap water	9,19E+11	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - RU	electricity, high voltage	9,09E+11	MJ
market for heat, from steam, in chemical industry heat, from steam, in chemical industry Cutoff, U - RoW	heat, from steam, in chemical industry	9,01E+11	MJ
steam production, as energy carrier, in chemical industry heat, from steam, in chemical industry Cutoff, U - RoW	heat, from steam, in chemical industry	9,01E+11	MJ
Urban Solid Waste - Treatment - BR	Refuse derived fuel from pretreatment	8,89E+11	kg
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - US-SERC	electricity, medium voltage	8,88E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - US-SERC	electricity, medium voltage	8,88E+11	MJ
petroleum production, onshore petroleum Cutoff, U - RU	petroleum	8,86E+11	kg
petroleum and gas production, off-shore petroleum Cutoff, U - RoW	petroleum	8,73E+11	kg
heat production, natural gas, at boiler modulating >100kW heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, natural gas	8,72E+11	MJ
transport, passenger car, EURO 5 transport, passenger car, EURO 5 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, EURO 5	8,71E+11	m
market for transport, passenger car, EURO 5 transport, passenger car, EURO 5 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, EURO 5	8,71E+11	m
transport, freight, lorry, all sizes, EURO4 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified transport, freight, lorry, unspecified Cutoff, U - RoW	transport, freight, lorry, unspecified	8,54E+11	t*km
transport, freight train, diesel transport, freight train Cutoff, U - RoW	transport, freight train	7,99E+11	t*km
market for ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene Cutoff, U - RoW	ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene	7,99E+11	kg
acetic acid production, product in 98% solution state acetic acid, without water, in 98% solution state Cutoff, U - RoW	acetic acid, without water, in 98% solution state	7,91E+11	kg

electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - RU	electricity, medium voltage	7,88E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - RU	electricity, medium voltage	7,84E+11	MJ
market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RoW	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4	7,77E+11	t*km
transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RoW	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4	7,77E+11	t*km
market group for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - RNA	electricity, high voltage	7,69E+11	MJ
gravel and sand quarry operation sand Cutoff, U - RoW	sand	7,66E+11	kg
market group for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - RLA	electricity, medium voltage	7,65E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - US-WECC	electricity, high voltage	7,61E+11	MJ
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - DE	heat, district or industrial, natural gas	7,50E+11	MJ
tap water production, direct filtration treatment tap water Cutoff, U - Europe without Switzerland	tap water	7,42E+11	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - JP	electricity, high voltage	7,40E+11	MJ
market group for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - IN	electricity, medium voltage	7,38E+11	MJ
ethylene hydration ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene Cutoff, U - RoW	ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene	7,21E+11	kg
heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - Europe without Switzerland	heat, district or industrial, other than natural gas	7,10E+11	MJ
market for tap water tap water Cutoff, U - ZA	tap water	6,99E+11	kg
market group for transport, freight, inland waterways, barge tanker transport, freight, inland waterways, barge tanker Cutoff, U - GLO	transport, freight, inland waterways, barge tanker	6,51E+11	t*km
market for natural gas, burned in gas motor, for storage natural gas, burned in gas motor, for storage Cutoff, U - GLO	natural gas, burned in gas motor, for storage	6,44E+11	MJ
market for methanol methanol Cutoff, U - GLO	methanol	6,31E+11	kg
methanol production methanol Cutoff, U - GLO	methanol	6,28E+11	kg
market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3	6,26E+11	t*km
transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3	6,26E+11	t*km

market for transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 3 transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 3 Cutoff, U - GLO	transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 3	6,10E+11	m
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - US-RFC	electricity, medium voltage	6,10E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - US-RFC	electricity, medium voltage	6,09E+11	MJ
electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore electricity, high voltage Cutoff, U - RoW	electricity, high voltage	6,06E+11	MJ
natural gas, burned in gas motor, for storage natural gas, burned in gas motor, for storage Cutoff, U - RoW	natural gas, burned in gas motor, for storage	6,03E+11	MJ
tap water production, conventional treatment tap water Cutoff, U - Europe without Switzerland	tap water	6,03E+11	kg
market for transport, freight, inland waterways, barge tanker transport, freight, inland waterways, barge tanker Cutoff, U - RoW	transport, freight, inland waterways, barge tanker	5,83E+11	t*km
transport, freight, inland waterways, barge tanker transport, freight, inland waterways, barge tanker Cutoff, U - RoW	transport, freight, inland waterways, barge tanker	5,83E+11	t*km
electricity production, natural gas, combined cycle power plant electricity, high voltage Cutoff, U - RoW	electricity, high voltage	5,76E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - FR	electricity, high voltage	5,71E+11	MJ
transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified transport, freight, lorry, unspecified Cutoff, U - RoW	transport, freight, lorry, unspecified	5,70E+11	t*km
market for gravel, crushed gravel, crushed Cutoff, U - RoW	gravel, crushed	5,64E+11	kg
gravel production, crushed gravel, crushed Cutoff, U - RoW	gravel, crushed	5,64E+11	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - DE	electricity, high voltage	5,64E+11	MJ
electricity production, hydro, reservoir, non-alpine region electricity, high voltage Cutoff, U - RoW	electricity, high voltage	5,63E+11	MJ
market for transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 4 transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 4 Cutoff, U - GLO	transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 4	5,60E+11	m
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CL	electricity, high voltage	5,59E+11	MJ
heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - RU	heat, district or industrial, natural gas	5,40E+11	MJ
market for hard coal hard coal Cutoff, U - ZA	hard coal	5,37E+11	kg
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - JP	electricity, medium voltage	5,29E+11	MJ
electricity production, natural gas, combined cycle power plant electricity, high voltage Cutoff, U - US-SERC	electricity, high voltage	5,28E+11	MJ

process-specific burdens, residual material landfill process-specific burdens, residual material landfill Cutoff, U - Europe without Switzerland	process-specific burdens, residual material landfill	5,22E+11	kg
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - JP	electricity, medium voltage	5,19E+11	MJ
transport, freight train, electricity transport, freight train Cutoff, U - CN	transport, freight train	5,15E+11	t*km
water production, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - FR	water, decarbonised	5,10E+11	kg
market for water, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - FR	water, decarbonised	5,10E+11	kg
market for process-specific burdens, residual material landfill process-specific burdens, residual material landfill Cutoff, U - Europe without Switzerland	process-specific burdens, residual material landfill	5,04E+11	kg
transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 3 transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 3 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 3	5,03E+11	m
heat production, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, natural gas	4,95E+11	MJ
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - SA	heat, district or industrial, natural gas	4,91E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - US-MRO	electricity, high voltage	4,90E+11	MJ
market for ethylene ethylene Cutoff, U - RoW	ethylene	4,88E+11	kg
ethylene production, average ethylene Cutoff, U - RoW	ethylene	4,88E+11	kg
market for transport, passenger car, large size, diesel, EURO 4 transport, passenger car, large size, diesel, EURO 4 Cutoff, U - GLO	transport, passenger car, large size, diesel, EURO 4	4,82E+11	m
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - CL	electricity, medium voltage	4,80E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - CL	electricity, medium voltage	4,79E+11	MJ
natural gas production natural gas, high pressure Cutoff, U - RU	natural gas, high pressure	4,78E+11	m3
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-JS	electricity, high voltage	4,77E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - CN-CSG	electricity, high voltage	4,77E+11	MJ
market for naphtha naphtha Cutoff, U - IN	naphtha	4,76E+11	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - BR-South-eastern grid	electricity, high voltage	4,70E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - US-WECC	electricity, medium voltage	4,65E+11	MJ

market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - US-WECC	electricity, medium voltage	4,64E+11	MJ
transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 4 transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 4 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 4	4,62E+11	m
heat production, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, natural gas	4,59E+11	MJ
Selexol - BR	Syngas from Selexol	4,55E+11	kg
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, U - RoW	natural gas, high pressure	4,55E+11	m3
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - KR	electricity, high voltage	4,54E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - IN-Western grid	electricity, high voltage	4,54E+11	MJ
market for heat, district or industrial, natural gas heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - CA-QC	heat, district or industrial, natural gas	4,53E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - DE	electricity, medium voltage	4,52E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - FR	electricity, medium voltage	4,50E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - FR	electricity, medium voltage	4,48E+11	MJ
market group for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - RME	electricity, medium voltage	4,46E+11	MJ
electricity production, hydro, run-of-river electricity, high voltage Cutoff, U - CL	electricity, high voltage	4,42E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - DE	electricity, medium voltage	4,41E+11	MJ
market for transport, passenger car, small size, petrol, EURO 3 transport, passenger car, small size, petrol, EURO 3 Cutoff, U - GLO	transport, passenger car, small size, petrol, EURO 3	4,39E+11	m
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - US-TRE	electricity, high voltage	4,38E+11	MJ
electricity production, nuclear, pressure water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - FR	electricity, high voltage	4,29E+11	MJ
ethyl acetate production ethyl acetate Cutoff, U - RER	ethyl acetate	4,26E+11	kg
market group for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, U - GLO	natural gas, high pressure	4,26E+11	m3
market for transport, freight, sea, tanker for liquid goods other than petroleum and liquefied natural gas transport, freight, sea, tanker for liquid goods other than petroleum and liquefied natural gas Cutoff, U - GLO	transport, freight, sea, tanker for liquid goods other than petroleum and liquefied natural gas	4,24E+11	t*km

transport, freight, sea, tanker for liquid goods other than petroleum and liquefied natural gas transport, freight, sea, tanker for liquid goods other than petroleum and liquefied natural gas Cutoff, U - GLO	transport, freight, sea, tanker for liquid goods other than petroleum and liquefied natural gas	4,24E+11	t*km
transport, passenger car, EURO 3 transport, passenger car, EURO 3 Cutoff, U - RER	transport, passenger car, EURO 3	4,23E+11	m
market for transport, passenger car, EURO 3 transport, passenger car, EURO 3 Cutoff, U - RER	transport, passenger car, EURO 3	4,23E+11	m
market for water, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - DE	water, decarbonised	4,21E+11	kg
water production, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - DE	water, decarbonised	4,21E+11	kg
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-SD	electricity, high voltage	4,20E+11	MJ
market for transport, freight train transport, freight train Cutoff, U - IN	transport, freight train	4,17E+11	t*km
market for transport, freight, lorry, unspecified transport, freight, lorry, unspecified Cutoff, U - RER	transport, freight, lorry, unspecified	4,16E+11	t*km
heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - IT	heat, district or industrial, natural gas	4,15E+11	MJ
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical electricity, high voltage Cutoff, U - RU	electricity, high voltage	4,07E+11	MJ
market for nickel concentrate, 7% Ni nickel concentrate, 7% Ni Cutoff, U - CN	nickel concentrate, 7% Ni	4,05E+11	kg
nickel mine operation and beneficiation to nickel concentrate, 7% Ni nickel concentrate, 7% Ni Cutoff, U - CN	nickel concentrate, 7% Ni	4,05E+11	kg
natural gas, burned in gas turbine, for compressor station electricity, medium voltage Cutoff, U - RU	electricity, medium voltage	4,03E+11	MJ
market for transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 5 transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 5 Cutoff, U - GLO	transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 5	4,01E+11	m
transport, passenger car, large size, diesel, EURO 4 transport, passenger car, large size, diesel, EURO 4 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, large size, diesel, EURO 4	3,98E+11	m
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-NM	electricity, high voltage	3,95E+11	MJ
market for transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 3 transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 3 Cutoff, U - GLO	transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 3	3,93E+11	m
natural gas production natural gas, high pressure Cutoff, U - RoW	natural gas, high pressure	3,88E+11	m3
market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3	3,87E+11	t*km
transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3	3,87E+11	t*km
market for carbon monoxide carbon monoxide Cutoff, U - RoW	carbon monoxide	3,80E+11	kg

carbon monoxide production carbon monoxide Cutoff, U - RoW	carbon monoxide	3,80E+11	kg
market for limestone, unprocessed limestone, unprocessed Cutoff, U - RoW	limestone, unprocessed	3,74E+11	kg
limestone quarry operation limestone, unprocessed Cutoff, U - RoW	limestone, unprocessed	3,74E+11	kg
market group for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - RAF	electricity, medium voltage	3,70E+11	MJ
market group for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR	electricity, medium voltage	3,70E+11	MJ
transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 Cutoff, U - RoW	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5	3,67E+11	t*km
market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 Cutoff, U - RoW	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5	3,67E+11	t*km
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR-South-eastern grid	electricity, medium voltage	3,66E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR-South-eastern grid	electricity, medium voltage	3,63E+11	MJ
transport, passenger car, small size, petrol, EURO 3 transport, passenger car, small size, petrol, EURO 3 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, small size, petrol, EURO 3	3,62E+11	m
tap water production, conventional treatment tap water Cutoff, U - IN	tap water	3,62E+11	kg
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - ES	heat, district or industrial, natural gas	3,60E+11	MJ
heat production, light fuel oil, at industrial furnace 1MW heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	3,57E+11	MJ
Boiler - BR	Steam from Boiler	3,56E+11	kg
market for transport, freight train transport, freight train Cutoff, U - Europe without Switzerland	transport, freight train	3,53E+11	t*km
market for transport, freight, inland waterways, barge transport, freight, inland waterways, barge Cutoff, U - RoW	transport, freight, inland waterways, barge	3,49E+11	t*km
transport, freight, inland waterways, barge transport, freight, inland waterways, barge Cutoff, U - RoW	transport, freight, inland waterways, barge	3,49E+11	t*km
market for electricity, high voltage, aluminium industry electricity, high voltage, aluminium industry Cutoff, U - CN	electricity, high voltage, aluminium industry	3,48E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage, aluminium industry electricity, medium voltage, aluminium industry Cutoff, U - CN	electricity, medium voltage, aluminium industry	3,46E+11	MJ
market for electricity, medium voltage, aluminium industry electricity, medium voltage, aluminium industry Cutoff, U - CN	electricity, medium voltage, aluminium industry	3,45E+11	MJ
tap water production, direct filtration treatment tap water Cutoff, U - RoW	tap water	3,45E+11	kg

naphtha production, petroleum refinery operation naphtha Cutoff, U - IN	naphtha	3,43E+11	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - IN-Northern grid	electricity, high voltage	3,41E+11	MJ
market for transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4 transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4 Cutoff, U - GLO	transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4	3,33E+11	m
transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 5 transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 5 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 5	3,30E+11	m
hard coal preparation, coal washing hard coal Cutoff, U - ZA	hard coal	3,26E+11	kg
transport, passenger car, EURO 4 transport, passenger car, EURO 4 Cutoff, U - RER	transport, passenger car, EURO 4	3,26E+11	m
market for transport, passenger car, EURO 4 transport, passenger car, EURO 4 Cutoff, U - RER	transport, passenger car, EURO 4	3,26E+11	m
market group for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - IN	electricity, high voltage	3,24E+11	MJ
transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 3 transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 3 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 3	3,24E+11	m
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, U - RU	natural gas, high pressure	3,24E+11	m3
heavy fuel oil production, petroleum refinery operation heavy fuel oil Cutoff, U - RoW	heavy fuel oil	3,24E+11	kg
heat and power co-generation, natural gas, 1MW electrical, lean burn heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - Europe without Switzerland	heat, district or industrial, natural gas	3,22E+11	MJ
electricity production, coal, aluminium industry electricity, high voltage, aluminium industry Cutoff, U - CN	electricity, high voltage, aluminium industry	3,21E+11	MJ
market for heavy fuel oil heavy fuel oil Cutoff, U - RoW	heavy fuel oil	3,20E+11	kg
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - KR	electricity, medium voltage	3,18E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - KR	electricity, medium voltage	3,18E+11	MJ
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - KR	heat, district or industrial, natural gas	3,17E+11	MJ
sand quarry operation, extraction from river bed sand Cutoff, U - RoW	sand	3,16E+11	kg
water production, completely softened water, completely softened Cutoff, U - RoW	water, completely softened	3,16E+11	kg
market for water, completely softened water, completely softened Cutoff, U - RoW	water, completely softened	3,16E+11	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - CH	electricity, high voltage	3,13E+11	MJ

lignite mine operation lignite Cutoff, U - RoW	lignite	3,12E+11	kg
market for lignite lignite Cutoff, U - RoW	lignite	3,12E+11	kg
market for molybdenite molybdenite Cutoff, U - GLO	molybdenite	3,09E+11	kg
transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RoW	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4	3,08E+11	t*km
market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RoW	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4	3,08E+11	t*km
nickel mine operation and beneficiation to nickel concentrate, 16% Ni nickel concentrate, 16% Ni Cutoff, U - CA-QC	nickel concentrate, 16% Ni	3,06E+11	kg
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - US-MRO	electricity, medium voltage	3,05E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - US-MRO	electricity, medium voltage	3,05E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - CN-CSG	electricity, medium voltage	3,04E+11	MJ
market group for transport, freight train transport, freight train Cutoff, U - RER	transport, freight train	3,03E+11	t*km
treatment of municipal solid waste, incineration heat, for reuse in municipal waste incineration only Cutoff, U - BG	heat, for reuse in municipal waste incineration only	3,03E+11	MJ
market for heat, for reuse in municipal waste incineration only heat, for reuse in municipal waste incineration only Cutoff, U - BG	heat, for reuse in municipal waste incineration only	3,03E+11	MJ
heat, from municipal waste incineration to generic market for heat district or industrial, other than natural gas heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - BG	heat, district or industrial, other than natural gas	3,03E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - CN-CSG	electricity, medium voltage	3,03E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - GB	electricity, high voltage	3,00E+11	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-HE	electricity, high voltage	2,99E+11	MJ
market for sand sand Cutoff, U - BR	sand	2,99E+11	kg
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - UA	heat, district or industrial, natural gas	2,96E+11	MJ
electricity production, hydro, run-of-river electricity, high voltage Cutoff, U - CN-SC	electricity, high voltage	2,94E+11	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-SX	electricity, high voltage	2,94E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - IT	electricity, high voltage	2,94E+11	MJ
gravel and sand quarry operation gravel, round Cutoff, U - CH	gravel, round	2,92E+11	kg

market for gravel, round gravel, round Cutoff, U - CH	gravel, round	2,92E+11	kg
market for hard coal hard coal Cutoff, U - IN	hard coal	2,91E+11	kg
hard coal mine operation, underground hard coal, run-of-mine Cutoff, U - ZA	hard coal, run-of-mine	2,84E+11	kg
market group for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - CA	electricity, medium voltage	2,81E+11	MJ
market for transport, freight, inland waterways, barge tanker transport, freight, inland waterways, barge tanker Cutoff, U - RER	transport, freight, inland waterways, barge tanker	2,81E+11	t*km
transport, freight, inland waterways, barge tanker transport, freight, inland waterways, barge tanker Cutoff, U - RER	transport, freight, inland waterways, barge tanker	2,81E+11	t*km
transport, freight train, electricity transport, freight train Cutoff, U - RoW	transport, freight train	2,80E+11	t*km
market for transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 4 transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 4 Cutoff, U - GLO	transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 4	2,79E+11	m
transport, pipeline, long distance, natural gas transport, pipeline, long distance, natural gas Cutoff, U - RoW	transport, pipeline, long distance, natural gas	2,78E+11	t*km
electricity production, oil electricity, high voltage Cutoff, U - RoW	electricity, high voltage	2,77E+11	MJ
transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4 transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4	2,75E+11	m
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - CH	electricity, medium voltage	2,74E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - CH	electricity, medium voltage	2,73E+11	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-ZJ	electricity, high voltage	2,73E+11	MJ
petroleum production, onshore petroleum Cutoff, U - RoW	petroleum	2,72E+11	kg
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - GB	electricity, medium voltage	2,72E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - IT	electricity, medium voltage	2,71E+11	MJ
heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - NL	heat, district or industrial, natural gas	2,71E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - GB	electricity, medium voltage	2,71E+11	MJ
market for sour gas, burned in gas turbine sour gas, burned in gas turbine Cutoff, U - GLO	sour gas, burned in gas turbine	2,70E+11	MJ
market for steam, in chemical industry steam, in chemical industry Cutoff, U - RoW	steam, in chemical industry	2,70E+11	kg

steam production, in chemical industry steam, in chemical industry Cutoff, U - RoW	steam, in chemical industry	2,70E+11	kg
market group for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, U - Europe without Switzerland	natural gas, high pressure	2,69E+11	m3
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - US-TRE	electricity, medium voltage	2,69E+11	MJ
transport, freight train, electricity transport, freight train Cutoff, U - IN	transport, freight train	2,69E+11	t*km
sour gas, burned in gas turbine sour gas, burned in gas turbine Cutoff, U - RoW	sour gas, burned in gas turbine	2,69E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - US-TRE	electricity, medium voltage	2,68E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - US-NPCC	electricity, high voltage	2,68E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - IT	electricity, medium voltage	2,67E+11	MJ
clay pit operation clay Cutoff, U - RoW	clay	2,67E+11	kg
market for clay clay Cutoff, U - RoW	clay	2,67E+11	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - IR	electricity, high voltage	2,67E+11	MJ
hard coal mine operation, open cast, dragline hard coal, run-of-mine Cutoff, U - ZA	hard coal, run-of-mine	2,65E+11	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - ES	electricity, high voltage	2,65E+11	MJ
ethylene hydration ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene Cutoff, U - RER	ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene	2,64E+11	kg
market for ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene Cutoff, U - RER	ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene	2,64E+11	kg
market group for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - RLA	electricity, high voltage	2,64E+11	MJ
iron ore mine operation, 46% Fe iron ore, crude ore, 46% Fe Cutoff, U - GLO	iron ore, crude ore, 46% Fe	2,63E+11	kg
electricity production, natural gas, combined cycle power plant electricity, high voltage Cutoff, U - US-RFC	electricity, high voltage	2,62E+11	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - RoW	electricity, high voltage	2,61E+11	MJ
market for transport, freight, lorry, unspecified transport, freight, lorry, unspecified Cutoff, U - BR	transport, freight, lorry, unspecified	2,60E+11	t*km
market for transport, passenger car, small size, petrol, EURO 5 transport, passenger car, small size, petrol, EURO 5 Cutoff, U - GLO	transport, passenger car, small size, petrol, EURO 5	2,60E+11	m

heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - FR	heat, district or industrial, natural gas	2,59E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - IN-Western grid	electricity, medium voltage	2,58E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - IN-Southern grid	electricity, high voltage	2,57E+11	MJ
water production, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - BR	water, decarbonised	2,57E+11	kg
market for water, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - BR	water, decarbonised	2,57E+11	kg
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-HB	electricity, high voltage	2,57E+11	MJ
limestone quarry operation limestone, unprocessed Cutoff, U - IN	limestone, unprocessed	2,56E+11	kg
market for limestone, unprocessed limestone, unprocessed Cutoff, U - IN	limestone, unprocessed	2,56E+11	kg
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - IT	heat, district or industrial, natural gas	2,56E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - MX	electricity, high voltage	2,56E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - IN-Western grid	electricity, medium voltage	2,55E+11	MJ
market for tap water tap water Cutoff, U - IN	tap water	2,54E+11	kg
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - JP	electricity, high voltage	2,53E+11	MJ
transport, passenger car, EURO 5 transport, passenger car, EURO 5 Cutoff, U - RER	transport, passenger car, EURO 5	2,51E+11	m
market for transport, passenger car, EURO 5 transport, passenger car, EURO 5 Cutoff, U - RER	transport, passenger car, EURO 5	2,51E+11	m
water production, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - CA	water, decarbonised	2,51E+11	kg
market for water, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - CA	water, decarbonised	2,51E+11	kg
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - US-SERC	heat, district or industrial, natural gas	2,50E+11	MJ
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, U - US	natural gas, high pressure	2,49E+11	m3
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical electricity, high voltage Cutoff, U - RoW	electricity, high voltage	2,48E+11	MJ
limestone production, crushed, for mill limestone, crushed, for mill Cutoff, U - IN	limestone, crushed, for mill	2,47E+11	kg
market for limestone, crushed, for mill limestone, crushed, for mill Cutoff, U - IN	limestone, crushed, for mill	2,47E+11	kg

electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - US-RFC	electricity, high voltage	2,44E+11	MJ
heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, natural gas	2,42E+11	MJ
market for transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 5 transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 5 Cutoff, U - GLO	transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 5	2,41E+11	m
electricity production, nuclear, pressure water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - US-SERC	electricity, high voltage	2,41E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - TR	electricity, high voltage	2,39E+11	MJ
hard coal mine operation hard coal, run-of-mine Cutoff, U - IN	hard coal, run-of-mine	2,39E+11	kg
market for hard coal, run-of-mine hard coal, run-of-mine Cutoff, U - IN	hard coal, run-of-mine	2,39E+11	kg
market group for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - BR	electricity, high voltage	2,39E+11	MJ
market group for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - RME	electricity, high voltage	2,33E+11	MJ
market for transport, pipeline, long distance, natural gas transport, pipeline, long distance, natural gas Cutoff, U - RoW	transport, pipeline, long distance, natural gas	2,32E+11	t*km
market for sulfuric acid sulfuric acid Cutoff, U - RoW	sulfuric acid	2,31E+11	kg
transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 4 transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 4 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 4	2,30E+11	m
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-AH	electricity, high voltage	2,29E+11	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - US-SERC	electricity, high voltage	2,28E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - ES	electricity, medium voltage	2,28E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - ES	electricity, medium voltage	2,27E+11	MJ
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - NL	heat, district or industrial, natural gas	2,24E+11	MJ
hard coal preparation, crushing and destoning hard coal Cutoff, U - ZA	hard coal	2,22E+11	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - IN-Eastern grid	electricity, high voltage	2,19E+11	MJ
market group for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - Europe without Switzerland	electricity, high voltage	2,17E+11	MJ
hard coal, run-of-mine to market for hard coal hard coal Cutoff, U - IN	hard coal	2,17E+11	kg
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - IN-Northern grid	electricity, medium voltage	2,17E+11	MJ

heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - IR	heat, district or industrial, natural gas	2,16E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - IN-Northern grid	electricity, medium voltage	2,15E+11	MJ
market for lime lime Cutoff, U - RoW	lime	2,15E+11	kg
transport, passenger car, small size, petrol, EURO 5 transport, passenger car, small size, petrol, EURO 5 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, small size, petrol, EURO 5	2,14E+11	m
tap water production, underground water with disinfection tap water Cutoff, U - ZA	tap water	2,14E+11	kg
lime production, milled, loose lime Cutoff, U - RoW	lime	2,12E+11	kg
transport, freight train, electricity transport, freight train Cutoff, U - Europe without Switzerland	transport, freight train	2,12E+11	t*km
market group for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - Canada without Quebec	electricity, medium voltage	2,11E+11	MJ
market for clay brick clay brick Cutoff, U - GLO	clay brick	2,11E+11	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - PY	electricity, high voltage	2,11E+11	MJ
petroleum production, onshore petroleum Cutoff, U - RAF	petroleum	2,11E+11	kg
sand quarry operation, extraction from river bed sand Cutoff, U - BR	sand	2,09E+11	kg
heat and power co-generation, hard coal heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - PL	heat, district or industrial, other than natural gas	2,08E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - SA	electricity, high voltage	2,06E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - AU	electricity, high voltage	2,06E+11	MJ
electricity production, nuclear, pressure water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - US-RFC	electricity, high voltage	2,03E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - VN	electricity, high voltage	2,03E+11	MJ
natural gas production natural gas, high pressure Cutoff, U - DZ	natural gas, high pressure	2,01E+11	m3
electricity production, hydro, pumped storage electricity, high voltage Cutoff, U - RoW	electricity, high voltage	1,99E+11	MJ
transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 5 transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 5 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 5	1,99E+11	m
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-XJ	electricity, high voltage	1,99E+11	MJ
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - US-WECC	heat, district or industrial, natural gas	1,98E+11	MJ
acetic acid production, product in 98% solution state acetic acid, without water, in 98% solution state Cutoff, U - RER	acetic acid, without water, in 98% solution state	1,98E+11	kg

market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - CA-QC	electricity, high voltage	1,98E+11	MJ
electricity, high voltage, import from PY electricity, high voltage Cutoff, U - BR-Southern grid	electricity, high voltage	1,97E+11	MJ
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - TR	heat, district or industrial, natural gas	1,96E+11	MJ
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - RO	heat, district or industrial, natural gas	1,96E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - AR	electricity, high voltage	1,95E+11	MJ
heat production, at coal coke industrial furnace 1-10MW heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	1,93E+11	MJ
tap water production, underground water without treatment tap water Cutoff, U - Europe without Switzerland	tap water	1,92E+11	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - TW	electricity, high voltage	1,89E+11	MJ
market for natural gas, unprocessed, at extraction natural gas, unprocessed, at extraction Cutoff, U - GLO	natural gas, unprocessed, at extraction	1,87E+11	m3
natural gas production, unprocessed, at extraction natural gas, unprocessed, at extraction Cutoff, U - GLO	natural gas, unprocessed, at extraction	1,87E+11	m3
electricity production, natural gas, combined cycle power plant electricity, high voltage Cutoff, U - US-WECC	electricity, high voltage	1,86E+11	MJ
transport, freight, lorry, all sizes, EURO3 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified transport, freight, lorry, unspecified Cutoff, U - RER	transport, freight, lorry, unspecified	1,86E+11	t*km
market for limestone, crushed, washed limestone, crushed, washed Cutoff, U - RoW	limestone, crushed, washed	1,85E+11	kg
limestone production, crushed, washed limestone, crushed, washed Cutoff, U - RoW	limestone, crushed, washed	1,85E+11	kg
market group for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - RER	electricity, high voltage	1,84E+11	MJ
ethylene production, average ethylene Cutoff, U - RER	ethylene	1,84E+11	kg
market for ethylene ethylene Cutoff, U - RER	ethylene	1,84E+11	kg
heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - DE	heat, district or industrial, other than natural gas	1,81E+11	MJ
electricity production, hydro, reservoir, alpine region electricity, high voltage Cutoff, U - NO	electricity, high voltage	1,81E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - IN-Southern grid	electricity, medium voltage	1,80E+11	MJ

packing, lime product packing, lime product Cutoff, U - RoW	packing, lime product	1,80E+11	kg
market for packing, lime product packing, lime product Cutoff, U - GLO	packing, lime product	1,80E+11	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - SE	electricity, high voltage	1,80E+11	MJ
market group for transport, freight, inland waterways, barge transport, freight, inland waterways, barge Cutoff, U - GLO	transport, freight, inland waterways, barge	1,79E+11	t*km
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - IN-Southern grid	electricity, medium voltage	1,79E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - EG	electricity, high voltage	1,79E+11	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - KR	electricity, high voltage	1,78E+11	MJ
heat and power co-generation, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - RoW	electricity, high voltage	1,75E+11	MJ
natural gas production natural gas, high pressure Cutoff, U - US	natural gas, high pressure	1,74E+11	m3
hard coal mine operation and hard coal preparation hard coal Cutoff, U - AU	hard coal	1,74E+11	kg
market for hard coal hard coal Cutoff, U - AU	hard coal	1,74E+11	kg
heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - SA	heat, district or industrial, natural gas	1,73E+11	MJ
petroleum and gas production, off-shore petroleum Cutoff, U - BR	petroleum	1,73E+11	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - NO	electricity, high voltage	1,72E+11	MJ
market for transport, freight train transport, freight train Cutoff, U - ZA	transport, freight train	1,72E+11	t*km
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - US-NPCC	electricity, medium voltage	1,70E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - MX	electricity, medium voltage	1,70E+11	MJ
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - US-TRE	heat, district or industrial, natural gas	1,69E+11	MJ
market for nickel, class 1 nickel, class 1 Cutoff, U - GLO	nickel, class 1	1,69E+11	kg
market for molybdenum molybdenum Cutoff, U - GLO	molybdenum	1,69E+11	kg
electricity production, natural gas, conventional power plant electricity, high voltage Cutoff, U - JP	electricity, high voltage	1,69E+11	MJ
liquefied petroleum gas production, petroleum refinery operation liquefied petroleum gas Cutoff, U - RoW	liquefied petroleum gas	1,69E+11	kg
market for hot rolling, steel hot rolling, steel Cutoff, U - GLO	hot rolling, steel	1,69E+11	kg
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - MX	electricity, medium voltage	1,68E+11	MJ

market for water, completely softened water, completely softened Cutoff, U - US	water, completely softened	1,68E+11	kg
water production, completely softened water, completely softened Cutoff, U - US	water, completely softened	1,68E+11	kg
market for gravel, crushed gravel, crushed Cutoff, U - IN	gravel, crushed	1,68E+11	kg
gravel production, crushed gravel, crushed Cutoff, U - IN	gravel, crushed	1,68E+11	kg
electricity production, hydro, run-of-river electricity, high voltage Cutoff, U - RU	electricity, high voltage	1,67E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - US-NPCC	electricity, medium voltage	1,67E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - PL	electricity, high voltage	1,66E+11	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-GD	electricity, high voltage	1,66E+11	MJ
molybdenum production molybdenum Cutoff, U - RoW	molybdenum	1,66E+11	kg
market for transport, passenger car, large size, diesel, EURO 3 transport, passenger car, large size, diesel, EURO 3 Cutoff, U - GLO	transport, passenger car, large size, diesel, EURO 3	1,66E+11	m
electricity voltage transformation from medium to low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - BR-South-eastern grid	electricity, low voltage	1,65E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - UA	electricity, high voltage	1,64E+11	MJ
tap water production, ultrafiltration treatment tap water Cutoff, U - RoW	tap water	1,64E+11	kg
transport, freight, lorry, all sizes, EURO4 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified transport, freight, lorry, unspecified Cutoff, U - RER	transport, freight, lorry, unspecified	1,62E+11	t*km
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - IR	electricity, medium voltage	1,62E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - IR	electricity, medium voltage	1,61E+11	MJ
heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - FI	heat, district or industrial, other than natural gas	1,60E+11	MJ
petroleum and gas production, off-shore natural gas, high pressure Cutoff, U - NO	natural gas, high pressure	1,59E+11	m3
electricity production, hydro, run-of-river electricity, high voltage Cutoff, U - CN-HU	electricity, high voltage	1,59E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - CA-ON	electricity, high voltage	1,59E+11	MJ
market for natural gas, liquefied natural gas, liquefied Cutoff, U - GLO	natural gas, liquefied	1,59E+11	m3

market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - BR-South-eastern grid	electricity, low voltage	1,59E+11	MJ
market group for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - CA	electricity, high voltage	1,58E+11	MJ
iron ore beneficiation iron ore concentrate Cutoff, U - RoW	iron ore concentrate	1,58E+11	kg
heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - SE	heat, district or industrial, other than natural gas	1,57E+11	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-LN	electricity, high voltage	1,57E+11	MJ
hot rolling, steel hot rolling, steel Cutoff, U - RoW	hot rolling, steel	1,56E+11	kg
clay brick production clay brick Cutoff, U - RoW	clay brick	1,56E+11	kg
market for nickel concentrate, 16% Ni nickel concentrate, 16% Ni Cutoff, U - GLO	nickel concentrate, 16% Ni	1,56E+11	kg
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - AU	heat, district or industrial, natural gas	1,56E+11	MJ
market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cutoff, U - RoW	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	1,55E+11	t*km
transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cutoff, U - RoW	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	1,55E+11	t*km
limestone production, crushed, for mill limestone, crushed, for mill Cutoff, U - RoW	limestone, crushed, for mill	1,55E+11	kg
market for limestone, crushed, for mill limestone, crushed, for mill Cutoff, U - RoW	limestone, crushed, for mill	1,55E+11	kg
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - TR	electricity, medium voltage	1,54E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - TR	electricity, medium voltage	1,53E+11	MJ
market group for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - RAS	electricity, low voltage	1,53E+11	MJ
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - US-RFC	heat, district or industrial, natural gas	1,53E+11	MJ
transport, pipeline, onshore, long distance, natural gas transport, pipeline, onshore, long distance, natural gas Cutoff, U - DZ	transport, pipeline, onshore, long distance, natural gas	1,53E+11	t*km
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - KZ	electricity, high voltage	1,52E+11	MJ
water production, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - ES	water, decarbonised	1,51E+11	kg
market for water, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - ES	water, decarbonised	1,51E+11	kg

market for water, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - GB	water, decarbonised	1,50E+11	kg
water production, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - GB	water, decarbonised	1,50E+11	kg
market for transport, passenger car, large size, diesel, EURO 5 transport, passenger car, large size, diesel, EURO 5 Cutoff, U - GLO	transport, passenger car, large size, diesel, EURO 5	1,49E+11	m
heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - US-SERC	heat, district or industrial, natural gas	1,49E+11	MJ
transport, freight train, diesel transport, freight train Cutoff, U - IN	transport, freight train	1,48E+11	t*km
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - BR-North-eastern grid	electricity, high voltage	1,48E+11	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-FJ	electricity, high voltage	1,48E+11	MJ
oxidation of butane ethyl acetate Cutoff, U - RoW	ethyl acetate	1,47E+11	kg
electricity, high voltage, import from BR-Southern grid electricity, high voltage Cutoff, U - BR-South-eastern grid	electricity, high voltage	1,47E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - AU	electricity, medium voltage	1,46E+11	MJ
market for hard coal hard coal Cutoff, U - ID	hard coal	1,46E+11	kg
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - AU	electricity, medium voltage	1,46E+11	MJ
tap water production, microstrainer treatment tap water Cutoff, U - RoW	tap water	1,46E+11	kg
hard coal mine operation and hard coal preparation hard coal Cutoff, U - ID	hard coal	1,46E+11	kg
electricity production, hydro, run-of-river electricity, high voltage Cutoff, U - US-WECC	electricity, high voltage	1,45E+11	MJ
electricity production, natural gas, conventional power plant electricity, high voltage Cutoff, U - IR	electricity, high voltage	1,45E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - PL	electricity, medium voltage	1,45E+11	MJ
electricity production, natural gas, combined cycle power plant electricity, high voltage Cutoff, U - JP	electricity, high voltage	1,45E+11	MJ
heat and power co-generation, hard coal heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - DE	heat, district or industrial, other than natural gas	1,45E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - PL	electricity, medium voltage	1,45E+11	MJ
hard coal mine operation, open cast, truck and shovel hard coal, run-of-mine Cutoff, U - ZA	hard coal, run-of-mine	1,44E+11	kg

electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-SA	electricity, high voltage	1,44E+11	MJ
market for lime, packed lime, packed Cutoff, U - RoW	lime, packed	1,43E+11	kg
lime production, milled, packed lime, packed Cutoff, U - RoW	lime, packed	1,43E+11	kg
heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - PL	heat, district or industrial, other than natural gas	1,43E+11	MJ
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, U - DZ	natural gas, high pressure	1,42E+11	m3
market for wood chips, dry, measured as dry mass wood chips, dry, measured as dry mass Cutoff, U - RoW	wood chips, dry, measured as dry mass	1,41E+11	kg
transport, freight train, diesel transport, freight train Cutoff, U - Europe without Switzerland	transport, freight train	1,41E+11	t*km
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - ID	electricity, high voltage	1,40E+11	MJ
electricity production, lignite electricity, high voltage Cutoff, U - DE	electricity, high voltage	1,40E+11	MJ
market for silica sand silica sand Cutoff, U - GLO	silica sand	1,40E+11	kg
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - NO	electricity, medium voltage	1,40E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - NO	electricity, medium voltage	1,40E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - UA	electricity, medium voltage	1,39E+11	MJ
transport, freight train, electricity transport, freight train Cutoff, U - ZA	transport, freight train	1,39E+11	t*km
electricity production, natural gas, combined cycle power plant electricity, high voltage Cutoff, U - CL	electricity, high voltage	1,39E+11	MJ
tap water production, conventional treatment tap water Cutoff, U - BR	tap water	1,39E+11	kg
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - UA	electricity, medium voltage	1,38E+11	MJ
electricity production, natural gas, combined cycle power plant electricity, high voltage Cutoff, U - US-TRE	electricity, high voltage	1,38E+11	MJ
heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical electricity, high voltage Cutoff, U - RoW	electricity, high voltage	1,38E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - MY	electricity, high voltage	1,37E+11	MJ
transport, passenger car, large size, diesel, EURO 3 transport, passenger car, large size, diesel, EURO 3 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, large size, diesel, EURO 3	1,37E+11	m
market for transport, passenger car, large size, petrol, EURO 3 transport, passenger car, large size, petrol, EURO 3 Cutoff, U - GLO	transport, passenger car, large size, petrol, EURO 3	1,36E+11	m

electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - SA	electricity, medium voltage	1,36E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - SE	electricity, medium voltage	1,35E+11	MJ
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - GB	heat, district or industrial, natural gas	1,35E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - SA	electricity, medium voltage	1,35E+11	MJ
market for sweetening, natural gas sweetening, natural gas Cutoff, U - GLO	sweetening, natural gas	1,35E+11	m3
sweetening, natural gas sweetening, natural gas Cutoff, U - RoW	sweetening, natural gas	1,35E+11	m3
oxidation of butane acetic acid, without water, in 98% solution state Cutoff, U - RoW	acetic acid, without water, in 98% solution state	1,34E+11	kg
market for lignite lignite Cutoff, U - RER	lignite	1,34E+11	kg
lignite mine operation lignite Cutoff, U - RER	lignite	1,34E+11	kg
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - VN	electricity, medium voltage	1,33E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - VN	electricity, medium voltage	1,33E+11	MJ
naphtha, import from RoW naphtha Cutoff, U - IN	naphtha	1,33E+11	kg
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - SE	electricity, medium voltage	1,32E+11	MJ
diesel production, petroleum refinery operation diesel Cutoff, U - RoW	diesel	1,31E+11	kg
silica sand production silica sand Cutoff, U - RoW	silica sand	1,31E+11	kg
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - TW	electricity, medium voltage	1,30E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - TW	electricity, medium voltage	1,30E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - NL	electricity, high voltage	1,30E+11	MJ
market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4	1,30E+11	t*km
transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4	1,30E+11	t*km
tap water production, conventional with biological treatment tap water Cutoff, U - Europe without Switzerland	tap water	1,30E+11	kg
market group for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - Europe without Switzerland	electricity, low voltage	1,30E+11	MJ

naphtha production, petroleum refinery operation naphtha Cutoff, U - PE	naphtha	1,29E+11	kg
market for naphtha naphtha Cutoff, U - PE	naphtha	1,29E+11	kg
market for chemical, inorganic chemical, inorganic Cutoff, U - GLO	chemical, inorganic	1,29E+11	kg
chemical production, inorganic chemical, inorganic Cutoff, U - GLO	chemical, inorganic	1,29E+11	kg
market for liquefied petroleum gas liquefied petroleum gas Cutoff, U - RoW	liquefied petroleum gas	1,28E+11	kg
market for diesel diesel Cutoff, U - RoW	diesel	1,28E+11	kg
natural gas, burned in gas turbine, for compressor station electricity, medium voltage Cutoff, U - RoW	electricity, medium voltage	1,27E+11	MJ
tap water production, underground water with disinfection tap water Cutoff, U - RoW	tap water	1,26E+11	kg
hard coal mine operation and hard coal preparation hard coal Cutoff, U - RoW	hard coal	1,25E+11	kg
market for blast furnace gas blast furnace gas Cutoff, U - GLO	blast furnace gas	1,25E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - EG	electricity, medium voltage	1,25E+11	MJ
electricity production, hydro, reservoir, non-alpine region electricity, high voltage Cutoff, U - CA-QC	electricity, high voltage	1,24E+11	MJ
electricity production, natural gas, combined cycle power plant electricity, high voltage Cutoff, U - MX	electricity, high voltage	1,24E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - KZ	electricity, medium voltage	1,24E+11	MJ
market for hard coal hard coal Cutoff, U - RoW	hard coal	1,24E+11	kg
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - EG	electricity, medium voltage	1,23E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - KZ	electricity, medium voltage	1,23E+11	MJ
transport, passenger car, large size, diesel, EURO 5 transport, passenger car, large size, diesel, EURO 5 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, large size, diesel, EURO 5	1,23E+11	m
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-NX	electricity, high voltage	1,23E+11	MJ
market for iron ore concentrate iron ore concentrate Cutoff, U - GLO	iron ore concentrate	1,22E+11	kg
heat production, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - CA-QC	heat, district or industrial, natural gas	1,22E+11	MJ
sulfuric acid production sulfuric acid Cutoff, U - RoW	sulfuric acid	1,22E+11	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - PK	electricity, high voltage	1,22E+11	MJ

market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - BR-Northern grid	electricity, high voltage	1,21E+11	MJ
electricity production, natural gas, conventional power plant electricity, high voltage Cutoff, U - GB	electricity, high voltage	1,20E+11	MJ
electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore electricity, high voltage Cutoff, U - US-MRO	electricity, high voltage	1,20E+11	MJ
petroleum and gas production, on-shore petroleum Cutoff, U - CA-AB	petroleum	1,20E+11	kg
market group for diesel diesel Cutoff, U - GLO	diesel	1,19E+11	kg
copper mine operation and beneficiation, sulfide ore molybdenite Cutoff, U - CN	molybdenite	1,19E+11	kg
clinker production clinker Cutoff, U - RoW	clinker	1,19E+11	kg
heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - US-WECC	heat, district or industrial, natural gas	1,18E+11	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - IN-CT	electricity, high voltage	1,18E+11	MJ
market for ethylene glycol dimethyl ether ethylene glycol dimethyl ether Cutoff, U - GLO	ethylene glycol dimethyl ether	1,17E+11	kg
electricity production, hard coal, at coal mine power plant electricity, high voltage, for internal use in coal mining Cutoff, U - CN	electricity, high voltage, for internal use in coal mining	1,16E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - CA-QC	electricity, medium voltage	1,16E+11	MJ
electricity production, hydro, reservoir, tropical region electricity, high voltage Cutoff, U - BR-Northern grid	electricity, high voltage	1,16E+11	MJ
market group for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - RAF	electricity, high voltage	1,16E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - CA-QC	electricity, medium voltage	1,16E+11	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-HU	electricity, high voltage	1,15E+11	MJ
heat production, natural gas, at boiler modulating >100kW heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - CA-QC	heat, district or industrial, natural gas	1,15E+11	MJ
sugarcane processing, modern annexed plant electricity, high voltage Cutoff, U - BR	electricity, high voltage	1,14E+11	MJ
heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - GB	heat, district or industrial, natural gas	1,13E+11	MJ
electricity production, nuclear, boiling water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - US-SERC	electricity, high voltage	1,13E+11	MJ

heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - US-NPCC	heat, district or industrial, natural gas	1,13E+11	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - IN-Eastern grid	electricity, medium voltage	1,13E+11	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - AE	electricity, high voltage	1,13E+11	MJ
transport, passenger car, large size, petrol, EURO 3 transport, passenger car, large size, petrol, EURO 3 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, large size, petrol, EURO 3	1,12E+11	m
electricity production, lignite electricity, high voltage Cutoff, U - US-MRO	electricity, high voltage	1,12E+11	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - IN-Eastern grid	electricity, medium voltage	1,12E+11	MJ
electricity production, hydro, reservoir, tropical region electricity, high voltage Cutoff, U - BR-South-eastern grid	electricity, high voltage	1,12E+11	MJ
market for hard coal hard coal Cutoff, U - RNA	hard coal	1,11E+11	kg
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - IN-UP	electricity, high voltage	1,11E+11	MJ
natural gas pressure reduction from high to low pressure natural gas, low pressure Cutoff, U - RoW	natural gas, low pressure	1,11E+11	m3
hard coal mine operation and hard coal preparation hard coal Cutoff, U - RNA	hard coal	1,10E+11	kg
transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RER	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3	1,10E+11	t*km
market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RER	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3	1,10E+11	t*km
market for tap water tap water Cutoff, U - CA-QC	tap water	1,10E+11	kg
market for natural gas, low pressure natural gas, low pressure Cutoff, U - RoW	natural gas, low pressure	1,10E+11	m3
transport, pipeline, long distance, natural gas transport, pipeline, long distance, natural gas Cutoff, U - RER w/o DE+NL+RU	transport, pipeline, long distance, natural gas	1,10E+11	t*km
electricity production, hydro, run-of-river electricity, high voltage Cutoff, U - CN-YN	electricity, high voltage	1,10E+11	MJ
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - FI	heat, district or industrial, natural gas	1,09E+11	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - IN-MH	electricity, high voltage	1,09E+11	MJ
heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - CA-QC	heat, district or industrial, natural gas	1,09E+11	MJ
electricity production, hydro, run-of-river electricity, high voltage Cutoff, U - FR	electricity, high voltage	1,08E+11	MJ

heat production, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - CA-QC	heat, district or industrial, natural gas	1,07E+11	MJ
transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 3 transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 3 Cutoff, U - RER	transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 3	1,07E+11	m
water production, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - CH	water, decarbonised	1,07E+11	kg
market for water, decarbonised water, decarbonised Cutoff, U - CH	water, decarbonised	1,07E+11	kg
electricity production, nuclear, pressure water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - RU	electricity, high voltage	1,06E+11	MJ
heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - GB	heat, district or industrial, other than natural gas	1,06E+11	MJ
market for pig iron pig iron Cutoff, U - RoW	pig iron	1,06E+11	kg
electricity production, natural gas, conventional power plant electricity, high voltage Cutoff, U - SA	electricity, high voltage	1,05E+11	MJ
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - BE	heat, district or industrial, natural gas	1,05E+11	MJ
iron sinter production iron sinter Cutoff, U - RoW	iron sinter	1,04E+11	kg
petroleum and gas production, on-shore natural gas, high pressure Cutoff, U - RoW	natural gas, high pressure	1,04E+11	m3
heavy fuel oil production, petroleum refinery operation heavy fuel oil Cutoff, U - Europe without Switzerland	heavy fuel oil	1,04E+11	kg
market for heavy fuel oil heavy fuel oil Cutoff, U - Europe without Switzerland	heavy fuel oil	1,04E+11	kg
electricity production, oil electricity, high voltage Cutoff, U - SA	electricity, high voltage	1,03E+11	MJ
market for heat, district or industrial, natural gas heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - CH	heat, district or industrial, natural gas	1,02E+11	MJ
heat production, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - Europe without Switzerland	heat, district or industrial, natural gas	1,02E+11	MJ
process-specific burdens, slag landfill process-specific burdens, slag landfill Cutoff, U - CH	process-specific burdens, slag landfill	1,02E+11	kg
transport, freight, lorry, all sizes, EURO3 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified transport, freight, lorry, unspecified Cutoff, U - BR	transport, freight, lorry, unspecified	1,02E+11	t*km
market group for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - Canada without Quebec	electricity, high voltage	1,02E+11	MJ
evaporation of natural gas natural gas, high pressure Cutoff, U - JP	natural gas, high pressure	1,01E+11	m3
drying, natural gas drying, natural gas Cutoff, U - NO	drying, natural gas	1,01E+11	m3

heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - US-TRE	heat, district or industrial, natural gas	1,01E+11	MJ
tap water production, artificial recharged wells tap water Cutoff, U - RoW	tap water	1,00E+11	kg
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - DK	heat, district or industrial, natural gas	1,00E+11	MJ
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, U - JP	natural gas, high pressure	1,00E+11	m3
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - IN-GJ	electricity, high voltage	1,00E+11	MJ
pig iron production pig iron Cutoff, U - RoW	pig iron	9,94E+10	kg
heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - ES	heat, district or industrial, natural gas	9,93E+10	MJ
transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 4 transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 4 Cutoff, U - RER	transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 4	9,83E+10	m
heat production, propane, at industrial furnace >100kW heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	9,81E+10	MJ
electricity production, lignite electricity, high voltage Cutoff, U - US-WECC	electricity, high voltage	9,75E+10	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - TH	electricity, high voltage	9,72E+10	MJ
transport, pipeline, long distance, natural gas transport, pipeline, long distance, natural gas Cutoff, U - DE	transport, pipeline, long distance, natural gas	9,70E+10	t*km
electricity production, nuclear, pressure water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - KR	electricity, high voltage	9,65E+10	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - NL	electricity, medium voltage	9,65E+10	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - NL	electricity, medium voltage	9,63E+10	MJ
electricity production, nuclear, boiling water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - US-RFC	electricity, high voltage	9,58E+10	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - ID	electricity, medium voltage	9,56E+10	MJ
market for iron scrap, unsorted iron scrap, unsorted Cutoff, U - GLO	iron scrap, unsorted	9,52E+10	kg
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - ID	electricity, medium voltage	9,52E+10	MJ
electricity production, nuclear, pressure water reactor, heavy water moderated electricity, high voltage Cutoff, U - CA-ON	electricity, high voltage	9,51E+10	MJ
carbon monoxide production carbon monoxide Cutoff, U - RER	carbon monoxide	9,51E+10	kg
market for carbon monoxide carbon monoxide Cutoff, U - RER	carbon monoxide	9,51E+10	kg

electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-SH	electricity, high voltage	9,48E+10	MJ
electricity production, natural gas, combined cycle power plant electricity, high voltage Cutoff, U - AR	electricity, high voltage	9,48E+10	MJ
iron scrap, unsorted, Recycled Content cut-off iron scrap, unsorted Cutoff, U - GLO	iron scrap, unsorted	9,44E+10	kg
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - IN-WB	electricity, high voltage	9,43E+10	MJ
electricity production, lignite electricity, high voltage Cutoff, U - US-SERC	electricity, high voltage	9,42E+10	MJ
electricity production, hydro, reservoir, alpine region electricity, high voltage Cutoff, U - CH	electricity, high voltage	9,40E+10	MJ
heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	9,35E+10	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - FI	electricity, high voltage	9,32E+10	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-HL	electricity, high voltage	9,32E+10	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - IN-AP	electricity, high voltage	9,28E+10	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - AT	electricity, high voltage	9,26E+10	MJ
market for heat, district or industrial, other than natural gas heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - CA-QC	heat, district or industrial, other than natural gas	9,26E+10	MJ
market for sugarcane sugarcane Cutoff, U - BR	sugarcane	9,24E+10	kg
electricity production, nuclear, pressure water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - UA	electricity, high voltage	9,20E+10	MJ
heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - AT	heat, district or industrial, natural gas	9,15E+10	MJ
market for explosive, tovox explosive, tovox Cutoff, U - GLO	explosive, tovox	9,13E+10	kg
market for transport, freight, inland waterways, barge transport, freight, inland waterways, barge Cutoff, U - RER	transport, freight, inland waterways, barge	9,12E+10	t*km
transport, freight, inland waterways, barge transport, freight, inland waterways, barge Cutoff, U - RER	transport, freight, inland waterways, barge	9,12E+10	t*km
electricity production, lignite electricity, high voltage Cutoff, U - AU	electricity, high voltage	9,11E+10	MJ
heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - US-RFC	heat, district or industrial, natural gas	9,11E+10	MJ
natural gas, burned in gas motor, for storage natural gas, burned in gas motor, for storage Cutoff, U - DZ	natural gas, burned in gas motor, for storage	9,09E+10	MJ
electricity production, lignite electricity, high voltage Cutoff, U - ID	electricity, high voltage	9,07E+10	MJ
market for blasting blasting Cutoff, U - GLO	blasting	9,06E+10	kg

explosive production, tovox explosive, tovox Cutoff, U - RoW	explosive, tovox	9,06E+10	kg
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - PT	heat, district or industrial, natural gas	9,04E+10	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - BE	electricity, high voltage	9,03E+10	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - MY	electricity, medium voltage	8,97E+10	MJ
sand quarry operation, open pit mine sand Cutoff, U - BR	sand	8,96E+10	kg
electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore electricity, high voltage Cutoff, U - DE	electricity, high voltage	8,94E+10	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - MY	electricity, medium voltage	8,93E+10	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-HN	electricity, high voltage	8,93E+10	MJ
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - HU	heat, district or industrial, natural gas	8,92E+10	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - CZ	electricity, high voltage	8,91E+10	MJ
transport, pipeline, onshore, long distance, natural gas transport, pipeline, onshore, long distance, natural gas Cutoff, U - NO	transport, pipeline, onshore, long distance, natural gas	8,90E+10	t*km
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - VE	electricity, high voltage	8,88E+10	MJ
natural gas production, liquefied natural gas, liquefied Cutoff, U - RoW	natural gas, liquefied	8,83E+10	m3
market for steel, low-alloyed steel, low-alloyed Cutoff, U - GLO	steel, low-alloyed	8,77E+10	kg
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - CA-ON	electricity, medium voltage	8,75E+10	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - CA-ON	electricity, medium voltage	8,73E+10	MJ
market group for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - US	electricity, low voltage	8,70E+10	MJ
treatment of municipal solid waste, incineration heat, for reuse in municipal waste incineration only Cutoff, U - DE	heat, for reuse in municipal waste incineration only	8,68E+10	MJ
market for heat, for reuse in municipal waste incineration only heat, for reuse in municipal waste incineration only Cutoff, U - DE	heat, for reuse in municipal waste incineration only	8,68E+10	MJ
heat, from municipal waste incineration to generic market for heat district or industrial, other than natural gas heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - DE	heat, district or industrial, other than natural gas	8,67E+10	MJ
market for reinforcing steel reinforcing steel Cutoff, U - GLO	reinforcing steel	8,59E+10	kg
electricity production, natural gas, conventional power plant electricity, high voltage Cutoff, U - CL	electricity, high voltage	8,55E+10	MJ

electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-JX	electricity, high voltage	8,50E+10	MJ
electricity production, lignite electricity, high voltage Cutoff, U - US-TRE	electricity, high voltage	8,49E+10	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-GS	electricity, high voltage	8,47E+10	MJ
transport, passenger car, large size, diesel, EURO 4 transport, passenger car, large size, diesel, EURO 4 Cutoff, U - RER	transport, passenger car, large size, diesel, EURO 4	8,46E+10	m
electricity production, hydro, run-of-river electricity, high voltage Cutoff, U - CH	electricity, high voltage	8,44E+10	MJ
market group for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - RNA	electricity, low voltage	8,40E+10	MJ
transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified transport, freight, lorry, unspecified Cutoff, U - BR	transport, freight, lorry, unspecified	8,34E+10	t*km
market for transport, pipeline, long distance, natural gas transport, pipeline, long distance, natural gas Cutoff, U - RER	transport, pipeline, long distance, natural gas	8,33E+10	t*km
sweet gas, burned in gas turbine sweet gas, burned in gas turbine Cutoff, U - NO	sweet gas, burned in gas turbine	8,30E+10	MJ
market for sand sand Cutoff, U - CH	sand	8,30E+10	kg
gravel and sand quarry operation sand Cutoff, U - CH	sand	8,30E+10	kg
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - AR	electricity, medium voltage	8,27E+10	MJ
electricity production, natural gas, combined cycle power plant electricity, high voltage Cutoff, U - IR	electricity, high voltage	8,24E+10	MJ
market for manure, liquid, cattle manure, liquid, cattle Cutoff, U - GLO	manure, liquid, cattle	8,24E+10	kg
manure, liquid, cattle, Recycled Content cut-off manure, liquid, cattle Cutoff, U - GLO	manure, liquid, cattle	8,24E+10	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - PH	electricity, high voltage	8,21E+10	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - AR	electricity, medium voltage	8,20E+10	MJ
market for bauxite bauxite Cutoff, U - GLO	bauxite	8,13E+10	kg
bauxite mine operation bauxite Cutoff, U - GLO	bauxite	8,13E+10	kg
heat and power co-generation, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - RU	electricity, high voltage	8,09E+10	MJ
transport, pipeline, offshore, long distance, natural gas transport, pipeline, offshore, long distance, natural gas Cutoff, U - NO	transport, pipeline, offshore, long distance, natural gas	8,08E+10	t*km
electricity production, nuclear, boiling water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - RU	electricity, high voltage	8,08E+10	MJ

tap water production, underground water with chemical treatment tap water Cutoff, U - Europe without Switzerland	tap water	8,08E+10	kg
tap water production, underground water with disinfection tap water Cutoff, U - Europe without Switzerland	tap water	8,08E+10	kg
market group for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CN	electricity, low voltage	8,08E+10	MJ
market for steel, chromium steel 18/8 steel, chromium steel 18/8 Cutoff, U - GLO	steel, chromium steel 18/8	8,06E+10	kg
market for steel, chromium steel 18/8, hot rolled steel, chromium steel 18/8, hot rolled Cutoff, U - GLO	steel, chromium steel 18/8, hot rolled	8,05E+10	kg
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - FI	electricity, medium voltage	8,01E+10	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - PK	electricity, medium voltage	8,01E+10	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - PK	electricity, medium voltage	7,94E+10	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - FI	electricity, medium voltage	7,93E+10	MJ
market for clay clay Cutoff, U - CH	clay	7,93E+10	kg
clay pit operation clay Cutoff, U - CH	clay	7,93E+10	kg
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BE	electricity, medium voltage	7,93E+10	MJ
Homogenization - BR	Wet biomass	7,92E+10	kg
diesel production, low-sulfur, petroleum refinery operation diesel, low-sulfur Cutoff, U - RoW	diesel, low-sulfur	7,88E+10	kg
ethylene glycol dimethyl ether production ethylene glycol dimethyl ether Cutoff, U - RoW	ethylene glycol dimethyl ether	7,86E+10	kg
blast furnace gas, Recycled Content cut-off blast furnace gas Cutoff, U - GLO	blast furnace gas	7,85E+10	MJ
market group for heavy fuel oil heavy fuel oil Cutoff, U - RER	heavy fuel oil	7,84E+10	kg
market group for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - RER	electricity, low voltage	7,83E+10	MJ
electricity, high voltage, import from AR electricity, high voltage Cutoff, U - BR-Southern grid	electricity, high voltage	7,83E+10	MJ
petroleum and gas production, off-shore petroleum Cutoff, U - GB	petroleum	7,82E+10	kg
market for hard coal hard coal Cutoff, U - RLA	hard coal	7,82E+10	kg

synthetic fuel production, from coal, high temperature Fisher-Tropsch operations ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene Cutoff, U - ZA	ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene	7,79E+10	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - IQ	electricity, high voltage	7,77E+10	MJ
heat and power co-generation, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - PL	electricity, high voltage	7,77E+10	MJ
market for diesel, low-sulfur diesel, low-sulfur Cutoff, U - RoW	diesel, low-sulfur	7,75E+10	kg
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BE	electricity, medium voltage	7,72E+10	MJ
transport, passenger car, small size, petrol, EURO 3 transport, passenger car, small size, petrol, EURO 3 Cutoff, U - RER	transport, passenger car, small size, petrol, EURO 3	7,71E+10	m
market for iron scrap, sorted, pressed iron scrap, sorted, pressed Cutoff, U - RoW	iron scrap, sorted, pressed	7,68E+10	kg
market for cement, alternative constituents 21-35% cement, alternative constituents 21-35% Cutoff, U - RoW	cement, alternative constituents 21-35%	7,67E+10	kg
cement production, alternative constituents 21-35% cement, alternative constituents 21-35% Cutoff, U - RoW	cement, alternative constituents 21-35%	7,67E+10	kg
market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - BR	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3	7,66E+10	t*km
transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - BR	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3	7,66E+10	t*km
sorting and pressing of iron scrap iron scrap, sorted, pressed Cutoff, U - RoW	iron scrap, sorted, pressed	7,65E+10	kg
electricity production, natural gas, conventional power plant electricity, high voltage Cutoff, U - TW	electricity, high voltage	7,57E+10	MJ
electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore electricity, high voltage Cutoff, U - US-TRE	electricity, high voltage	7,56E+10	MJ
heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - KR	heat, district or industrial, natural gas	7,56E+10	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - IN-MP	electricity, high voltage	7,54E+10	MJ
heat production, hardwood chips from forest, at furnace 1000kW heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	7,50E+10	MJ
heat production, wood chips from industry, at furnace 5000kW, state-of-the-art 2014 heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	7,49E+10	MJ
heat production, hardwood chips from forest, at furnace 1000kW, state-of-the-art 2014 heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	7,49E+10	MJ

heat production, hardwood chips from forest, at furnace 5000kW, state-of-the-art 2014 heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	7,49E+10	MJ
heat production, wood chips from industry, at furnace 1000kW, state-of-the-art 2014 heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	7,49E+10	MJ
heat production, wood chips from industry, at furnace 1000kW heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	7,49E+10	MJ
heat production, hardwood chips from forest, at furnace 5000kW heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	7,49E+10	MJ
heat production, wood chips from industry, at furnace 5000kW heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	7,49E+10	MJ
petroleum and gas production, on-shore natural gas, high pressure Cutoff, U - US	natural gas, high pressure	7,47E+10	m3
market for transport, passenger car, large size, petrol, EURO 4 transport, passenger car, large size, petrol, EURO 4 Cutoff, U - GLO	transport, passenger car, large size, petrol, EURO 4	7,46E+10	m
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - AE	electricity, medium voltage	7,46E+10	MJ
electricity voltage transformation from medium to low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CN-SGCC	electricity, low voltage	7,45E+10	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - AE	electricity, medium voltage	7,43E+10	MJ
plywood production wood chips, dry, measured as dry mass Cutoff, U - RoW	wood chips, dry, measured as dry mass	7,43E+10	kg
market for vinasse, from fermentation of sugarcane vinasse, from fermentation of sugarcane Cutoff, U - GLO	vinasse, from fermentation of sugarcane	7,42E+10	kg
market for oxygen, liquid oxygen, liquid Cutoff, U - RoW	oxygen, liquid	7,41E+10	kg
air separation, cryogenic oxygen, liquid Cutoff, U - RoW	oxygen, liquid	7,37E+10	kg
market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - CN-SGCC	electricity, low voltage	7,34E+10	MJ
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - AR	heat, district or industrial, natural gas	7,32E+10	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-JL	electricity, high voltage	7,31E+10	MJ
electricity production, hydro, run-of-river electricity, high voltage Cutoff, U - CA-QC	electricity, high voltage	7,28E+10	MJ
market for transport, passenger car, large size, petrol, EURO 5 transport, passenger car, large size, petrol, EURO 5 Cutoff, U - GLO	transport, passenger car, large size, petrol, EURO 5	7,24E+10	m
electricity production, natural gas, combined cycle power plant electricity, high voltage Cutoff, U - US-NPCC	electricity, high voltage	7,23E+10	MJ

heat and power co-generation, lignite heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - CZ	heat, district or industrial, other than natural gas	7,21E+10	MJ
heat production, light fuel oil, at boiler 100kW, non-modulating heat, central or small-scale, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, central or small-scale, other than natural gas	7,15E+10	MJ
heat production, hardwood chips from forest, at furnace 300kW, state-of-the-art 2014 heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	7,14E+10	MJ
heat production, hardwood chips from forest, at furnace 300kW heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	7,14E+10	MJ
natural gas production, liquefied natural gas, liquefied Cutoff, U - RME	natural gas, liquefied	7,09E+10	m3
electricity production, natural gas, combined cycle power plant electricity, high voltage Cutoff, U - US-MRO	electricity, high voltage	7,08E+10	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-TJ	electricity, high voltage	7,04E+10	MJ
transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 5 transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 5 Cutoff, U - RER	transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 5	7,03E+10	m
steel production, electric, chromium steel 18/8 steel, chromium steel 18/8 Cutoff, U - RoW	steel, chromium steel 18/8	7,01E+10	kg
steel production, chromium steel 18/8, hot rolled steel, chromium steel 18/8, hot rolled Cutoff, U - RoW	steel, chromium steel 18/8, hot rolled	7,00E+10	kg
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - LT	heat, district or industrial, natural gas	6,98E+10	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - DE	electricity, high voltage	6,92E+10	MJ
petroleum and gas production, on-shore petroleum Cutoff, U - US	petroleum	6,92E+10	kg
market for steel, unalloyed steel, unalloyed Cutoff, U - GLO	steel, unalloyed	6,91E+10	kg
transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 3 transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 3 Cutoff, U - RER	transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 3	6,90E+10	m
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, U - DE	natural gas, high pressure	6,85E+10	m3
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - AU	electricity, high voltage	6,85E+10	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - DZ	electricity, high voltage	6,81E+10	MJ
market group for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - RAF	electricity, low voltage	6,76E+10	MJ
heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - US-NPCC	heat, district or industrial, natural gas	6,75E+10	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - CA-BC	electricity, high voltage	6,75E+10	MJ

electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR-North-eastern grid	electricity, medium voltage	6,74E+10	MJ
electricity production, natural gas, conventional power plant electricity, high voltage Cutoff, U - US-SERC	electricity, high voltage	6,72E+10	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR-North-eastern grid	electricity, medium voltage	6,69E+10	MJ
electricity production, lignite electricity, high voltage Cutoff, U - RoW	electricity, high voltage	6,68E+10	MJ
electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore electricity, high voltage Cutoff, U - CL	electricity, high voltage	6,68E+10	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - MY	electricity, high voltage	6,61E+10	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - AT	electricity, medium voltage	6,60E+10	MJ
treatment of coal tar, in industrial furnace 1MW heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - GLO	heat, district or industrial, other than natural gas	6,58E+10	MJ
market for sodium chloride, powder sodium chloride, powder Cutoff, U - GLO	sodium chloride, powder	6,58E+10	kg
electricity production, natural gas, combined cycle power plant electricity, high voltage Cutoff, U - TR	electricity, high voltage	6,57E+10	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - AT	electricity, medium voltage	6,57E+10	MJ
limestone quarry operation limestone, unprocessed Cutoff, U - CH	limestone, unprocessed	6,56E+10	kg
market for limestone, unprocessed limestone, unprocessed Cutoff, U - CH	limestone, unprocessed	6,56E+10	kg
market for wood chips, wet, measured as dry mass wood chips, wet, measured as dry mass Cutoff, U - Europe without Switzerland	wood chips, wet, measured as dry mass	6,47E+10	kg
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - TH	electricity, medium voltage	6,43E+10	MJ
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, U - NO	natural gas, high pressure	6,43E+10	m3
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-SC	electricity, high voltage	6,41E+10	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - TH	electricity, medium voltage	6,41E+10	MJ
steel production, converter, unalloyed steel, unalloyed Cutoff, U - RoW	steel, unalloyed	6,40E+10	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - CO	electricity, high voltage	6,39E+10	MJ
heat and power co-generation, lignite electricity, high voltage Cutoff, U - RU	electricity, high voltage	6,37E+10	MJ
heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - PT	heat, district or industrial, natural gas	6,36E+10	MJ

market for tap water tap water Cutoff, U - BR	tap water	6,36E+10	kg
heat and power co-generation, oil heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - IT	heat, district or industrial, other than natural gas	6,31E+10	MJ
market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RER	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3	6,29E+10	t*km
transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RER	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3	6,29E+10	t*km
market for hard coal hard coal Cutoff, U - Europe, without Russia and Turkey	hard coal	6,26E+10	kg
electricity production, natural gas, aluminium industry electricity, high voltage, aluminium industry Cutoff, U - IAI Area, Gulf Cooperation Council	electricity, high voltage, aluminium industry	6,26E+10	MJ
market for tap water tap water Cutoff, U - CH	tap water	6,26E+10	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - CA-AB	electricity, high voltage	6,26E+10	MJ
naphtha production, petroleum refinery operation naphtha Cutoff, U - BR	naphtha	6,22E+10	kg
market for naphtha naphtha Cutoff, U - BR	naphtha	6,22E+10	kg
heat production, wood chips from industry, at furnace 300kW, state-of-the-art 2014 heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	6,20E+10	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-GZ	electricity, high voltage	6,18E+10	MJ
transport, passenger car, large size, petrol, EURO 4 transport, passenger car, large size, petrol, EURO 4 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, large size, petrol, EURO 4	6,15E+10	m
electricity production, nuclear, pressure water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - DE	electricity, high voltage	6,15E+10	MJ
hard coal mine operation and hard coal preparation hard coal Cutoff, U - RLA	hard coal	6,09E+10	kg
hot rolling, steel hot rolling, steel Cutoff, U - Europe without Austria	hot rolling, steel	6,07E+10	kg
blasting blasting Cutoff, U - RoW	blasting	6,06E+10	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - BR-Mid-western grid	electricity, high voltage	6,06E+10	MJ
market for transport, passenger car, small size, diesel, EURO 4 transport, passenger car, small size, diesel, EURO 4 Cutoff, U - GLO	transport, passenger car, small size, diesel, EURO 4	6,06E+10	m
market for electricity, high voltage, aluminium industry electricity, high voltage, aluminium industry Cutoff, U - IAI Area, Gulf Cooperation Council	electricity, high voltage, aluminium industry	6,05E+10	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - PT	electricity, high voltage	6,03E+10	MJ
heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical electricity, high voltage Cutoff, U - US-TRE	electricity, high voltage	6,02E+10	MJ

electricity voltage transformation from high to medium voltage, aluminium industry electricity, medium voltage, aluminium industry Cutoff, U - IAI Area, Gulf Cooperation Council	electricity, medium voltage, aluminium industry	6,01E+10	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - RO	electricity, high voltage	6,00E+10	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - KW	electricity, high voltage	6,00E+10	MJ
market for electricity, medium voltage, aluminium industry electricity, medium voltage, aluminium industry Cutoff, U - IAI Area, Gulf Cooperation Council	electricity, medium voltage, aluminium industry	5,98E+10	MJ
transport, passenger car, large size, petrol, EURO 5 transport, passenger car, large size, petrol, EURO 5 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, large size, petrol, EURO 5	5,97E+10	m
heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - NL	heat, district or industrial, other than natural gas	5,94E+10	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - IN-OR	electricity, high voltage	5,91E+10	MJ
electricity production, nuclear, boiling water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - GB	electricity, high voltage	5,86E+10	MJ
transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4 transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4 Cutoff, U - RER	transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4	5,85E+10	m
market for wood chips, wet, measured as dry mass wood chips, wet, measured as dry mass Cutoff, U - RoW	wood chips, wet, measured as dry mass	5,85E+10	kg
electricity production, natural gas, conventional power plant electricity, high voltage Cutoff, U - KR	electricity, high voltage	5,80E+10	MJ
reinforcing steel production reinforcing steel Cutoff, U - RoW	reinforcing steel	5,80E+10	kg
electricity production, nuclear, pressure water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - ZA	electricity, high voltage	5,80E+10	MJ
sugarcane production sugarcane Cutoff, U - BR-SP	sugarcane	5,79E+10	kg
transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified transport, freight, lorry, unspecified Cutoff, U - RER	transport, freight, lorry, unspecified	5,76E+10	t*km
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - US-WECC	electricity, high voltage	5,75E+10	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - TW	electricity, high voltage	5,73E+10	MJ
electricity production, hydro, run-of-river electricity, high voltage Cutoff, U - SE	electricity, high voltage	5,71E+10	MJ
electricity production, hydro, run-of-river electricity, high voltage Cutoff, U - JP	electricity, high voltage	5,69E+10	MJ
cobalt production nickel, class 1 Cutoff, U - GLO	nickel, class 1	5,68E+10	kg

tap water production, direct filtration treatment tap water Cutoff, U - CA-QC	tap water	5,65E+10	kg
heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - CA-QC	heat, district or industrial, other than natural gas	5,64E+10	MJ
heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - AT	heat, district or industrial, other than natural gas	5,64E+10	MJ
electricity production, hydro, reservoir, non-alpine region electricity, high voltage Cutoff, U - RU	electricity, high voltage	5,60E+10	MJ
market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4	5,59E+10	t*km
transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4	5,59E+10	t*km
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - GR	electricity, high voltage	5,57E+10	MJ
electricity production, hydro, run-of-river electricity, high voltage Cutoff, U - CN-HN	electricity, high voltage	5,54E+10	MJ
molybdenite mine operation molybdenite Cutoff, U - GLO	molybdenite	5,53E+10	kg
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - BR-Southern grid	electricity, high voltage	5,53E+10	MJ
heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - PL	heat, district or industrial, natural gas	5,52E+10	MJ
heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - BE	heat, district or industrial, other than natural gas	5,52E+10	MJ
electricity production, nuclear, pressure water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - US-NPCC	electricity, high voltage	5,52E+10	MJ
heat and power co-generation, hard coal heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RU	heat, district or industrial, other than natural gas	5,52E+10	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - CZ	electricity, medium voltage	5,50E+10	MJ
clay brick production clay brick Cutoff, U - RER	clay brick	5,49E+10	kg
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - CZ	electricity, medium voltage	5,49E+10	MJ
electricity, high voltage, import from BR-Northern grid electricity, high voltage Cutoff, U - BR-South-eastern grid	electricity, high voltage	5,49E+10	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - UZ	electricity, high voltage	5,48E+10	MJ
market for cement, Portland cement, Portland Cutoff, U - RoW	cement, Portland	5,48E+10	kg
cement production, Portland cement, Portland Cutoff, U - RoW	cement, Portland	5,48E+10	kg
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - BD	electricity, high voltage	5,48E+10	MJ

heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - TR	heat, district or industrial, natural gas	5,47E+10	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - PH	electricity, medium voltage	5,46E+10	MJ
heat and power co-generation, lignite heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW	heat, district or industrial, other than natural gas	5,45E+10	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - PH	electricity, medium voltage	5,43E+10	MJ
sodium chloride production, powder sodium chloride, powder Cutoff, U - RoW	sodium chloride, powder	5,43E+10	kg
lime production, milled, loose lime Cutoff, U - Europe without Switzerland	lime	5,42E+10	kg
market for chromite ore concentrate chromite ore concentrate Cutoff, U - GLO	chromite ore concentrate	5,41E+10	kg
electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore electricity, high voltage Cutoff, U - US-WECC	electricity, high voltage	5,41E+10	MJ
evaporation of natural gas natural gas, high pressure Cutoff, U - RoW	natural gas, high pressure	5,40E+10	m3
market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 Cutoff, U - BR	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5	5,39E+10	t*km
transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 Cutoff, U - BR	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5	5,39E+10	t*km
transport, freight, lorry, all sizes, EURO6 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified transport, freight, lorry, unspecified Cutoff, U - RoW	transport, freight, lorry, unspecified	5,34E+10	t*km
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - VE	electricity, medium voltage	5,33E+10	MJ
electricity production, hydro, reservoir, tropical region electricity, high voltage Cutoff, U - CO	electricity, high voltage	5,33E+10	MJ
market for water, completely softened water, completely softened Cutoff, U - RER	water, completely softened	5,32E+10	kg
water production, completely softened water, completely softened Cutoff, U - RER	water, completely softened	5,32E+10	kg
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - TR	electricity, high voltage	5,25E+10	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - VE	electricity, medium voltage	5,23E+10	MJ
heat and power co-generation, lignite heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - DE	heat, district or industrial, other than natural gas	5,21E+10	MJ
electricity production, nuclear, boiling water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - SE	electricity, high voltage	5,21E+10	MJ

market for electricity, high voltage, aluminium industry electricity, high voltage, aluminium industry Cutoff, U - IAI Area, EU27 & EFTA	electricity, high voltage, aluminium industry	5,19E+10	MJ
steel production, converter, low-alloyed steel, low-alloyed Cutoff, U - RoW	steel, low-alloyed	5,18E+10	kg
electricity production, hydro, reservoir, alpine region electricity, high voltage Cutoff, U - CA-BC	electricity, high voltage	5,18E+10	MJ
electricity, high voltage, import from MZ electricity, high voltage Cutoff, U - ZA	electricity, high voltage	5,16E+10	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage, aluminium industry electricity, medium voltage, aluminium industry Cutoff, U - IAI Area, EU27 & EFTA	electricity, medium voltage, aluminium industry	5,16E+10	MJ
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - CA-AB	heat, district or industrial, natural gas	5,16E+10	MJ
market for electricity, medium voltage, aluminium industry electricity, medium voltage, aluminium industry Cutoff, U - IAI Area, EU27 & EFTA	electricity, medium voltage, aluminium industry	5,14E+10	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - HU	electricity, high voltage	5,13E+10	MJ
market for steel, low-alloyed, hot rolled steel, low-alloyed, hot rolled Cutoff, U - GLO	steel, low-alloyed, hot rolled	5,13E+10	kg
electricity, high voltage, import from IN-Western grid electricity, high voltage Cutoff, U - IN-Northern grid	electricity, high voltage	5,11E+10	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - PE	electricity, high voltage	5,10E+10	MJ
heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - ES	heat, district or industrial, other than natural gas	5,09E+10	MJ
market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - IL	electricity, high voltage	5,04E+10	MJ
tap water production, ultrafiltration treatment tap water Cutoff, U - Europe without Switzerland	tap water	5,03E+10	kg
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - IQ	electricity, medium voltage	5,02E+10	MJ
transport, passenger car, small size, diesel, EURO 4 transport, passenger car, small size, diesel, EURO 4 Cutoff, U - RoW	transport, passenger car, small size, diesel, EURO 4	4,99E+10	m
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, U - GB	natural gas, high pressure	4,96E+10	m3
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - CN-CQ	electricity, high voltage	4,95E+10	MJ
market for manure, liquid, swine manure, liquid, swine Cutoff, U - GLO	manure, liquid, swine	4,94E+10	kg
manure, liquid, swine, Recycled Content cut-off manure, liquid, swine Cutoff, U - GLO	manure, liquid, swine	4,94E+10	kg
market for sulfur sulfur Cutoff, U - GLO	sulfur	4,92E+10	kg

market for electricity, high voltage, aluminium industry electricity, high voltage, aluminium industry Cutoff, U - IAI Area, Russia & RER w/o EU27 & EFTA	electricity, high voltage, aluminium industry	4,92E+10	MJ
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - CZ	heat, district or industrial, natural gas	4,92E+10	MJ
hard coal mine operation and hard coal preparation hard coal Cutoff, U - RU	hard coal	4,91E+10	kg
heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical electricity, high voltage Cutoff, U - US-SERC	electricity, high voltage	4,91E+10	MJ
market for hard coal hard coal Cutoff, U - RU	hard coal	4,90E+10	kg
heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - SE	heat, district or industrial, natural gas	4,90E+10	MJ
transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 4 transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 4 Cutoff, U - RER	transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 4	4,89E+10	m
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - IQ	electricity, medium voltage	4,89E+10	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage, aluminium industry electricity, medium voltage, aluminium industry Cutoff, U - IAI Area, Russia & RER w/o EU27 & EFTA	electricity, medium voltage, aluminium industry	4,88E+10	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - GR	electricity, medium voltage	4,87E+10	MJ
electricity production, natural gas, combined cycle power plant electricity, high voltage Cutoff, U - BR-South-eastern grid	electricity, high voltage	4,86E+10	MJ
market for electricity, medium voltage, aluminium industry electricity, medium voltage, aluminium industry Cutoff, U - IAI Area, Russia & RER w/o EU27 & EFTA	electricity, medium voltage, aluminium industry	4,85E+10	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - GR	electricity, medium voltage	4,85E+10	MJ
electricity, high voltage, hydro, run-of-river, import from France electricity, high voltage Cutoff, U - CH	electricity, high voltage	4,84E+10	MJ
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - RO	electricity, medium voltage	4,84E+10	MJ
electricity production, nuclear, pressure water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - ES	electricity, high voltage	4,82E+10	MJ
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - RO	electricity, medium voltage	4,80E+10	MJ
electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - UA	electricity, high voltage	4,80E+10	MJ

electricity production, hydro, aluminium industry electricity, high voltage, aluminium industry Cutoff, U - IAI Area, Russia & RER w/o EU27 & EFTA market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - BG	electricity, high voltage, aluminium industry	4,80E+10	MJ
electricity, high voltage, import from BR-North-eastern grid electricity, high voltage Cutoff, U - BR-South-eastern grid	electricity, high voltage	4,78E+10	MJ
	electricity, high voltage	4,76E+10	MJ

Apêndice E – Resultados da AICV

Name	Impact result	Unit
Fossil resource scarcity	1,13E+13	kg oil eq.
Stratospheric ozone depletion	14.621.735	kg CFC11 eq.
Global warming	1,59E+13	kg CO2 eq.
Fine particulate matter formation	5,40E+10	kg PM2.5 eq.
Human carcinogenic toxicity	2,20E+12	kg 1,4-DCB
Freshwater ecotoxicity	2,21E+13	kg 1,4-DCB
Water consumption	5,42E+11	m3
Ozone formation, Human health	8,38E+10	kg NOx eq.
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	9,15E+10	kg NOx eq.
Mineral resource scarcity	2,73E+12	kg Cu eq.
Marine ecotoxicity	2,76E+13	kg 1,4-DCB
Human non-carcinogenic toxicity	2,31E+14	kg 1,4-DCB
Freshwater eutrophication	2,86E+10	kg P eq.
Ionizing radiation	1,06E+12	kBq Co-60 eq.
Marine eutrophication	1,06E+09	kg N eq
Land use	-3,53E+11	m2a crop eq.
Terrestrial acidification	1,37E+11	kg SO2 eq.
Terrestrial ecotoxicity	4,83E+14	kg 1,4-DCB