

Sumário Executivo

3º Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa de São Leopoldo – ano 2021

*3º São Leopoldo Greenhouse Gases Emissions
Inventory – year 2021*

Setembro/2025

Sumário

Prefácio.....	3
1. Participantes.....	5
2. Equipe de execução	5
3. Observatório	8
4. Introdução.....	9
5. Contextualização do município.....	11
6. Metodologia e Caracterização do Inventário.....	14
6.1 Metodologia GPC	14
6.2 Coleta de dados	17
7. Emissões setoriais	20
7.1 Energia estacionária.....	20
7.2 Transportes	20
7.3 Resíduos	20
8. Resultados gerais.....	21
8.1 Esgotamento sanitário.....	21
8.2 Resíduos Sólidos	32
8.3 Transporte.....	45
8.4 Energia estacionária.....	60
9. Gases de efeito estufa.....	96
9.1 Resumo	97
9.2 Comparativo 2019/2020/2021	98
Considerações finais	101
Referências.....	102

Prefácio

O governo municipal através da Secretaria de Meio Ambiente trabalha na implementação da política de mitigação aos efeitos das mudanças climáticas. Um conjunto de ações projetadas, como, o Observatório de Mudanças Climáticas (OMC) de São Leopoldo, encontra-se em fase de implementação. O inventário das emissões dos gases do efeito estufa é uma ação que vai ao encontro do conjunto de ações citadas. A partir do inventário, desenvolveu-se o plano local de ação climática que compreende um diagnóstico de nossos processos e das ações de adaptação, mitigação e resiliência da cidade frente às consequentes alterações do clima global.

As alterações verificadas na atmosfera e na biosfera são resultado cumulativo dos padrões globais de industrialização impostos por modelos ultrapassados de gestão ambiental. Normalmente, numa primeira abordagem são as chamadas “tecnologias de fim de tubo”. Embora essencial para o controle da poluição imediata e de curto prazo, bem como, para o suporte de instrumentos e ferramentas de gestão nas organizações, esta abordagem caracteriza-se por ser reativa à geração de resíduos. Isso se deve ao fato de ser aplicada como resposta a alguma pressão ou necessidade, geralmente legal. No entanto, ela falha, pois tenta combater a poluição somente após o poluente ter sido gerado. Assim, atualmente, as práticas de “fim de tubo” precisam ser gradativamente superadas pela abordagem da prevenção. Sob essa nova perspectiva, a atenção está voltada para o processo de geração da poluição, visando evitar que o poluente seja gerado na fonte. Assim, a perspectiva preventiva, que surgiu com mais força a partir do início do século XXI, passou a ser amplamente discutida na área ambiental como uma potencial solução para os problemas globais do impacto ambiental gerado pelo homem. Essas mudanças são acompanhadas pela visão de Sustentabilidade, baseada nos três pilares da ecoeficiência: ambiental, econômico e social. Supõe-se, portanto, que para que uma organização ou

processo seja válido, deve ser compatível com o meio ambiente, economicamente lucrativo e socialmente justo. Isso implica na adoção de modelos de gestão que identifiquem as causas dos problemas ambientais para evitar a necessidade de medidas corretivas, reduzindo os impactos causados por eles ao meio ambiente, possibilitando alternativas economicamente viáveis e que contribuam efetivamente para a melhoria da qualidade de vida dos habitantes.

Nesta ótica, o Observatório de Mudanças Climáticas da cidade de São Leopoldo (OMC), estrutura pertencente a Secretaria Municipal de Meio Ambiente, se alinha com a missão da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), em que as premissas do desenvolvimento sustentável estão intrinsecamente ligadas a formação de recursos humanos em todos os níveis na instituição, recursos estes que terão no OMC, fonte de conhecimento, oportunidades de contribuir com a construção contínua e a otimização do inventário de emissões do município, e principalmente projetar e implementar ações de prevenção e mitigação dos impactos associados a vida na sociedade leopoldense.

1. Participantes

A idealização deste inventário de emissões de gases de efeito estufa (GEE) partiu da Secretaria Municipal de Meio Ambiente de São Leopoldo (SEMMAM), através do Observatório de Mudanças Climáticas de São Leopoldo.

A SEMMAM desenvolveu uma parceria com a Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), junto ao Grupo de Pesquisa Núcleo de Caracterização de Materiais – NucMat e dos Programas de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) e em Engenharia Mecânica (PPGEM), para o desenvolvimento e execução das atividades de elaboração dos inventários de emissões, criação do plano local de ação climática e implantação das ações propostas. Como coordenadores deste projeto, representando a universidade e os PPGs, estão os professores Carlos Alberto Mendes Moraes e Feliciane Andrade Brehm. Para suporte e execução das atividades programadas e em desenvolvimento, o projeto conta com a doutoranda Jaqueline Ramos Grabasck, do PPGEC.

O suporte do município a esta publicação destaca-se com o auxílio e disponibilidade das secretarias do município, da autarquia de água e esgoto (SEMAE - São Leopoldo), e da empresa concessionária de energia (RGE), para o levantamento de dados das emissões de gases do efeito estufa (GEE). Além da Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SEMMAM), a Comissão formadora do Observatório de Mudanças Climáticas é integrada pela Secretaria Municipal de Serviços Urbanos (SEMURB), Secretaria de Segurança e Defesa Comunitária (SEMUSP), Serviço Municipal de Água e Esgotos (SEMAE) e a Concessionária de Energia Elétrica (RGE).

2. Equipe de execução

Claudia Costa – Secretária responsável pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SEMMAM).

Lisandro da Silveira Gonçalves – Graduado em Biologia pela Universidade Luterana do Brasil (ULBRA), possui mestrado em Avaliação de Impactos Ambientais pela Universidade La Salle (UNILASALLE). Assessor de Gestão Ambiental da Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SEMMAM).

Everson Gardel de Melo – Graduado em Engenharia Mecânica pelo Instituto Federal Sul-Rio-Grandense (IFSUL), possui mestrado em Engenharia Civil pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Coordena o Observatório Municipal de Mudanças Climáticas de São Leopoldo.

Carlos Alberto Mendes Moraes – Graduado e mestre em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com doutorado em Ciência dos Materiais no *Postgraduate Course on Materials Science pela University of Manchester and Institute of Science and Technology (UMIST)*. Professor titular na Unisinos nos cursos de graduação em diversas Engenharias e Gestão Ambiental, e nos Programas de Pós-Graduação em Engenharia Civil e em Engenharia Mecânica.

Feliciane Andrade Brehm – Graduada em Química pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), mestre e doutora em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela UFRGS. Atualmente é professora adjunta no programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Unisinos e auditora interna do sistema de gestão ambiental desta mesma universidade.

Aline Silveira Barreto – Graduada em Engenharia Química, especialista em Saneamento e mestre em Tecnologias de Materiais e Processos Industriais pela Universidade Feevale. Cursando doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela UFRGS. Atua como Gerente de Operação de Sistemas de Esgotamento Sanitário no SEMAE, no município de São Leopoldo.

Simara Rodrigues Gheno – Graduada em Biologia, mestre e doutora em Ensino de Ciências e Matemática pela Universidade Luterana do Brasil (ULBRA). Atua na Secretaria Municipal de Mobilidade e Serviços Urbanos de São Leopoldo.

Jaqueline Ramos Grabasck – Graduada em Arquitetura e Urbanismo e mestre em Engenharia Civil pela Unisinos. Especialista em Perícia, auditoria e gestão ambiental, pelo Instituto de Pós-Graduação – IPOG. Cursando doutorado em Engenharia Civil, também pela Unisinos. Atua como professora de ensino técnico na rede estadual.

Natasha Javiel Comassetto – Graduada em Biologia e mestre em Qualidade Ambiental. Atua como professora.

3. Observatório

O Observatório de Mudanças Climáticas – OMC – de São Leopoldo foi idealizado e está sendo desenvolvido e operado pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SEMMAM).

A Unisinos atua como responsável pela prestação de serviços técnicos especializados, para operação e desenvolvimento dos inventários de emissões, e planos de ação, por meio do grupo de pesquisa Núcleo de Caracterização de Materiais (NucMat) e pelos programas de pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) e em Engenharia Mecânica (PPGEM).

As reuniões para levantamentos de dados do 1º Inventário tiveram início em novembro de 2021, após a assinatura do decreto do Observatório Municipal de Mudanças Climáticas. Enquanto as reuniões resultantes do 2º Inventário ocorreram entre 2021 e 2023, juntamente com a elaboração do Plano Local de Ação Climática do município. Já as reuniões referentes ao 3º Inventário ocorreram em 2024 e 2025.

A estrutura física do Observatório encontra-se dentro da área do Parque Natural Municipal Imperatriz Leopoldina, sendo esta, uma importante área de conservação e preservação da cidade de São Leopoldo.

O Observatório de Mudanças Climáticas de São Leopoldo é responsável pela elaboração e desenvolvimento dos Inventários de Emissões de Gases do Efeito Estufa do município de São Leopoldo, sendo o primeiro desenvolvido no ano base de 2019, o 2º Inventário referente ao ano de 2020 e este 3º Inventário referente ao ano de 2021.

4. Introdução

Esta publicação apresenta os resultados do 3º Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) do município de São Leopoldo – RS, referente ao ano de 2021. O objetivo do inventário é identificar as principais fontes de emissões de GEE nos diversos setores da cidade, com o intuito de auxiliar no desenvolvimento de estratégias que visam à mitigação dos impactos ambientais gerados pelas mudanças climáticas.

Para o desenvolvimento do Inventário de Mudanças Climáticas de São Leopoldo foi utilizada a metodologia *Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories* (GPC), que é reconhecida internacionalmente e amplamente aplicada no desenvolvimento de inventários. Esta metodologia proporciona robustez e clareza na mensuração das emissões, além de possibilitar a comparabilidade entre inventários nacionais e internacionais.

As emissões foram calculadas utilizando a plataforma Ciris, mediante a utilização de dados advindos de transportes, resíduos sólidos, tratamento de esgoto e consumo de energia, fornecidos pelos diversos setores da gestão pública municipal e concessionárias prestadoras de serviços públicos – coordenados pela Secretaria de Meio Ambiente do município.

O desenvolvimento deste inventário vai ao encontro das premissas apresentadas pela Agenda 2030 e pelos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU). Além de, estar alinhado com os preceitos da Rede Mercocidades. Desde 1995, a rede é inspirada *“por uma integração regional diferente, respeitosa da diversidade e com a vocação de construir uma cidadania participativa e sem fronteiras. 24 anos depois, somos uma das mais importantes redes de governos locais da América do Sul e um referente destacado nos processos de integração regional. Em 2021, estamos muito longe de nossa*

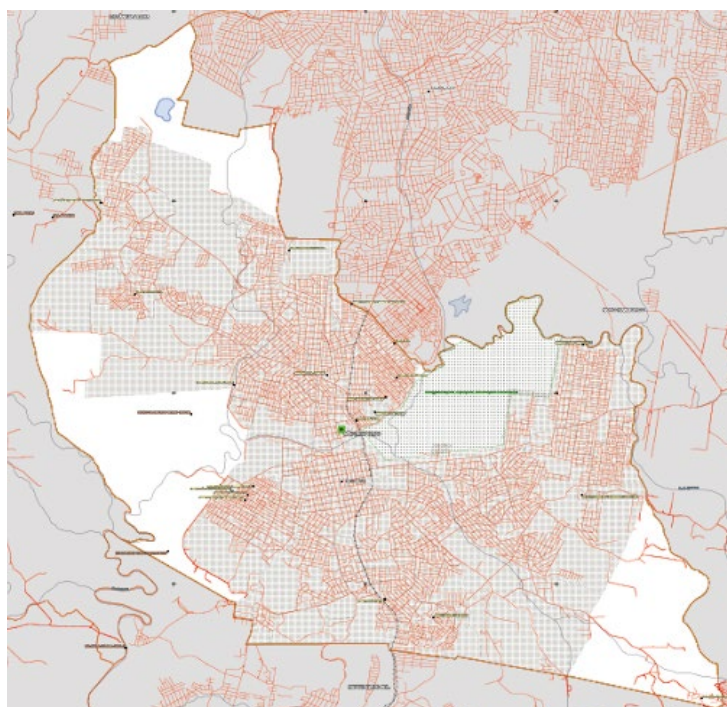
conformação original de 12 cidades, passando a contar com 364 cidades membro de 10 países do continente (Argentina, Brasil, Paraguai, Uruguai, Venezuela, Chile, Bolívia, Equador, Peru e Colômbia), onde habitam mais de 120 milhões de pessoas” (Mercocidades, 2022).

A publicação apresenta um panorama da cidade de São Leopoldo, a metodologia utilizada para desenvolvimento do inventário, os resultados gerais, um resumo das emissões do ano de 2021 e as conclusões.

5. *Contextualização do município*

O município de São Leopoldo apresenta uma área de 103.009 km² (IBGE, 2020), localizado na região metropolitana de Porto Alegre, capital do Estado do Rio Grande do Sul (**Figura 1**).

Figura 1 - Mapa do município de São Leopoldo



Fonte: Prefeitura de São Leopoldo, 2021.

Atualmente, São Leopoldo abriga uma população estimada em 237.720 pessoas (FEE, 2021), com um PIB *per capita* de R\$ 45.159,57 (FEE, 2021).

A cidade apresenta alta taxa de esgotamento sanitário apresentando em torno de 92,9% de coleta (IBGE, 2010) e 27% de tratamento efetivo (SNIS, 2020). Assim como, apresenta um índice satisfatório de arborização viária, chegando a 85,4% (IBGE, 2010). A região está em uma zona de

transição entre os biomas Mata Atlântica e Pampa, não pertencendo ao sistema costeiro-marinho, mas apresentando em seu território um importante rio, que abastece toda a região do Vale dos Sinos, o Rio dos Sinos. O território leopoldense possui em torno de 24% de sua área destinada à conservação ambiental, entre unidades de conservação, reserva biológica, áreas de preservação ambiental (APA), áreas de preservação permanente (APP), entre outras caracterizações.

Este inventário foi desenvolvido tendo como base o ano de 2021, de 01 de janeiro até 31 de dezembro, utilizando os dados disponibilizados pelas diversas secretarias, autarquias e empresas terceirizadas.

As emissões de GEE advindas de atividades antrópicas foram calculadas dentro dos limites do município de São Leopoldo, conforme apresentado na **Tabela 1**.

Tabela 1 - Limites do inventário

Limites do inventário	Informações
Nome do município	São Leopoldo
Estado	Rio Grande do Sul
País	Brasil
Ano do inventário	2021
Limites geográficos	Novo Hamburgo, Portão, Estância Velha e Sapucaia do Sul
Área (km ²)	103.009
População (hab.)	237.720
PIB <i>per capita</i> (R\$)	45.159,57
Clima	Subtropical úmido
Bioma	Zona de transição entre a Mata Atlântica e o Pampa

6. Metodologia e Caracterização do Inventário

6.1 Metodologia GPC

Para o desenvolvimento do 3º Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Município de São Leopoldo, ano 2021, foi utilizada a metodologia GPC, criada pelo Governos Locais pela Sustentabilidade (ICLEI) juntamente com a *World Resources Institute* (WRI) e a *Climate Leadership Group* (C40).

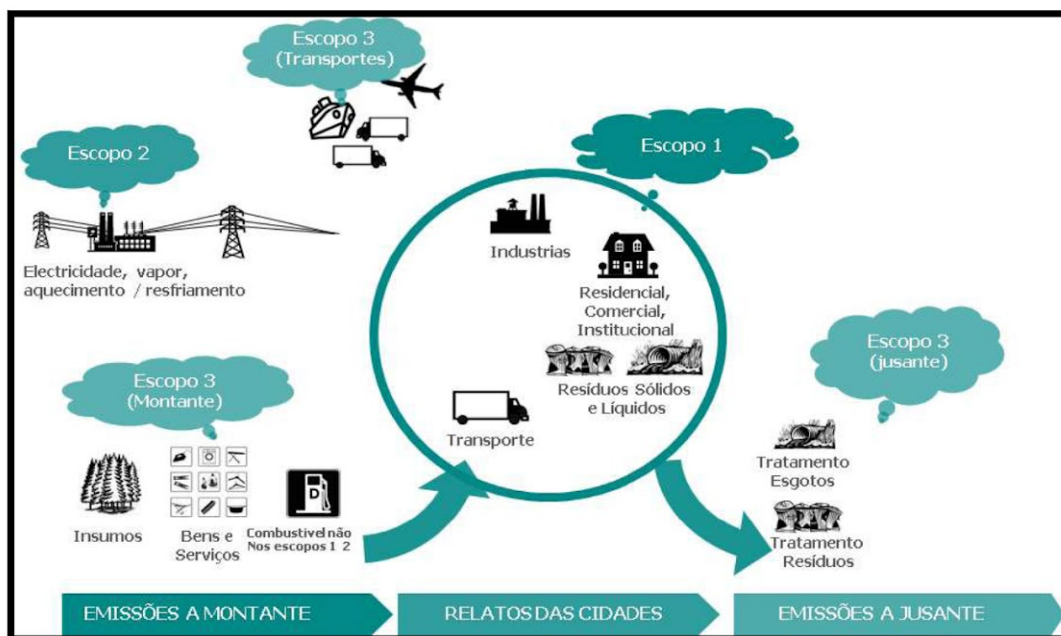
A metodologia GPC foi desenvolvida para ser robusta e clara, a fim de possibilitar uma agregação e maior confiabilidade dos dados. Além de proporcionar comparações mais confiáveis entre os inventários, pré-estabelecendo requisitos, apresentando orientações para cálculos e para reporte dos resultados dos inventários (FONG *et al.*, 2014).

Conforme metodologia GPC, o inventário deve abordar os seguintes gases do efeito estufa: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorcarbonetos (PFCs), hexafluoreto de enxofre (SF₆) e trifluoreto de nitrogênio (NF₃) (ICLEI-SAMS, 2018).

Com o intuito de identificar as maiores fontes de emissões de GEEs, a metodologia GPC determina seis setores diferentes, nos quais são alocadas as atividades emissoras: energia estacionária; transportes; resíduos; processos industriais e uso de produtos (IPPU); agricultura, floresta e outros usos do solo (AFOLU); e outras emissões indiretas. A **Figura 2** apresenta os setores das atividades emissoras e seus respectivos escopos. Para compreender os diferentes níveis de relatório GPC faz-se necessária a compreensão dos escopos dos relatórios. Estes escopos foram criados para agrupar três categorias com base onde há a sua ocorrência, podendo ocorrer dentro ou fora dos limites da cidade, sendo eles: Escopo 1, Escopo 2 e Escopo 3. O Escopo 1 considera as emissões diretas, geradas por fontes

localizadas dentro dos limites da cidade. O Escopo 2 abrange as emissões indiretas, que ocorrem dentro dos limites da cidade, mas são resultantes do uso de eletricidade, calor, vapor e/ou resfriamento, sendo fornecidos pela rede. Enquanto o Escopo 3 compreende outras emissões diretas, que ocorrem fora dos limites da cidade, advindas de atividades que ocorrem dentro dos limites da cidade (C40 CITIES, 2021). A classificação dos dados em seus respectivos Escopos é essencial para que haja consistência e confiabilidade para com o Inventário.

Figura 2 - Setores das atividades consideradas na metodologia GPC



Fonte: (ICLEI-SAMS, 2018)

Os dados dos setores foram analisados e calculados, obedecendo critérios apresentados pela Plataforma Ciris – *City Inventory Reporting and Information System*. Devido ao contexto da cidade, abrangendo as atividades desenvolvidas e a disponibilidade de dados confiáveis, parte-se para a

escolha do nível adequado para reporte, sendo eles, *Basic* e *Basic+* (FONG *et al.*, 2014).

Para o nível *Basic*, em princípio, os dados são encontrados com maior facilidade, abrangendo emissões comuns em praticamente todas as cidades, compreendendo: energia estacionária (Escopo 1 e 2); transporte dentro dos limites da cidade (Escopo 1 e 2); resíduos gerados dentro dos limites da cidade (Escopo 1); tratamento de resíduos encaminhados para outras cidades (Escopo 3) (ICLEI-SAMS, 2018).

O nível *Basic+* determina uma maior abrangência dos dados de emissões, englobando o nível *Basic* e, também, as seguintes categorias: processos industriais e uso de produtos (Escopo 1); agricultura, floresta e uso da terra (Escopo 1); fontes de energia estacionária, perdas em transmissão e distribuição (Escopo 3); e transporte (Escopo 3) (C40 CITIES, 2021).

As emissões do GEE apresentadas neste inventário são resultantes da unidade obtida em dióxido de carbono equivalente (CO₂e) pela multiplicação dos diferentes GEE inventariados pela métrica do Potencial de Aquecimento

Global (*Global Warming Potential* – GWP), que é indicada nos relatórios de avaliação do IPCC, conforme apresentado na **Tabela 2**.

Tabela 2 - Valores de GWP dos principais GEE (5AR)

GEE	GWP (tCO₂e)
CO ₂	1
CH ₄	28
N ₂ O	265
CO ₂ RENOVÁVEL	1
SF ₆	23.500

Fonte: (IPCC, 2013)

O Potencial de Aquecimento Global corresponde ao Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2013).

6.2 Coleta de dados

Os dados utilizados para desenvolvimento deste inventário foram obtidos junto às secretarias municipais, à autarquia de esgotamento sanitário e água, às empresas de energia elétrica e de fornecimento de gás natural e o

consumo de combustíveis pela Agência Nacional de Petróleo, conforme apresentado na **Tabela 3**.

Tabela 3 - Fontes de informações de consumo

Atividade	Instituição/Fonte
Energia elétrica	Rio Grande Energia (RGE)
Tratamento de efluentes domésticos	Sistemas de Esgotamento Sanitário do Serviço Municipal de Água e Esgotos (SEMAE)
Tratamento de resíduos sólidos	Secretaria de Mobilidade e Serviços Urbanos (SEMURB)
Veículos cadastrados na cidade	Secretaria de Segurança e Defesa Comunitária (SEMUSP)
Consumo de GN	Companhia de Gás do Estado do Rio Grande do Sul (Sulgás)
Consumo de GLP, diesel e gasolina	Agência Nacional de Petróleo (ANP)

Os dados referentes ao consumo de energia elétrica, do ano de 2021, correspondem à média anual, fornecida pela RGE, por meio de planilhas eletrônicas.

O Sistema de Esgotamento Sanitário, operado pelo SEMAE, forneceu os dados referentes ao ano de 2021 mediante planilhas eletrônicas,

juntamente aos fatores de emissões geradas no transporte, tratamento e lançamento do esgoto sanitário.

Por sua vez, os dados referentes aos resíduos sólidos foram fornecidos pela Secretaria de Mobilidade e Serviços Urbanos (SEMURB), por meio de planilhas eletrônicas.

Neste sentido, os dados referentes ao consumo de combustíveis, GLP, gasolina e diesel, advêm da Agência Nacional de Petróleo (ANP), referente ao consumo de combustível no município no ano de 2021. Já os dados referentes ao consumo de gás natural foram fornecidos pela Sulgás, mediante planilhas eletrônicas.

7. Emissões setoriais

7.1 Energia estacionária

As fontes de energia estacionária são consideradas uma das maiores contribuintes das emissões de GEE em uma localidade, advinda da combustão direta de combustíveis em edificações, considerando o uso indireto de eletricidade ou calor, que são fornecidos pela rede de distribuição. Assim como, as emissões fugitivas que são geradas no processo de geração, de entrega e de consumo de energia (C40 CITIES, 2021).

7.2 Transportes

As fontes de transporte também são consideradas uma das maiores contribuintes de emissões de GEE em uma cidade, abrangendo transporte rodoviário, ferroviário, aquático e aéreo. As emissões destas fontes são geradas diretamente pela combustão de combustível e indiretamente pelo uso de eletricidade que é fornecida pela rede de distribuição (ICLEI-SAMS, 2018).

7.3 Resíduos

As fontes de resíduos abrangem resíduos sólidos e águas residuais, podendo ser descartados e/ou tratados dentro ou fora dos limites da cidade. As emissões de GEE produzidas pelo descarte e tratamento dos resíduos ocorrem mediante decomposição aeróbia ou anaeróbia, podendo ocorrer também por meio de incineração (IPCC, 2021).

Cabe ressaltar que toda a energia gerada por meio de resíduos deve ser relatada na geração de energia e não no setor de resíduos (C40 CITIES, 2021).

8. Resultados gerais

Neste item são apresentados resultados do 3º Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa de São Leopoldo.

8.1 Esgotamento sanitário

Os dados de tratamento de efluentes do município de São Leopoldo foram fornecidos pelo SEMAE, autarquia responsável pelo tratamento de água e esgoto da cidade.

O SEMAE apresenta a capacidade de captação de água bruta no Rio dos Sinos de até 1.500 litros por segundo. Contando com uma estação de tratamento de água, 37 reservatórios e 23 elevatórias de água tratada distribuídas por 764.875 metros lineares. O sistema de esgotamento sanitário é composto por cinco estações de tratamento de esgotos e 17 elevatórias de esgotos que compreendem uma rede de 124.809 metros lineares (SNIS, 2020).

A etapa de tratamento de água do SEMAE é composta pelos processos de coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação.

O processo de tratamento de esgoto é realizado no município de São Leopoldo por 5 estações de tratamento de esgoto (ETEs), sendo elas: ETE Vicentina, ETE Feitoria, ETE Tancredo Neves, ETE Distrito Industrial e ETE Tarcílio Nunes.

Na ETE Vicentina é desenvolvido um tratamento preliminar por meio de gradeamento e desarenador, responsáveis pela retirada de sólidos grosseiros e areia. A seguir passa por um tratamento primário, realizado em dois reatores anaeróbios destinados a reduzir a carga orgânica e os sólidos suspensos totais. Na etapa seguinte, ocorre o tratamento secundário, que ocorre em três câmaras sequenciais, sendo elas anaeróbia, anóxica e aeróbia,

onde ocorrem os processos de nitrificação e desnitrificação. Após, o efluente é conduzido à etapa de tratamento terciária onde um coagulante promove a precipitação do nutriente fósforo. Esta estação de tratamento apresenta uma vazão máxima de projeto de 8.640 m³/dia.

A ETE Feitoria, também é composta por gradeamento e desarenador para realização do tratamento preliminar, porém o tratamento secundário é realizado por uma lagoa aerada/facultativa seguida por um decantador secundário, para precipitação do lodo formado, que tem a função de remover a matéria orgânica e transformar o nitrogênio amoniacal em suas formas oxidadas, na sequência ocorre o tratamento terciário que se dá por banhado construído (*wetland*) onde é realizada a remoção dos nutrientes remanescentes, como fósforo, formas oxidadas de nitrogênio e coliformes termotolerantes. Nesta ETE, a vazão média de projeto é de 10.360 m³/dia (SNIS, 2020).

Enquanto o tratamento realizado na ETE Tancredo Neves dá-se primeiramente por um tanque séptico, onde realiza-se a degradação da matéria orgânica a partir de processos oxidativos anaeróbios e sedimentação de sólidos, passando para o seu tratamento secundário que ocorre em um filtro biológico anaeróbio, sendo responsável pela remoção da matéria remanescente e dos sólidos suspensos. Esta ETE apresenta vazão média de 1.730 m³/dia (SEMAE, 2020).

Na ETE Distrito Industrial realiza-se o tratamento primário por meio de reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB), que realiza a redução da carga orgânica e dos sólidos suspensos totais. Contando também, com filtro aeróbio submerso (FAS) com decantador concêntrico, que realiza a remoção da matéria orgânica, dos nutrientes, dos patógenos e a clarificação do efluente final. Esta ETE apresenta uma vazão média de projeto de 160 m³/dia (SEMAE, 2020).

A ETE Tarcílio Nunes (SEMAE, 2020) realiza o tratamento primário composto por um tanque séptico, onde ocorre a degradação da matéria orgânica a partir de processos oxidativos anaeróbios e a sedimentação de sólidos, enquanto o tratamento secundário ocorre por meio de um contador biológico rotativo (biodisco), a fim de realizar a remoção da matéria orgânica remanescente, de sólidos suspensos, bem como a remoção do nutriente nitrogênio amoniacal. Esta ETE apresenta vazão média de projeto de 54,6 m³/dia.

Para o desenvolvimento dos cálculos utilizou-se o material total organicamente degradável em efluente doméstico, além dos dados apresentados a seguir, na **Tabela 4**.

Tabela 4 - Dados de cálculo de efluentes

População	237.720 habitantes (IBGE, 2022)
DBO	50 g/hab/dia
I	1,25 (considerando que há descarga de efluente industrial).

Fonte: (SEMAE, 2020; IBGE, 2024)

A Equação 01 apresenta o cálculo do material total organicamente degradável:

$$TOW = P \times DBO \times 0,001 \times I \times 365 \quad (01)$$

Fonte: IPCC, 2021c

Onde:

TOW → É o material total organicamente tratado em kg DBO/ano

P → É a população atendida

DBO → É a demanda biológica de oxigênio *per capita* em g/pessoa/dia

I → É o fator de correção para a contribuição de efluente industrial no esgotamento sanitário

0,001 → É o fator de conversão g DBO para kg DBO

Para o cálculo do material organicamente tratado utilizou a Equação 01 e os dados apresentados na **Tabela 4**, conforme pode-se observar a seguir.

Para:

$$TOW = 237.720 \text{ hab} \times 50 \text{ g/hab /dia} \times 0,001 \times 1,25 \times 365 \text{ dias}$$

$$TOW = 5.422.987,50 \text{ kg DBO/ano}$$

O fator de emissão CH₄ para tratamento de efluente doméstico via ou sistema de descarga pode ser calculado de acordo com a Equação 02.

$$\zeta_j = B_o \times MCF_j \quad (02)$$

Fonte: IPCC, 2021c

Onde:

ζ_j → É o fator de emissão em g CH₄/kg DBO;

B_o → É a capacidade máxima de produção de metano em kg CH₄/ kg DBO;

MCF_j → É o fator de correção para o gás metano.

Na **Tabela 5** encontram-se os dados fornecidos pelo SEMAE, para o desenvolvimento dos cálculos.

Tabela 5 - Dados fornecidos pelo SEMAE referentes ao ano de 2021

B ₀	0,6 kg CH ₄ /kg DBO
MCF ₁	0,000
MCF ₂	0,001
MCF ₃	0,083
MCF ₄	0,053
MCF ₅	0,145
MCF ₆	0,000

Fonte: SEMAE (2021)

Utilizando a Equação 02 e os dados da **Tabela 5** encontrou-se os resultados a seguir.

$$\zeta_1 = 0,6 \times 0,000 = 0,000$$

$$\zeta_2 = 0,6 \times 0,001 = 0,0006$$

$$\zeta_3 = 0,6 \times 0,083 = 0,050$$

$$\zeta_4 = 0,6 \times 0,053 = 0,032$$

$$\zeta_5 = 0,6 \times 0,145 = 0,087$$

$$\zeta_6 = 0,6 \times 0,000 = 0,000$$

O total de emissões de CH₄ para efluente doméstico é obtido mediante o uso da Equação 03.

$$\xi CH_4 = [\sum_{i,j}(U_i \times T_{i,j} \times \zeta_j)](TOW - S) - R \quad (03)$$

Fonte: IPCC, 2021c

Onde:

ξCH_4 → É dado em kg CH₄/ano

U_i → É a fração da população para cada efluente doméstico

$T_{i,j}$ → Grau de utilização para cada destino do efluente doméstico

ζ_j → Fator de emissão em kg CH₄/kg DBO

S → É a quantidade de material orgânico removido no lodo em kg DBO/ano

R → É a quantidade de metano recuperado em kg CH₄/ano

A **Tabela 6** apresenta os índices de efluente doméstico considerando a população existente no município de São Leopoldo.

Tabela 6 - Índices de efluente doméstico conforme a população do município

Efluente doméstico em relação à população do município (%)					
Não coletado		Coletado			
Sumidouro	Arroios e rio	Não tratado		Tratado	
		Fossa/filtro	Arroios e rio	Anaeróbio	Aeróbio
5,40	1,00	16,50	53,20	18,08	5,82
0,054	0,01	0,165	0,532	0,1808	0,0582

Fonte: SEMAE (2021).

Com os dados fornecidos pelo SEMAE desenvolveu-se os cálculos a seguir, com o intuito de obter cada fator de emissão.

$$U, T, \zeta_{1,6} = (0,000 + 0,0006 + 0,050 + 0,032 + 0,087 + 0,000) \\ = 0,169$$

O valor utilizado para S foi 0 (zero), pois não ocorreu a remoção de material orgânico do lodo. Assim como, também se considerou 0 (zero) para o valor de R, pois não houve recuperação de metano.

Mediante os dados e resultados obtidos encontrou-se o montante de emissões de CH₄, com a utilização da Equação 03, conforme observa-se a seguir.

Para:

$$\xi CH_4 = \left[\sum_{1,6} (0,169) \right] (5.422.987,50 - 0) - 0$$

$$= 915.421,98 \text{ kg } CH_4/\text{ano}$$

Com o valor obtido realiza-se a conversão para toneladas de CO₂e, conforme apresentado a seguir:

$$\xi CH_4 = \frac{915.421,98}{1.000} \times 28 = 25.631,82 \text{ tCO}_2\text{e}$$

Para obter as emissões de N₂O utiliza-se a equação 04.

$$N_2O_{plants} = P \times T_{plant} \times F_{ind-com} \times EF_{plant} \quad (04)$$

Fonte: IPCC, 2021c

Onde:

N_2O_{plants} → É dado em kg N₂O/ano

P → População

T_{plant} → Grau de utilização da planta em %

$F_{ind-com}$ → Fração de proteína co-dispensada industrial e comercial

EF_{plant} → Fator de emissão em g N₂O/per capita/ano

Para a fração de proteína co-dispensada industrial e comercial, o IPCC (2021c) recomenda a utilização do valor padrão de 1,25, baseando-se nos estudos de Metcalf & Eddy (2003). Enquanto, o fator de emissão indicado pelo IPCC (2021c) corresponde a 3,2 g N₂O/per capita/ano.

Para:

$$N_{2O_{plants}} = 237.720 \times 0,2329 \times 1,25 \times 3,2 = 221.459,95 \text{ kg } N_{2O} / \text{ ano}$$

Para obter o nitrogênio total no efluente utiliza-se a equação 05, conforme apresentada a seguir.

$$N_{efluente} = (P \times Proteína \times F_{NPR} \times F_{NON-COM} \times F_{IND-COM}) - N_{lodo} \quad (05)$$

Onde:

$N_{efluente}$ → Total anual de nitrogênio no efluente em kg N/ano

P → População

$Proteína$ → Consumo anual *per capita* de proteína em kg/*per capita*/ano

F_{NPR} → Fração de nitrogênio na proteína em kg N/kg proteína

$F_{NON-COM}$ → Fator de proteína não consumida adicionada ao efluente

$F_{IND-COM}$ → Fração de proteína co-dispensada industrial e comercial

N_{lodo} → Nitrogênio removido com o lodo em kg N/ano

Para o consumo anual *per capita* de proteína foi adotado o valor de 93,01 kg/per capita/ano referente ao consumo das três principais proteínas (bovino, frango e suíno) no Brasil, de acordo com dados do IBGE e MDIC (2021). Para a fração de nitrogênio na proteína, o IPCC (2021c) recomenda a utilização do valor padrão de 0,16 kg N/kg proteína. Fator de proteína não consumida adicionada ao efluente corresponde a 1,1 por se tratar de um país com coleta de resíduos (IPCC, 2021c). Já para a fração de proteína co-dispensada industrial e comercial, o IPCC (2021c) recomenda a utilização do valor padrão de 1,25, baseando-se nos estudos de Metcalf & Eddy (2003). Para o valor referente ao nitrogênio removido com o lodo foi utilizado o valor padrão indicado pelo IPCC (2021c), que corresponde a zero.

Para:

$$N_{efluente} = (237.720 \times 93,01 \times 0,16 \times 1,1 \times 1,25) - 0$$

$$= 4.864.274,18 \text{ kg N/ano}$$

Com os valores encontrados utiliza-se a Equação 06 para obter as emissões de N₂O, conforme pode-se observar a seguir.

$$\xi N_2O = N_{efluente} \times EF_{efluente} \times 44/28 \quad (06)$$

Onde:

ξN_2O → Emissões de N₂O no ano do inventário em kg N₂O/ano

$N_{efluente}$ → Nitrogênio no efluente descartado no meio aquático kg N/ano

$EF_{efluente}$ → Fator de emissão para emissões de N₂O descarregadas em águas residuais em kg N₂O-N/kg N

44/28 → Fator de conversão de kg N₂O-N para kg N₂O

Para o fator de emissão para emissões de N₂O descartado em águas residuais utiliza-se o valor padrão indicado pelo IPCC (2021c), que corresponde a 0,005 g N₂O/*per capita*/ano.

Para:

$$\xi_{N_2O} = 4.642.814,23 \times 0,005 \times 44/28 = 38.219,30 \text{ kg } N_2O/\text{ano}$$

Com o valor obtido realiza-se a conversão para toneladas de CO₂e, conforme apresentado a seguir:

$$\xi_{N_2O} = \frac{38.219,30}{1.000} \times 265 = 10.128,11 \text{ tCO}_2e$$

Por fim, as emissões de CH₄ e N₂O foram aplicadas na Equação 07 para obter as emissões totais de esgotamento sanitário.

$$\xi_{es} = \xi_{CH_4} + \xi_{N_2O} \quad (07)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Para:

$$\xi_{es} = 25.631,82 + 10.128,11 = 35.759,93 \text{ tCO}_2e$$

Desta forma, conclui-se que o total de emissões advindas do esgotamento sanitário no ano de 2021 no município de São Leopoldo correspondem a 35.759,93 tCO₂e.

8.2 Resíduos Sólidos

A Secretaria Municipal de Mobilidade e Serviços Urbanos (SEMURB) é responsável pela limpeza pública do município de São Leopoldo, realizando a fiscalização e coordenação das atividades realizadas pela empresa concessionária de serviços. Além de ser a responsável pelo fornecimento dos dados aqui apresentados.

A coleta domiciliar de resíduos orgânicos e de rejeitos é realizada em todos os bairros do município, ocorrendo três vezes por semana. Os resíduos sólidos são enviados ao aterro sanitário da empresa Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR), constituída por uma área de 135 ha, sendo 60 ha para utilização como aterro sanitário e os demais correspondem à área de preservação.

O aterro da CRVR tem capacidade para recebimento de cinco milhões de toneladas de resíduos, apresentando uma vida útil de 20 anos. Todo o lixiviado gerado é acumulado em lagoas impermeabilizadas e o seu tratamento é desenvolvido externamente por unidades licenciadas.

Além do aterro em operação, o município conta com um aterro encerrado, que é monitorado e apresenta estação de transbordo em operação pela empresa responsável pela coleta domiciliar. O transbordo também é utilizado pelas cooperativas de coleta seletiva para o descarte de rejeitos originários da coleta seletiva do município. Os resíduos sólidos urbanos coletados são encaminhados à CRVR.

A secretaria é responsável pelos serviços de capina, pintura, roçada, varrição manual e mecanizada, conservação das ruas, praças e logradouros. Além da coleta, transporte e destinação final dos resíduos domiciliares.

A coleta seletiva é realizada por oito cooperativas de reciclagem e é compartilhada com o município, com o intuito de complementar a execução da coleta. Para o desenvolvimento deste trabalho, o município determina que as cooperativas tenham licença de operação em dia e que realizem a triagem de forma a garantir o máximo aproveitamento de resíduos sólidos reciclados.

O município ainda conta com três ecopontos para destinação de resíduos de poda, jardinagem, construção, recicláveis, móveis, madeiras e pneus. Nestes ecopontos, cada cidadão pode destinar até 1 m³/dia.

O aterro de resíduos de construção civil do município está em operação, sendo utilizado somente pelos serviços municipais de limpeza urbana. No município encontra-se uma usina de reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD), desenvolvida e operada por um consórcio público de saneamento básico, entre 26 municípios da Mesorregião Metropolitana de Porto Alegre, apresentando uma área de 31.099 m². Esta usina de RCD é equipada com dois britadores, um móvel e um fixo (GRABASCK, 2016).

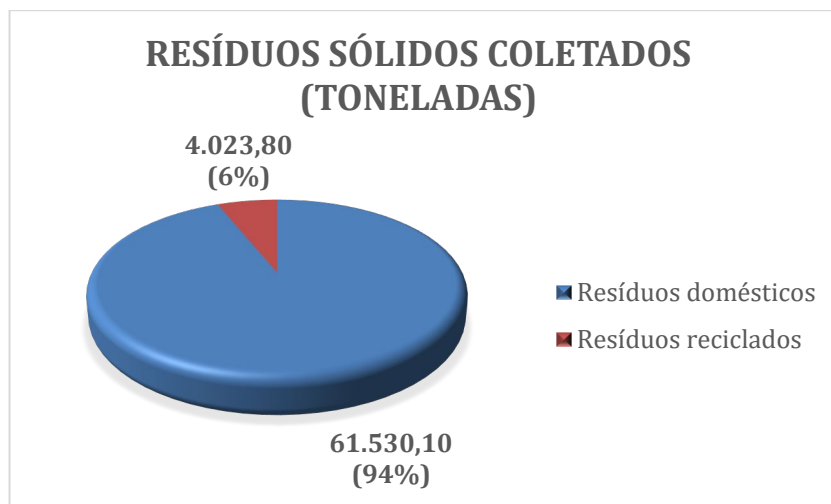
A SEMURB também é responsável pela administração dos cemitérios municipais de São Leopoldo, que geram resíduos de exumação, equipamento de proteção individual (EPI), resíduos sólidos de construção civil, recicláveis e resíduos comuns. O resíduo comum é destinado para a coleta municipal, os demais são coletados e destinados por uma empresa contratada. Dos três cemitérios existentes no município são coletados 500 kg/mês de resíduos recolhidos.

Os resíduos hospitalares gerados na Fundação Hospital Centenário de São Leopoldo são separados na central de resíduos do próprio hospital, entre,

comum, reciclável e contaminados. Os resíduos comuns são destinados à coleta municipal. Os resíduos recicláveis são recebidos por uma das cooperativas de reciclagem que atendem ao município. Já os resíduos contaminados são recebidos pela empresa contratada, Ambserv Tratamento de Resíduos.

No ano de 2021, foram coletados em São Leopoldo 61.530,10 t de resíduos orgânicos e rejeitos, que foram encaminhados para o aterro sanitário da CRVR. As cooperativas de reciclagem recolheram 4.023,80 t de resíduos recicláveis (Figura 3).

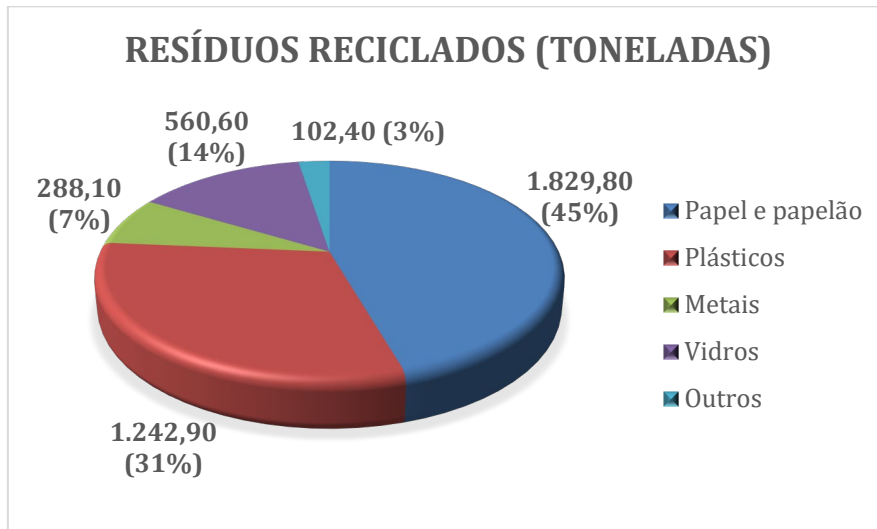
Figura 3 - Resíduos sólidos recolhidos em São Leopoldo no ano de 2021



Fonte: Elaborado pelos autores.

Do montante de resíduos recicláveis recolhidos, foram recuperados os percentuais apresentados na Figura 4. Deste total, 1.829,80 t correspondem a resíduos constituídos de papel e papelão; 1.242,90 t correspondem a plásticos; 288,10 t são representados por metais; 560,60 t são representados por vidros; e 102,40 t correspondem a outros materiais recicláveis, exceto pneus e eletrônicos.

Figura 4 - Resíduos recicláveis coletados em São Leopoldo no ano de 2021



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para o desenvolvimento dos cálculos foram utilizados os dados apresentados na **Tabela 7**, referentes às coletas realizadas pelo órgão municipal. Para a estimativa das emissões geradas nos resíduos sólidos destinados ao aterro sanitário municipal foi considerada apenas a geração de metano devido aos valores de CO₂ e N₂O serem desprezíveis neste processo. O método compromisso de metano foi utilizado para a estimativa de emissões de metano para os resíduos sólidos urbanos. O método é apresentado na Equação 08 (IPCC, 2021c).

$$L_0 = DDOCm \times F \times 16/12 \quad (08)$$

Fonte: IPCC (2021c)

Onde:

L_0 → É a geração potencial de metano (Gg)

DOC_m → É a massa de compostável de carbono orgânico degradado (DOC)

F → É a fração de metano no gás de aterro

$16/12$ → É a razão estequiométrica entre metano e carbono

Para o cálculo de $DDOC_m$ utiliza-se a Equação 09 (IPCC, 2021c).

$$DDOC_m = W \times DOC \times DOC_f \times MCF \quad (09)$$

Fonte: IPCC (2021c)

Onde:

$DDOC_m$ → É a massa de compostável de DOC (Gg)

W → É a quantidade de resíduo depositado (Gg)

DOC → É a quantidade de carbono orgânico degradável em Gg C/Gg de resíduo

DOC_f → É a fração de DOC efetivamente degradada

MCF → É o fator de correção do metano por tipo de local de disposição do resíduo

Na **Tabela 7** são apresentados os parâmetros utilizados para o potencial de geração de metano dos resíduos sólidos municipais coletados pela prefeitura.

Tabela 7 - Parâmetros para L_0 dos resíduos sólidos municipais coletados pela prefeitura

	Comida	Jardim	Papel	Madeira	Têxteis	Fraldas	Lodo	RSM	Inerte
DOC (tRSU)	0	0,2	0,4	0,43	0	0	0,05	0,16	-
DOCf	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-
K	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,185	0,09	-
W (Gg)	30,5	0	6,936	0	0	0	0	42,215	7,59
MCF	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-
DDOC m (Gg)	0	0	0,6936	0	0	0	0	1,6886	-
F	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-
Total Lo (CH₄ potencial)					1,584163				
Total Lo (CO₂e)					44.356,56				

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para os resíduos coletados pela CRVR foram utilizados os dados apresentados na **Tabela 8**.

Tabela 8 - Parâmetros para L_o dos resíduos sólidos municipais recebidos pela CRVR

	Comida	Jardim	Papel	Madeira	Têxteis	Fraldas	Lodo	RSM	Inerte
DOC (tCH ₃ /t RSU)	0	0,2	0,4	0,43	0	0	0,05	0,16	-
DOCf	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-
K	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,185	0,09	-
W (Gg)	125	0	28	12	5	12	0	232	8
MCF	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-
DDOC m (Gg)	0	0	2,8	1,29	0	0	0	9,28	-
F	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-
Total Lo (CH₄ potencial)					6,1712				
Total Lo (CO₂e)					172.793,6				

Fonte: Elaborado pelos autores.

Aos valores calculados para as emissões provenientes de resíduos sólidos depositados no aterro sanitário, foram descontados os valores de queima de metano. Esses dados foram fornecidos pela Concessionária responsável pelo aterro sanitário localizado no município (CRVR). A Tabela 9 apresenta os dados fornecidos pela CRVR.

Tabela 9 – Dados de emissões provenientes de resíduos sólidos fornecidos pela CRVR

Biogás (m³/mês)	CH₄ (%)	Metano (m³/mês)	Total CH₄ flare (kg/mês)	Total CH₄ flare(t)
548.640	0,27	148.132,8	106.211,21	106,21
676.080	0,45	304.236	218.137,21	218,13
808.560	0,55	446.325,12	320.015,11	320,01
572.400	0,28	160.272	114.915,02	114,91
758.880	0,36	279.267,84	200.235,04	200,23
833.760	0,34	290.982,24	208.634,26	208,63
698.400	0,28	199.044	142.714,54	142,71
828.720	0,40	332.316,72	238.271,08	238,27
824.400	0,40	332.233,2	238.211,20	238,21
392.400	0,30	120.074,4	86.093,34	86,09
Total CH₄ (t)				1.873,43
Total CO₂e				52.456,26

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Tabela 10 apresenta os dados utilizados para resíduos com queima a céu aberto.

Tabela 10 - Índices de resíduos submetidos a queima por céu aberto

	Comida	Jardim	Papel	Madeira	Têxteis	Fraldas	Inertes	Plástico
WF	0,56	0	0,12	0,05	0,02	0,05	0,042	0,178
dm	0,4	0,4	0,9	0,85	0,8	0,4	0,9	1
CF	0,38	0,49	0,46	0,5	0,5	0,7	0,03	0,75
FCF	0,38	0	0,01	-	0,2	0,1	1	1
OF	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
Somatório	0,0188	0	0,0003	0,0123	0,0009	0,0008	0,0007	0,07743
CO₂	0,0048	0	7E ⁻⁰⁵	0,0031	0,0002	0,0002	0,0002	0,01976
Total CO₂ (t)	28,379							

Fonte: Elaborado pelos autores.

O somatório apresentado na **Tabela 10** foi gerado mediante a utilização da Equação 10, que pode ser encontrada também no Capítulo 05 do material, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2021c), referente às estimativas de emissões de CO₂ baseadas na composição dos resíduos sólidos municipais.

$$\xi CO_2 = MSW \times \sum_j (WF_j \times dm_j \times CF_j \times FCF_j \times OF_j) \times 44/12 \quad (10)$$

Fonte: IPCC (2021c)

Onde:

MSW → Corresponde a quantidade total de resíduos sólidos como peso úmido incinerado ou queimado a céu aberto (Gg/ano)

WF_j → É a fração de resíduo por tipo de material

dm_j → É a fração de material seco por tipo de material

CF_j → É a fração de carbono no material seco

FCF_j → É a fração de carbono fóssil no total de carbono por tipo de material

OF_j → É o fator de oxidação

$44/12$ → É o fator de conversão de C para CO_2

O cálculo das emissões de CH_4 é baseado na quantidade de resíduos queimados a céu aberto e no fator emissão conforme apresentado na Equação 11 (IPCC, 2021c), em Gg/ano.

$$\xi CH_4 = \sum_i (IW_i \times \zeta_i) \times 10^{-6} \quad (11)$$

Fonte: IPCC (2021c)

Onde:

IW_i → É a quantidade de resíduos sólidos por tipo de material incinerado ou queimado a céu aberto (Gg/ano)

ζ_i → É o fator de emissão de metano agregado ao resíduo em $kg CH_4/Gg$ de resíduo

10^{-6} → É o fator de conversão de kg para Gg

Logo:

$$\xi CH_4 = \sum_i (0,696_i Gg/ano \times 6500_i kgCH_4/Gg) \times 10^{-6} Gg$$

$$\xi CH_4 = 0,0005 Gg/ano = 0,4524 t/ano$$

O cálculo de emissões de N_2O é baseado na quantidade de resíduos queimados a céu aberto, juntamente com o fator de emissão padrão, conforme apresentado na Equação 12 (IPCC, 2021c), apresentada a seguir.

$$\xi N_2O = \sum_i (IW_i \times \zeta_i) \times 10^{-6} \quad (12)$$

Fonte: IPCC (2021c)

$$\xi N_2O = \sum_i (0,0696_i Gg/ano \times 150_i kgCH_4/Gg) \times 10^{-6}$$

$$\xi N_2O = 1^{-05} Gg/ano = 0,0104 t/an$$

Os dados utilizados para desenvolvimento de cálculo de incineração são apresentados na **Tabela 11**.

Tabela 11 - Índices de resíduos submetidos a incineração

	Comida	Jardim	Papel	Madeira	Têxteis	Fraldas	Inertes	Plástico
WF	1	-	-	-	-	-	-	-
dm	1	-	-	-	-	-	-	-
CF	0,38	-	-	-	-	-	-	-
FCF	1	-	-	-	-	-	-	-
OF	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
Somatório	0,2204	0	0	0	0	0	0	0
CO₂	0,036	0	0	0	0	0	0	0
Total CO₂ (t)	35,978							

Fonte: Elaborado pelos autores.

O somatório apresentado na **Tabela 11** foi gerado mediante a utilização da Equação 13, que pode ser encontrada também no Capítulo 05 do material *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2021c), referente as estimativas de emissões de CO₂ baseadas na composição dos resíduos sólidos municipais.

$$\xi CO_2 = MSW \times \sum_j (WF_j \times dm_j \times CF_j \times FCF_j \times OF_j) \times 44/12 \quad (13)$$

Fonte: IPCC (2021c)

O cálculo das emissões de CH_4 é baseado na quantidade de resíduos incinerados e no fator emissão, conforme apresentado na Equação 14, em Gg/ano.

$$\xi CH_4 = \sum_i (IW_i \times \zeta_i) \times 10^{-6} \quad (14)$$

Fonte: IPCC (2021c)

$$\xi CH_4 = \sum_i (0,0445_i Gg/ano \times 6500_i kgCH_4/Gg) \times 10^{-6}$$

$$\xi CH_4 = \sum_i (0,0445_i Gg/ano \times 6500_i kgCH_4/Gg) \times 10^{-6}$$

$$\xi CH_4 = 0,0003 Gg/ano = 0,2894 t/ano$$

O cálculo de emissões de N_2O é baseado na quantidade de resíduos incinerados, juntamente com o fator de emissão padrão, conforme apresentado na Equação 15 a seguir.

$$\xi N_2O = \sum_i (IW_i \times \zeta_i) \times 10^{-6} \quad (15)$$

Fonte: IPCC (2021c)

$$\xi N_2O = \sum_i (0,0445_i Gg/ano \times 150_i kgCH_4/Gg) \times 10^{-6}$$

$$\xi N_2O = 7^{-06} Gg/ano = 0,0067 t/ano$$

Frente aos resultados obtidos, foi realizado o somatório das emissões referentes ao montante de resíduos sólidos no município de São Leopoldo, conforme apresentado na Equação 16.

$$\xi_{totais} = (((CH_4_{potencial} \times 28) \div 1000) + ((CH_4 \times 28) \div 1000) + ((N_2O \times 28) \div 1000) + CO_2e + CO_2) - (CH_4 \times 28) \div 1000 \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \xi_{totais} &= (0,22 + 0,02 + 0,005 + 269.606,42 + 64,36) - (52,46) \\ &= 269.618,56 \text{ tCO}_2e \end{aligned}$$

Desta forma, conclui-se que as emissões advindas dos resíduos sólidos, referentes ao ano de 2021, correspondem a 269.618,56 tCO₂e.

8.3 Transporte

Os dados referentes aos veículos que circulam pelo município de São Leopoldo foram obtidos junto a Secretaria de Segurança e Defesa Comunitária (SEMUSP). Os dados referentes ao consumo de combustíveis (GLP, gasolina e diesel) no município foram fornecidos pela Agência Nacional de Petróleo. A metodologia empregada utiliza-se dos guias para elaboração de inventários de emissões do IPCC, Volume 2 – Energia, no Capítulo 3, que versa sobre combustão móvel (IPCC, 2021b).

Para os cálculos referentes ao consumo de combustíveis foram utilizados os dados fornecidos pela ANP, correspondentes ao consumo real de combustíveis no município de São Leopoldo durante o ano de 2021.

No desenvolvimento dos cálculos referentes ao diesel, transformou-se o volume de venda em energia (TJ). Para o ano de 2021 foram consumidos 29.078.400 L de diesel no município de São Leopoldo, que representam 29.078,40 m³. Primeiramente, encontrou-se a massa total do diesel,

utilizando a massa específica e o consumo de diesel no município, mediante o uso da Equação 17.

$$mt_d = \mu_d \times v_d \quad (17)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$mt_d \rightarrow$ massa total diesel (kg)

$\mu_d \rightarrow$ massa específica diesel (kg/m³)

$v_d \rightarrow$ consumo diesel em São Leopoldo (m³)

Para a massa específica do diesel utilizou-se a média dos valores 820 a 850 kg/m³, que corresponde a 835 kg/m³ (PETROBRAS, 2023).

Para:

$$mt_d = 835 \text{ kg/m}^3 \times 29.078,40 \text{ m}^3 = 24.280.464,00 \text{ kg}$$

Para o cálculo da energia utilizou-se a Equação 18.

$$\varepsilon_d = mt_d \times \rho_d \quad (18)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\varepsilon_d \rightarrow$ energia diesel (TJ)

$m_{d} \rightarrow$ massa total diesel (kg)

$\rho_{d} \rightarrow$ poder calorífico diesel (kg)

Para o poder calorífico do diesel foi utilizado o valor 44.350 KJ/kg (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2024).

Para:

$$\varepsilon_d = 24.280.464,00 \text{ kg} \times 44.350 \text{ KJ/kg} = 1,076^{12} \text{ kcal}$$

$$\varepsilon_d = 1,076^{12} \text{ kcal} \times 10^{-9} = 1076,84 \text{ TJ}$$

Obtendo-se a energia, aplicou-se os fatores de emissões de CO₂, N₂O e CH₄, a fim de gerar o resultado das emissões em CO₂e. Os fatores de emissão foram obtidos no Capítulo 03, do material *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2021b), conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Fatores de emissões de diesel para transporte rodoviário

Fator de emissão	Padrão (kg/TJ)
CO ₂	74.100
N ₂ O	3,9
CH ₄	3,9

Fonte: IPCC (2021b).

Para obter as emissões de CO₂ aplicou-se a Equação 19.

$$\xi CO_2 = \varepsilon_d \times \zeta CO_2 \quad (19)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi CO_2 \rightarrow$ emissões de CO_2 (kg)

$\varepsilon_d \rightarrow$ energia diesel (TJ)

$\zeta CO_2 \rightarrow$ fator de emissão de CO_2 (kg/TJ)

Para:

$$\xi CO_2 = (1076,84 \text{ TJ} \times 74.100 \text{ kg/TJ})/1000 = 79.793,74 \text{ t}$$

Para obter as emissões de N_2O aplicou-se a Equação 20.

$$\xi N_2O = \varepsilon_d \times \zeta N_2O \quad (20)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi N_2O \rightarrow$ emissões de N_2O (kg)

$\varepsilon_d \rightarrow$ energia diesel (TJ)

$\zeta N_2O \rightarrow$ fator de emissão de N_2O (kg/TJ)

Para:

$$\xi N_2O = (1076,84 \text{ TJ} \times 3,9 \text{ kg/TJ})/1000 = 4,20 \text{ t}$$

Para obter as emissões de CH_4 aplicou-se a Equação 21.

$$\xi CH_4 = \varepsilon_d \times \zeta CH_4 \quad (21)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi CH_4 \rightarrow$ emissões de CH_4 (kg)

$\varepsilon_d \rightarrow$ energia diesel (TJ)

$\zeta CH_4 \rightarrow$ fator de emissão de CH_4 (kg/TJ)

Para:

$$\xi CH_4 = (1076,84 \text{ TJ} \times 3,9 \text{ kg/TJ}) / 1000 = 4,20 \text{ t}$$

Por fim, as emissões totais de diesel foram obtidas utilizando a Equação 22.

$$\xi_d = \xi CO_2 + ((\xi N_2O \times 265) + (\xi CH_4 \times 28)) \quad (22)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi_d \rightarrow$ emissões totais de diesel (tCO_2e)

$\xi_{CO_2} \rightarrow$ emissões de CO_2 (t)

$\xi_{N_2O} \rightarrow$ emissões de N_2O (t)

$\xi_{CH_4} \rightarrow$ emissões de CH_4 (t)

Para:

$$\xi_d = 79.793,74 t + ((4,20 t \times 265) + (4,20 t \times 28))$$

$$\xi_d = 81.024,24 tCO_2e$$

Para a elaboração dos cálculos de consumo de gasolina no município de São Leopoldo utilizou-se o valor 68.366.890 L, fornecido pela ANP, referente ao consumo de gasolina no município no ano de 2021. Este valor foi convertido de litros para m^3 , correspondendo a 68.366,89 m^3 . Primeiramente, encontrou-se a massa total da gasolina, utilizando a massa específica e o consumo de gasolina no município.

$$mt_g = \mu_g \times v_g \quad (23)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$mt_g \rightarrow$ massa total gasolina (kg)

$\mu_g \rightarrow$ massa específica gasolina (kg/m^3)

$v_g \rightarrow$ consumo gasolina em São Leopoldo (m^3)

Para a massa específica da gasolina utilizou-se o valor de 715 kg/m^3 (PETROBRAS, 2021). A fim de encontrar a massa total da gasolina aplicou-se a Equação 23.

$$mt_g = 715 \text{ kg/m}^3 \times 68.366,89 \text{ m}^3$$

$$mt_g = 48.882.326,35 \text{ kg}$$

Para se obter a energia, utilizou-se a massa total, obtida na equação anterior, e para o poder calorífico da gasolina utilizou-se a média do poder calorífico inferior, 10.400 kcal/kg , e do poder calorífico superior, 11.220 kcal/kg , que corresponde a 10.810 kcal/kg (MME, 2017). Para o cálculo da energia utilizou-se a Equação 24.

$$\varepsilon_g = mt_g \times \rho_g \quad (24)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\varepsilon_g \rightarrow$ energia gasolina (TJ)

$mt_g \rightarrow$ massa total gasolina (kg)

$\rho_g \rightarrow$ poder calorífico gasolina (kg)

Para:

$$\varepsilon_g = (48.882.326,35 \text{ kg} \times 45.229,04 \text{ kJ/kg}) \times 10^{-9} = 2.210,90 \text{ TJ}$$

Obtendo-se a energia, aplicou-se os fatores de emissões de CO₂, N₂O e CH₄, a fim de gerar o resultado das emissões em CO₂e. Os fatores de emissão foram obtidos no Capítulo 03, do material *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2021b), conforme apresentado na **Tabela 13**. Por meio da aplicação das equações apresentadas a seguir, obteve-se os índices de emissões, referentes ao consumo de gasolina, em São Leopoldo.

Tabela 13 - Fatores de emissões de gasolina para transporte rodoviário

Fator de emissão	Padrão (kg/TJ)
CO ₂	69.300
N ₂ O	3,2
CH ₄	33

Fonte: IPCC (2021b).

Para obter as emissões de CO₂ aplicou-se a Equação 25.

$$\xi \text{ CO}_2 = \varepsilon_g \times \zeta \text{ CO}_2 \quad (25)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi \text{ CO}_2 \rightarrow \text{emissões de CO}_2(\text{kg})$

$\varepsilon_g \rightarrow$ energia gasolina (TJ)

$\zeta CO_2 \rightarrow$ fator de emissão de CO_2 para gasolina (kg/TJ)

Para:

$$\xi CO_2 = (2.210,90 \text{ TJ} \times 69.300 \text{ kg/TJ}) / 1000 = 153.215,42 \text{ t}$$

Para obter as emissões de N_2O aplicou-se a Equação 26.

$$\xi N_2O = \varepsilon_g \times \zeta N_2O \quad (26)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi N_2O \rightarrow$ emissões de N_2O (kg)

$\varepsilon_g \rightarrow$ energia gasolina (TJ)

$\zeta N_2O \rightarrow$ fator de emissão de N_2O para gasolina (kg/TJ)

Para:

$$\xi N_2O = (2.210,90 \text{ TJ} \times 3,2 \text{ kg/TJ}) / 1000 = 7,07 \text{ t}$$

Para obter as emissões de CH_4 aplicou-se a Equação 27.

$$\xi CH_4 = \varepsilon_g \times \zeta CH_4 \quad (27)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi CH_4 \rightarrow$ emissões de CH_4 (kg)

$\varepsilon_g \rightarrow$ energia gasolina (TJ)

$\zeta CH_4 \rightarrow$ fator de emissão de CH_4 para gasolina (kg/TJ)

Para:

$$\xi CH_4 = (2.210,90 \text{ TJ} \times 33 \text{ kg/TJ}) / 1000 = 72,96 \text{ t}$$

Por fim, as emissões de gasolina foram obtidas utilizando a Equação 28.

$$\xi_g = \xi CO_2 + ((\xi N_2O \times 265) + (\xi CH_4 \times 28)) \quad (28)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi_g \rightarrow$ emissões totais de gasolina (tCO₂e)

$\xi CO_2 \rightarrow$ emissões de CO₂(t)

$\xi N_2O \rightarrow$ emissões de N₂O (t)

$\xi CH_4 \rightarrow$ emissões de CH₄(t)

Para:

$$\xi_g = 153.215,42 t + ((7,07 t \times 265) + (72,96 t \times 28))$$

$$\xi_g = 157.133,13 tCO_2e$$

A ANP forneceu os dados de consumo de gás natural veicular (GNV) no município de São Leopoldo para o ano de 2021. Foram consumidos 2.543.921 L de GNV no município de São Leopoldo, que representam 2.543,921 m³. Primeiramente, encontrou-se a massa total do GNV, utilizando a massa específica e o consumo de GNV no município, conforme Equação 29.

$$mt_{gnv} = \mu_{gnv} \times v_{gnv} \quad (29)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$mt_{gnv} \rightarrow$ massa total GNV (kg)

$\mu_{gnv} \rightarrow$ massa específica GNV (kg/m³)

$v_{gnv} \rightarrow$ consumo GNV em São Leopoldo (m³)

Para a massa específica do GNV utilizou-se a média dos valores 0,65 a 0,8 kg/m³, que corresponde a 0,725 kg/m³ (ROSA *et al.*, 2022).

Para:

$$mt_{gnv} = 0,725 \text{ kg/m}^3 \times 2.543,921 \text{ m}^3 = 1.844,34 \text{ kg}$$

Para o cálculo da energia utilizou-se a Equação 30.

$$\varepsilon_{gnv} = mt_{gnv} \times \rho_{gnv} \quad (30)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\varepsilon_{gnv} \rightarrow$ energia GNV (TJ)

$mt_{gnv} \rightarrow$ massa total GNV (kg)

$\rho_{gnv} \rightarrow$ poder calorífico GNV (kg)

Para o poder calorífico foi utilizado o valor médio do poder calorífico inferior, que é 35.000 kJ/m³, e do poder calorífico superior, que é 43.000 kJ/m³, sendo que sua média corresponde a 39.000 kJ/m³ (ANP, 2020).

Para:

$$\varepsilon_{gnv} = (1.844,34 \text{ m}^3 \times 39.000 \text{ kJ/m}^3) \times 10^{-9} = 0,07 \text{ TJ}$$

Obtendo-se a energia, aplicou-se os fatores de emissões de CO₂, N₂O e CH₄, a fim de gerar o resultado das emissões em CO₂e. Os fatores de emissão foram obtidos no Capítulo 03, do material *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2021b), conforme apresentado na **Tabela 14**.

Tabela 14 - Fatores de emissões de GNV para transporte rodoviário

Fator de emissão	Padrão (kg/TJ)
CO ₂	56.100
N ₂ O	3
CH ₄	92

Fonte: IPCC (2021b).

Para obter as emissões de CO₂ aplicou-se a Equação 31.

$$\xi CO_2 = \varepsilon_{gnv} \times \zeta CO_2 \quad (31)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi CO_2 \rightarrow$ emissões de CO₂(kg)

$\varepsilon_{gnv} \rightarrow$ energia GNV (TJ)

$\zeta CO_2 \rightarrow$ fator de emissão de CO₂ de GNV (kg/TJ)

Para:

$$\xi CO_2 = (0,07 T \times 56.100 \text{ kg/TJ}) / 1000 = 4,04 t$$

Para obter as emissões de N₂O aplicou-se a Equação 32.

$$\xi N_2O = \varepsilon_{gnv} \times \zeta N_2O \quad (32)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi N_2O \rightarrow$ emissões de N_2O (kg)

$\varepsilon_{gnv} \rightarrow$ energia GNV (TJ)

$\zeta N_2O \rightarrow$ fator de emissão de N_2O para GNV (kg/TJ)

Para:

$$\xi N_2O = (0,07 \text{ TJ} \times 3 \text{ kg/TJ}) / 1000 = 0,00021 \text{ t}$$

Para obter as emissões de CH_4 aplicou-se a Equação 33.

$$\xi CH_4 = \varepsilon_{gnv} \times \zeta CH_4 \quad (33)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi CH_4 \rightarrow$ emissões de CH_4 (kg)

$\varepsilon_{gnv} \rightarrow$ energia GNV (TJ)

$\zeta CH_4 \rightarrow$ fator de emissão de CH_4 para GNV (kg/TJ)

Para:

$$\xi CH_4 = (0,07 TJ \times 92 kg/TJ) / 1000 = 0,00662 t$$

Por fim, as emissões de GNV foram obtidas utilizando a Equação 34.

$$\xi_{gnv} = \xi CO_2 + ((\xi N_2O \times 265) + (\xi CH_4 \times 28)) \quad (34)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi_{gnv} \rightarrow$ emissões totais de GNV (tCO₂e)

$\xi CO_2 \rightarrow$ emissões de CO₂(t)

$\xi N_2O \rightarrow$ emissões de N₂O (t)

$\xi CH_4 \rightarrow$ emissões de CH₄(t)

Para:

$$\xi_{gnv} = 4,04 t + ((0,00021 t \times 265) + (0,00662 t \times 28))$$

$$\xi_{gnv} = 4,28 tCO_2e$$

Para obter o valor total de emissões no setor de transportes faz-se necessário realizar o somatório das emissões geradas pelos diferentes tipos de combustíveis, conforme pode-se observar na Equação 35.

$$\xi_t = \xi_d + \xi_g + \xi_{gnv} \quad (35)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi_t \rightarrow$ emissões totais do setor de transportes (tCO₂e)

$\xi_d \rightarrow$ emissões totais de diesel (tCO₂e)

$\xi_g \rightarrow$ emissões totais de gasolina (tCO₂e)

$\xi_{gnv} \rightarrow$ emissões totais de GNV (tCO₂e)

Para:

$$\xi_t = 81.024,24 \text{ tCO}_2\text{e} + 157.133,13 \text{ tCO}_2\text{e} + 4,28 \text{ tCO}_2\text{e}$$

$$\xi_t = 238.161,65 \text{ tCO}_2\text{e}$$

Desta forma, conclui-se que o total de emissões advindas do setor de transportes no ano de 2021 no município de São Leopoldo correspondem a 238.161,65 tCO₂e.

8.4 Energia estacionária

A ANP forneceu o consumo de gás liquefeito de petróleo (GLP) e a Sulgás forneceu o consumo de gás natural (GN) referentes ao ano de 2021, para desenvolvimento deste inventário.

As equações apresentadas a seguir referem-se às emissões de GN em edificações residenciais na cidade de São Leopoldo, considerando o consumo de 123,12 m³ no ano de 2021, fornecido pela Sulgás. A partir de então, encontra-se a massa total do GN, utilizando a massa específica e o consumo de GN no município.

$$mt_{gn} = \mu_{gn} \times v_{gn} \quad (36)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

mt_{gn} → massa total GN (kg)

μ_{gn} → massa específica GN (kg/m³)

v_{gn} → consumo GN em São Leopoldo (m³)

Para a massa específica do GN utilizou-se a média dos valores 0,65 a 0,8 kg/m³, que corresponde a 0,725 kg/m³ (ROSA *et al.*, 2022).

Para:

$$mt_{gn} = 0,725 \text{ kg/m}^3 \times 123,12 \text{ m}^3 = 89,26 \text{ kg}$$

Para o cálculo da energia utilizou-se a Equação 37.

$$\varepsilon_{gn} = mt_{gn} \times \rho_{gn} \quad (37)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

ε_{gn} → energia GN (TJ)

mt_{gn} → massa total GN (kg)

ρ_{gn} → poder calorífico GN (kg)

Para o poder calorífico foi utilizado o valor médio de 39.000 kJ/m³, que corresponde à média do poder calorífico inferior, que é 35.000 kJ/m³, e do poder calorífico superior, que é de 43.000 kJ/m³ (ANP, 2020).

Para:

$$\varepsilon_{gn} = (89,26 \text{ m}^3 \times 39.000 \text{ kJ/m}^3) \times 10^{-9} = 0,0035 \text{ TJ}$$

Obtendo-se a energia, aplicou-se os fatores de emissões de CO₂, N₂O e CH₄, a fim de gerar o resultado das emissões em CO₂e. Os fatores de emissão foram obtidos no Capítulo 02, do material *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (2021b), conforme apresentado na **Tabela 15**.

Tabela 15 - Fatores de emissões de GN para energia estacionária em edificações residenciais

Fator de emissão	Padrão (kg/TJ)
CO ₂	56.100
N ₂ O	0,1
CH ₄	5

Fonte: IPCC (2021b).

Para obter as emissões de CO₂ aplicou-se a Equação 38.

$$\xi CO_2 = \varepsilon_{gn} \times \zeta CO_2 \quad (38)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi CO_2 \rightarrow$ emissões de CO₂ (kg)

$\varepsilon_{gn} \rightarrow$ energia GN (TJ)

$\zeta CO_2 \rightarrow$ fator de emissão de CO₂ de GN (kg/TJ)

Para:

$$\xi CO_2 = (0,0035 TJ \times 56.100 kg/TJ) / 1000 = 0,196 t$$

Para obter as emissões de N₂O aplicou-se a Equação 39.

$$\xi N_2O = \varepsilon_{gn} \times \zeta N_2O \quad (39)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi N_2O \rightarrow$ emissões de N₂O (kg)

$\varepsilon_{gn} \rightarrow$ energia GN (TJ)

$\zeta N_2O \rightarrow$ fator de emissão de N_2O para GN (kg/TJ)

Para:

$$\xi N_2O = (0,0035 TJ \times 0,1 kg/TJ) / 1000 = 0,00000035 t$$

Para obter as emissões de CH_4 aplicou-se a Equação 40.

$$\xi CH_4 = \varepsilon_{gn} \times \zeta CH_4 \quad (40)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi CH_4 \rightarrow$ emissões de CH_4 (kg)

$\varepsilon_{gn} \rightarrow$ energia GN (TJ)

$\zeta CH_4 \rightarrow$ fator de emissão de CH_4 para GN (kg/TJ)

Para:

$$\xi CH_4 = (0,0035 TJ \times 5 kg/TJ) / 1000 = 0,0000175 t$$

Por fim, as emissões de GN foram obtidas utilizando a Equação 41.

$$\xi_{gn} = \xi CO_2 + ((\xi N_2O \times 265) + (\xi CH_4 \times 28)) \quad (41)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi_{gn} \rightarrow$ emissões totais de GN (tCO_2e)

$\xi_{CO_2} \rightarrow$ emissões de CO_2 (t)

$\xi_{N_2O} \rightarrow$ emissões de N_2O (t)

$\xi_{CH_4} \rightarrow$ emissões de CH_4 (t)

Para:

$$\xi_{gn} = 0,196 t + ((0,00000035 t \times 265) + (0,0000175 t \times 28))$$

$$\xi_{gn} = 0,196 tCO_2e$$

Para o levantamento das emissões referentes às edificações comerciais foram utilizadas as equações que seguem abaixo. Considerando o consumo de 195,15 m³ de GN no ano de 2021, fornecido pela Sulgás. Segue-se então para a definição da massa total do GN, utilizando a massa específica e o consumo de GN no município.

$$mt_{gn} = \mu_{gn} \times v_{gn} \quad (42)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$mt_{gn} \rightarrow$ massa total GN (kg)

μ_{gn} → *massa específica GN* (kg/m^3)

v_{gn} → *consumo GN em São Leopoldo* (m^3)

Para a massa específica do GN utilizou-se a média dos valores 0,65 a 0,8 kg/m^3 , que corresponde a 0,725 kg/m^3 (ROSA *et al.*, 2022).

Para:

$$mt_{gn} = 0,725 \text{ kg/m}^3 \times 195,15 \text{ m}^3 = 141,48 \text{ kg}$$

Para o cálculo da energia utilizou-se a Equação 43.

$$\varepsilon_{gn} = mt_{gn} \times \rho_{gn} \tag{43}$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

ε_{gn} → *energia GN* (TJ)

mt_{gn} → *massa total GN* (kg)

ρ_{gn} → *poder calorífico GN* (kg)

Para o poder calorífico foi utilizado o valor médio do poder calorífico inferior, 35.000 kJ/m^3 , e do poder calorífico superior, 43.000 kJ/m^3 , que corresponde a 39.000 kJ/m^3 .

Para:

$$\varepsilon_{gn} = (141,48 \text{ m}^3 \times 39.000 \text{ kJ/m}^3) \times 10^{-9} = 0,0055 \text{ TJ}$$

Obtendo-se a energia, aplicou-se os fatores de emissões de CO₂, N₂O e CH₄, a fim de gerar o resultado das emissões em CO₂e. Os fatores de emissões foram obtidos no Capítulo 02, do material *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2021b), conforme apresentado na **Tabela 16**.

Tabela 16 - Fatores de emissões de GN para energia estacionária em edificações comerciais

Fator de emissão	Padrão (kg/TJ)
CO ₂	56.100
N ₂ O	0,1
CH ₄	5

Fonte: IPCC (2021b).

Para obter as emissões de CO₂ aplicou-se a Equação 44.

$$\xi \text{ CO}_2 = \varepsilon_{gn} \times \zeta \text{ CO}_2 \quad (44)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi \text{ CO}_2 \rightarrow$ emissões de CO₂(kg)

$\varepsilon_{gn} \rightarrow$ energia GN (TJ)

$\zeta CO_2 \rightarrow$ fator de emissão de CO_2 de GN (kg/TJ)

Para:

$$\xi CO_2 = (0,0055 TJ \times 56.100 kg/TJ) / 1000 = 0,309 t$$

Para obter as emissões de N_2O aplicou-se a Equação 45.

$$\xi N_2O = \varepsilon_{gn} \times \zeta N_2O \quad (45)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi N_2O \rightarrow$ emissões de N_2O (kg)

$\varepsilon_{gn} \rightarrow$ energia GN (TJ)

$\zeta N_2O \rightarrow$ fator de emissão de N_2O para GN (kg/TJ)

Para:

$$\xi N_2O = (0,0055 TJ \times 0,1 kg/TJ) / 1000 = 0,0000055 t$$

Para obter as emissões de CH_4 aplicou-se a Equação 46.

$$\xi CH_4 = \varepsilon_{gn} \times \zeta CH_4 \quad (46)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi CH_4 \rightarrow$ emissões de CH_4 (kg)

$\varepsilon_{gn} \rightarrow$ energia GN (TJ)

$\zeta CH_4 \rightarrow$ fator de emissão de CH_4 para GN (kg/TJ)

Para:

$$\xi CH_4 = (0,0055 \text{ TJ} \times 5 \text{ kg/TJ}) / 1000 = 0,000028 \text{ t}$$

Por fim, as emissões de GN foram obtidas utilizando a Equação 47.

$$\xi_{gn} = \xi CO_2 + ((\xi N_2O \times 265) + (\xi CH_4 \times 28)) \quad (47)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi_{gn} \rightarrow$ emissões totais de GN (tCO₂e)

$\xi CO_2 \rightarrow$ emissões de CO₂ (t)

$\xi N_2O \rightarrow$ emissões de N₂O (t)

$\xi CH_4 \rightarrow$ emissões de CH₄ (t)

Para:

$$\xi_{gn} = 0,309 t + ((0,00000055 t \times 265) + (0,000028 t \times 28))$$

$$\xi_{gn} = 0,31 tCO_2e$$

Para o desenvolvimento dos cálculos referentes ao consumo de gás liquefeito de petróleo (GLP) utilizou-se os dados fornecidos pela ANP, considerando um consumo total de 5.932.138 kg para o ano de 2021, que abrange as edificações: residenciais, comerciais, industriais e públicas.

Para o cálculo das emissões de GLP referentes ao consumo residencial foram utilizadas as equações que seguem, com um consumo de 3.590.227 kg. Para o cálculo da energia utilizou-se a Equação 48.

$$\varepsilon_{glpr} = mt_{glpr} \times \rho_{glp} \quad (48)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

ε_{glpr} → energia GLP (TJ)

mt_{glpr} → massa total GLP (kg)

ρ_{glp} → poder calorífico GLP (kg)

O poder calorífico do GLP corresponde a 11.100 kcal/kg (ANP, 2020). Para convertê-lo para kJ foi multiplicado o valor por 4,184 kJ, que resultou em 46.442,4 kJ/kg.

Para:

$$\varepsilon_{glpr} = (3.590.227 \text{ kg} \times 46.442,4 \text{ kJ/kg}) \times 10^{-9} = 166,74 \text{ TJ}$$

Obtendo-se a energia, aplicou-se os fatores de emissões de CO₂, N₂O e CH₄, a fim de gerar o resultado das emissões em CO₂e. Os fatores de emissão foram obtidos no Capítulo 02, do material *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2021b), conforme apresentado na **Tabela 17**.

Tabela 17 - Fatores de emissões de GLP para energia estacionária em edificações residenciais

Fator de emissão	Padrão (kg/TJ)
CO ₂	63.100
N ₂ O	0,1
CH ₄	5

Fonte: IPCC (2021b).

Para obter as emissões de CO₂ aplicou-se a Equação 49.

$$\xi \text{ CO}_2 = \varepsilon_{glpr} \times \zeta \text{ CO}_2 \quad (49)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi \text{ CO}_2 \rightarrow$ emissões de CO₂(kg)

$\varepsilon_{glpr} \rightarrow$ energia GLP residencial (TJ)

$\zeta CO_2 \rightarrow$ fator de emissão de CO_2 de GLP residencial (kg/TJ)

Para:

$$\xi CO_2 = (166,74 TJ \times 63.100 kg/TJ) / 1000 = 10.521,22 t$$

Para obter as emissões de N_2O aplicou-se a Equação 50.

$$\xi N_2O = \varepsilon_{glpr} \times \zeta N_2O \quad (50)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi N_2O \rightarrow$ emissões de N_2O (kg)

$\varepsilon_{glpr} \rightarrow$ energia GLP residencial (TJ)

$\zeta N_2O \rightarrow$ fator de emissão de N_2O para GLP (kg/TJ)

Para:

$$\xi N_2O = (166,74 TJ \times 0,1 kg/TJ) / 1000 = 0,02 t$$

Para obter as emissões de CH_4 aplicou-se a Equação 51.

$$\xi CH_4 = \varepsilon_{glpr} \times \zeta CH_4 \quad (51)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi CH_4 \rightarrow$ emissões de CH_4 (kg)

$\varepsilon_{glpr} \rightarrow$ energia GLP residencial (TJ)

$\zeta CH_4 \rightarrow$ fator de emissão de CH_4 para GLP residencial (kg/TJ)

Para:

$$\xi CH_4 = (166,74 \text{ TJ} \times 5 \text{ kg/TJ}) / 1000 = 0,83 \text{ t}$$

Por fim, as emissões de GLP residencial foram obtidas utilizando a Equação 52.

$$\xi_{glpr} = \xi CO_2 + ((\xi N_2O \times 265) + (\xi CH_4 \times 28)) \quad (52)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi_{glpr} \rightarrow$ emissões totais de GLP residencial (tCO₂e)

$\xi CO_2 \rightarrow$ emissões de CO₂ (t)

$\xi N_2O \rightarrow$ emissões de N₂O (t)

$\xi CH_4 \rightarrow$ emissões de CH₄ (t)

Para:

$$\xi_{glpr} = 10.521,22 t + ((0,02 t \times 265) + (0,83 t \times 28))$$

$$\xi_{glpr} = 10.548,98 tCO_2e$$

Segundo a ANP, para o ano de 2021 foi consumido 906.195 kg de GLP nas edificações comerciais em São Leopoldo. Para calcular as emissões de GLP referentes ao consumo em edificações comerciais foram utilizadas as equações que seguem. Iniciando pelo cálculo da energia, mediante o uso da Equação 53.

$$\varepsilon_{glpc} = mt_{glpc} \times \rho_{glc} \quad (53)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\varepsilon_{glpc} \rightarrow$ energia GLP (TJ)

$mt_{glpc} \rightarrow$ massa total GLP comercial (kg)

$\rho_{glp} \rightarrow$ poder calorífico GLP (kJ/kg)

O poder calorífico do GLP corresponde a 11.100 kcal/kg (ANP, 2020). Para convertê-lo para kJ foi multiplicado o valor por 4,184 kJ, que resultou em 46.442,4 kJ/kg.

Para:

$$\varepsilon_{glpc} = (906.195 kg \times 46.442,4 kJ/kg) \times 10^{-9} = 42,09 TJ$$

Obtendo-se a energia, aplicou-se os fatores de emissões de CO₂, N₂O e CH₄, a fim de gerar o resultado das emissões em CO₂e. Os fatores de emissão foram obtidos no Capítulo 02, do material *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2021b), conforme apresentado na **Tabela 18**.

Tabela 18 - Fatores de emissões de GLP para energia estacionária em edificações comerciais

Fator de emissão	Padrão (kg/TJ)
CO ₂	63.100
N ₂ O	0,1
CH ₄	5

Fonte: IPCC (2021b).

Para obter as emissões de CO₂ aplicou-se a Equação 54.

$$\xi CO_2 = \varepsilon_{glpc} \times \zeta CO_2 \quad (54)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi CO_2 \rightarrow$ emissões de CO₂(kg)

$\varepsilon_{glpc} \rightarrow$ energia GLP comercial (TJ)

$\zeta CO_2 \rightarrow$ fator de emissão de CO₂ de GLP comercial (kg/TJ)

Para:

$$\xi CO_2 = (42,09 TJ \times 63.100 kg/TJ)/1000 = 2.655,62 t$$

Para obter as emissões de N₂O aplicou-se a Equação 55.

$$\xi N_2O = \varepsilon_{glpc} \times \zeta N_2O \quad (55)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi N_2O \rightarrow$ emissões de N₂O (kg)

$\varepsilon_{glpc} \rightarrow$ energia GLP comercial (TJ)

$\zeta N_2O \rightarrow$ fator de emissão de N₂O para GLP (kg/TJ)

Para:

$$\xi N_2O = (42,09 TJ \times 0,1 kg/TJ)/1000 = 0,00421 t$$

Para obter as emissões de CH₄ aplicou-se a Equação 56.

$$\xi CH_4 = \varepsilon_{glpc} \times \zeta CH_4 \quad (56)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi CH_4 \rightarrow$ emissões de CH_4 (kg)

$\varepsilon_{glpc} \rightarrow$ energia GLP comercial (TJ)

$\zeta CH_4 \rightarrow$ fator de emissão de CH_4 para GLP comercial (kg/TJ)

Para:

$$\xi CH_4 = (42,09 TJ \times 5 kg/TJ)/1000 = 0,21 t$$

Por fim, as emissões de GLP comercial foram obtidas utilizando a Equação 57.

$$\xi_{glpc} = \xi CO_2 + ((\xi N_2O \times 265) + (\xi CH_4 \times 28)) \quad (57)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi_{glpc} \rightarrow$ emissões totais de GLP comercial (tCO₂e)

$\xi CO_2 \rightarrow$ emissões de CO_2 (t)

$\xi N_2O \rightarrow$ emissões de N_2O (t)

$\xi CH_4 \rightarrow$ emissões de CH_4 (t)

Para:

$$\xi_{glpc} = 2.655,62 t + ((0,00421 t \times 265) + (0,21 t \times 28))$$

$$\xi_{glpc} = 2.662,63 t CO_2e$$

Conforme a ANP, o consumo de GLP em edificações industriais em 2021, em São Leopoldo, corresponde a 1.432.173 kg. Para calcular as emissões de GLP referentes ao consumo em edificações industriais foram utilizadas as equações que seguem. Iniciando pelo cálculo da energia, mediante o uso da Equação 58.

$$\varepsilon_{glpi} = mt_{glpi} \times \rho_{glp} \quad (58)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\varepsilon_{glpi} \rightarrow$ energia GLP (TJ)

$mt_{glpi} \rightarrow$ massa total GLP industrial (kg)

$\rho_{glp} \rightarrow$ poder calorífico GLP (kJ/kg)

O poder calorífico do GLP corresponde a 11.100 kcal/kg (ANP, 2020). Para convertê-lo para kJ foi multiplicado o valor por 4,184 kJ, que resultou em 46.442,4 kJ/kg.

Para:

$$\varepsilon_{glpi} = (1.432.173 kg \times 46.442,4 kJ/kg) \times 10^{-9} = 66,51 TJ$$

Obtendo-se a energia, aplicou-se os fatores de emissões de CO₂, N₂O e CH₄, a fim de gerar o resultado das emissões em CO₂e. Os fatores de emissão foram obtidos no Capítulo 02, do material *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2021b), conforme apresentado na **Tabela 19**.

Tabela 19 - Fatores de emissões de GLP para energia estacionária em edificações industriais

Fator de emissão	Padrão (kg/TJ)
CO ₂	63.100
N ₂ O	0,1
CH ₄	1

Fonte: IPCC (2021b).

Para obter as emissões de CO₂ aplicou-se a Equação 59.

$$\xi CO_2 = \varepsilon_{glpi} \times \zeta CO_2 \quad (59)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi CO_2 \rightarrow$ emissões de CO₂(kg)

$\varepsilon_{glpi} \rightarrow$ energia GLP industrial (TJ)

$\zeta CO_2 \rightarrow$ fator de emissão de CO₂ de GLP industrial (kg/TJ)

Para:

$$\xi CO_2 = (66,51 \text{ TJ} \times 63.100 \text{ kg/TJ})1000 = 4.197,01 \text{ t}$$

Para obter as emissões de N_2O aplicou-se a Equação 60.

$$\xi N_2O = \varepsilon_{glpi} \times \zeta N_2O \quad (60)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi N_2O \rightarrow$ emissões de N_2O (kg)

$\varepsilon_{glpi} \rightarrow$ energia GLP industrial (TJ)

$\zeta N_2O \rightarrow$ fator de emissão de N_2O para GLP (kg/TJ)

Para:

$$\xi N_2O = (66,51 \text{ TJ} \times 0,1 \text{ kg/TJ})1000 = 0,0067 \text{ t}$$

Para obter as emissões de CH_4 aplicou-se a Equação 61.

$$\xi CH_4 = \varepsilon_{glpi} \times \zeta CH_4 \quad (61)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi CH_4 \rightarrow$ emissões de CH_4 (kg)

$\varepsilon_{glpi} \rightarrow$ energia GLP industrial (TJ)

$\zeta CH_4 \rightarrow$ fator de emissão de CH_4 para GLP industrial (kg/TJ)

Para:

$$\xi CH_4 = (66,51 TJ \times 1 kg/TJ)1000 = 0,067 t$$

Por fim, as emissões de GLP industrial foram obtidas utilizando a Equação 62.

$$\xi_{glpi} = \xi CO_2 + ((\xi N_2O \times 265) + (\xi CH_4 \times 28)) \quad (62)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi_{glpi} \rightarrow$ emissões totais de GLP industrial (tCO₂e)

$\xi CO_2 \rightarrow$ emissões de CO₂(t)

$\xi N_2O \rightarrow$ emissões de N₂O (t)

$\xi CH_4 \rightarrow$ emissões de CH₄(t)

Para:

$$\xi_{glpi} = 4.197,01 t + ((0,0067 t \times 265) + (0,067 t \times 28))$$

$$\xi_{glpi} = 4.200,63 \text{ tCO}_2e$$

Para calcular as emissões de GLP referentes ao consumo em edificações públicas foram utilizadas as equações que seguem, considerando o consumo de 3.543 kg. Iniciando pelo cálculo da energia, mediante o uso da Equação 63.

$$\varepsilon_{glpp} = mt_{glpp} \times \rho_{glp} \quad (63)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

ε_{glpp} → energia GLP (TJ)

mt_{glpp} → massa total GLP pública (kg)

ρ_{glp} → poder calorífico GLP (kJ/kg)

O poder calorífico do GLP corresponde a 11.100 kcal/kg (ANP, 2020). Para convertê-lo para kJ/kg multiplicou-se por 4,184 kJ, que resultou em 46.442,4 kJ/kg.

Para:

$$\varepsilon_{glpp} = 3.543 \text{ kg} \times 46.442,4 \text{ kJ/kg} = 164.545.423,2 \text{ kJ}$$

$$\varepsilon_{glpp} = 164.545.423,2 \text{ kJ} \times 10^{-9} = 0,16 \text{ TJ}$$

Obtendo-se a energia, aplicou-se os fatores de emissões de CO₂, N₂O e CH₄, a fim de gerar o resultado das emissões em CO₂e. Os fatores de emissão foram obtidos no Capítulo 02, do material *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2021b), conforme apresentado na **Tabela 20**.

Tabela 20 - Fatores de emissões de GLP para energia estacionária em edificações públicas

Fator de emissão	Padrão (kg/TJ)
CO ₂	63.100
N ₂ O	0,1
CH ₄	5

Fonte: IPCC (2021b).

Para obter as emissões de CO₂ aplicou-se a Equação 64.

$$\xi CO_2 = \varepsilon_{glpp} \times \zeta CO_2 \quad (64)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi CO_2 \rightarrow$ emissões de CO₂(kg)

$\varepsilon_{glpp} \rightarrow$ energia GLP pública (TJ)

$\zeta CO_2 \rightarrow$ fator de emissão de CO₂ de GLP pública (kg/TJ)

Para:

$$\xi CO_2 = (0,16 TJ \times 63.100 kg/TJ)/1000 = 10,38 t$$

Para obter as emissões de N₂O aplicou-se a Equação 65.

$$\xi N_2O = \varepsilon_{glpp} \times \zeta N_2O \quad (65)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi N_2O \rightarrow$ emissões de N₂O (kg)

$\varepsilon_{glpp} \rightarrow$ energia GLP pública (TJ)

$\zeta N_2O \rightarrow$ fator de emissão de N₂O para GLP (kg/TJ)

Para:

$$\xi N_2O = (0,16 TJ \times 0,1 kg/TJ)/1000 = 0,000016 t$$

Para obter as emissões de CH₄ aplicou-se a Equação 66.

$$\xi CH_4 = \varepsilon_{glpp} \times \zeta CH_4 \quad (66)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi CH_4 \rightarrow$ emissões de CH_4 (kg)

$\varepsilon_{glpp} \rightarrow$ energia GLP pública (TJ)

$\zeta CH_4 \rightarrow$ fator de emissão de CH_4 para GLP pública (kg/TJ)

Para:

$$\xi CH_4 = (0,16 TJ \times 5 kg/TJ)/1000 = 0,00082 t$$

Por fim, as emissões de GLP em edificações públicas foram obtidas utilizando a Equação 67.

$$\xi_{glpp} = \xi CO_2 + ((\xi N_2O \times 265) + (\xi CH_4 \times 28)) \quad (67)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi_{glpp} \rightarrow$ emissões totais de GLP pública (tCO₂e)

$\xi CO_2 \rightarrow$ emissões de CO₂ (t)

$\xi N_2O \rightarrow$ emissões de N₂O (t)

$\xi CH_4 \rightarrow$ emissões de CH₄ (t)

Para:

$$\xi_{glpp} = 10,38 t + ((0,000016 t \times 265) + (0,00082 t \times 28))$$

$$\xi_{glpp} = 10,41 \text{ tCO}_2e$$

Para obter o valor total de GN consumido no município de São Leopoldo no ano de 2021 foi aplicada a Equação 68.

$$\xi_{gn} = \xi_{gnr} + \xi_{gnc} \quad (68)$$

Onde:

$\xi_{gnr} \rightarrow$ emissões totais de GN em edificações residenciais (tCO₂e)

$\xi_{gnc} \rightarrow$ emissões totais de GN em edificações comerciais (tCO₂e)

Para:

$$\xi_{gn} = 0,197 \text{ tCO}_2e + 0,31 \text{ tCO}_2e$$

$$\xi_{gn} = 0,51 \text{ tCO}_2e$$

Para obter o valor total de GLP consumido no município de São Leopoldo no ano de 2021 foi aplicada a Equação 69.

$$\xi_{glp} = \xi_{glpr} + \xi_{glpc} + \xi_{glpi} + \xi_{glpp} \quad (69)$$

Onde:

$\xi_{glpr} \rightarrow$ emissões totais de GLP em edificações residenciais (tCO₂e)

ξ_{glpc} → *emissões totais de GLP em edificações comerciais (tCO₂e)*

ξ_{glpi} → *emissões totais de GLP em edificações industriais (tCO₂e)*

ξ_{glpp} → *emissões totais de GLP em edificações públicas (tCO₂e)*

Para:

$$\xi_{glp} = 10.548,98 \text{ tCO}_2\text{e} + 2.662,63 \text{ tCO}_2\text{e} + 4.200,63 \text{ tCO}_2\text{e} + 10,41 \text{ tCO}_2\text{e}$$

$$\xi_{glp} = 17.422,65 \text{ tCO}_2\text{e}$$

Para obter o valor total de emissões no setor de energia estacionária, referente ao consumo de GN e GLP faz-se necessário realizar o somatório das emissões, conforme pode-se observar na Equação 70.

$$\xi_t = \xi_{gn} + \xi_{glp} \quad (70)$$

Onde:

ξ_t → *emissões totais de GN e GLP (tCO₂e)*

ξ_{gn} → *emissões totais de GN (tCO₂e)*

ξ_{glp} → *emissões totais de GLP (tCO₂e)*

Para:

$$\xi_t = 0,51 \text{ tCO}_2\text{e} + 17.422,64 \text{ tCO}_2\text{e}$$

$$\xi_t = 17.423,15 \text{ tCO}_2\text{e}$$

Mediante o desenvolvimento das equações afirma-se que o total de emissões advindas do consumo de GN e GLP, no ano de 2021, correspondem a 17.423,15 tCO₂e.

Para calcular as emissões referentes ao consumo de energia elétrica no município de São Leopoldo foi utilizada a média anual de 2021, mediante cálculo dos valores fornecidos pela RGE. Para o desenvolvimento do cálculo das emissões faz-se necessário o uso do fator de emissão correspondente da fonte de energia utilizada. Neste inventário foi utilizado o fator de 0,09 t CO₂/MWh, que corresponde ao consumo total do Brasil pelo fator de emissão do ano de 2021.

O consumo de energia na categoria residencial corresponde a 212.075.322,478 KWh, que deve ser convertido para MWh multiplicando por 0,001. Desta forma, o consumo de energia passa para 212.075,32 MWh. Para obter o valor em emissões de tCO₂e deve-se aplicar a Equação 71.

$$\xi_r = \varepsilon_r \times \zeta \quad (71)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi_r \rightarrow$ emissões residenciais (tCO₂e)

$\varepsilon_r \rightarrow$ energia elétrica consumida na categoria residencial (KWh)

$\zeta \rightarrow$ fator de emissão (tCO₂/MWh)

Para:

$$\xi_r = 212.075,32 \text{ MWh} \times 0,09 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$$

$$\xi_r = 19.086,78 \text{ tCO}_2e$$

O consumo de energia na categoria comercial corresponde a 85.612.202,037 KWh, que deve ser convertido para MWh multiplicando por 0,001. Desta forma, o consumo de energia passa para 85.612,20 MWh. Para obter o valor em emissões de tCO₂e deve-se aplicar a Equação 72.

$$\xi_c = \varepsilon_c \times \zeta \quad (72)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi_c \rightarrow$ emissões comerciais (tCO₂e)

$\varepsilon_c \rightarrow$ energia elétrica consumida na categoria comercial (KWh)

$\zeta \rightarrow$ fator de emissão (tCO₂/MWh)

Para:

$$\xi_c = 85.612,20 \text{ MWh} \times 0,09 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$$

$$\xi_c = 7.705,10 \text{ tCO}_2e$$

O consumo de energia na categoria industrial corresponde a 274.052.543,645 KWh, que deve ser convertido para MWh multiplicando por 0,001. Desta forma, o consumo de energia passa para 274.052,54 MWh. Para obter o valor em emissões de tCO₂e deve-se aplicar a Equação 73.

$$\xi_i = \varepsilon_i \times \zeta \quad (73)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi_i \rightarrow$ emissões industriais (tCO₂e)

$\varepsilon_i \rightarrow$ energia elétrica consumida na categoria industrial (KWh)

$\zeta \rightarrow$ fator de emissão (tCO₂/MWh)

Para:

$$\xi_i = 274.052,54 \text{ MWh} \times 0,09 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$$

$$\xi_i = 24.664,73 \text{ tCO}_2e$$

O consumo de energia na categoria rural corresponde a 297.661,007 KWh, que deve ser convertido para MWh multiplicando por 0,001. Desta forma, o consumo de energia passa para 297,66 MWh. Para obter o valor em emissões de tCO₂e deve-se aplicar a Equação 74.

$$\xi_{ru} = \varepsilon_{ru} \times \zeta \quad (74)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

ξ_{ru} → *emissões rurais (tCO₂e)*

ε_{ru} → *energia elétrica consumida na categoria rural (KWh)*

ζ → *fator de emissão (tCO₂/MWh)*

Para:

$$\xi_{ru} = 297,66 \text{ MWh} \times 0,09 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$$

$$\xi_{ru} = 26,79 \text{ tCO}_2e$$

O consumo de energia na categoria poder público corresponde a 8.100.819,410 KWh, que deve ser convertido para MWh multiplicando por 0,001. Desta forma, o consumo de energia passa para 8.100,82 MWh. Para obter o valor em emissões de tCO₂e deve-se aplicar a Equação 75.

$$\xi_{pp} = \varepsilon_{pp} \times \zeta \quad (75)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

ξ_{pp} → *emissões poder público (tCO₂e)*

ε_{pp}

→ *energia elétrica consumida na categoria poder público (KWh)*

$\zeta \rightarrow$ *fator de emissão (tCO₂/MWh)*

Para:

$$\xi_{pp} = 8.100,82 \text{ MWh} \times 0,09 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$$

$$\xi_{pp} = 729,07 \text{ tCO}_2e$$

O consumo de energia na categoria iluminação pública corresponde a 18.952.165,624 KWh, que deve ser convertido para MWh multiplicando por 0,001. Desta forma, o consumo de energia passa para 18.952,17 MWh. Para obter o valor em emissões de tCO₂e deve-se aplicar a Equação 76.

$$\xi_{ip} = \varepsilon_{ip} \times \zeta \tag{76}$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi_{ip} \rightarrow$ *emissões iluminação pública (tCO₂e)*

ε_{ip}

\rightarrow *energia elétrica consumida na categoria iluminação pública (KWh)*

$\zeta \rightarrow$ *fator de emissão (tCO₂/MWh)*

Para:

$$\xi_{ip} = 18.952,17 \text{ MWh} \times 0,09 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$$

$$\xi_{ip} = 1.705,70 \text{ tCO}_2e$$

O consumo de energia na categoria serviço público corresponde a 15.378.025,053 KWh, que deve ser convertido para MWh multiplicando por 0,001. Desta forma, o consumo de energia passa para 15.378,03 MWh. Para obter o valor em emissões de tCO₂e deve-se aplicar a Equação 77.

$$\xi_{sp} = \varepsilon_{sp} \times \zeta \quad (77)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

ξ_{sp} → emissões serviço público (tCO₂e)

ε_{sp}

→ energia elétrica consumida na categoria serviço público (KWh)

ζ → fator de emissão (tCO₂/MWh)

Para:

$$\xi_{sp} = 15.378,03 \text{ MWh} \times 0,09 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$$

$$\xi_{sp} = 1.384,02 \text{ tCO}_2e$$

O consumo de energia na categoria consumo da concessionária RGE corresponde a 708.756,571 KWh, que deve ser convertido para MWh multiplicando por 0,001. Desta forma, o consumo de energia passa para

708,76 MWh. Para obter o valor em emissões de tCO₂e deve-se aplicar a Equação 78.

$$\xi_{RGE} = \varepsilon_{RGE} \times \zeta \quad (78)$$

Fonte: IPCC (2021b)

Onde:

$\xi_{RGE} \rightarrow$ emissões consumo RGE (tCO₂e)

$\varepsilon_{RGE} \rightarrow$ energia elétrica consumida na categoria consumo RGE (KWh)

$\zeta \rightarrow$ fator de emissão (tCO₂/MWh)

Para:

$$\xi_{RGE} = 708,76 \text{ MWh} \times 0,09 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$$

$$\xi_{RGE} = 63,79 \text{ tCO}_2e$$

A Equação 79 apresenta o total de emissões da categoria de energia elétrica.

$$\xi_t = \xi_r + \xi_c + \xi_i + \xi_{ru} + \xi_{pp} + \xi_{ip} + \xi_{sp} + \xi_{RGE} \quad (79)$$

Onde:

$\xi_r \rightarrow$ emissões residenciais (tCO₂e)

$\xi_c \rightarrow$ emissões comerciais (tCO₂e)

$\xi_i \rightarrow$ emissões industriais (tCO₂e)

$\xi_{ru} \rightarrow$ emissões rurais (tCO₂e)

$\xi_{pp} \rightarrow$ emissões poder público (tCO₂e)

$\xi_{ip} \rightarrow$ emissões iluminação pública (tCO₂e)

$\xi_{sp} \rightarrow$ emissões serviço público (tCO₂e)

$\xi_{RGE} \rightarrow$ emissões consumo RGE (tCO₂e)

Para:

$$\xi_t = 19.086,78 \text{ tCO}_2\text{e} + 7.705,10 \text{ tCO}_2\text{e} + 24.664,73 \text{ tCO}_2\text{e} + 26,79 \text{ tCO}_2\text{e} + 729,07 \text{ tCO}_2\text{e} + 1.705,70 \text{ tCO}_2\text{e} + 1.384,02 \text{ tCO}_2\text{e} + 63,79 \text{ tCO}_2\text{e}$$

$$\xi_t = 55.365,98 \text{ tCO}_2\text{e}$$

A **Tabela 21** apresenta as emissões referentes a energia estacionária, conforme a categoria de consumo.

Tabela 21 - Emissões do setor de energia estacionária

Categoria de consumo	Consumo	Emissões (tCO₂e)
GN	318,27 m ³	0,51
GLP	5.932.138 kg	17.422,64
Energia elétrica	615.177,50 MWh	55.365,98
Total de emissões		72.789,13

Desta forma, conclui-se que as emissões referentes a energia estacionária, para o ano de 2021, correspondem a 72.789,13 tCO₂e.

9. Gases de efeito estufa

Os principais gases do efeito estufa emitidos na cidade de São Leopoldo são: dióxido de carbono (CO₂), que corresponde 99,657% das emissões; metano (CH₄), com índice de 0,327%; e óxido nitroso (N₂O), que corresponde a 0,016% das emissões geradas no município (**Figura 5**).

Figura 5 - Dados de emissões de GEE em São Leopoldo - RS



9.1 Resumo

A Tabela 22 apresenta um resumo dos resultados apresentados no 3º Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa de São Leopoldo – RS, referente ao ano de 2021.

Tabela 22 - Sumário de emissões de GEE de São Leopoldo referente ao ano de 2021

Setor	CO ₂ (t)	CH ₄ (t)	N ₂ O (t)	CO ₂ e (t)
Energia estacionária	72.750,70	1,11	0,03	72.789,12
Transportes	233.013,19	77,17	11,27	238.161,65
Resíduos	64,36	923,92	38,24	305.378,49
Total	305.828,25	1.002,20	49,54	616.329,27

Conforme os dados apresentados na **Tabela 22**, os valores mais significativos para CO₂ correspondem ao setor de transporte, com 233.013,19 tCO₂. Com relação as emissões de CH₄ e N₂O, o setor de resíduos se destaca com os maiores valores, sendo eles, 923, 92 tCH₄ e 38,24 tN₂O. Desta forma, o setor de resíduos apresenta o resultado mais significativo referente a CO₂e, seguido do setor de transporte e, por fim, energia estacionária. Este inventário apresenta o montante de 616.329,27 tCO₂ de emissões de GEE para o ano de 2021.

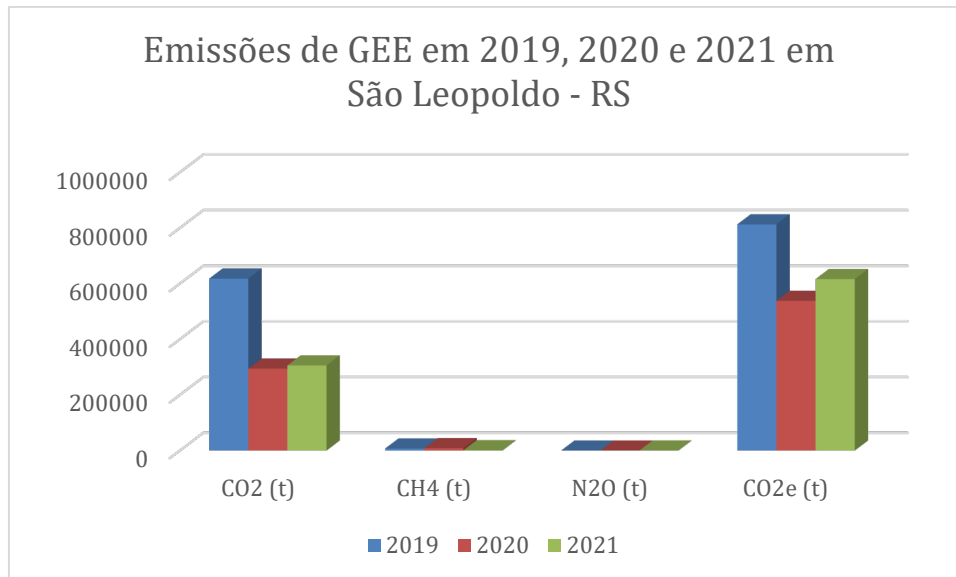
9.2 Comparativo 2019/2020/2021

A **Tabela 23** apresenta um comparativo das emissões geradas em 2019, 2020 e 2021 no município de São Leopoldo.

Tabela 23 - Sumário de emissões de GEE de São Leopoldo 2019, 2020 e 2021

Ano	CO₂ (t)	CH₄ (t)	N₂O (t)	CO₂e (t)
2019	617.842,36	7.330,01	28,03	812.887,77
2020	294.451,62	8.596,47	11,20	538.136,68
2021	305.831,97	8.568,28	11,32	525.626,03

A **Figura 6** apresenta o gráfico comparativo das emissões geradas nos anos de 2019, 2020 e 2021 no município de São Leopoldo.

Figura 6 - Comparativo de emissões dos anos 2019, 2020 e 2021 em São Leopoldo

Conforme pode-se observar na **Figura 6**, as emissões de GEE diminuíram significativamente do ano de 2019 para o ano de 2020 e apresentaram um leve aumento em 2021, nos valores referentes a CO₂e e CO₂. Enquanto CH₄ apresentou um leve aumento de 2019 para 2020 e uma redução significativa em 2021. Já os valores referentes a N₂O apresentaram um decréscimo de 2019 para 2020 e um aumento significativo de 2020 para 2021. Acredita-se que esta diferença se deve a ocorrência da pandemia do COVID-19, pois em 2021 muitos cidadãos estavam retornando de forma gradual ao trabalho presencial.

Considerações finais

A cidade de São Leopoldo apresentou o maior índice de emissões neste 3º Inventário de Emissões de GEE no setor de transportes, assim como, nos inventários referentes aos anos anteriores e como as demais cidades do país, que já desenvolveram seus inventários. Apresentando, assim, a geração de 238.161,65 tCO₂e no setor de transportes no ano de 2021.

Com relação a geração de resíduos, as emissões chegaram ao montante de 305.378,49 tCO₂e, seguido pelo setor de energia estacionária com 72.789,12 tCO₂e. Resultando num total de 616.329,27 tCO₂e gerados no município de São Leopoldo, no ano de 2021.

Cabe ressaltar que este valor é menor do que o encontrado no inventário referente ao ano de 2019, que resultou em 812.887,77 tCO₂e e levemente maior que o valor referente ao ano de 2020, que apresentou 538.136,68 tCO₂e. Acredita-se que esta diferença significativa de 2019 para 2020 se deve pela ocorrência da pandemia do COVID-19, que fez com que a população passasse mais tempo em casa, realizando os seus trabalhos de forma remota. Enquanto o aumento nas emissões em 2021, pode ser justificado pelo fato do isolamento ter sido reduzido gradualmente.

O inventário é um indicador local que mede as ações de mitigação, que serão desenvolvidas a cada ano, sendo complementado com o Plano Local de Ação Climática (PLAC), que já foi desenvolvido e encontra-se em fase de atualização.

O PLAC surge da análise e avaliação das emissões destacadas pelos inventários, com o intuito de promover ações que vão ao encontro dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) e da Agenda 2030, a fim de reduzir as emissões geradas e mitigar as mudanças climáticas.

Referências

ANP. **Anuário estatístico 2020**. Agência Nacional de Petróleo, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2019#:~:text=O%20Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20Brasileiro%20do,nacionais%20no%20per%C3%ADodo%202009%2D2018.>

C40 CITIES. **CIRIS User guide**. C40 Cities, 2021

EPE. **Balço energético nacional-Relatório síntese**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética, 2019.

FEE. **Município: São Leopoldo**. Fundação de Economia e Estatística, 2021. Disponível em: <https://arquivofee.rs.gov.br/perfil-socioeconomico/municipios/detalhe/?municipio=S%E3o+Leopoldo>

FONG et al. **Global protocol for community- scale greenhouse gas emission inventories**. GHG Protocol, 2014.

GRABASCK, Jaqueline Ramos. **Aspectos e impactos ambientais decorrentes da extração de agregado natural e produção de agregado reciclado: estudo de caso no RS**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2016.

IBGE. **IBGE**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/> Acesso em: 30 de outubro de 2021.

IBGE. **IBGE Cidades**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/sao-leopoldo/panorama>

IBGE. **IBGE Cidades**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2018. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/sao-leopoldo/panorama>

IBGE. **IBGE Cidades**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/sao-leopoldo/panorama>

IBGE. **IBGE Cidades**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/sao-leopoldo/panorama>

ICLEI-SAMS. **Inventário dos gases do efeito estufa**. ICLEI-SAMS, 2018.

IPCC. **2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories**. Em 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 1 – General guidance and reporting, 2021a. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol1.html>

IPCC. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Em 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2 – Energy, 2021b. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>

IPCC. **2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories**. Em 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5 – Waste, 2021. Disponível em <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html> Acesso em 14 de novembro de 2021.

MCTI. **Fator médio – Inventários corporativos**. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2021. Disponível: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html Acesso em: 17 de dezembro de 2023.

MERCOCIDADES. **Quem somos?** Mercocidades, 2022. Disponível em: <https://mercociudades.org/pt-br/mercociudades/>

MME. **Balanço Energético Nacional**. Ministério de Minas e Energia, 2017. Disponível em: https://www.mme.gov.br/SIEBRASIL/App_Content_User/archivos-publicos/nz3ggqk0.mrp20180831000000.pdf?or=30148&ss=1&v=1//efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj

PETROBRAS. **Óleo diesel – Informações técnicas**. Versão março, 2023. Disponível em: https://petrobras.com.br/documents/2677942/0/Manual%20de%20Diesel_2023.pdf/6764bdc0-af21-737b-745c-5eb9bb4f9ee1?version=1.0&t=1689172109000&download=true

PREFEITURA DE SÃO LEOPOLDO. **Conheça São Leopoldo**. Prefeitura Municipal de São Leopoldo, 2021. Disponível em: https://www.saoleopoldo.rs.gov.br/?titulo=Conhe%20a%20S%20Leopoldo&template=conteudo&categoria=436&codigoCategoria=436&idConteudo=2429&tipoConteudo=INCLUDE_MOSTRA_CONTEUDO

SEMAE. **Um novo ciclo**. São Leopoldo, 2020.

SNIS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**. Brasília, Ministério das Cidades, 2020. Disponível em: www.snis.gov.br

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Heat values of various fuels*. 2024. Disponível em: <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx>