

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

ALÉCIO OLIVEIRA GOTTI

Estudo Teórico Comparativo entre as Emissões Atmosféricas de Compostos
Orgânicos Voláteis Provenientes de Tanques de Armazenamento de
Combustíveis com Teto Fixo e com Teto Flutuante Instalados
no Município de São Carlos/SP.

São Carlos, SP
2024

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

Estudo Teórico Comparativo entre as Emissões Atmosféricas de Compostos Orgânicos Voláteis Provenientes de Tanques de Armazenamento de Combustíveis com Teto Fixo e com Teto Flutuante Instalados no Município de São Carlos/SP.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Aluno: Alécio Oliveira Gotti

Orientador: Prof. Dr. Wiclef Dymurgo Marra Junior

São Carlos, SP

2024

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

G686e Gotti, Alécio Oliveira
 Estudo Teórico Comparativo entre as Emissões
Atmosféricas de Compostos Orgânicos Voláteis
Provenientes de Tanques de Armazenamento de
Combustíveis com Teto Fixo e com Teto Flutuante
Instalados no Município de São Carlos-SP / Alécio
Oliveira Gotti; orientador Wiclef Dymurgo Marra Junior.
São Carlos, 2024.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2024.

1. Emissões evaporativas. 2. Emissões
atmosféricas. 3. Tanques de armazenamento. 4. Compostos
orgânicos voláteis (COVs). 5. Software TANKS. I.
Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Alecio Oliveira Gotti**

Data da Defesa: 07/06/2024

Comissão Julgadora:

Resultado:

Wiclef Dymurgo Marra Junior (Orientador(a))

APROVADO

Guilherme Henrique Duarte de Oliveira

APROVADO

Lucas Tadeu Fuess

Aprovado

Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais por todo o suporte e carinho dedicados durante toda minha jornada de vida, de graduação, nos momentos bons e ruins.

A todos os amigos e parceiros, tanto os de longa data quanto os que conheci recentemente, que me acompanharam durante a execução deste trabalho, mas principalmente ao longo de toda a minha jornada, sempre oferecendo apoio, incentivo, e o principal: o companheirismo.

Ao Prof. Dr. Wiclef Dymurgo Marra Junior, que norteou meus passos e me auxiliou desde o início na execução deste trabalho, muito obrigado pela orientação e paciência. Ao Prof. Dr. Guilherme Henrique Duarte de Oliveira e ao Prof. Dr. Lucas Tadeu Fuess pela participação na banca.

A todos os irmãos de República Feudo que tive a oportunidade de conhecer e de compartilhar todos os bons e maus momentos, todos os ensinamentos e aprendizados; obrigado por serem uma segunda família.

À turma da ambiental 018, por todos os momentos trocados dentro e fora da sala de aula e pelos aprendizados que me ajudaram a chegar até aqui.

À Universidade de São Paulo, mais precisamente à Escola de Engenharia de São Carlos e todos os docentes do Curso de Graduação de Engenharia Ambiental.

Aos colegas de fora da universidade que me ajudaram com os dados e com a realização deste trabalho.

A todos os colegas que compartilharam e fizeram parte dessa jornada.

RESUMO

GOTTI, A. O. **Estimativa teórica de emissões de compostos orgânicos voláteis: estudo comparativo entre as emissões atmosféricas provenientes de tanques de armazenamento de teto fixo e de teto flutuante instalados em um empreendimento fictício no município de São Carlos/SP.** 2024. 89 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

As emissões atmosféricas são uma grande preocupação ambiental, introduzindo gases poluentes que degradam a qualidade do ar e afetam o clima global. Compostos orgânicos voláteis (COVs) são particularmente problemáticos, pois contribuem para a formação de ozônio troposférico, prejudicial à saúde humana e à agricultura. Este trabalho abordou a estimativa teórica de emissões atmosféricas oriundas de um empreendimento de tancagem de combustíveis fictício, com o objetivo de exercer uma simulação das emissões atmosféricas, para posterior comparação entre o Cenário 1, com 8 tanques de armazenamento de teto fixo, e o Cenário 2, com também 8 tanques, porém equipados com teto flutuante interno, em ambos os cenários foram usados a gasolina e o etanol como produtos base. Ademais buscou-se enquadrar o empreendimento dentro da legislação estadual vigente (Decreto Estadual 59.113/13), com um valor de 40 t/ano de emissão de COVs, a fim de não ter necessidade de realização de licenciamento. Para isto, foi preciso estimar teoricamente as emissões da etapa de carregamento e descarregamento de produtos, as emissões fugitivas dos acessórios de linha de tubulação acoplados aos tanques e as emissões evaporativas dos tanques, para o cálculo desta última foi o programa TANKS 4.09d da *Environmental Protection Agency* (EPA). Por fim os resultados foram comparados e analisados, Cenário 1 com 43,33 t/ano e Cenário 2 com 21,72 t/ano ambos após abatimento, onde foi constatado que o volume de emissão dos tanques de teto fixo é muito superior ao volume dos tanques de teto flutuante interno. Atribuindo, assim, ao Cenário 1 uma inaptidão em relação ao limite da legislação, mesmo com os 95% de abatimento das emissões, ocasionado pela aplicação de uma possível Unidade de Recuperação de Vapores (URV). Enquanto o Cenário 2 se encontrou dentro dos limites da lei mesmo sem abatimento algum. Sendo assim, este estudo se torna relevante para nortear o modo como a legislação pode ser aplicada sobre um empreendimento com emissões de COVs, e como um guia para um possível estudo real e aplicado de estimativa de emissões atmosféricas.

Palavras-chave: Emissões Evaporativas. Emissões Atmosféricas. Tanques de Armazenamento. Compostos Orgânicos Voláteis (COVs). Software TANKS.

ABSTRACT

GOTTI, A. O. Theoretical Estimation of Volatile Organic Compounds Emissions: A Comparative Study of Atmospheric Emissions from Fixed-Roof and Floating-Roof Storage Tanks Installed in a Fictitious Enterprise in the Municipality of São Carlos/SP. 2024. 89 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Atmospheric emissions are a major environmental concern, introducing pollutant gases that degrade air quality and affect the global climate. Volatile organic compounds (VOCs) are particularly problematic as they contribute to the formation of tropospheric ozone, which is harmful to human health and agriculture. This work addressed the theoretical estimation of atmospheric emissions from a fictitious fuel storage facility, with the aim of simulating atmospheric emissions for subsequent comparison between Scenario 1, with 8 storage tanks of different volumes with fixed roofs, and Scenario 2, with 8 storage tanks, also of different volumes, with internal floating roofs. Additionally, the aim was to align the facility with the current state legislation (State Decree 59.113/13), which sets a limit of 40 t/year of VOC emissions, in order to avoid the need for licensing. To achieve this determination, it was necessary to measure the emissions from the tanks, the loading and unloading stages of products, and the fugitive emissions from the pipeline accessories coupled to the tanks. For the tank estimation, the TANKS 4.09d software from the Environmental Protection Agency (EPA) was used to calculate the evaporative emissions from the tanks, using gasoline and ethanol as the basis. Finally, the results were compared and analyzed, revealing that the emission volume of fixed-roof tanks (43,33 t/year) is significantly higher than that of internal floating-roof tanks (21,72 t/year). Consequently, Scenario 1 was deemed non-compliant with the legislative limit, even with 95% emission reduction due to the application of a feasible Vapor Recovery Unit (VRU). In contrast, Scenario 2 remained within the legal limits without any reduction. Therefore, this study becomes relevant for guiding the application of legislation to enterprises with VOC emissions and serves as a guide for a possible real and applied study of atmospheric emission estimation.

Keywords: Evaporative Emissions. Atmospheric Emissions. Storage Tanks. Volatile Organic Compounds (VOCs). TANKS Software.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Carregamento por tubo não submerso tipo <i>splash</i> | 20 |
| Figura 2 – Carregamento por tubo não submerso tipo <i>submerged</i> | 20 |
| Figura 3 – Carregamento por tubo não submerso tipo <i>bottom</i> | 21 |
| Figura 4 – Imagem ilustrativa de um tanque de teto fixo..... | 25 |
| Figura 5 – Imagem ilustrativa de um tanque de teto flutuante externo | 26 |
| Figura 6 – Imagem ilustrativa de um tanque de teto flutuante interno..... | 27 |
| Figura 7 – Ilustração de um respiro simples..... | 28 |
| Figura 8 – Ilustração de uma válvula de alívio. | 29 |
| Figura 9 – Modelo de corta-chamas..... | 30 |
| Figura 10 – Tubulação industrial com indicação de flanges (conexões), linhas abertas e válvulas..... | 37 |
| Figura 11 – Imagem de uma bomba centrífuga com indicação do selo de vedação | 38 |
| Figura 12 – Localização geográfica do município de São Carlos (c), compreendo sua localização no estado de São Paulo (b) e a localização deste no Brasil (a) | 39 |
| Figura 13 – Mapa ilustrativo das macros bacias que constituem o município de São Carlos, com indicação da área urbana em cinza..... | 40 |
| Figura 14 – Zoneamento da Macrozona do Plano Diretor de São Carlos | 41 |
| Figura 15 – Área STS 08 do Porto de Santos..... | 42 |
| Figura 16 – Imagem ilustrativa da localização do empreendimento em relação à mancha urbana de São Carlos, retirada do programa Google Earth..... | 43 |
| Figura 17 – Imagem ilustrativa do software TANKS com entrada dados de um tanque de teto fixo de 1000 m ³ | 49 |
| Figura 18 – Imagem ilustrativa do software TANKS com entrada dados de um tanque de teto fixo de 2000 m ³ | 49 |
| Figura 19 – Imagem ilustrativa do software TANKS com entrada dados de um tanque de teto fixo de 3000 m ³ | 50 |
| Figura 20 – Imagem ilustrativa do software TANKS com entrada dados de um tanque de teto fixo de 5372 m ³ | 50 |
| Figura 21 – Imagem ilustrativa da interface do software TANKS com entrada de dados de um tanque de teto flutuante interno de 1000 m ³ | 52 |

| | |
|---|----|
| Figura 22 – Imagem ilustrativa da interface do software TANKS com entrada de dados de um tanque de teto flutuante interno de 2000m ³ , com destaque para as características diferentes. | 53 |
| Figura 23 – Imagem ilustrativa da entrada de dados meteorológicos cadastrados no programa TANKS 4.09d..... | 64 |
| Figura 24 – Imagem ilustrativa das características da Gasolina RVP 12 na base do programa TANKS 4.09d..... | 65 |
| Figura 25 – Imagem ilustrativa das características do Etanol na base do programa TANKS 4.09d..... | 65 |
| Figura 26 – Diagrama de uma linha teórica de distribuição com sistema de controle | 67 |
| Figura 27 – Gráfico de comparação das emissões de COVs, após abatimento, nas diferentes etapas do processo dos cenários 1 e 2 | 75 |
| Figura 28 – Gráfico de comparação das emissões evaporativas de gasolina provenientes dos tanques de teto fixo (TQ) e dos tanques de teto flutuante (TQF)..... | 76 |
| Figura 29 – Gráfico de comparação das emissões evaporativas de etanol provenientes dos tanques de teto fixo (TQ) e dos tanques de teto flutuante (TQF)..... | 76 |
| Figura 30 – Gráfico de comparação entre as emissões evaporativas dos tanques de teto fixo (TQ) e dos tanques de teto flutuante (TQF), diferenciando a gasolina e o etanol | 77 |
| Figura 31 – Gráfico de comparação entre as emissões evaporativas dos tanques de teto fixo (TQ) com abatimento e dos tanques de teto flutuante (TQF) sem abatimento | 78 |
| Figura 32 – Gráfico de comparação entre as emissões evaporativas dos tanques de teto fixo (TQ), evidenciando seus respectivos volumes e diferenciando a gasolina e o etanol | 79 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Novos padrões de qualidade do ar do Decreto Estadual nº 59.113/2013..... | 17 |
| Tabela 2 – Maiores fontes de emissão existentes numa planta de processamento típica..... | 18 |
| Tabela 3 – Tipos de tanques recomendados pela norma N-270 para armazenamento de alguns hidrocarbonetos | 22 |
| Tabela 4 – Tipos de pinturas e fatores α do revestimento dos tanques e tetos..... | 23 |
| Tabela 5 – Análise das várias técnicas de Recuperação de COV..... | 35 |
| Tabela 6 – Parâmetros de entrada do <i>software</i> TANKS 4.09d para os tipos de tanques verticais | 45 |
| Tabela 7 – Dados volumétricos dos tanques de teto fixo em SI..... | 47 |
| Tabela 8 – Dados volumétricos dos tanques de teto fixo em padrão americano..... | 47 |
| Tabela 9 – Características físicas dos tanques de teto fixo em SI..... | 48 |
| Tabela 10 – Características físicas dos tanques de teto fixo em padrão americano | 48 |
| Tabela 11 – Dados volumétricos dos tanques de teto flutuante | 51 |
| Tabela 12 – Aspectos estruturais dos tanques de teto flutuante | 52 |
| Tabela 13 – Fatores de saturação para carregamento de produtos líquidos | 55 |
| Tabela 14 – Fatores de emissão dos equipamentos | 56 |
| Tabela 15 – Média de Radiação Solar incidente no município de São Carlos..... | 58 |
| Tabela 16 – Média de Velocidade do Vento incidente no município de São Carlos | 59 |
| Tabela 17 – Temperatura média do município de São Carlos..... | 60 |
| Tabela 18 – Temperatura média mínima do município de São Carlos | 61 |
| Tabela 19 – Temperatura média máxima do município de São Carlos..... | 62 |
| Tabela 20 – Média de Pressão Atmosférica do município de São Carlos..... | 63 |
| Tabela 21 – Características e propriedades físico-químicas dos produtos utilizados nas simulações | 66 |
| Tabela 22 – Emissões fugitivas dos acessórios de linha, referente à 8 tanques..... | 68 |
| Tabela 23 – Redução das emissões fugitivas com aplicação do LDAR..... | 69 |
| Tabela 24 – Estimativa teórica de emissão por carregamento..... | 69 |
| Tabela 25 – Emissões por carregamento após abatimento | 70 |
| Tabela 26 – Total de emissões evaporativas da etapa de tancagem | 71 |
| Tabela 27 – Total de emissões dos tanques de teto fixo evaporativas após abatimento | 72 |
| Tabela 28 – Emissões evaporativas dos tanques de teto flutuante | 73 |
| Tabela 29 – Total de emissões evaporativas dos tanques de teto flutuante após abatimento... | 74 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 13 |
| 2. OBJETIVOS | 15 |
| 2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 15 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 3.1. COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS | 16 |
| 3.2. POLUENTES E PADRÕES DE QUALIDADE DO AR | 17 |
| 3.3. FONTE DE EMISSÕES | 19 |
| 3.3.1. Emissões Pontuais | 20 |
| 3.3.1.1. Estocagem | 20 |
| 3.3.1.2. Operações de Transferência | 20 |
| 3.4. TANQUES DE ARMAZENAMENTO | 22 |
| 3.4.1. Tanques de Teto Fixo | 25 |
| 3.4.2. Tanques de Teto Flutuante | 26 |
| 3.4.2.1. Teto Flutuante Externo | 26 |
| 3.4.2.2. Teto Flutuante Interno | 27 |
| 3.5. DISPOSITIVOS E ACESSÓRIOS | 29 |
| 3.5.1. Respiros e Válvulas de Alívio | 29 |
| 3.5.2. Dispositivos Corta-chamas | 30 |
| 3.6. INSTRUMENTOS E TECNOLOGIAS PARA ABATIMENTO DE COVs | 31 |
| 3.6.1. Unidade de Recuperação de Voláteis | 31 |
| 3.6.1.1. Adsorção | 31 |
| 3.6.1.2. Absorção | 32 |
| 3.6.1.3. Condensação | 33 |
| 3.6.1.4. Separação por Membrana | 34 |
| 3.6.1.5. Pós-queimador | 35 |
| 3.6.1.6. Análise dos Métodos de Recuperação/Destruição de COVs | 35 |
| 3.6.2. Leak Detection and Repair | 37 |
| 3.6.2.1. Componentes abrangidos pelo LDAR | 37 |
| 4. METODOLOGIA | 40 |
| 4.1. CARACTERIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS | 40 |
| 4.1.1. Caracterização do Empreendimento | 43 |

| | | |
|----------|---|----|
| 4.2. | AVALIAÇÃO DE EMISSÕES..... | 45 |
| 4.2.1. | <i>Software</i> TANKS 4.09d | 45 |
| 4.2.2. | Tanques de Armazenamento Simulados | 46 |
| 4.2.2.1. | Cenário 1 – Simulação de Tanques de Teto Fixo | 47 |
| 4.2.2.2. | Cenário 2 – Simulação de Tanques de Teto Flutuante Interno..... | 52 |
| 4.2.3. | Emissões provenientes de Carregamentos | 54 |
| 4.2.4. | Emissões Fugitivas..... | 56 |
| 4.3. | DADOS METEOROLÓGICOS UTILIZADOS | 58 |
| 4.4. | PRODUTOS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO..... | 65 |
| 4.5. | CRITÉRIOS AVALIADOS NO ESTUDO..... | 67 |
| 5. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 68 |
| 5.1. | ESTIMATIVA TEÓRICA DE EMISSÕES..... | 68 |
| 5.1.1. | Emissões Fugitivas..... | 68 |
| 5.1.2. | Emissões de Carregamento..... | 70 |
| 5.1.3. | Emissões Evaporativas | 71 |
| 5.1.3.1. | Cenário 1: Tanque de Teto Fixo | 71 |
| 5.1.3.2. | Cenário 2: Tanque de Teto Flutuante Interno..... | 73 |
| 5.2. | DISCUSSÃO DOS CENÁRIOS | 75 |
| 6. | CONCLUSÃO..... | 82 |
| 7. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 84 |

1. INTRODUÇÃO

Desde a implantação do rodoviarismo no Brasil, com o objetivo de promover uma integração nacional, escoar a produção agrícola e industrial e facilitar o acesso a áreas remotas do país, a prioridade de investimento no desenvolvimento de modais de transporte se alterou e passou a ser majoritariamente rodoviário. A partir deste fenômeno e do crescimento socioeconômico global, houve uma maior dependência por automóveis, veículos de carga e transporte público urbano. Isto intensificou a demanda por combustíveis líquidos, fósseis e posteriormente renováveis, que se mantém em alta até os dias atuais.

No entanto, essa dependência também trouxe desafios ambientais e econômicos, como a poluição do ar, as emissões de gases de efeito estufa e os custos elevados de manutenção das estradas. Em relação às emissões atmosféricas, estas não são provenientes apenas da queima dos combustíveis nos veículos com motor à combustão, que emitem principalmente dióxido de carbono (CO_2), mas também são emitidas no carregamento, armazenagem e transporte desses combustíveis.

As emissões atmosféricas são uma das principais preocupações e um dos maiores desafios ambientais atuais, pois introduzem diversos tipos de gases poluentes na atmosfera que degradam a qualidade do ar ambiente. Essas emissões desencadeiam mudanças climáticas globais de magnitude sem precedentes, afetando o clima e os ecossistemas do planeta.

Entre os poluentes emitidos na atmosfera, os compostos orgânicos voláteis (COVs) desempenham um papel significativo devido ao seu impacto nocivo na qualidade do ar e na saúde humana. Na atmosfera, os COVs participam de reações fotoquímicas que levam à formação de ozônio troposférico (O_3), um componente chave do “*smog* fotoquímico¹”. Este é prejudicial à saúde, causando diferentes tipos de doenças respiratórias; causa danos às plantas, tornando-as mais suscetíveis a estresses ambientais como seca e calor excessivo, resultando em perdas consideráveis à produtividade agropecuária.

Nesse contexto, um exemplo de fonte fixa de poluição atmosférica comum é o armazenamento de combustíveis, comumente conhecido como parque de tancagem; este consiste em um grande terreno com diversos tanques que armazenam diferentes tipos de

¹ Smog fotoquímico: O termo tem origem na língua inglesa, derivando-se da combinação das palavras “*smoke*” (fumaça) e “*fog*” (neblina). Caracteriza-se pela formação de uma espécie de neblina de poluição, composta pela mistura de gases, fumaça e vapores de água.

hidrocarbonetos (HC) em estado líquido, gasoso ou liquefeito. As emissões provenientes dos respiros e dos componentes de tubulação dos tanques, das operações de carregamento e descarregamento vão direto para a atmosfera, caso não haja nenhum tipo de dispositivo para tratar ou destruir essa poluição de COVs. A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), órgão regulamentador, prevê instrumentos de abatimento de poluentes no seu Guia de Melhor Tecnologia Prática Disponível, que funciona como base para que estas sejam aplicadas em empreendimentos como do tipo citado ou em indústrias no geral (CETESB, 2017).

Este trabalho tem como objetivo explorar as fontes de emissões de um parque de tancagem de combustíveis fictício localizado em São Carlos - SP, comparando os diferentes modelos de tanques. O foco é o enquadramento do empreendimento na legislação vigente, abatendo a maior quantidade de emissões possível. Para atingir esse objetivo, será determinada a melhor tecnologia prática disponível para cada etapa do processo produtivo e, posteriormente, realizado o cálculo de abatimento dos poluentes. Para o cálculo das emissões evaporativas dos tanques de armazenamento será utilizado o programa TANKS 4.09d, o qual foi desenvolvido por meio de uma parceria entre o Instituto Americano do Petróleo - API e a *Environmental Protection Agency* (EPA) e é aceito pela CETESB.

A relevância deste estudo se dá por estimar as emissões de um pequeno volume de compostos orgânicos e evidenciar o prejuízo na qualidade do ar causada por estes. Com isso é possível mostrar que este é mais um fator que fomenta a mudança de combustíveis fósseis para biocombustíveis e combustíveis limpos e renováveis.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é estimar de maneira teórica as emissões atmosféricas advindas de uma base de distribuição de combustíveis fictícia localizada na cidade de São Carlos/SP, visando comparar os dois cenários idealizados com diferenças estruturais no teto dos tanques de armazenamento e verificar se o empreendimento poderia se enquadrar dentro dos limites das legislações vigentes.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar quantitativamente o volume de compostos orgânicos voláteis emitidos nas diferentes etapas do processo de armazenamento;
- Comparar os resultados brutos do estudo de emissões com os resultados pós abatimento, e os diferentes tipos de armazenagem para os produtos utilizados;
- Enquadrar os Cenários simulados na legislação estadual vigente sobre qualidade do ar;
- Sugerir tecnologias de abatimento de emissões que mais se adequem às necessidades do empreendimento em cada etapa do processo de armazenamento;
- Trazer avaliações individuais quanto às diferentes estruturas e componentes utilizados nas simulações.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico será abordado o conteúdo referente às fontes de emissões atmosféricas presentes em plantas de tancagem de combustíveis e os poluentes advindos desse processo que são lançados na atmosfera. Assim como informações sobre tipo de estocagem de grânéis líquidos e outros tipos de processos em indústrias químicas e petroquímicas. Sendo também abordado métodos de redução e abatimento para as emissões de compostos orgânicos voláteis (COVs).

3.1. COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS

A compreensão do que são compostos orgânicos voláteis é fundamental para entender as emissões atmosféricas e seus efeitos. Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos EUA – EPA (2024), COVs são classificados como qualquer composto de carbono, com exceção de monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido carbônico, carbetos, carbonatos metálicos e carbonato de amônia que participa de reações fotoquímicas na atmosfera e que possua ponto de ebulição menor ou igual a 250 °C em 1 atm.

Estes compostos na atmosfera combinam com óxidos de nitrogênio na presença da luz solar formando ozônio, um oxidante que tem efeitos nocivos sobre plantas e animais (HUNTER e OYAMA, 2002). Estas emissões podem ser liberadas como hidrocarbonetos puros ou parcialmente modificados pela sua combustão, seja na forma de vapores ou de partículas em suspensão, combinados com compostos orgânicos contendo enxofre, nitrogênio e outras substâncias indesejadas. Na troposfera (camada da atmosfera terrestre desde o nível do mar até 15 km), os COVs interagem com os radicais hidroxila (OH), acelerando a conversão do monóxido de nitrogênio (NO) em dióxido de nitrogênio (NO₂). Posteriormente, o NO₂ contribui para a formação de ozônio (O₃) quando exposto à radiação eletromagnética (INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS – IBP, 2004).

A importância de controlar as emissões dos COVs deve-se ao fato deles serem um dos principais componentes das reações químicas na atmosfera, que formam o ozônio e outros oxidantes fotoquímicos, causando o chamado “Smog” Fotoquímico (HUNTER e OYAMA, 2002). Segundo o Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP (2004), além de precursores da

formação de O_3 , os COVs são um agente extremamente tóxico que afeta o crescimento de plantas, a saúde humana, mesmo em concentração reduzidas.

3.2. POLUENTES E PADRÕES DE QUALIDADE DO AR

O ar contém diversos tipos de poluentes, apresentando-se em formas físicas variadas, como sólidos, líquidos e gases. Os sólidos podem se manifestar como partículas ou aerossóis. A classificação desses poluentes pode ser baseada em sua origem, composição, propriedades químicas, efeitos fisiológicos, forma física ou legislação aplicável. Os poluentes primários são emitidos na atmosfera na mesma forma química em que foram liberados, enquanto os poluentes secundários são formados por reações químicas na atmosfera. No caso do material particulado (MP), sua fração submicrométrica, conhecida como *moda fina*, têm origem em gases como SO_2 (dióxido de enxofre), NO_x (óxidos de nitrogênio) e COVs, emitidos principalmente por atividades humanas e transformados por meio de reações químicas ou coagulação (BERETTA, 2000 *apud* MARTINS, 2004).

Apesar dos avanços na qualidade do ar, o impacto da poluição atmosférica na saúde humana permanece significativo. O aumento da população, o envelhecimento e a maior suscetibilidade a doenças relacionadas à poluição contribuem para um crescente peso das enfermidades associadas a esse problema. Por isso faz-se necessário o estabelecimento de um padrão de qualidade do ar que é, em suma, um instrumento técnico que define legalmente um limite máximo para a concentração de um poluente, visando controlar as emissões dos poluentes com o intuito de garantir a proteção da saúde e do bem-estar das pessoas e do meio ambiente (CETESB, 2022).

No Brasil, incide a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) Nº 491, de 19 de novembro de 2018 (BRASIL, 2018) que definiu 14 padrões de qualidade do ar para nove poluentes, sendo estes: dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO), partículas inaláveis (MP_{10}), partículas inaláveis finas ($MP_{2,5}$), partículas totais em suspensão (PTS), fumaça (FMC), chumbo (Pb), dióxido de nitrogênio (NO_2) e ozônio (O_3). Recentemente foi aprovada a Lei nº 14.850/24 que instituiu novos pareceres à, já existente, Política Nacional de Qualidade do Ar, porém os novos padrões de qualidade do ar serão posteriormente estabelecidos pela equipe do Conama (BRASIL, 2024).

Contudo, no estado de São Paulo o Decreto Estadual nº 59.113/2013 (SÃO PAULO, 2013) é o dispositivo normativo que estabelece novos padrões de qualidade do ar e define diretrizes para o gerenciamento da qualidade do ar ao longo do tempo, e fica a cargo da CETESB realizar a regulamentação dos novos padrões de qualidade do ar e garantir o cumprimento dos mesmos. Esta garantia é feita em torno da Decisão de Diretoria Nº 119/2021/I/C, de 26 de novembro de 2021 (SÃO PAULO, 2021) juntamente ao Plano de Redução de Emissão de Fontes Estacionárias - PREFE de 2014 (SÃO PAULO, 2014).

A fim de compreender os novos padrões de qualidade do ar vigentes, a Tabela 1 resume as determinações; com exceção dos parâmetros monóxido de carbono (CO), partículas totais em suspensão (PTS) e chumbo (Pb), os novos padrões que foram estabelecidos para serem atendidos de forma escalonada, em quatro estágios, desde uma Meta Intermediária 1 (MI1) até um Padrão Final (PF). A mensuração dos valores é feita de acordo com cada parâmetro, O₃ e CO por exemplo correspondem a média móvel de 8 horas, assim como SO₂, MP_{2,5}, MP₁₀, PTS e FMC a média de 24 horas, e o NO₂ média de 1 hora; já a medição do chumbo equivale a Média Aritmética Anual (MMA).

Tabela 1 – Novos padrões de qualidade do ar do Decreto Estadual nº 59.113/2013.

| Padrões | CO (ppm) | SO ₂ (µg/m ³) | MP ₁₀ (µg/m ³) | MP _{2,5} (µg/m ³) | PTS (µg/m ³) | FMC (µg/m ³) | Pb (µg/ m ³) | NO ₂ (µg/m ³) | O ₃ (µg/m ³) |
|---------|-------------|---|--|---|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|--|
| | 8h | 24h | 24h | 24h | 24h | 24h | MAA | 1h | 8h |
| MI 1 | 9 | 60 | 120 | 60 | 240 | 120 | 0,5 | 260 | 140 |
| MI 2 | 9 | 40 | 100 | 50 | 240 | 100 | 0,5 | 240 | 130 |
| MI 3 | 9 | 30 | 75 | 37 | 240 | 75 | 0,5 | 220 | 120 |
| PF | 9 | 20 | 50 | 25 | 240 | 50 | 0,5 | 200 | 100 |

Fonte: Adaptado de CETESB, 2014

Entretanto, a real meta a ser utilizada neste estudo será o inciso III que consta no artigo 12 do Decreto Estadual nº 59.113/2013, conforme estabelecido:

[...] Artigo 12º - Devem se submeter, após a publicação do PREFE ou de outros programas previstos no § 5º do artigo 6º, às regras de licenciamento, conforme estabelecido no artigo anterior, os novos empreendimentos e ampliações de existentes, cujo total de emissões adicionadas seja igual ou superior a:

I - material particulado (MP): 100 t/ano;

II - óxidos de nitrogênio (NO_x): 40 t/ano;

III - compostos orgânicos voláteis, exceto metano (COVs, não-CH₄): 40 t/ano;

IV - óxidos de enxofre (SO_x): 250 t/ano (SÃO PAULO, 2013, p.11).

As 40t/ano que constam na lei fazem referência às emissões totais de um empreendimento, por isso serão abordados diferentes tipos de lançamentos evaporativos neste estudo.

3.3. FONTE DE EMISSÕES

As fontes de emissões atmosféricas são classificadas em pontuais e não pontuais. Nas fontes pontuais, toda a emissão é concentrada em um único local específico. Exemplos comuns na indústria incluem chaminés de fornos e caldeiras, assim como suspiros de tanques de armazenamento. Já as fontes de emissões não pontuais, também chamadas de fugitivas, são compostas por equipamentos e componentes integrantes dos sistemas de transporte de produtos dentro dos processos industriais. Estes incluem bombas, compressores, flanges, válvulas, entre outros (WALLACE, 1979 *apud* MARTINS, 2004).

Segundo o IBP (2004) os maiores percentuais de emanções de COVs provêm de tubulações e equipamentos, como é possível observar na Tabela 2.

Tabela 2 – Maiores fontes de emissão existentes em refinarias, indústrias químicas e petroquímicas.

| Fontes de COVs em refinarias, indústrias químicas e petroquímicas | Faixa de Variação (%) |
|--|------------------------------|
| Perdas fugitivas em tubulações e equipamentos | 40 a 60 |
| Operações de carregamento e retirada de hidrocarbonetos envolvendo vagões e caminhões-tanque | 20 a 30 |
| Sistemas de Tratamento de Efluentes Líquidos | 5 a 15 |
| Tanques de Armazenamento | 5 a 15 |
| Alívios de processo | 5 a 15 |

Fonte: Instituto Brasileiro De Petróleo e Gás – IBP, 2004.

3.3.1. Emissões Pontuais

3.3.1.1. Estocagem

Assim como as indústrias químicas, petroquímicas e de petróleo, os empreendimentos de tancagem de combustíveis, resinas e afins também utilizam tanques para estocagem de suas matérias-primas, insumos e produtos. Por isso, estes tanques desempenham um papel fundamental nas operações industriais, permitindo que as empresas armazenem reservas estratégicas dentro de suas instalações. Essas reservas são cruciais para manter a continuidade operacional em situações de interrupção no fornecimento de determinados produtos. Além disso, os tanques são utilizados para acumular produtos, assegurando um abastecimento constante e confiável aos clientes (MARTINS, 2004).

3.3.1.2. Operações de Transferência

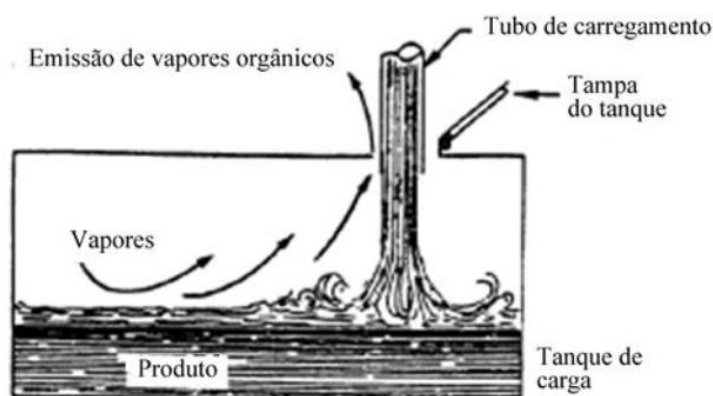
O transporte de líquidos derivados do petróleo entre instalações industriais é geralmente realizado por meio de tubulações, devido à sua segurança e ao menor impacto ambiental. No entanto, em casos em que a quantidade transportada ou a distância percorrida não são viáveis para o transporte por tubulação, outros métodos são empregados. Os mais comuns incluem o uso de caminhões-tanque, vagões-tanque, navios-tanque e recipientes menores, como tambores, dependendo das necessidades específicas de transporte (MARTINS, 2004).

As emissões de COVs durante as operações de carga e descarga de derivados líquidos de petróleo em caminhões-tanque, vagões-tanque e embarcações são provocadas pela agitação do fluido durante o enchimento, por conta da evaporação e principalmente pela exaustão do volume de vapores existente no compartimento através do topo dos tanques, em que há a expulsão do volume de vapor deslocado por um volume igual de líquido que foi introduzido no compartimento. Para níveis maiores de turbulência, pode ocorrer o arraste de gotículas de líquido com os vapores emitidos (CONCAWE, 2002).

O nível de turbulência depende do método a ser utilizado na hora do carregamento, quanto mais gotículas suspensas, maior a turbulência. Os principais métodos de carregamento para transporte são do tipo *Splash*, *Submerged* e *Bottom load*.

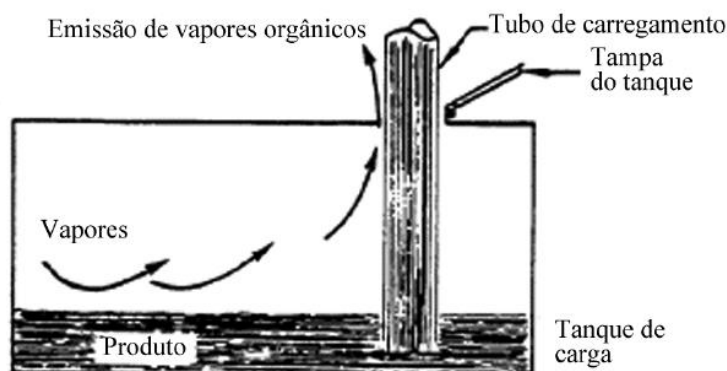
Segundo a U.S. EPA no método de carregamento por *splash*, o tubo de enchimento da plataforma é baixado apenas parcialmente no tanque de carga, por isso durante esta operação ocorrem turbulências significativas e muito contato entre vapor e líquido, resultando em altos níveis de geração e perda de vapor, como é possível observar na Figura 1. Já na opção de enchimento submerso, *submerged*, ao contrário do tipo *splash*, o tubo de enchimento é baixado completamente até quase atingir a base do tanque de carga, como demonstra a Figura 2, resultando em menor turbulência. No tipo *bottom*, também classificado como submerso, um tubo de enchimento permanente é fixado na parte inferior do tanque de carga, durante a maior parte do carregamento submerso a abertura do tubo de enchimento está abaixo do nível da superfície líquida. A turbulência líquida é significativamente controlada durante o carregamento submerso, exemplificado na Figura 3, resultando em uma geração de vapor muito menor do que a encontrada durante o carregamento por *splash* e relativamente menor do que o método *submerged* (U. S. EPA, 2020).

Figura 1 – Carregamento por tubo não submerso tipo *splash*.



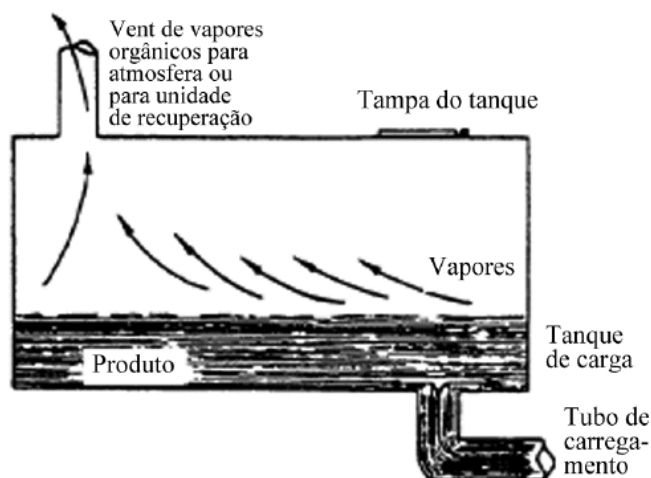
Fonte: Adaptado de U. S. EPA, 2020.

Figura 2 – Carregamento por tubo submerso tipo *submerged*.



Fonte: Adaptado de U. S. EPA, 2020.

Figura 3 – Carregamento por tubo submerso tipo *bottom*.



Fonte: Adaptado de U. S. EPA, 2020.

3.4. TANQUES DE ARMAZENAMENTO

Para que se torne viável entender como se dão as emissões atmosféricas advindas dos tanques, primeiro, é necessário compreender o funcionamento dos tanques de armazenagem e de seus dispositivos. A emissão proveniente dos tanques é classificada como pontual e de estocagem.

Tanques de armazenamento podem ser encontrados em diversos segmentos de indústrias, como refinarias de petróleo, petroquímicas, de fabricação de produtos químicos, operações de armazenamento e transferência a granel e outras indústrias que consomem ou produzem líquidos orgânicos. Existem seis tipos de tanques de armazenamento: teto fixo (vertical e horizontal), teto flutuante externo, teto flutuante externo em forma de domo (ou coberto), teto flutuante interno, espaço de vapor variável e de pressão (baixa e alta) (U.S. EPA, 2020).

A norma N-270 da Petrobras (PETROBRAS, 2020) expõe quais tipos tanques são indicados para armazenagem de determinados produtos, como detalha a Tabela 3. Os reservatórios recomendados para utilização no segmento de indústria abordado por este trabalho são os tanques verticais de teto fixo, teto flutuante interno ou teto flutuante externo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2000).

Tabela 3 – Tipos de tanques recomendados pela norma N-270 para armazenamento de alguns hidrocarbonetos.

| Produto Armazenado | Tipo de Tanque |
|---|--|
| Produtos leves da faixa de gasolina e nafta; e petróleo cru | Tanque atmosférico de teto flutuante externo; Tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno. |
| Gasolina de Aviação | Tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno. |
| Álcool etílico hidratado e Metanol | Tanque atmosférico de teto flutuante externo; Tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno. |
| Óleo diesel classes I e II | Tanque atmosférico de teto flutuante externo; Tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno. |
| Querosene de Aviação | Tanque atmosférico de teto fixo; Tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno. |
| Produtos da faixa de querosene ou mais pesados, tais como: a) querosene; b) óleo diesel classe III; c) resíduo de vácuo; d) diesel do FCC; e) óleo combustível; f) resíduos; g) óleo lubrificante; h) asfalto e cimento asfáltico; i) lastro de navio. | Tanque atmosférico de teto fixo. |

Fonte: Adaptado de PETROBRAS, 2014.

Apesar de sutil, de acordo com a U.S. EPA (2020), a cor e a integridade do costado interferem bastante no volume de emissões atmosféricas. Na questão da condição do costado e do teto, tanques com indícios de ferrugem, sendo estes leves ou mais densos, que recobrem a pintura original possuem maior potencial de emissão. Entretanto, em tanques de teto flutuante interno a condição do costado interno do tanque também interfere na volatilização e emissão do produto armazenado. A pintura externa do tanque pode ser de diferentes cores, o fator de absorção de radiação térmica, ou energia luminosa, chamado de α varia conforme a tinta escolhida. A Tabela 4 ilustra as cores com seus respectivos fatores de absorção, a tinta “nova” é aquela em que o brilho ainda permanece intacto, já a pintura “antiga” possui superfície visivelmente desbotada e opaca (U.S. EPA, 2020).

Tabela 4 – Tipos de pinturas e fatores α do revestimento dos tanques e tetos.

| Cor | Tipo | Fator α em função da condição do revestimento | |
|----------|----------------|--|---------------|
| | | Bom (novo) | Ruim (antigo) |
| Branco | - | 0,17 | 0,34 |
| Alumínio | Especular | 0,39 | 0,49 |
| | Difuso | 0,60 | 0,68 |
| | Sem pintura | 0,10 | 0,15 |
| Bege | - | 0,35 | 0,49 |
| Preto | - | 0,97 | 0,97 |
| Marrom | - | 0,58 | 0,67 |
| Cinza | Claro | 0,54 | 0,63 |
| | Médio | 0,68 | 0,74 |
| Verde | Escuro | 0,89 | 0,91 |
| Vermelho | Primer | 0,89 | 0,91 |
| Ferrugem | Óxido de ferro | 0,38 | 0,50 |

Fonte: Adaptado de U.S. EPA, 2020.

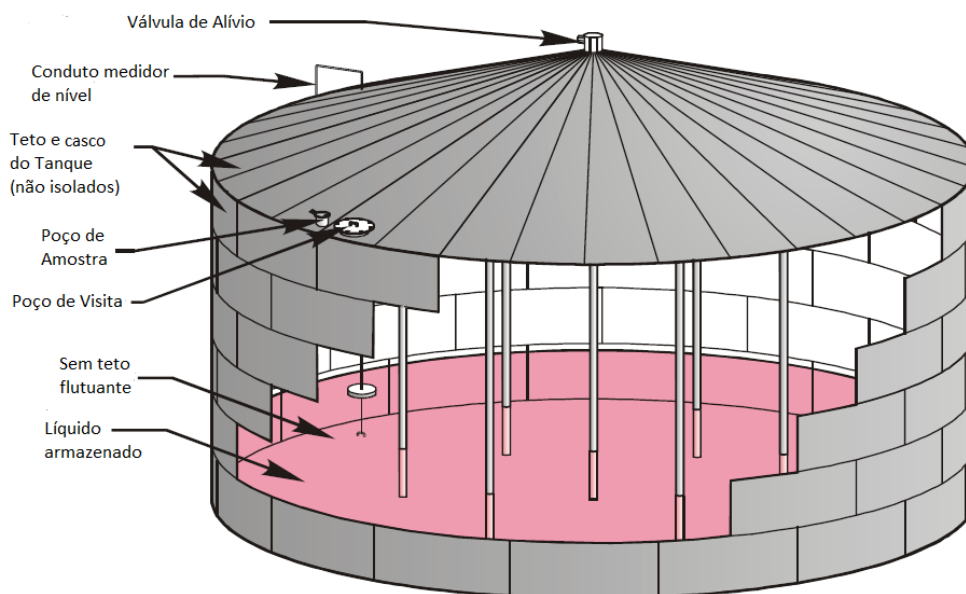
3.4.1. Tanques de Teto Fixo

Os tanques de teto fixo consistem em uma armação de aço cilíndrica, com um teto permanentemente fixado, que pode variar de formato, sendo cônico, domo ou plano; como pode ser observado na Figura 4. Estes tanques são os mais econômicos para construir e são considerados como o equipamento mínimo aceitável para armazenamento de compostos orgânicos líquidos (U. S. EPA, 2007).

Este modelo com o teto permanentemente fixado é ventilado livremente ou equipado com um sistema de ventilação de pressão/vácuo, que pode ser estabelecido com a utilização de uma válvula adequada. Este último permite que os tanques operem com uma leve pressão interna ou vácuo para evitar a liberação de vapores durante pequenas mudanças de temperatura, pressão ou nível de líquido. Além disso, os tanques de teto fixo podem ter aberturas ou escotilhas adicionais, chamadas de ventilações de emergência, para fornecer capacidade de fluxo de ventilação aumentada em caso de pressão excessiva no tanque (U. S. EPA, 2007).

A composição da atmosfera dentro de um tanque de teto fixo é uma mistura de nitrogênio, oxigênio e vapores de compostos orgânicos, estes são formados pela volatilização do produto armazenado no tanque. Durante o enchimento, a mistura de hidrocarbonetos e ar acima da superfície do líquido é liberada para a atmosfera pelas válvulas de alívio do teto do tanque. O gás tem a mesma composição da atmosfera interna do tanque, saturada de hidrocarbonetos. A evaporação do líquido estocado ocorre na superfície do líquido até que o espaço do vapor seja saturado (JORDAN, *et al.*, 1990 *apud* MARTINS, 2004).

Figura 4 – Imagem ilustrativa de um tanque de teto fixo.



Fonte: Adaptado de U.S. EPA, 2020.

3.4.2. Tanques de Teto Flutuante

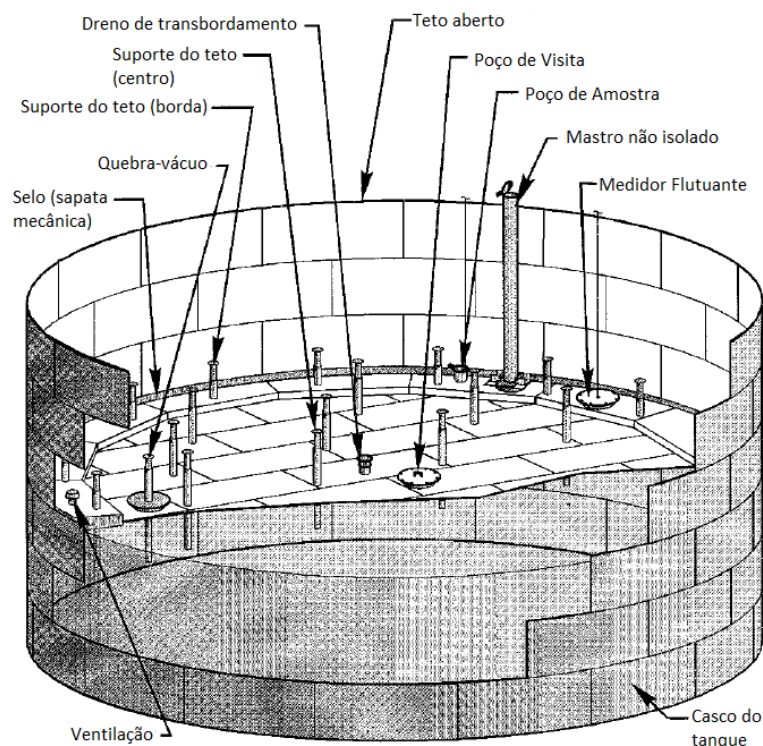
3.4.2.1. Teto Flutuante Externo

Os tanques de teto flutuante externo são estruturas compostas por um casco cilíndrico de aço, que é aberto na parte superior e equipado com um teto que pode flutuar livremente sobre a superfície do líquido armazenado. O teto flutuante se ajusta conforme as mudanças no nível do líquido dentro do tanque, garantindo que a superfície do líquido esteja completamente coberta, sendo equipado com um selo anexado ao perímetro todo do teto, o sistema de vedação. Porém, há um espaço que permanece entre a vedação e a parede do tanque, promovendo perdas evaporativas. Um sistema de selos consiste em apenas um selo primário ou em um selo primário e outro secundário que é montado em cima do primário. Estes selos podem ser de três tipos diferentes: sapata mecânica (*mechanical shoe*), que desliza com a parede do tanque; vedação de preenchimento, podendo ser montada para eliminar o espaço de vapor entre a vedação de borda e a superfície do líquido (*liquid-mounted*) ou para permitir um espaço de vapor entre a vedação de borda e a superfície do líquido (*vapor-mounted*). Como os selos secundários são colocados por cima do primário para auxiliá-lo, esses só podem ser do tipo *liquid-mounted* ou

vapor-mounted, enquanto a sapata mecânica só pode ser utilizada como selo primário (U. S. EPA, 2020).

O projeto do teto flutuante externo é tal que as perdas evaporativas rotineiras do líquido armazenado são limitadas a dois tipos: perdas em repouso, causada por acessórios de deck, como válvulas, dispositivo corta-chamas e selos, e pelo sistema de vedação da borda; e perdas em operação, causadas pela movimentação do líquido, enchimento e esvaziamento do tanque. Devido à configuração aberta deste tanque, os efeitos do vento têm um impacto significativo nas perdas por evaporação (U. S. EPA, 2020). A Figura 5 ilustra como o sistema de teto e vedação funcionam.

Figura 5 – Imagem ilustrativa de um tanque de teto flutuante externo.



Fonte: Adaptado de U.S. EPA, 2020.

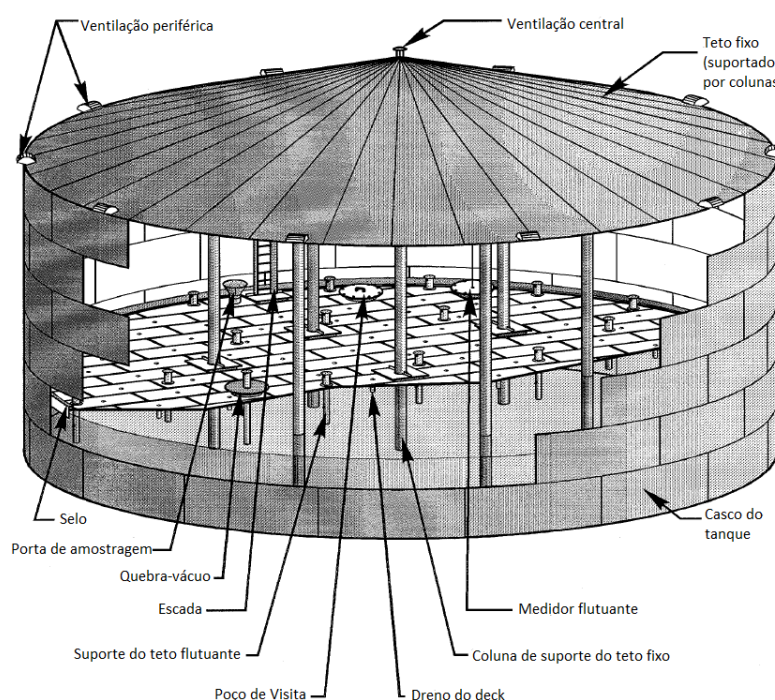
3.4.2.2. Teto Flutuante Interno

Tanques com teto do tipo flutuante interno geralmente são tanques de teto fixo permanente em que foi adicionado um deck flutuante em seu interior. Existem dois tipos básicos de tanques de teto flutuante interno: tanques nos quais o teto fixo é suportado por colunas

verticais dentro do tanque (teto fixo convertido em flutuante interno), e tanques com um teto fixo autoportante e sem colunas de suporte internas. O deck em tanques de teto flutuante interno sobe e desce com o nível do líquido e a maioria dos tetos flutuantes internos de alumínio atualmente em serviço possui decks sem contato, em que o suporte do teto flutuante acompanha a variação de altura do líquido. Neste tipo de tanque os selos do teto flutuante, tanto primário quanto secundário, funcionam e são do mesmo tipo dos tanques de teto flutuante externo. A Figura 6 ilustra as propriedades do tanque de teto flutuante interno (U. S. EPA, 2020).

As perdas por evaporação nos tetos flutuantes podem ser atribuídas aos acessórios do deck, às junções não soldadas do deck e ao espaço entre o teto flutuante e a parede do tanque. Geralmente, a quantidade de vapor que escapa do teto flutuante é significativamente menor do que aquela evaporada da superfície livre do líquido, o que resulta em um espaço de vapor acima do teto flutuante que normalmente não está saturado. O teto fixo, por sua vez, evita a ação do vento sobre a superfície do teto flutuante, o que reduz as perdas de vapor (U. S. EPA, 2020).

Figura 6 – Imagem ilustrativa de um tanque de teto fixo convertido em flutuante interno.



Fonte: Adaptado de U.S. EPA, 2020.

3.5. DISPOSITIVOS E ACESSÓRIOS

As emissões advindas dos dispositivos e acessórios são classificadas como difusas.

3.5.1. Respiros e Válvulas de Alívio

A maioria dos tanques atmosféricos requer um dispositivo de ventilação que permita a saída de grandes volumes de vapor sob pressões relativamente baixas e para isso são utilizados os respiros, que apenas liberam o produto volatilizado para a atmosfera. As válvulas de alívio de pressão/vácuo são amplamente utilizadas em tanques de armazenamento, incluindo tanques com teto fixo e com teto flutuante, para minimizar as perdas por evaporação. As válvulas evitam o acúmulo de pressão excessiva ou vácuo, que podem desequilibrar o sistema ou danificar o recipiente de armazenamento (PETROBLOG, 2015).

Os níveis de proteção de pressão e vácuo são controlados com palhetas ou molas e podem ser combinados para fornecer as configurações de pressão ou vácuo necessárias. É comum combinar sistemas de palheta e mola em uma única unidade, ou seja, as configurações de pressão requerem uma seção de mola, enquanto as configurações de vácuo usam o método de palheta (U. S. EPA, 2007).

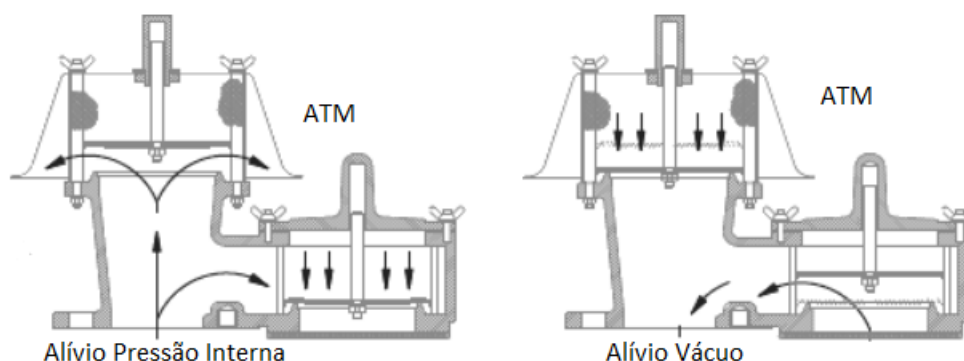
Na Figura 7 observa-se a simples construção de um respiro, na Figura 8 é possível compreender o funcionamento de uma válvula de alívio.

Figura 7 – Ilustração de um respiro simples.



Fonte: Adaptado de Wermac.org, 2024.

Figura 8 – Ilustração de uma válvula de alívio.

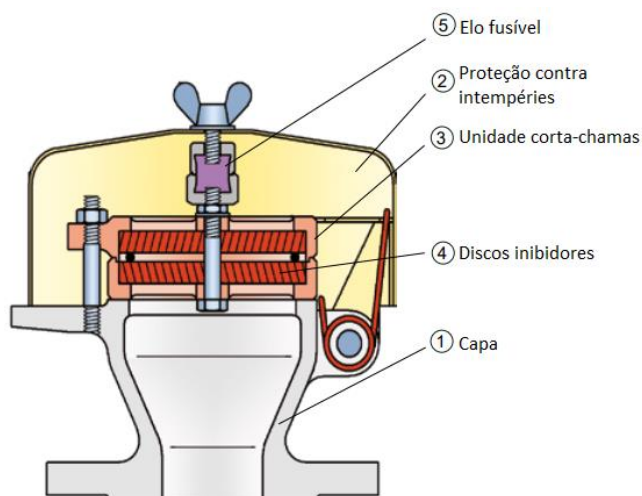


Fonte: Adaptado de Wermac.org, 2024.

3.5.2. Dispositivos Corta-chamas

Corta-chamas, também conhecidos como "inibidores de chama", são projetados para prevenir a transmissão de chama permitindo ainda assim o fluxo de gás e/ou líquido. Quando uma mistura entra em ignição em um tubo, por exemplo, a chama se propaga em direção à mistura não queimada, ou sejam ao combustível armazenado. A expansão em volume da mistura queimada comprime a mistura não queimada e acelera a chama. A largura e o comprimento da lacuna do disco do inibidor de chama determinam sua capacidade de extinção. Quanto mais estreita e longa for a lacuna, maior será a eficácia de extinção. Quanto mais ampla e curta for a lacuna, menor será a perda de pressão. Experimentos podem determinar a solução ótima entre as duas condições. Entretanto, caso a chama se estabilize dentro do dispositivo, o elo fusível derreterá e permitirá que a cobertura contra intempéries acionada por mola se mova para a posição aberta (PETROBLOG, 2015). O dispositivo corta-chamas e o disco inibidor podem ser observados na Figura 9.

Figura 9 – Modelo de corta-chamas.



Fonte: Adaptado de PROTEGO BE/HK, 2024.

3.6. INSTRUMENTOS E TECNOLOGIAS PARA ABATIMENTO DE COV_s

3.6.1. Unidade de Recuperação de Voláteis

As Unidades de Recuperação de Voláteis (URVs) são tecnologias aplicadas no abatimento de emissões com foco no tratamento dos voláteis presentes nos gases emitidos. As URVs e os pós-queimadores estão previstas no guia da Melhor Tecnologia Prática Disponível da CETESB (2014). Porém os incineradores têm como propósito destruir os COVs da corrente gasosa.

3.6.1.1. Adsorção

O processo de adsorção consiste na aderência física de hidrocarbonetos aos poros ativados da superfície de um sólido, como o carvão ativado. A adsorção física ocorre quando as moléculas poluidoras são fixadas nos poros do meio adsorvente por uma atração intermolecular fraca, dipolo-dipolo ou também chamada forças de Van der Waals (HUNTER e OYAMA, 2000). O carbono possui capacidade de adsorção limitada, então para que o processo

possa ser contínuo é preciso a instalação de pelo menos dois vasos (“leitos”) contendo carvão ativado (CONCAWE, 2002).

A concentração de COVs no fluxo de entrada do processo de adsorção influencia o quão difícil vai ser o tratamento. É preciso aumentar o nível de concentração de uma corrente gasosa para que esta tenha condições de ser limpa por um sistema de adsorção pequeno (KHAN e GHOSHAL, 2000).

Algumas das vantagens do sistema de adsorção são a possibilidade de recuperar o poluente e reutilizá-lo no processo produtivo e a extensa gama e diferentes concentrações de poluentes que podem ser tratados por este método, além disto, se bem executado, um sistema de adsorção pode atingir 98% ou mais de eficiência. Entretanto, nem todo hidrocarboneto é adequado para adsorção, podendo ocorrer problemas de corrosão com alguns solventes orgânicos, por exemplo cetonas e compostos halogenados (HUNTER e OYAMA, 2000).

Adsorvedores geralmente são combinados a outros sistemas, condensadores podem ser utilizados para reduzir a concentração do poluente a um nível desejado e para diminuir a temperatura no sistema, como a adsorção é um processo exotérmico que libera calor, garantir que o fluxo gasoso possua umidade permite um melhor controle deste processo. Porém, possuindo dois vasos adsorventes, é possível fazer um revezamento entre os modos de adsorção e regeneração ou dessorção, utilizando-se uma corrente aquecida de vapor d’água ou fazendo vácuo no sistema, de maneira tal que o processo de adsorção é revertido (HUNTER e OYAMA, 2000).

3.6.1.2. Absorção

O processo de absorção se baseia na transferência de poluentes de uma corrente gasosa para uma corrente líquida solvente. Essa transferência acontece devido à diferença de pressão entre o poluente na corrente gasosa e sua solubilidade no líquido. A escolha do solvente para o poluente é crucial para determinar a eficácia do processo, normalmente são escolhidos os altamente solúveis. Existem dois tipos de absorção: a química, que envolve a reação do poluente com o solvente, e a física, que ocorre apenas pela solubilidade (HUNTER e OYAMA, 2000).

Os sistemas de absorção são muito eficazes, removendo mais de 98% dos poluentes presentes nas correntes gasosas. Em alguns casos, a eficiência desse processo pode ser melhorada adicionando-se substâncias como água do mar, cloro, hipoclorito, ácido clorídrico, hidróxido de sódio ou bicarbonato de sódio (HUNTER e OYAMA, 2000). Isso ocorre em uma coluna de absorção projetada para oferecer a área de contato entre líquido e vapor necessária para promover a transferência de massa (KHAN e GHOSHAL, 2000). O sistema em si não é extenso, mas pode ser diminuído com o uso de um líquido absorvente (absorção química), porém, apesar da redução no tamanho, esta técnica inviabiliza a recuperação do poluente, pois este já reagiu e formou outros compostos (HUNTER e OYAMA, 2000).

Entretanto esta tecnologia pode ter sua eficiência um pouco alterada, pois a absorção não é apropriada para tratar correntes de vapor com diferentes compostos orgânicos em sua composição, pois é difícil encontrar um líquido solvente que possa absorver diferentes substâncias de forma eficaz. (CONCAWE, 2002; HUNTER e OYAMA, 2000).

3.6.1.3. Condensação

Condensação é o processo de liquefação de compostos ou contaminantes condensáveis, seja resfriando o fluxo de gás com baixas temperaturas ou aplicando pressurização até que um ou mais componentes se separem da mistura. Isso acontece quando a pressão parcial do gás excede a pressão de vapor de cada um de seus componentes, passando assim para o estado líquido (HUNTER e OYAMA, 2000).

Existem dois tipos principais de condensadores: contato e sem contato. O mais comum é o condensador sem contato, também conhecido como condensador de superfície, onde o calor é transferido através de uma barreira (geralmente um tubo ou placa de metal) que separa o fluxo de gás do líquido refrigerante. Exemplos de condensadores sem contato são: trocadores de calor de casco/tubo e trocadores de calor de placas. Nos trocadores de calor casco/tubo, o líquido em baixa temperatura flui através dos tubos, enquanto o fluxo de gás passa pelo casco externo aos tubos, e os constituintes condensáveis formam um filme na superfície externa dos tubos. Se houver pouca umidade no fluxo de gás, sistemas de condensação sem contato podem permitir a recuperação de produtos puros em situações em que apenas um composto condensável está presente no fluxo de gás (CONCAWE, 2002; HUNTER e OYAMA, 2000).

A temperatura do trocador de calor de contato direto é crucial para a eficiência do processo de recuperação. A eficiência da condensação também depende da pressão de vapor e da concentração do poluente na corrente gasosa, bem como da pressão de operação do sistema. Para uma eficiência superior a 90%, pode ser necessário instalar um segundo estágio de condensação, como um condensador criogênico usando nitrogênio líquido, o que aumenta o custo do processo (CONCAWE, 2002; HUNTER e OYAMA, 2000). Porém, se uma parte significativa do fluxo gasoso é constituída por compostos que solidificam na temperatura de operação, um condensador do tipo casco/tubo não será efetivo, pois a área de transferência de calor irá se sujar rapidamente e o condensador será entupido (KHAN e GHOSHAL, 2000).

3.6.1.4. Separação por Membrana

Neste processo os compostos orgânicos são separados da corrente gasosa por um filtro de membrana semipermeável e é geralmente aplicado em fluxos gasosos com compostos poluentes. Essas membranas são projetadas para permitir a passagem preferencial de moléculas de ar ou poluentes, resultando em uma corrente de poluentes mais concentrada em um dos lados da membrana. Um sistema comum envolve a pressurização da corrente de gás poluído para remover o máximo possível de poluentes por condensação, seguido pelo direcionamento da corrente de gás resultante através da membrana, a qual facilita a passagem das moléculas de ar enquanto restringe a passagem das moléculas de compostos orgânicos (HUNTER e OYAMA, 2000).

Esta tecnologia não só possui algumas vantagens interessantes, como as misturas de hidrocarbonetos podem ser efetivamente separadas por uma membrana de Polieterimida sem revestimento de borracha de silicone, mas também sua eficiência pode chegar a 99% (KHAN e GHOSHAL, 2000; HUNTER e OYAMA, 2000). Outra vantagem é que o método de separação por membranas pode ser utilizado em circunstâncias onde a adsorção não é adequada. Isso é especialmente relevante quando os compostos têm elevado peso molecular ou tendem a polimerizar na superfície do carbono ativado (HEBERT, 1997 *apud* BELEM E VARGAS, 2008).

3.6.1.5. Pós-queimador

Os queimadores ou "*flares*²" incineram os gases advindos de algum processo na forma de combustão completa, e liberam para a atmosfera os produtos gasosos desta combustão. Esta ferramenta é na maioria das vezes utilizada, de forma secundária, como um sistema de controle para possíveis transtornos no processo produtivo em que gases muito poluentes precisam ser rapidamente queimados para não serem expelidos diretamente no meio ambiente (HUNTER e OYAMA, 2000). Os dois tipos de sistemas de recuperação de energia térmica usados atualmente são os regenerativos e os recuperativos. Ambos usam o calor da corrente de gás de exausto para aquecer a corrente de gás entrando, antes de passar pela zona de combustão (KHAN e GHOSHAL, 2000).

A queima de COVs é realizada na faixa de temperatura de 1300 °F a 1800 °F (ou 704 – 982 °C). A temperatura de operação do *flare* varia conforme a necessidade de destruição do gás presente no processo. Temperaturas de operação próximas de 982 °C podem produzir elevados níveis de óxidos de nitrogênio, gerando outro problema ambiental, além de também formar CO e CO₂ que são liberados para a atmosfera (KHAN e GHOSHAL, 2000). É necessário controlar o aumento da pressão, da temperatura e da infiltração de ar ambiente afim de não permitir que o fluxo gasoso se torne, pois os gases a serem queimados já estão acima do limite explosivo (HUNTER e OYAMA, 2000).

3.6.1.6. Análise dos Métodos de Recuperação/Destruição de COVs

Após detalhamento e compreensão básica das possíveis tecnologias para recuperação de COVs, a Tabela 5 compila as vantagens e desvantagens de cada método de recuperação e destruição de compostos voláteis supracitados, citando ainda eficiência de remoção, resíduo gerado pela tecnologia aplicada e o custo de operação da mesma.

² Flare: A tocha (flare) é usada para queimar gases inflamáveis excedentes ou perigosos, evitando sua liberação na atmosfera.

Tabela 5 – Análise das várias técnicas de Recuperação de COV.

| Técnicas de Controle | Custo anual de operação (US\$/m³ p/ minuto) | Eficiência de Remoção (%) | Resíduo Gerado | Vantagens | Desvantagens |
|---|--|----------------------------------|---|---|---|
| Oxidação térmica (destruição) | Recuperativo 0,42 – 2,55 Regenerativo 0,56 – 4,25 | 95 – 99 | Produtos de combustão | Possível recuperação de energia (máximo de 85%) | Halogenados e outros podem requerer equipamento adicional de controle do afluente |
| Condensação (recuperação) | 0,56 – 3,40 | 70 – 85 | Condensado | A recuperação dos produtos pode compensar o custo operacional | Requer manutenção rigorosa. É recomendado para materiais com pontos de bolhas acima de 38 °C. |
| Absorção (recuperação) | 0,70 – 3,40 | 90 – 98 | Água residual | A recuperação dos produtos pode compensar o custo operacional | Requer manutenção rigorosa. Pode requerer pré-tratamento dos COVs.. |
| Adsorção com carvão ativado (recuperação) | 0,28 – 0,99 | 80 – 90 | Carvão gasto e produtos orgânicos coletados | A recuperação dos produtos pode compensar o custo operacional | Suscetível a umidade, e alguns compostos (cetonas, aldeídos e ésteres) podem entupir os poros, diminuindo a eficiência. |
| Separação por membrana (recuperação) | 0,42 – 0,85 | 90 – 99 | Membranas exaustas | A recuperação dos produtos pode compensar o custo operacional | As membranas são de difícil obtenção. |

Fonte: Adaptado de KHAN e GHOSHAL, 2000.

3.6.2. *Leak Detection and Repair*³

A Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA) desempenha um papel crucial no monitoramento e regulamentação de emissões para minimizar seu impacto na saúde pública e no meio ambiente. Identificar e atuar sobre essas fontes de vazamentos por meio de manutenção adequada, monitoramento e atualizações tecnológicas são passos essenciais para reduzir a poluição do ar proveniente de operações industriais. Estudos anteriores da EPA estimaram que válvulas e conectores são responsáveis por mais de 90% das emissões fugitivas controláveis, que são originadas por apenas, aproximadamente, 0,13% dos componentes de tubulação (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA, 2007). As refinarias de petróleo e instalações de fabricação de produtos químicos lidam com substâncias altamente voláteis, o que aumenta a chance de vazamentos fugitivos para o meio ambiente.

No caso, o *Leak Detection and Repair* (LDAR) é uma prática de trabalho projetada para identificar equipamentos com vazamentos, para que as emissões possam ser reduzidas por meio de reparos ou substituindo estes equipamentos por componentes "livres de vazamentos". E depois da detecção do vazamento, o equipamento em questão deve ser substituído dentro de um prazo especificado.

Implantar, operar e manter registro do programa LDAR é uma indicação da própria CETESB como aplicação da Melhor Tecnologia Prática Disponível em empreendimentos industriais, como tancagens de combustíveis, plantas químicas, refinarias de petróleo e afins (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB, 2014).

3.6.2.1. Componentes abrangidos pelo LDAR

As refinarias de petróleo e plantas químicas e petroquímicas utilizam diversos equipamentos para o transporte e controle de fluidos em suas tubulações, cada um com pontos específicos susceptíveis a vazamentos, os acessórios neste trabalho estão citados a seguir:

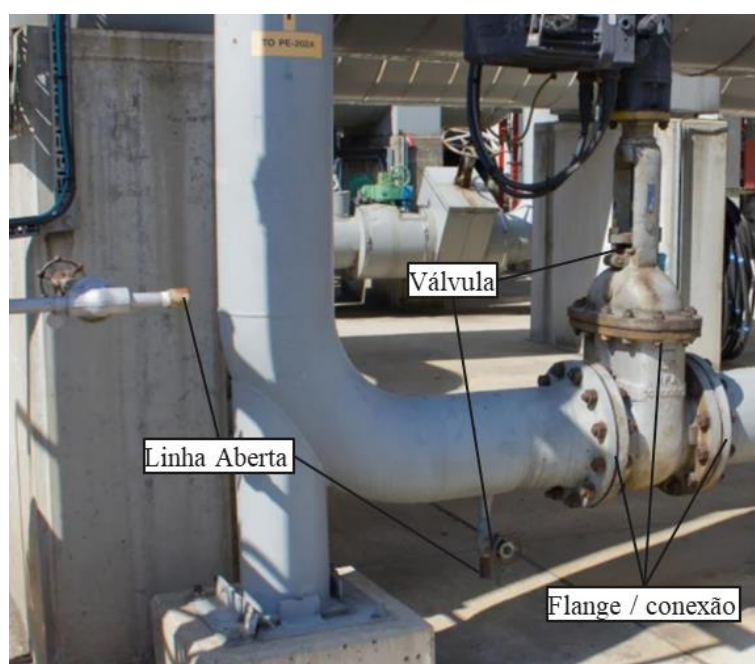
Os acessórios em que o LDAR detecta vazamento e que estão abordados neste trabalho são: as bombas que são usadas para mover fluidos de um ponto a outro e possuem maior chance

³ Leak Detection and Repair (LDAR): Detecção e Reparo de Vazamentos, é um programa sistemático usado na indústria para identificar, monitorar e corrigir vazamentos de substâncias, especialmente gases e líquidos, em instalações de produção e processamento.

de vazamento em seus selos, onde há maior risco devido ao desgaste das vedações; as válvulas que possuem a função de restringir ou permitir o movimento de fluidos e são o equipamento de processo mais comum na indústria, sendo o vazamento relacionado ao anel de vedação e ao corpo da válvula; as flanges e conexões que são usadas para unir tubulações e equipamentos de processo, sendo seus vazamentos oriundos de falhas nas juntas de vedação ou de parafusos apertados inadequadamente; as linhas abertas são tubulações ou mangueiras abertas ao ambiente, sendo seus vazamentos em decorrência do ponto onde a linha está aberta e são geralmente controlados por tampas, plugues e flanges (U.S. EPA, 2007).

A Figura 10 ilustra uma tubulação típica de uma planta industrial com indicação de alguns equipamentos e a Figura 11 indica a localização do selo da bomba.

Figura 10 – Tubulação industrial com indicação de flanges (conexões), linhas abertas e válvulas.



Fonte: Adaptado de Enesens, 2015.

Figura 11 – Imagem de uma bomba centrífuga com indicação do selo de vedação.



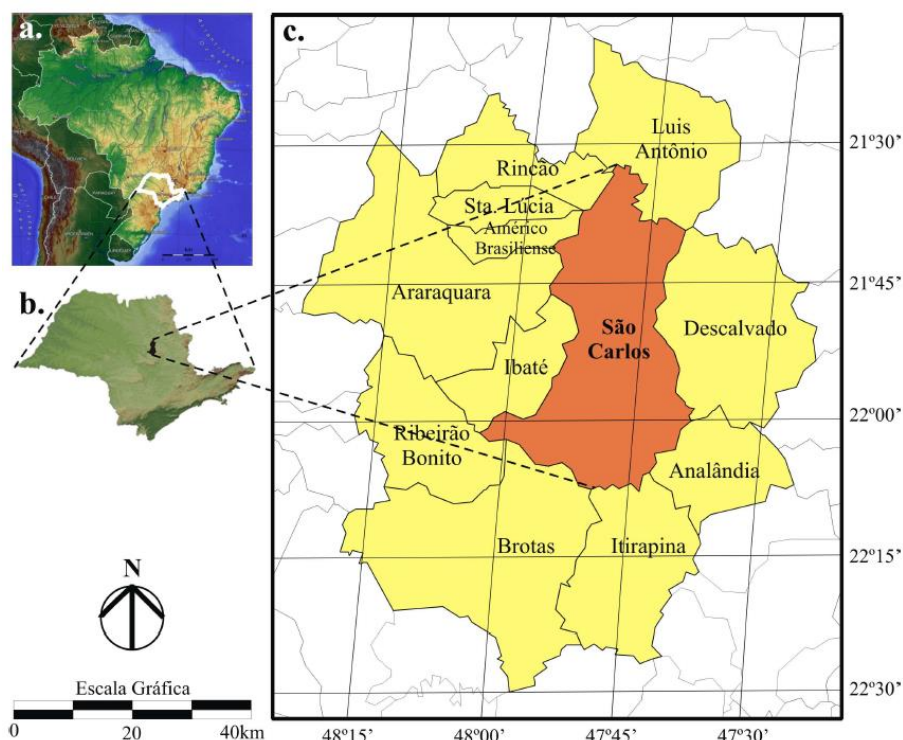
Fonte: Adaptado de MHT Shopping, 2024.

4. METODOLOGIA

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS

O município de São Carlos está situado na região central do estado de São Paulo, entre as coordenadas geográficas: Longitude O 47°30' e 48°30', Latitude S 21°30' e 22°30', com altitude média de 856 metros. Possui área territorial de aproximadamente 1.137 km², com área urbana de aproximadamente 67 km². Sua população é de 254.857 habitantes, sendo sua densidade demográfica de 224,17 hab/km² (IBGE, 2022). A Figura 12 ilustra melhor a localização referida.

Figura 12 – Localização geográfica do município de São Carlos (c), compreendendo sua localização no estado de São Paulo (b) e a localização deste no Brasil (a).

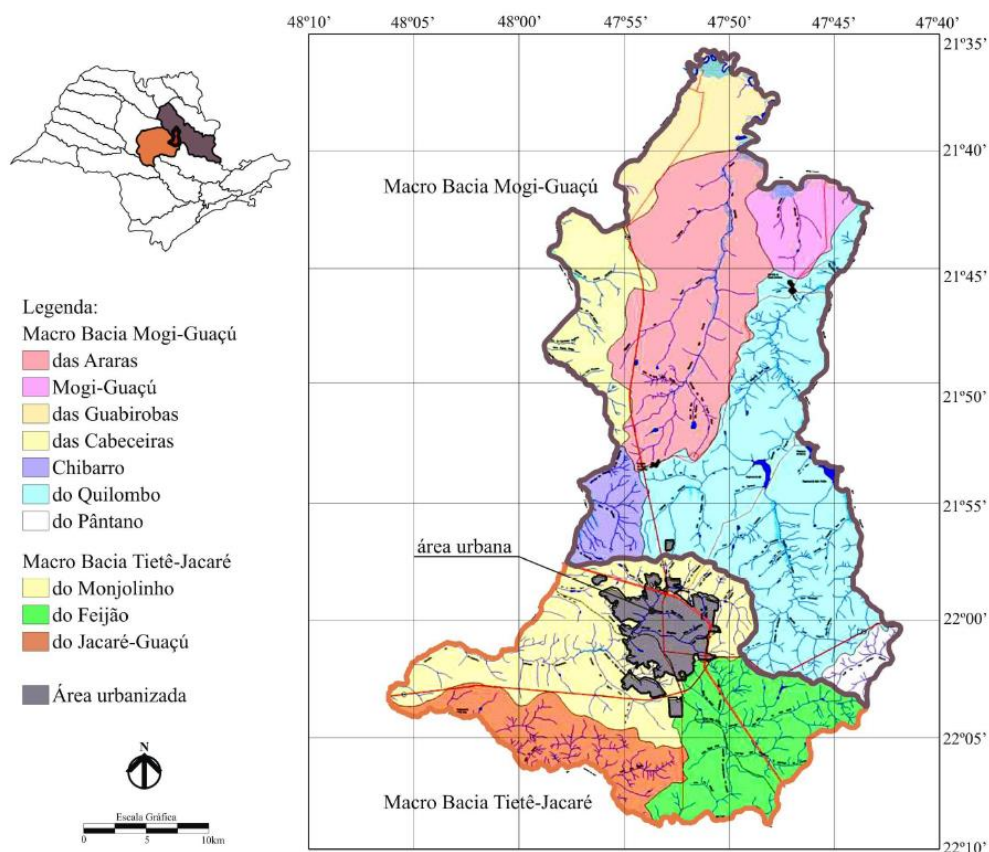


Fonte: Barbosa, 2009.

O município de São Carlos está situado em duas grandes bacias hidrográficas. Aproximadamente um terço de sua área, localizada na porção sul do território municipal, faz parte da macro bacia hidrográfica Tietê-Jacaré (UGRHI 13). Os dois terços restantes, que abrangem a porção norte do município, estão inseridos na macro bacia do rio Mogi-Guaçu (UGRHI 9) (BARBOSA, 2009).

A mancha urbana está localizada na porção sul do município, como é possível observar na Figura 13, juntamente com as macros bacias hidrográficas que compõem a região.

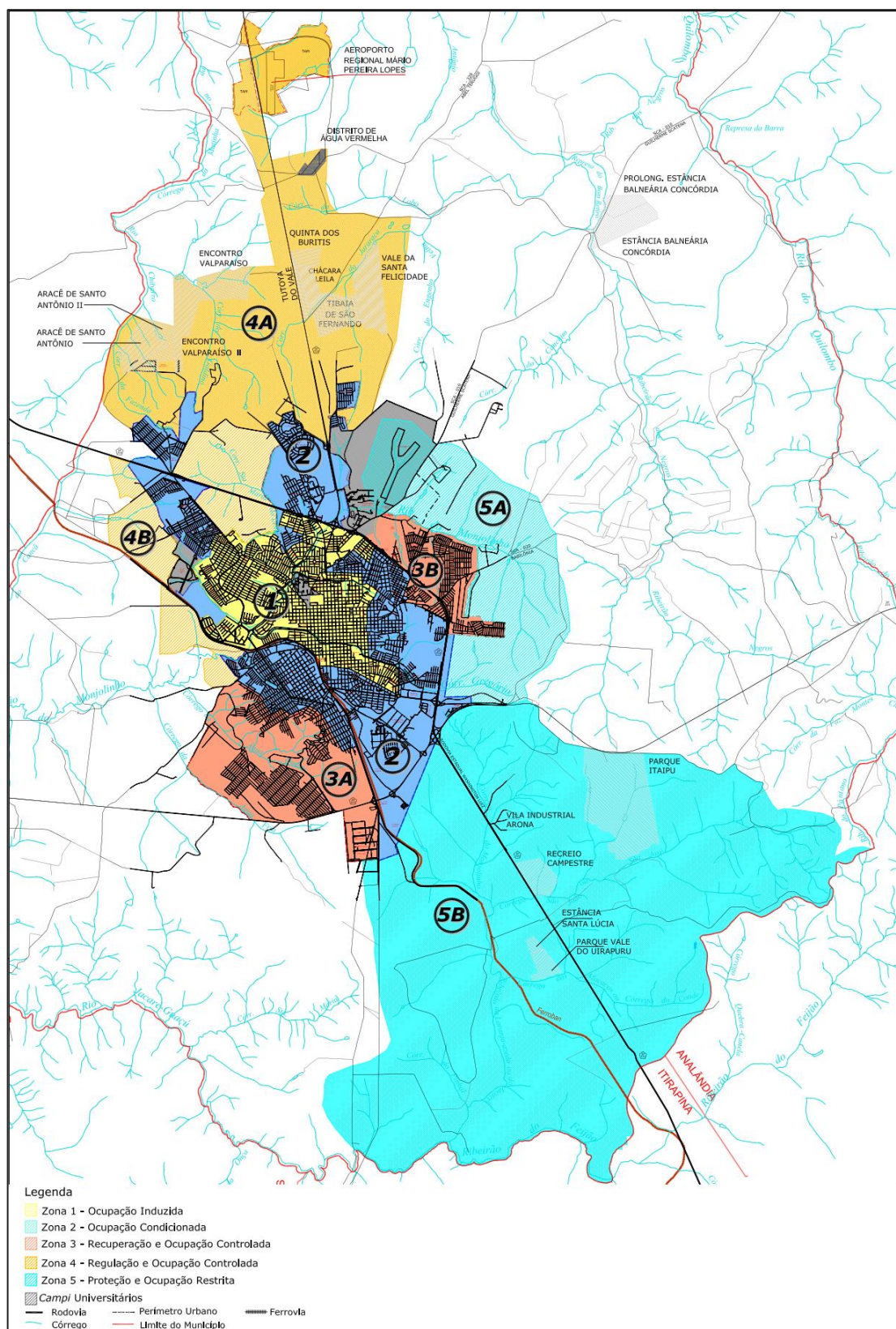
Figura 13 – Mapa ilustrativo das macros bacias que constituem o município de São Carlos, com indicação da área urbana em cinza.



Fonte: Barbosa, 2009.

O plano diretor de São Carlos de 2005 divide a mancha urbana em diversas zonas, as macrozonas 1, 2, 3A e 4B permitem a instalações industriais com observância de uma medida mitigadora: obtenção de licenciamento junto à CETESB. Sendo esta atendida pelo artigo 12 do Decreto Estadual 59113/13. As macrozonas citadas estão localizadas a noroeste da área urbana, como é possível observar na Figura 14.

Figura 14 – Zoneamento da Macrozona do Plano Diretor de São Carlos.



Fonte: Adaptado de São Carlos, 2016.

4.1.1. Caracterização do Empreendimento

Levando em consideração um parque de tancagem exemplo, o STS 08 que está localizado na região da Alamoia, na margem direita do Porto de Santos, possui 6 tanques destinados ao armazenamento de granéis líquidos, os quais estão espalhados pelo terreno arrendado como mostra a Figura 15, e têm uma área superficial de 152.324 m² (AUTORIDADE PORTUÁRIA DE SANTOS, 2020).

Figura 15 – Área STS 08 do Porto de Santos.



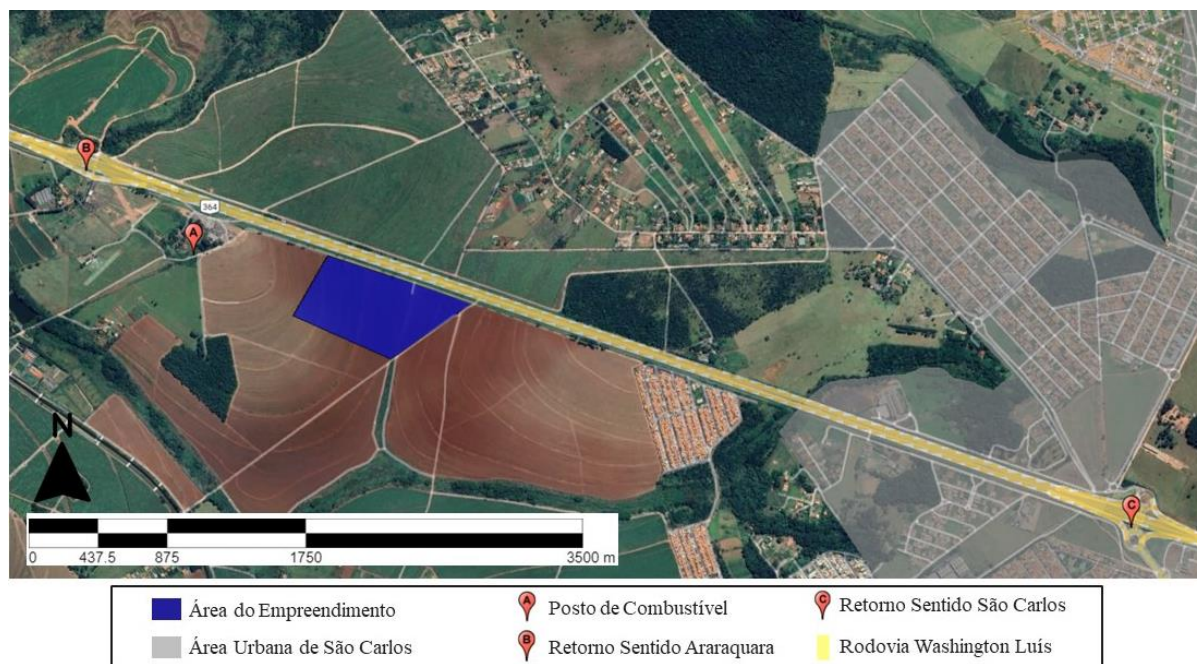
Fonte: Autoridade Portuária de Santos, 2020.

Com isto, o empreendimento simulado neste estudo não requer uma área extensa para acomodação, sendo suficiente um terreno plano de 140.000 m². Neste sentido, a região 4B foi a escolhida para instalação do empreendimento fictício, pois é a macrozona que se encontra mais distante do conglomerado urbano e das áreas residenciais rurais e que promove menores impactos à população local. Além disso, este local foi escolhido por apresentar total integração com a Rodovia Washington Luís, também conhecida como SP-310, e estar localizado entre dois retornos desta mesma rodovia, o que facilitaria a logística dos caminhões-tanque para carregamento e descarregamento dentro da planta.

A localização exata escolhida é Longitude 21°58'9.03"S e Latitude 47°57'34.97"O, próximo ao km 243 da SP-310, o terreno possui 1,63 km de extensão e 140.000 m² de área. A

Figura 16 mostra como ficaria a localização do empreendimento na área rural de São Carlos, compreendida pela macrozona 4B.

Figura 16 – Imagem ilustrativa da localização do empreendimento em relação à mancha urbana de São Carlos, retirada do programa Google Earth.



Fonte: Autor (2024).

O polígono com cor azul mostra o terreno de instalação da planta, já o polígono em cinza claro é a mancha urbana do município de São Carlos. Alguns outros pontos foram evidenciados com marcadores, o ponto A diz respeito a um posto de combustível presente próximo ao empreendimento; e os marcadores B e C salientam os retornos de rodovia supracitados. O posto do ponto A mostra que não só há possíveis clientes do parque de tancagem próximos, como pode haver muitos outros a médias e longas distâncias.

4.2. AVALIAÇÃO DE EMISSÕES

4.2.1. *Software*⁴ TANKS 4.09d

A simulação foi realizada utilizando o *software* TANKS 4.09d. Este programa foi desenvolvido e distribuído pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. EPA, 1999) e é de uso público, destinado a fins não comerciais. As equações básicas do *software* foram desenvolvidas pela API e podem ser encontradas, assim como os fatores de emissões dos poluentes, no documento *The Air Pollution AP-42* (U.S. EPA, 2020). O programa permite estimar as emissões de tanques de armazenamento de líquidos orgânicos, derivados de petróleo e óleo cru.

Como condição inicial para cada cenário é preciso colocar como dado de entrada no *software* TANKS 4.09d informações como: características construtivas dos tanques como cor, condição do costado, geometria do teto, tipo de selo, tipo e quantidade de acessórios; conteúdo líquido a ser armazenado, taxa de movimentação do produto, dados meteorológicos da localização do empreendimento. Cada tipo de tanque possui parâmetros diferentes que precisam ser preenchidos para executar a simulação, estes estão descritos na Tabela 6.

⁴ Software: conjunto de instruções, dados ou programas usados para operar computadores e executar tarefas específicas.

Tabela 6 – Parâmetros de entrada do *software* TANKS 4.09d para os tipos de tanques verticais.

| Teto Fixo | Teto Flutuante Externo | Teto Flutuante Interno |
|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Altura do costado (ft) | Diâmetro (ft) | Diâmetro (ft) |
| Diâmetro (ft) | Volume do tanque (gal) | Volume do tanque (gal) |
| Altura máxima do líquido (ft) | Giros por ano | Giros por ano |
| Volume de trabalho (gal) | Taxa de transferência (gal/ano) | Taxa de transferência (gal/ano) |
| Giros por ano | Condições internas do costado | Teto autossuportado |
| Taxa de transferência (gal/ano) | Cor do costado | Número de colunas |
| Aquecimento | Condição do costado | Diâmetro das colunas (ft) |
| Cor do costado | Tipo de teto | Condições internas do costado |
| Condição do costado | Categoria de acessórios de teto | Cor do costado |
| Cor do teto | Construção do tanque | Condição do costado |
| Condição do teto | Selo primário | Cor do teto |
| Tipo do teto | Selo secundário | Condição do teto |
| Altura do teto (ft) | - | Selo primário |
| Inclinação do teto (ft/ft) | - | Selo secundário |
| - | - | Tipo de deck |
| - | - | Categoria de acessórios de teto |

Fonte: Adaptado de Kolicheski *et al.*, 2023.

4.2.2. Tanques de Armazenamento Simulados

O estudo consistiu na realização de simulações das emissões de COV de duas tipologias de tanques (teto fixo e teto flutuante interno), mantendo constante os parâmetros relacionados ao dimensionamento dos tanques, distribuição de volumes no parque de tancagem e cor e integridade do costado e do teto dos tanques. Para representar a realidade dos parques de armazenamento, com tanques de dimensões reais, os valores utilizados na simulação foram retirados de uma planta petroquímica, que não pôde ser identificada, que trabalha com combustíveis, solventes e resina, e atua com 50 reservatórios de tancagem, distribuídos em tanques de teto fixo e de teto flutuante, com volumes de 1.000 m³, 1.079 m³, 2.000 m³, 2.106 m³, 3.000 m³, 5.372 m³ e 10.380 m³. Neste trabalho, para melhor comparação entre os resultados,

foram empregados reservatórios com volumes de 1.000 m³, 2.000 m³, 3.000 m³ e 5.372 m³, sendo um tanque de cada volume para cada um dos produtos, gasolina e etanol, totalizando 8 tanques de teto fixo no cenário 1 e 8 tanques de teto flutuante no cenário 2.

Estes reservatórios, tanto de teto fixo quanto de teto flutuante, possuem costado e tetos na cor branca e em boas condições, pois de acordo com a U.S. EPA (2020) o costado metálico e sem pintura é a melhor opção em relação a absorção de radiação térmica, porém os tanques de costado e tetos brancos são tipicamente os mais utilizados em refinarias e empreendimentos de armazenamento de granéis líquidos.

Serão apresentadas, para os dois cenários, as dimensões físicas e volumétricas dos tanques, primeiramente em unidades do sistema internacional (SI) e posteriormente nas unidades de medida do sistema imperial usadas de entrada no programa TANKS.

4.2.2.1. Cenário 1 – Simulação de Tanques de Teto Fixo

Nas Tabelas 7 e 8 estão apresentados os dados volumétricos dos tanques e o respectivo produto simulado. A movimentação é referente à quantidade de produto movimentada pelo empreendimento em um ano, neste caso dividido entre os tanques destinados àquele combustível; giros por ano é relativo ao processo de enchimento e esvaziamento dos reservatórios e foi calculado através da relação entre a variação total de altura do tanque pela altura operacional máxima. Todos os tanques utilizados na simulação são constituídos por aço carbono, a cor da tintura é branca e o teto é do tipo cone, tanto os tanques quanto os tetos possuem condições boas.

Tabela 7 – Dados volumétricos dos tanques de teto fixo em SI.

| Tanque | Produto | Volume Tanque (m³) | Capacidade (m³) | Movimentação (m³/ano) | Giros por Ano |
|---------------|----------------|---------------------------|------------------------|------------------------------|----------------------|
| TQ-01 | Gasolina | 5.372,00 | 5.264,56 | 62.500 | 11,87 |
| TQ-02 | Gasolina | 3.000,00 | 2.940,00 | 62.500 | 21,26 |
| TQ-03 | Gasolina | 2.000,00 | 1.960,00 | 62.500 | 31,89 |
| TQ-04 | Gasolina | 1.000,00 | 980,00 | 62.500 | 63,78 |
| TQ-05 | Etanol | 5.372,00 | 5.264,56 | 62.500 | 11,87 |
| TQ-06 | Etanol | 3.000,00 | 2.940,00 | 62.500 | 21,26 |
| TQ-07 | Etanol | 2.000,00 | 1.960,00 | 62.500 | 31,89 |
| TQ-08 | Etanol | 1.000,00 | 980,00 | 62.500 | 63,78 |

Fonte: Autor (2024).

Tabela 8 – Dados volumétricos dos tanques de teto fixo em unidades do sistema imperial.

| Tanque | Produto | Volume Tanque (gal) | Capacidade (gal) | Movimentação (gal/ano) | Giros por Ano |
|---------------|----------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------------|
| TQ-01 | Gasolina | 1.419.132,00 | 1.390.749,34 | 16.510.750 | 11,87 |
| TQ-02 | Gasolina | 792.516,00 | 776.665,68 | 16.510.750 | 21,26 |
| TQ-03 | Gasolina | 528.344,00 | 517.777,12 | 16.510.750 | 31,89 |
| TQ-04 | Gasolina | 264.172,00 | 258.888,56 | 16.510.750 | 63,78 |
| TQ-05 | Etanol | 1.419.132,00 | 1.390.749,34 | 16.510.750 | 11,87 |
| TQ-06 | Etanol | 792.516,00 | 776.665,68 | 16.510.750 | 21,26 |
| TQ-07 | Etanol | 528.344,00 | 517.777,12 | 16.510.750 | 31,89 |
| TQ-08 | Etanol | 264.172,00 | 258.888,56 | 16.510.750 | 63,78 |

Fonte: Autor (2024).

Complementando os dados de entrada no TANKS, as Tabelas 9 e 10 contemplam os atributos físicos dos reservatórios.

Tabela 9 – Características físicas dos tanques de teto fixo em SI.

| Características Tanques | | | | Cone | |
|-------------------------|----------------------|------------------------------|--------------|------------|------------------|
| Tanque | Altura do Tanque (m) | Altura Máxima do Líquido (m) | Diâmetro (m) | Altura (m) | Inclinação (m/m) |
| TQ-01 | 18,75 | 18,38 | 19,10 | 2,56 | 0,27 |
| TQ-02 | 19,25 | 18,87 | 14,32 | 1,92 | 0,27 |
| TQ-03 | 14,75 | 14,46 | 13,37 | 1,79 | 0,27 |
| TQ-04 | 14,50 | 14,21 | 9,55 | 1,28 | 0,27 |
| TQ-05 | 18,75 | 18,38 | 19,10 | 2,56 | 0,27 |
| TQ-06 | 19,25 | 18,87 | 14,32 | 1,92 | 0,27 |
| TQ-07 | 14,75 | 14,46 | 13,37 | 1,79 | 0,27 |
| TQ-08 | 14,50 | 14,21 | 9,55 | 1,28 | 0,27 |

Fonte: Autor (2024).

Tabela 10 – Características físicas dos tanques de teto fixo em unidades do sistema imperial.

| Características Tanques | | | | | Cone | |
|-------------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|--------------------|
| Tanque | Altura do Tanque (ft) | Altura Máxima do Líquido (ft) | Altura Média do Líquido (ft) | Diâmetro (ft) | Altura (ft) | Inclinação (ft/ft) |
| TQ-01 | 61,52 | 60,28 | 30,14 | 62,66 | 8,39 | 0,27 |
| TQ-02 | 63,16 | 61,89 | 30,95 | 46,98 | 6,29 | 0,27 |
| TQ-03 | 48,39 | 47,42 | 23,71 | 43,86 | 5,88 | 0,27 |
| TQ-04 | 47,57 | 46,62 | 23,31 | 31,33 | 4,20 | 0,27 |
| TQ-05 | 61,52 | 60,28 | 30,14 | 62,66 | 8,39 | 0,27 |
| TQ-06 | 63,16 | 61,89 | 30,95 | 46,98 | 6,29 | 0,27 |
| TQ-07 | 48,39 | 47,42 | 23,71 | 43,86 | 5,88 | 0,27 |
| TQ-08 | 47,57 | 46,62 | 23,31 | 31,33 | 4,20 | 0,27 |

Fonte: Autor (2024).

Nas Figuras 17 a 20 estão apresentados a plotagem dos dados na interface do programa TANKS para os diferentes tamanhos de tanque. Nesta etapa, os únicos dados que variaram nas simulações de gasolina e etanol foram a movimentação por ano (lê-se *Net Throughput*) e os giros por ano (lê-se *Tournovers per Year*).

Figura 17 – Imagem ilustrativa do *software* TANKS com entrada dados de um tanque de teto fixo de 1000 m³.

Vertical Fixed Roof Tank

Identification

Physical Characteristics

Site Selection

Tank Contents

Monthly Calculations

Dimensions:

Roof Characteristics:

Shell Height (ft):

47,57

Color/Shade:

White/White (D)

Shell Diameter (ft):

31,33

Condition:

Good (D)

Maximum Liquid Height (ft):

46,62

Type:

Cone

Average Liquid Height (ft):

23,31

Height (ft):

4,2

Working Volume (gal):

258.888,56

Slope (ft/ft) (Cone Roof):

0,27

Turnovers per Year:

63,77551

Net Throughput (gal/yr):

16.510.750,00

Is Tank Heated?

No

Shell Characteristics:

Breather Vent Settings:

Shell Color/Shade:

White/White (D)

Vacuum Setting (psig):

-0,03

Shell Condition:

Good (D)

Pressure Setting (psig):

0,03

Copy

Run Report

Save

Close

Help

Fonte: Autor (2024).

Figura 18 – Imagem ilustrativa do *software* TANKS com entrada dados de um tanque de teto fixo de 2000 m³.

Vertical Fixed Roof Tank

Identification

Physical Characteristics

Site Selection

Tank Contents

Monthly Calculations

Dimensions:

Roof Characteristics:

Shell Height (ft):

48,39

Color/Shade:

White/White (D)

Shell Diameter (ft):

43,86

Condition:

Good (D)

Maximum Liquid Height (ft):

47,42

Type:

Cone

Average Liquid Height (ft):

23,71

Height (ft):

5,88

Working Volume (gal):

517.777,12

Slope (ft/ft) (Cone Roof):

0,27

Turnovers per Year:

31,887755

Net Throughput (gal/yr):

16.510.750,00

Is Tank Heated?

No

Shell Characteristics:

Breather Vent Settings:

Shell Color/Shade:

White/White (D)

Vacuum Setting (psig):

-0,03

Shell Condition:

Good (D)

Pressure Setting (psig):

0,03

Copy

Run Report

Save

Close

Help

Fonte: Autor (2024).

Figura 19 – Imagem ilustrativa do *software* TANKS com entrada dados de um tanque de teto fixo de 3000 m³.

Vertical Fixed Roof Tank

Identification

Physical Characteristics

Site Selection

Tank Contents

Monthly Calculations

Dimensions:

Roof Characteristics:

Shell Height (ft):

63,16

Color/Shade:

White/White (D)

Shell Diameter (ft):

46,98

Condition:

Good (D)

Maximum Liquid Height (ft):

61,89

Type:

Cone

Average Liquid Height (ft):

30,95

Height (ft):

6,29

Working Volume (gal):

776.665,68

Slope (ft/ft) (Cone Roof):

0,27

Turnovers per Year:

21,258503

Net Throughput (gal/yr):

16.510.750,00

Is Tank Heated?

No

Shell Characteristics:

Breather Vent Settings:

Shell Color/Shade:

White/White (D)

Vacuum Setting (psig):

-0,03

Shell Condition:

Good (D)

Pressure Setting (psig):

0,03

Copy

Run Report

Save

Close

Help

Fonte: Autor (2024).

Figura 20 – Imagem ilustrativa do *software* TANKS com entrada dados de um tanque de teto fixo de 5372 m³.

Vertical Fixed Roof Tank

Identification

Physical Characteristics

Site Selection

Tank Contents

Monthly Calculations

Dimensions:

Roof Characteristics:

Shell Height (ft):

61,52

Color/Shade:

White/White (D)

Shell Diameter (ft):

62,66

Condition:

Good (D)

Maximum Liquid Height (ft):

60,28

Type:

Cone

Average Liquid Height (ft):

30,14

Height (ft):

8,39

Working Volume (gal):

1.390.749,34

Slope (ft/ft) (Cone Roof):

0,27

Turnovers per Year:

11,871837

Net Throughput (gal/yr):

16.510.750,00

Is Tank Heated?

No

Shell Characteristics:

Breather Vent Settings:

Shell Color/Shade:

White/White (D)

Vacuum Setting (psig):

-0,03

Shell Condition:

Good (D)

Pressure Setting (psig):

0,03

Copy

Run Report

Save

Close

Help

Fonte: Autor (2024).

4.2.2.2. Cenário 2 – Simulação de Tanques de Teto Flutuante Interno

Como proposição teórica para a redução de emissões de COVs previamente à instalação de métodos de abatimento, foi sugerido a implementação de tanques de teto flutuante no lugar dos reservatórios de teto fixo. O cálculo para tanques de teto flutuante possui características diferentes, são adicionadas quatro informações importantes: o tipo do selo primário e secundário, as características de acoplagem do teto e sua categoria. Todos os tanques utilizados na simulação possuem teto do tipo autossuportado, o material constituinte é aço carbono e a cor da tinta é branca, ambos tetos e tanques possuem condições boas e com pouca ferrugem. Assim como no tópico de tanques de teto fixo, a Tabela 11 apresenta os dados de características físicas em unidades de medida diferentes.

Tabela 11 – Dados volumétricos dos tanques de teto flutuante.

| Tanque | Produto | Volume Tanque (m³) | Volume do Tanque (gal) | Movimentação (m³/ano) | Movimentação (gal/ano) | Giros por Ano |
|---------------|----------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| TQ-01 | Gasolina | 5.372,00 | 1.419.132 | 62.500 | 16.510.750 | 11,87 |
| TQ-02 | Gasolina | 3.000,00 | 792.516 | 62.500 | 16.510.750 | 21,26 |
| TQ-03 | Gasolina | 2.000,00 | 528.344 | 62.500 | 16.510.750 | 31,89 |
| TQ-04 | Gasolina | 1.000,00 | 264.172 | 62.500 | 16.510.750 | 63,78 |
| TQ-05 | Etanol | 5.372,00 | 1.419.132 | 62.500 | 16.510.750 | 11,87 |
| TQ-06 | Etanol | 3.000,00 | 792.516 | 62.500 | 16.510.750 | 21,26 |
| TQ-07 | Etanol | 2.000,00 | 528.344 | 62.500 | 16.510.750 | 31,89 |
| TQ-08 | Etanol | 1.000,00 | 264.172 | 62.500 | 16.510.750 | 63,78 |

Fonte: Autor (2024).

Já a Tabela 12 expõe as características físicas dos tanques e de seus tetos.

Tabela 12 – Aspectos estruturais dos tanques de teto flutuante.

| Características Tanques | | | | | Teto | |
|-------------------------|--------------|---------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------|-----------|
| Tanque | Diâmetro (m) | Diâmetro (ft) | Selo Primário (tipo de sapata) | Selo Secundário (tipo de sapata) | Acoplagem | Categoria |
| TQ-01 | 19,10 | 62,66 | Mecânica | Montada | Soldado | Típico |
| TQ-02 | 14,32 | 46,98 | Mecânica | Montada | Soldado | Típico |
| TQ-03 | 13,37 | 43,86 | Mecânica | Montada | Soldado | Típico |
| TQ-04 | 9,55 | 31,33 | Mecânica | Montada | Soldado | Típico |
| TQ-05 | 19,10 | 62,66 | Mecânica | Montada | Soldado | Típico |
| TQ-06 | 14,32 | 46,98 | Mecânica | Montada | Soldado | Típico |
| TQ-07 | 13,37 | 43,86 | Mecânica | Montada | Soldado | Típico |
| TQ-08 | 9,55 | 31,33 | Mecânica | Montada | Soldado | Típico |

Fonte: Autor (2024).

Na Figura 21 é apresentado a interface do programa TANKS para entrada dos dados, com um tanque de 1000 m³ para exemplo. Desta vez apenas uma figura de interface será suficiente, pois as únicas características diferentes de um tanque para os outros são: o diâmetro, o volume do tanque e a movimentação e giro por ano, expostos nas Tabelas 24 e 25, como mostra a Figura 22.

Figura 21 – Imagem ilustrativa da interface do *software* TANKS com entrada de dados de um tanque de teto flutuante interno de 1000 m³.

Internal Floating Roof Tank

Identification Physical Characteristics Site Selection Tank Contents Monthly Calculations

Physical Characteristics

Tank Characteristics:

Diameter (ft): 31,33

Tank Volume (gal): 264.172,00

Turnovers per year: 63,78

Net Throughput (gal/yr): 16.510.750,00

Self Supporting Roof? Yes

Number of Columns: 0

Effective Column Diameter: 0

Internal Shell Condition: Light Rust (D)

External Shell Color/Shade: White/White (D)

External Shell Condition: Good (D)

Roof Color/Shade: White/White (D)

Roof Paint Condition: Good (D)

Rim Seal System:

Primary Seal: Mechanical Shoe

Secondary Seal: Shoe-mounted

Deck Characteristics:

Deck Type: Welded

Deck Fitting Category: Typical

View/Add Fittings

Copy Run Report Save Close Help

Fonte: Autor (2024).

Figura 22 – Imagem ilustrativa da interface do *software* TANKS com entrada de dados de um tanque de teto flutuante interno de 2000m³, com destaque para as características diferentes.

Internal Floating Roof Tank

Identification Physical Characteristics Site Selection Tank Contents Monthly Calculations

Physical Characteristics

Tank Characteristics:

Diameter (ft): 43,86

Tank Volume (gal): 528.344,00

Turnovers per year: 31,89

Net Throughput (gal/yr): 16.510.750,00

Rim Seal System:

Primary Seal: Mechanical Shoe

Secondary Seal: Shoe-mounted

Deck Characteristics:

Self Supporting Roof? Yes

Deck Type: Welded

Number of Columns: 0

Deck Fitting Category: Typical

Effective Column Diameter: 0

Internal Shell Condition: Light Rust (D)

External Shell Color/Shade: White/White (D)

External Shell Condition: Good (D)

Roof Color/Shade: White/White (D)

Roof Paint Condition: Good (D)

View/Add Fittings

Copy Run Report Save Close Help

Fonte: Autor (2024).

4.2.3. Emissões provenientes de Carregamentos

A U.S. EPA define no Capítulo 5.2 - “*Transportation and Marketing of Petroleum Liquids*” do documento AP-42 – *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources* como deve ser feito o cálculo das emissões fugitivas advindas das operações de carregamento, a Equação 1 ilustra o cálculo.

$$PC = 12,46 \frac{S * P * M}{T}$$

(Equação 1)

Sendo,

PC, a perda por carregamento, em lb/10³ gal;

S, o fator de saturação, adimensional;

P, a pressão de vapor do produto, em psia;

M, o peso molecular do vapor, em lb/lb-mol

T, a temperatura do líquido, em °R

Transformando as unidades da Equação 1 no padrão do SI, temos que 1 libra (lb) é igual a 0,45 kg (quilograma); 1 gal (galão) é igual a 3,78 L (litros); 1 psia é igual a 0,068 atm (atmosfera); e 1 °C (celsius) é igual a 493,47 °R (Rankine).

O fator de saturação depende diretamente da operação de carregamento utilizada nos caminhões-tanque. A operação escolhida para esta planta foi a *submerged loading* com tanque de carga limpo (S=0,5), os fatores de saturação podem ser observados na Tabela 13.

Tabela 13 – Fatores de saturação para carregamento de produtos líquidos.

| Meio de Transporte | Modo de Operação | Tipo de Serviço | Fator de Saturação |
|---|----------------------------|---|--------------------|
| Caminhões-tanque e vagões-tanque ferroviários | Carregamento submerso | Tanque de carga limpo | 0,5 |
| | | Serviço regular exclusivo | 0,6 |
| | | Serviço exclusivo de balanceamento de vapor | 1,0 |
| | Carregamento <i>splash</i> | Tanque de carga limpo | 1,45 |
| | | Serviço regular exclusivo | 1,45 |
| | | Serviço exclusivo de balanceamento de vapor | 1,0 |

Fonte: Adaptado de U.S. EPA, 2020.

4.2.4. Emissões Fugitivas

As emissões fugitivas foram determinadas com base nos fatores estipulados no documento EPA-453/R-95-017 - *Protocol for Equipment Leak Emission Estimates*. Este documento estabelece os fatores de emissão em kg/h para diferentes tipos de acessórios, horas de operação e classes de serviço, conforme detalhado na Tabela 14; além de estabelecer as eficiências de redução de emissões, que neste estudo foi usado um valor médio de 70% (U. S. EPA, 1995).

Tabela 14 – Fatores de emissão dos equipamentos.

| Tipo do Equipamento | Classe de Serviço | Fator de Emissão (kg/hr/fonte) |
|----------------------------|--------------------------|---|
| Válvulas | Gás | 0,00597 |
| | Líquido Leve | 0,00403 |
| | Líquido Pesado | 0,00023 |
| Selos de Bomba | Líquido Leve | 0,0199 |
| | Líquido Pesado | 0,00862 |
| Conectores | Todos | 0,00183 |
| Final de Linha Aberto | Todos | 0,0017 |

Fonte: Adaptado de U.S. EPA, 1995

É possível obter o volume de emissão dos determinados componentes, multiplicando o número de horas operacionais com o fator de emissão definido, e então multiplicar pelo número de equipamentos e/ou acessórios daquele tipo existente no sistema, assim como mostra a Equação 2.

$$Ve = HO * Fe * N^{eq}$$

(Equação 2)

Sendo,

Ve, o volume de emissão, em t/ano;

HO, as horas operacionais, em horas;

Fe, o fator de emissão, adimensional;

N^{eq}, o número de acessórios, em unidade.

Porém, é preciso levar em consideração a classificação do produto em Gás, Líquido Leve ou Líquido Pesado, feita de acordo com o que consta na EPA-453/R-95-017:

- Gás/vapor: produto no estado gasoso nas condições de operação;
- Líquido leve: produto no estado líquido na qual a somatória da concentração dos componentes individuais da corrente com pressão de vapor acima de 0,3 kPa a 20°C é igual ou maior a 20% em peso;
- Líquido pesado: líquido não classificado como gás/vapor ou líquido leve.

4.3. DADOS METEOROLÓGICOS UTILIZADOS

Para que fosse possível realizar a estimativa de emissões geradas nos tanques de armazenamento através do programa TANKS 4.09d, o município de São Carlos-SP precisou ser adicionado à base de dados do programa, e os seguintes dados foram necessários: dados de temperatura média, mínima e máxima, pressão atmosférica, velocidade do vento e radiação solar incidentes no local de estudo.

As informações de condições meteorológicas medidas no período de 2021 a 2023, temperatura média, mínima e máxima, velocidade do vento e radiação solar foram obtidas na base de dados da Estação da Embrapa Pecuária Sudeste (EMBRAPA, 2024), e os valores de pressão atmosférica da base de dados do Sistema de Informações da Qualidade do Ar (QUALAR) de CETESB, estação Araraquara (CETESB, 2024).

A estação de monitoramento da Embrapa Pecuária Sudeste, Latitude: 21°57'42"(Sul) e Longitude: 47°50'28"(Oeste), está instalada na zona rural de São Carlos e se encontra a 12 km do empreendimento, enquanto a estação Araraquara da CETESB está localizada no município de Araraquara, a 32 km do empreendimento, portanto os dados são representativos para tal localidade.

Os dados meteorológicos brutos, do município de São Carlos, utilizados no cadastro do sistema TANKS para o cálculo de emissões e o memorial de cálculo estão apresentados nas Tabelas 15 a 20.

Tabela 15 – Média de Radiação Solar incidente no município de São Carlos.

| Meses | Radiação Solar 2021 (W/m²) | Radiação Solar 2022 (W/m²) | Radiação Solar 2023 (W/m²) | Média (W/m²) | Média (Btu/ft²*dia) |
|--------------|---|---|---|-------------------------|--------------------------------|
| Janeiro | 258,33 | 221,53 | 219,10 | 232,99 | 1.772,50 |
| Fevereiro | 240,05 | 246,30 | 229,40 | 238,58 | 1.815,06 |
| Março | 234,95 | 235,42 | 225,58 | 231,98 | 1.764,87 |
| Abril | 225,12 | 217,48 | 200,35 | 214,31 | 1.630,44 |
| Maio | 175,81 | 187,85 | 192,13 | 185,26 | 1.409,43 |
| Junho | 166,44 | 164,81 | 172,57 | 167,94 | 1.277,65 |
| Julho | 194,68 | 191,67 | 188,43 | 191,59 | 1.457,57 |
| Agosto | 201,97 | 188,54 | 191,09 | 193,87 | 1.474,88 |
| Setembro | 218,52 | 194,79 | 235,19 | 216,17 | 1.644,53 |
| Outubro | 207,75 | 232,41 | 221,99 | 220,72 | 1.679,17 |
| Novembro | 267,94 | 266,78 | 270,14 | 268,29 | 2.041,06 |
| Dezembro | 262,73 | 233,22 | 282,41 | 259,45 | 1.973,85 |
| Média | 221,19 | 215,07 | 219,03 | 218,43 | 1661,75 |

Fonte: Estação da Embrapa Pecuária Sudeste, 2024.

Tabela 16 – Média de Velocidade do Vento incidente no município de São Carlos.

| Meses | Velocidade do Vento 2021 (m/s) | Velocidade do Vento 2022 (m/s) | Velocidade do Vento 2023 (m/s) | Média (m/s) | Média (mph) |
|--------------|---|---|---|--------------------|------------------------|
| Janeiro | 1,7 | 1,7 | 1,9 | 1,77 | 3,95 |
| Fevereiro | 1,8 | 1,5 | 1,4 | 1,57 | 3,50 |
| Março | 1,4 | 1,7 | 1,4 | 1,50 | 3,36 |
| Abril | 2,1 | 2,0 | 1,4 | 1,83 | 4,10 |
| Maio | 1,7 | 1,8 | 1,7 | 1,73 | 3,88 |
| Junho | 1,7 | 1,7 | 1,5 | 1,63 | 3,65 |
| Julho | 2,1 | 1,8 | 1,9 | 1,93 | 4,32 |
| Agosto | 2,7 | 2,7 | 2,1 | 2,50 | 5,59 |
| Setembro | 2,7 | 3,1 | 2,3 | 2,70 | 6,04 |
| Outubro | 2,8 | 2,4 | 2,1 | 2,43 | 5,44 |
| Novembro | 2,6 | 2,9 | 2,1 | 2,53 | 5,67 |
| Dezembro | 2,4 | 2,4 | 1,9 | 2,23 | 5,00 |
| Média | 2,14 | 2,14 | 1,81 | 2,03 | 4,54 |

Fonte: Estação da Embrapa Pecuária Sudeste, 2024.

Tabela 17 – Temperatura média do município de São Carlos.

| Meses | Temperatura Média 2021 (°C) | Temperatura Média 2022 (°C) | Temperatura Média 2023 (°C) | Média (°C) | Média (°F) |
|--------------|--|--|--|-------------------|-------------------|
| Janeiro | 23,4 | 22,4 | 21,6 | 22,47 | 72,44 |
| Fevereiro | 22,7 | 23,0 | 22,4 | 22,70 | 72,86 |
| Março | 23,0 | 23,4 | 22,8 | 23,07 | 73,52 |
| Abril | 20,6 | 21,9 | 20,5 | 21,00 | 69,80 |
| Maio | 19,9 | 18,1 | 19,3 | 19,10 | 66,38 |
| Junho | 18,2 | 18,5 | 18,0 | 18,23 | 64,82 |
| Julho | 17,2 | 20,4 | 19,1 | 15,57 | 60,02 |
| Agosto | 20,7 | 19,2 | 21,0 | 20,30 | 68,54 |
| Setembro | 24,4 | 19,4 | 24,2 | 22,67 | 72,80 |
| Outubro | 21,1 | 22,1 | 23,3 | 22,17 | 71,90 |
| Novembro | 22,4 | 20,6 | 24,5 | 22,50 | 72,50 |
| Dezembro | 22,1 | 21,8 | 24,7 | 22,87 | 73,16 |
| Média | 21,31 | 20,90 | 21,78 | 21,33 | 70,40 |

Fonte: Estação da Embrapa Pecuária Sudeste, 2024.

Tabela 18 – Temperatura média mínima do município de São Carlos.

| Meses | Temperatura Média Mínima 2021 (°C) | Temperatura Média Mínima 2022 (°C) | Temperatura Média Mínima 2023 (°C) | Média (°C) | Média (°F) |
|--------------|---|---|---|-------------------|-------------------|
| Janeiro | 19,4 | 18,8 | 18,5 | 18,90 | 66,02 |
| Fevereiro | 18,3 | 18,7 | 18,9 | 18,63 | 65,54 |
| Março | 18,5 | 19,0 | 18,6 | 18,70 | 65,66 |
| Abril | 16,3 | 17,1 | 16,4 | 16,60 | 61,88 |
| Maio | 14,9 | 13,5 | 14,9 | 14,43 | 57,98 |
| Junho | 13,5 | 14,0 | 13,5 | 13,67 | 56,60 |
| Julho | 11,2 | 14,9 | 13,7 | 13,27 | 55,88 |
| Agosto | 14,7 | 13,9 | 15,5 | 14,70 | 58,46 |
| Setembro | 17,9 | 14,2 | 18,0 | 16,70 | 62,06 |
| Outubro | 16,3 | 17,2 | 18,6 | 17,37 | 63,26 |
| Novembro | 17,3 | 15,3 | 19,1 | 17,23 | 63,02 |
| Dezembro | 17,7 | 18,2 | 19,3 | 18,40 | 65,12 |
| Média | 16,33 | 16,23 | 17,08 | 16,55 | 61,79 |

Fonte: Estação da Embrapa Pecuária Sudeste, 2024.

Tabela 19 – Temperatura média máxima do município de São Carlos.

| Meses | Temperatura Média Máxima 2021 (°C) | Temperatura Média Máxima 2022 (°C) | Temperatura Média Máxima 2023 (°C) | Média (°C) | Média (°F) |
|--------------|---|---|---|-------------------|-------------------|
| Janeiro | 29,4 | 28,0 | 27,0 | 28,13 | 82,64 |
| Fevereiro | 28,9 | 29,0 | 28,4 | 28,77 | 83,78 |
| Março | 28,9 | 29,7 | 29,5 | 29,37 | 84,86 |
| Abril | 27,2 | 28,4 | 26,6 | 27,40 | 81,32 |
| Maio | 26,3 | 24,3 | 25,6 | 25,40 | 77,72 |
| Junho | 24,7 | 24,3 | 23,8 | 24,27 | 75,68 |
| Julho | 24,6 | 27,0 | 25,7 | 25,77 | 78,38 |
| Agosto | 28,0 | 25,8 | 27,9 | 27,23 | 81,02 |
| Setembro | 32,2 | 25,9 | 31,4 | 29,83 | 85,70 |
| Outubro | 28,0 | 28,5 | 29,9 | 28,80 | 83,84 |
| Novembro | 28,7 | 27,5 | 31,3 | 29,17 | 84,50 |
| Dezembro | 28,1 | 27,4 | 31,5 | 29,00 | 84,20 |
| Média | 27,92 | 27,15 | 28,22 | 27,76 | 81,97 |

Fonte: Estação da Embrapa Pecuária Sudeste, 2024.

Tabela 20 – Média de Pressão Atmosférica do município de São Carlos.

| Meses | Pressão Atmosférica 2021 (hPa) | Pressão Atmosférica 2022 (hPa) | Pressão Atmosférica 2023 (hPa) | Média (hPa) | Média (psi) |
|--------------|---|---|---|--------------------|--------------------|
| Janeiro | 952,3 | 952,1 | 953,2 | 952,5 | 13,81 |
| Fevereiro | 951,4 | 952,7 | 954,3 | 952,8 | 13,82 |
| Março | 953,0 | 953,8 | 955,3 | 954,0 | 13,83 |
| Abril | 955,3 | 955,1 | 955,3 | 955,2 | 13,85 |
| Maio | 956,5 | 957,1 | 958,1 | 957,2 | 13,88 |
| Junho | 957,9 | 957,6 | 960 | 958,5 | 13,90 |
| Julho | 959,7 | 958,1 | 959,8 | 959,2 | 13,91 |
| Agosto | 958,0 | 958,2 | 957,1 | 957,8 | 13,89 |
| Setembro | 954,6 | 956,3 | 955,4 | 955,4 | 13,85 |
| Outubro | 953,9 | 954,3 | 953,6 | 953,9 | 13,83 |
| Novembro | 951,6 | 953,8 | 952,9 | 952,8 | 13,82 |
| Dezembro | 951,1 | 951,9 | 953,3 | 952,1 | 13,81 |
| Média | 954,6 | 955,1 | 955,7 | 955,1 | 13,85 |

Fonte: Estação Meteorológica de Araraquara da CETESB, 2024.

A Figura 23 apresenta a tela de entrada dos dados tabulados utilizados no programa TANKS 4.09d.

Figura 23 – Imagem ilustrativa da entrada de dados meteorológicos cadastrados no programa TANKS 4.09d.

Meteorological

City:

City: State:

Daily Average Ambient Temperature (F): Atmospheric Pressure (psia):

| Month | Daily Maximum Ambient Temp. (F) | Daily Minimum Ambient Temp. (F) | Solar Insulation Factor (Btu / (ft ² *day)) | Average Wind Speed (mph) |
|-------|---------------------------------|---------------------------------|--|--------------------------|
| JAN | 82,64 | 66,02 | 1772,5 | 3,95 |
| FEB | 83,78 | 65,54 | 1815,06 | 3,5 |
| MAR | 84,86 | 65,66 | 1764,87 | 3,36 |
| APR | 81,32 | 61,88 | 1630,44 | 4,1 |
| MAY | 77,72 | 57,98 | 1409,43 | 3,88 |
| JUN | 75,68 | 56,6 | 1277,65 | 3,65 |
| JUL | 78,38 | 55,88 | 1457,57 | 4,32 |
| AUG | 81,02 | 58,46 | 1474,88 | 5,59 |
| SEP | 85,7 | 62,06 | 1644,53 | 6,04 |
| OCT | 83,84 | 63,26 | 1679,17 | 5,44 |
| NOV | 84,5 | 63,02 | 2041,06 | 5,67 |
| DEC | 84,2 | 65,12 | 1973,85 | 5 |
| ANN | 81,97 | 61,79 | 1661,75 | 4,54 |

Fonte: Autor (2024).

4.4. PRODUTOS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO

As simulações dos fatores de emissão de COV foram realizadas com dois produtos, que estão presentes no banco de dados do *software* Tanks: gasolina (*gasoline* RVP12), e etanol (*ethyl alcohol*), como apresentados nas Figuras 24 e 25, respectivamente, com os valores de temperatura expressos em *Fahrenheit* (F).

De acordo com Lockwood (2019) uma refinaria situada na Baía de Todos os Santos, no estado da Bahia, possui capacidade de armazenamento de até 232.000 barris por dia, ou 36.885 m³ considerando que 1 barril é igual a 0,159 m³, para diesel, gasolina, querosene de aviação, nafta, entre outros. Assim como uma empresa de armazenagem instalada no Porto de Santos, no estado de São Paulo, possui 150.000 m³ de capacidade de armazenamento distribuídos em 82 tanques, deste total 40.000 m³ são destinados para contenção de etanol. Esta empresa citada possui operação de 25% de todo o etanol do Porto de Santos, que em 2011 movimentou 2.100.000 m³ de etanol, então foi movimentado pela empresa um total de 525.000 m³ de etanol em um ano distribuídos na sua capacidade de 40.000 m³ (PETRAGLIA *et al.*, 2011).

Com isto, o valor de movimentação utilizado na simulação foi de 250.000 m³ tanto para a gasolina quanto para o etanol. Algumas das propriedades físico-químicas dos produtos, assim como os valores de movimentação dos mesmos estão mostradas na Tabela 21.

Figura 24 – Imagem ilustrativa das características da Gasolina RVP 12 na base do programa TANKS 4.09d.

Chemical

| | | | |
|----------------|-------------------|--|--|
| Chemical Name: | Gasoline (RVP 12) | | |
| CAS Number: | | | |

| | | | |
|--------------------------------|-----------------------|-------------------------|----|
| Category: | Petroleum Distillates | Liq. Mol. Weight: | 92 |
| Liquid Density (lb/gal @ 60F): | 5,6 | Vapor Molecular Weight: | 64 |

Vapor Pressure Information (fill in one or more options completely)

Option 1: Enter Vapor Pressure (psia) for each temperature:

| | | | |
|------|--------|-------|---------|
| 40F: | 4,2899 | 80F: | 9,1455 |
| 50F: | 5,2417 | 90F: | 10,8623 |
| 60F: | 6,3556 | 100F: | 12,8222 |
| 70F: | 7,6502 | | |

Fonte: Autor (2024).

Figura 25 – Imagem ilustrativa das características do Etanol na base do programa TANKS 4.09d.

Chemical

| | | | |
|----------------|---------------|--|--|
| Chemical Name: | Ethyl alcohol | | |
| CAS Number: | 00064-17-5 | | |

| | | | |
|--------------------------------|-----------------|-------------------------|-------|
| Category: | Organic Liquids | Liq. Mol. Weight: | 46,07 |
| Liquid Density (lb/gal @ 60F): | 6,61 | Vapor Molecular Weight: | 46,07 |

Vapor Pressure Information (fill in one or more options completely)

Option 1: Enter Vapor Pressure (psia) for each temperature:

| | | | |
|------|-------|-------|-------|
| 40F: | 0,193 | 80F: | 1,218 |
| 50F: | 0,406 | 90F: | 1,682 |
| 60F: | 0,619 | 100F: | 2,32 |
| 70F: | 0,87 | | |

Fonte: Autor (2024).

Tabela 21 – Características e propriedades físico-químicas dos produtos utilizados nas simulações.

| Propriedades | Gasolina | Etanol |
|--------------------------------|-----------------------|------------------|
| Peso molecular (lb/lb-mol) | 92 | 46,07 |
| Densidade (lb/gal a 60°F) | 5,6 | 6,61 |
| Classe de serviço | Destilado de Petróleo | Líquido Orgânico |
| Pressão de vapor (psia a 70°F) | 7,6502 | 0,870 |
| Movimentação total (m³/ano) | 250.000 | 250.000 |

Fonte: Autor (2024).

4.5. CRITÉRIOS AVALIADOS NO ESTUDO

As variações das emissões de COV foram simuladas considerando critérios de dimensionamento dos tanques, distribuição de volumes num parque de tancagem e cor e integridade do costado e do teto dos tanques. Os tanques testados apresentavam as seguintes cores e condições de costado e teto: branco em bom estado.

A taxa de transferência de produto corresponde ao volume movimentado de líquido ao longo do ano. O valor é obtido da multiplicação do número de giros (enchimentos e esvaziamentos completos) pelo volume do tanque (U.S. EPA, 2020).

O critério principal avaliado foi o enquadramento do empreendimento fictício nas legislações atuantes, principalmente com base no inciso III do Artigo 12 do Decreto Estadual nº 59.113/2013, que prevê um limite de 40t/ano de emissão de Compostos orgânicos voláteis (com exceção do metano) por empreendimento para que não haja necessidade de realização de licenciamento ambiental. Além disso foi avaliada a influência do tipo de tanque, substituindo os tanques de teto fixo com maior volume de emissão por tanques de teto flutuante interno.

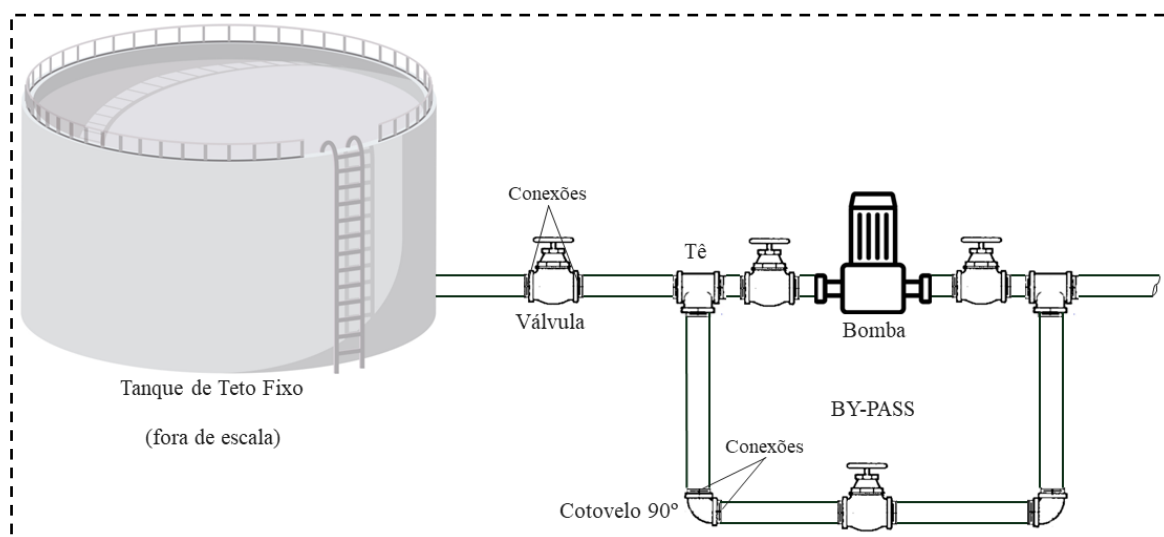
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. ESTIMATIVA TEÓRICA DE EMISSÕES

5.1.1. Emissões Fugitivas

As emissões fugitivas dependem diretamente do número de acessórios existentes, para isto foi idealizada uma linha padrão de distribuição de combustível, que foi parcialmente representada na Figura 26, e estaria ligada a cada um dos tanques e à estação de carregamento e descarregamento.

Figura 26 – Recorte de uma linha teórica de distribuição com sistema de controle.



Fonte: Autor (2024).

Segundo a mesma planta petroquímica que não pôde ser identificada, uma linha de distribuição para cada tanque necessita de pelo menos uma bomba e um dreno e, usualmente, possui 15 válvulas; as conexões, conhecidas também como flanges, estão presentes à jusante e à montante dos equipamentos, pois servem para conectar estes à tubulação, por isso foram consideradas 2 conexões para cada acessório em serviço. Neste caso foi adaptado no conjunto um esquema de segurança conhecido como *by-pass* ou passagem livre, que permite ao fluido passar por outro caminho que não seja pela bomba, para isto foram adicionados dois Tês e dois Cotovelos de 90°, com conexões em todas as junções com os tubos.

Como ambos os combustíveis são classificados como líquido leve, a taxa de emissão utilizada foi para este tipo de densidade. As horas operacionais empregadas no cálculo foram

8040 horas por ano, correspondendo à uma operação de 30 dias por mês e 24 horas por dia, porém subtraídos 30 dias, dispostos para manutenção da rede. A Tabela 22 apresenta os dados do cálculo e o resultado total de 18,543 t/ano.

Tabela 22 – Emissões fugitivas dos acessórios de linha, referente à 8 tanques.

| Tipo de Equipamento | Serviço | Taxa de Emissão (kg/h/fonte) | Nº de Equipamentos | Horas Operacionais | Emissões Fugitivas (t/ano) |
|----------------------------|----------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Válvulas | Líquido Leve | 0,0109 | 120 | 8.040 | 10,516 |
| Bombas | Líquido Leve | 0,114 | 8 | 8.040 | 7,333 |
| Conexões | Todos | 0,00025 | 352 | 8.040 | 0,708 |
| Drenos | Todos | 0,0023 | 8 | 8.040 | 0,148 |
| Total | - | - | 408 | - | 18,543 |

Fonte: Autor (2024).

Diferentemente das operações de carregamento e tancagem, a tecnologia utilizada para abatimento de emissões fugitivas é o LDAR, com eficiência média de 70%, a aplicação desta metodologia deve ser feita anualmente para garantir a conformidade e a prevenção de vazamento dos equipamentos monitorados (U.S. EPA, 2007). Segundo Lv *et al.* (2021) a aplicação das medidas propostas pelo LDAR em uma refinaria ou em plantas similares faz com que as emissões fugitivas dos acessórios fiquem extremamente baixas.

A Tabela 23 apresenta os valores após redução, possuindo como novo valor total 5,611 t/ano.

Tabela 23 – Redução das emissões fugitivas com aplicação do LDAR.

| Tipo de Equipamento | Emissões Fugitivas (t/ano) | Redução pelo LDAR | Emissões Fugitivas após Monitoramento (t/ano) |
|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|--|
| Válvulas | 10,516 | 70% | 3,155 |
| Bombas | 7,333 | 70% | 2,20 |
| Conexões | 0,708 | 70% | 0,212 |
| Drenos | 0,148 | 70% | 0,044 |
| Total | 18,543 | - | 5,611 |

Fonte: Autor (2024).

5.1.2. Emissões de Carregamento

A estimativa teórica das emissões pela operação de carregamento foi feita utilizando apenas o carregamento por modal rodoviário, com fator de saturação de 0,6, e com base em uma temperatura de 21,1 °C (70 °F ou 530 °R), visto que a temperatura média da cidade de São Carlos é, aproximadamente, 21 °C. A Tabela 24 apresenta os dados juntamente com o resultado de emissão já calculado de 314,339 t/ano.

Tabela 24 – Estimativa teórica de emissão por carregamento.

| Produto | Fator de Saturação (S) | Pressão de Vapor (psia) | Temperatura (R) | Peso Molecular (lb/lb-mol) | Movimentação (m³/ano) (gal/ano) | Emissão no Carregamento (t/ano) |
|----------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------|-----------------------------------|--|--|
| Etanol | 0,6 | 0,870 | 530 | 46,07 | 250.000 66.043.000 | 16,936 |
| Gasolina | 0,6 | 7,6502 | 530 | 92,0 | 250.000 63.043.000 | 297,402 |
| Total | - | - | - | - | 500.000 132.086.000 | 314,339 |

Fonte: Autor (2024).

Assim como nas emissões evaporativas, nesta etapa foi aplicado uma URV teórica padrão com 95% de eficiência, valor mínimo exigido pela CETESB, e o valor de 15,717 t/ano foi obtido como novo volume de emissões de carregamento, como mostra a Tabela 25.

Tabela 25 – Emissões por carregamento após abatimento.

| Produto | Emissão no Carregamento (t/ano) | Abatimento por URV | Emissão após Sistema de Controle (t/ano) |
|----------------|--|---------------------------|---|
| Etanol | 16,936 | 95% | 0,847 |
| Gasolina | 297,402 | 95% | 14,87 |
| Total | 314,339 | - | 15,717 |

Fonte: Autor (2024).

5.1.3. Emissões Evaporativas

Esta seção foi dividida em duas subseções, com o objetivo de abordar os dois cenários individualmente, sendo que a primeira destinada a tancagem mais simples de teto fixo, abordando também as emissões das etapas de carregamento e fugitivas; e a segunda destinada às emissões evaporativas de tanques de teto flutuante para que seja possível comparar os dois cenários entre si e com a legislação. A gasolina e o etanol foram escolhidos para a simulação, pois são combustíveis com uma grande diferença na pressão de vapor, fator significativo que interfere diretamente na produção de emissões evaporativas, com intuito de proporcionar maiores discrepâncias no estudo.

Após a realização das estimativas teóricas, os resultados das diferentes etapas serão somados e comparados com a legislação. Porém, a CETESB apenas autoriza a implementação de um parque de tancagem juntamente com métodos de abatimento de emissões de voláteis (CETESB, 2017). Por isso, serão apresentadas as emissões calculadas com e sem os respectivos métodos de recuperação e abatimento.

5.1.3.1. Cenário 1: Tanque de Teto Fixo

As emissões evaporativas dos tanques com teto fixo foram separadas em perdas por respiração, em que a perda acontece pela volatilização do líquido armazenado que é expelida por acessórios de teto como o corta-chamas e as válvulas de respiro e de alívio; e por movimentação,

onde as emissões são advindas do esvaziamento e enchimento dos tanques; e estão detalhadas na Tabela 26, com emissão total de 439,171 t/ano

Tabela 26 – Total de emissões evaporativas da etapa de tancagem.

| Tanque | Produto | Perda por Movimentação (t/ano) | Perda por Respiração (t/ano) | Total de Emissões (t/ano) |
|---------------|----------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| TQ-01 | Gasolina | 90,739 | 31,605 | 122,344 |
| TQ-02 | Gasolina | 90,739 | 17,771 | 108,510 |
| TQ-03 | Gasolina | 90,739 | 15,206 | 105,944 |
| TQ-04 | Gasolina | 57,807 | 7,735 | 65,541 |
| TQ-05 | Etanol | 8,109 | 3,290 | 11,399 |
| TQ-06 | Etanol | 8,109 | 1,852 | 9,961 |
| TQ-07 | Etanol | 8,109 | 1,464 | 9,572 |
| TQ-08 | Etanol | 5,166 | 0,735 | 5,901 |
| Total | - | 359,514 | 79,657 | 439,171 |

Fonte: Autor (2024).

Contudo, como já citado, o órgão fiscalizador (CETESB) prevê obrigatoriamente a instalação de uma tecnologia de abatimento juntamente à fonte poluidora. Neste estudo de caso foi aplicado uma unidade de recuperação de voláteis com 95% de abatimento, eficiência mínima e exigida por lei; esta URV também foi aplicada para a etapa de carregamento, por se tratar de uma unidade de tratamento que abrange tanto os tanques como a estação de carregamento do empreendimento.

Aplicando este valor de abatimento ao total de emissões evaporativas anuais, chegou-se ao novo valor de 21,959 t/ano como observado na Tabela 27.

Tabela 27 – Total de emissões evaporativas dos tanques de teto fixo após abatimento.

| Tanque | Produto | Total de Emissões (t/ano) | Abatimento por URV | Emissão após Sistema de Controle (t/ano) |
|---------------|----------------|----------------------------------|---------------------------|---|
| TQ-01 | Gasolina | 122,344 | 95% | 6,117 |
| TQ-02 | Gasolina | 108,510 | 95% | 5,426 |
| TQ-03 | Gasolina | 105,944 | 95% | 5,297 |
| TQ-04 | Gasolina | 65,541 | 95% | 3,277 |
| TQ-05 | Etanol | 11,399 | 95% | 0,570 |
| TQ-06 | Etanol | 9,961 | 95% | 0,498 |
| TQ-07 | Etanol | 9,572 | 95% | 0,479 |
| TQ-08 | Etanol | 5,901 | 95% | 0,295 |
| Total | - | 439,171 | - | 21,959 |

Fonte: Autor (2024).

Portanto, somados os valores de emissão individual das diferentes partes do processo (carregamento, fugitivas e evaporativas), obteve-se o resultado de 43,335 t/ano como valor geral de emissões do empreendimento. Então, aplicando a legislação vigente de 40 t/ano como valor máximo, fica claro que este empreendimento funcionando nos termos apresentados no Cenário 1 precisaria de um licenciamento ambiental antes de obter o aval de operação ou expansão.

5.1.3.2. Cenário 2: Tanque de Teto Flutuante Interno

As emissões evaporativas dos tanques, foram separadas em perdas por vedação na borda, referente às emissões que ocorrem pelos selos de extremidade na vedação do teto flutuante, onde vapores podem escapar para a atmosfera; perdas por movimentação, neste caso principalmente a retirada do produto de dentro do tanque; e perdas por conexões dos acessórios com o teto flutuante, em que os dispositivos instalados podem permitir a fuga de vapores. Segundo Martins (2004) as maiores emissões são promovidas primeiramente pelos selos de vedação da extremidade dos tetos flutuantes e posteriormente pelas conexões dos acessórios instalados no teto (como o corta-chamas e as válvulas de respiro e de alívio); neste estudo esta afirmação foi parcialmente confirmada, pois as principais perdas foram mantidas, porém as

emissões ocasionadas pelos acessórios foram maiores que as perdas pelo selo de vedação, como é possível observar na Tabela 28.

Tabela 28 – Emissões evaporativas dos tanques de teto flutuante.

| Tanque | Produto | Perda por Vedação (t/ano) | Perda por Movimentação (t/ano) | Perda por Acessórios (t/ano) | Total de Emissões (t/ano) |
|---------------|----------------|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| TQ-01 | Gasolina | 0,624 | 0,023 | 1,309 | 1,955 |
| TQ-02 | Gasolina | 0,468 | 0,030 | 1,112 | 1,610 |
| TQ-03 | Gasolina | 0,436 | 0,032 | 1,063 | 1,532 |
| TQ-04 | Gasolina | 0,312 | 0,045 | 0,916 | 1,272 |
| TQ-05 | Etanol | 0,039 | 0,027 | 0,082 | 0,148 |
| TQ-06 | Etanol | 0,029 | 0,036 | 0,070 | 0,135 |
| TQ-07 | Etanol | 0,028 | 0,038 | 0,067 | 0,132 |
| TQ-08 | Etanol | 0,020 | 0,053 | 0,058 | 0,130 |
| Total | - | 1,955 | 0,283 | 4,676 | 6,914 |

Fonte: Autor (2024).

Observa-se que, apenas com a mudança na estrutura dos tanques, houve uma redução significativa nas emissões, de aproximadamente 98%, em relação ao cenário 1. Além disso, neste segundo cenário, é possível alcançar um resultado inferior a 40 t/ano apenas somando o valor de emissão evaporativa dos tanques de teto flutuante sem abatimento, 6,914 t/ano, às emissões de carregamento e fugitivas (15,717 t/ano e 5,611 t/ano) do cenário 1, após abatimento, obtendo uma quantia de 28,242 t/ano.

Entretanto, seguindo a mesma linha do cenário anterior, neste novo cenário também foi aplicado um abatimento teórico por URV com eficiência de 95%, obtendo o valor de 0,346 t/ano para as emissões após aplicação da tecnologia, como mostra a Tabela 29.

Tabela 29 – Total de emissões evaporativas dos tanques de teto flutuante após abatimento.

| Tanque | Produto | Total de Emissões (t/ano) | Abatimento por URV | Emissão após Sistema de Controle (t/ano) |
|---------------|----------------|----------------------------------|---------------------------|---|
| TQ-01 | Gasolina | 1,955 | 95% | 0,098 |
| TQ-02 | Gasolina | 1,610 | 95% | 0,081 |
| TQ-03 | Gasolina | 1,532 | 95% | 0,077 |
| TQ-04 | Gasolina | 1,272 | 95% | 0,064 |
| TQ-05 | Etanol | 0,148 | 95% | 0,007 |
| TQ-06 | Etanol | 0,135 | 95% | 0,007 |
| TQ-07 | Etanol | 0,132 | 95% | 0,007 |
| TQ-08 | Etanol | 0,130 | 95% | 0,007 |
| Total | - | 6,914 | - | 0,346 |

Fonte: Autor (2024).

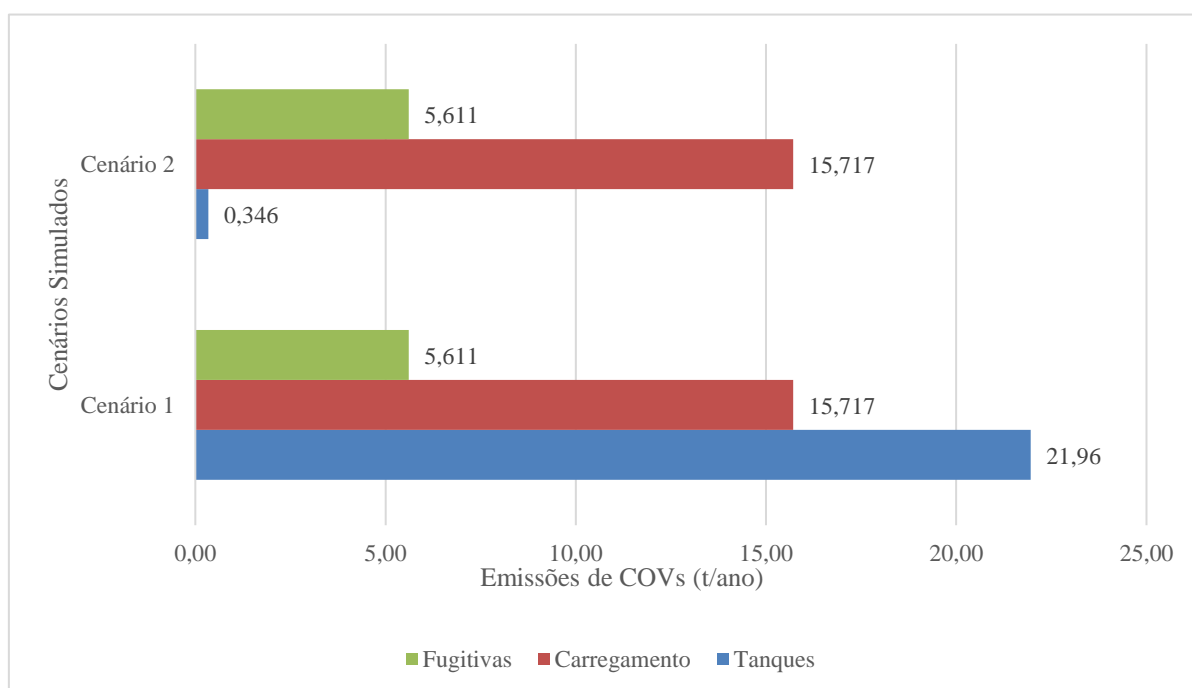
Neste caso, a aplicação dos tanques de teto flutuante foi a única diferença do cenário anterior, portanto é preciso somar as emissões evaporativas recém calculadas com as emissões de carregamento e fugitivas previamente calculadas no cenário 1, chegando então a um resultado de 21,722 t/ano. Valor que enquadra o empreendimento como dentro do limite permitido e por isso sem exigência de licenciamento.

5.2. DISCUSSÃO DOS CENÁRIOS

Os resultados obtidos permitiram comparar os cenários 1 e 2, contrastando os dois tipos de teto, os diferentes volumes de tanques e as emissões atmosféricas dos produtos estudados. Isso evidenciou a disparidade entre os valores de emissão e ajudou a entender a relação direta e/ou indireta entre as características volumétricas dos tanques. Segundo Koçak (2022) *apud* Kolicheski *et al.* (2023) a aproximação dos resultados concebidos por esta simulação com a realidade pode ser confirmada para plantas com tancagem de hidrocarbonetos que buscam estimar suas emissões de COVs, pois foram comparadas emissões geradas pelo programa TANKS e emissões medidas empiricamente, e foi obtido uma correspondência de dados consistente.

Segundo Lv *et al.* (2021) a etapa de armazenamento nos tanques é a que mais promove emissões atmosféricas, seguido das operações de carregamento, do sistema de tratamento empregado e das perdas fugitivas de equipamentos. No cenário 1 o volume de emissões das etapas segue esta ordem proposta, porém no cenário 2 as perdas por carregamento são as que dominam o quadro de emissões, como pode ser observado na Figura 27.

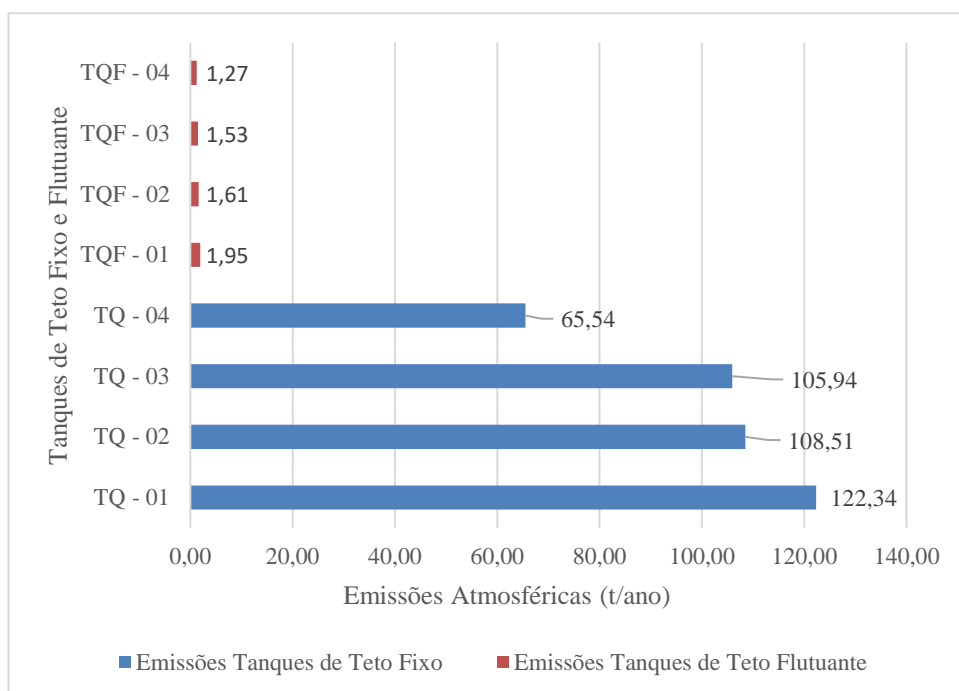
Figura 27 – Gráfico de comparação das emissões de COVs, após abatimento, nas diferentes etapas do processo dos cenários 1 e 2.



Fonte: Autor (2024).

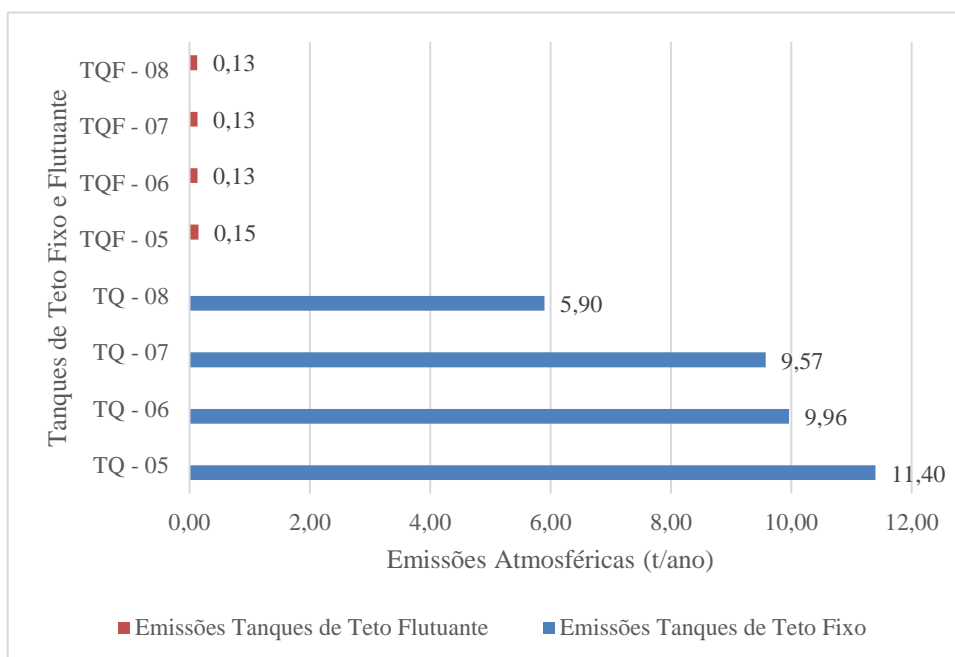
Foi realizado a comparação entre as emissões dos tanques de teto fixo e de teto flutuante contrastando os resultados pelo tipo de combustível armazenado, gasolina e etanol, como pode ser observado nas Figuras 28 e 29 respectivamente.

Figura 28 – Gráfico de comparação das emissões evaporativas de gasolina provenientes dos tanques de teto fixo (TQ) e dos tanques de teto flutuante (TQF).



Fonte: Autor (2024).

Figura 29 – Gráfico de comparação das emissões evaporativas de etanol provenientes dos tanques de teto fixo (TQ) e dos tanques de teto flutuante (TQF).



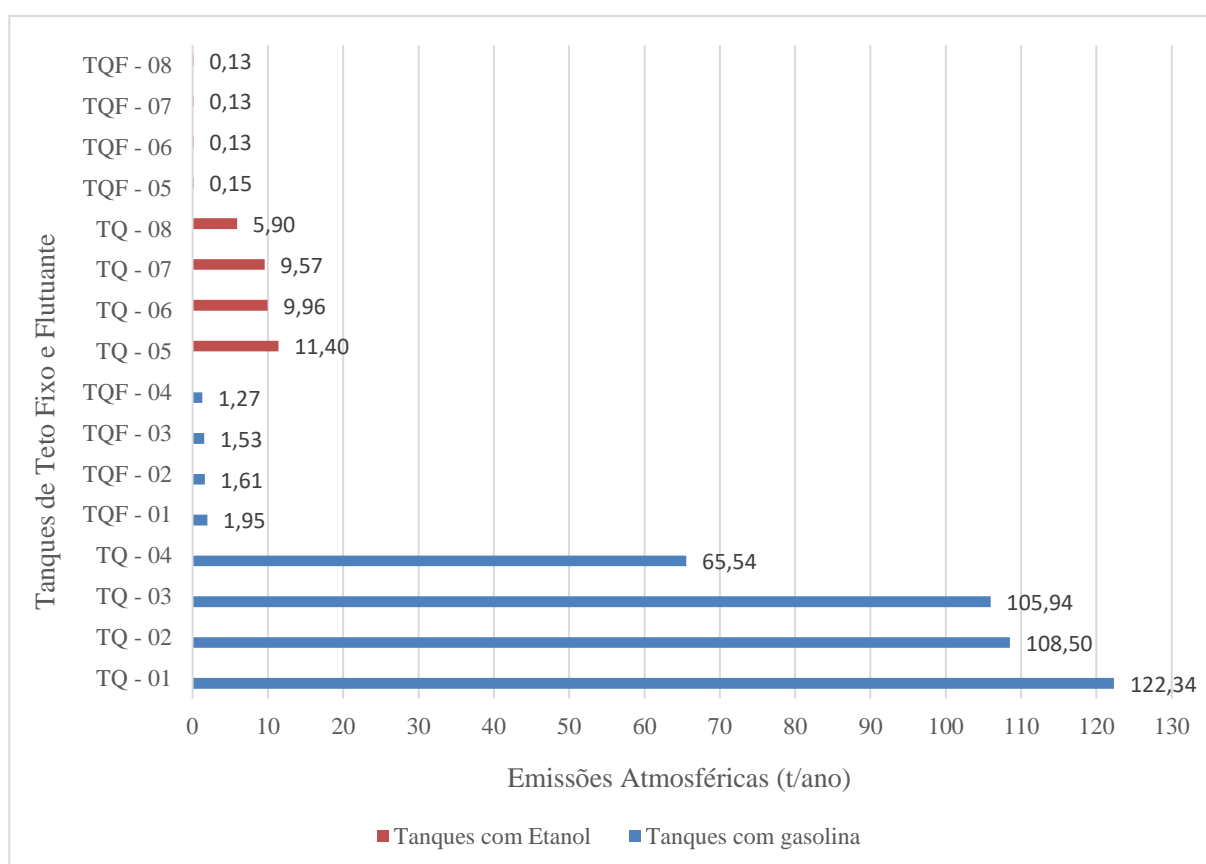
Fonte: Autor (2024).

A disparidade entre os tipos de teto fica evidenciada a partir dos gráficos. O teto fixo permite a volatilização dos gases em todo seu volume disponível, o que favorece o aumento de

pressão e consequentemente a perda pela válvula de respiro. O tanque de teto flutuante por sua vez evita a expansão dos gases com o teto bem acima do líquido, e as perdas se dão pelas bordas e pela selagem do teto. E assim como constatado por Martins (2004) e Kolicheski *et al.* (2023) e visualizado nos resultados deste estudo, os tanques com teto flutuante interno mesmo se possuírem menores movimentações são superiores, em relação a evitar emissões atmosféricas, aos reservatórios com teto fixo.

As emissões da estimativa com gasolina demonstram uma redução mais representativa, pois a emissão de apenas um tanque de teto fixo, sem abatimento, já seria capaz de deixar o empreendimento acima do valor de corte da legislação. A estimativa com o etanol ainda estaria abaixo das 40 t/ano, mesmo se somadas as emissões dos quatro tanques de teto fixo. Entretanto a redução de emissão foi igual, em porcentagem, e significativa para ambos os produtos. A Figura 30 evidencia a diferença entre as emissões dos dois combustíveis sem tecnologia de abatimento.

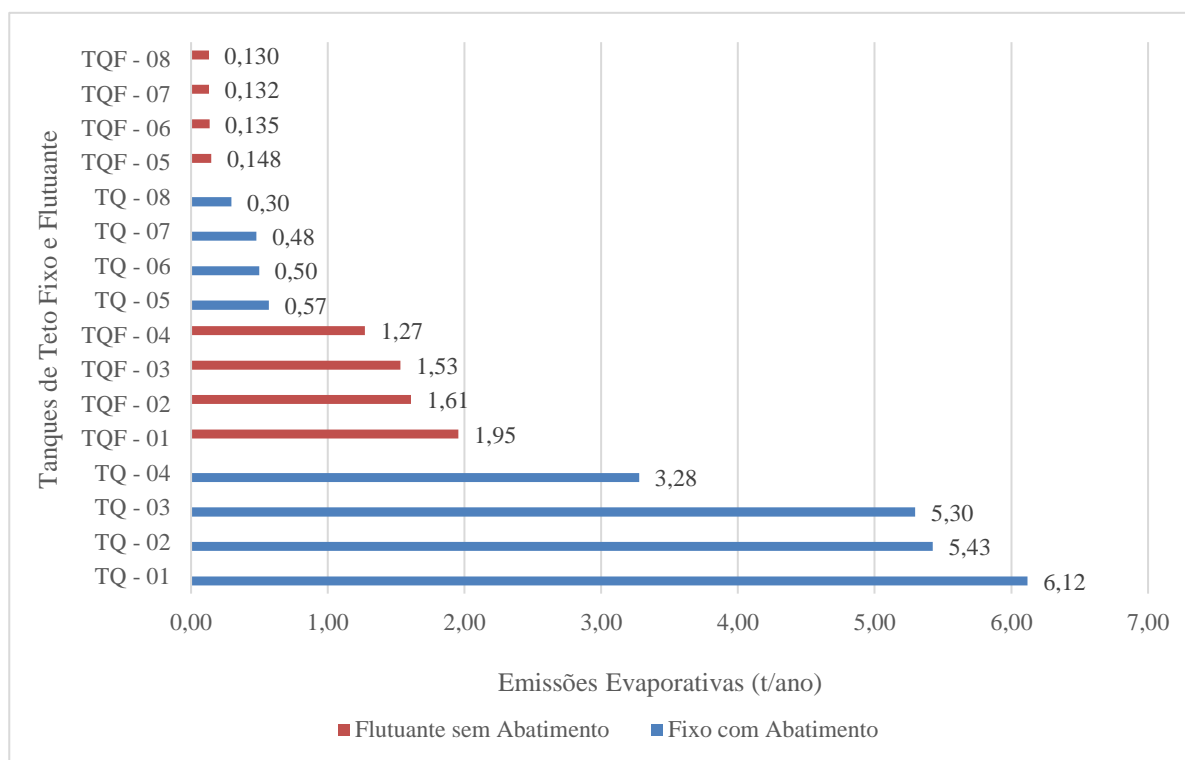
Figura 30 – Gráfico de comparação entre as emissões evaporativas dos tanques de teto fixo (TQ) e dos tanques de teto flutuante (TQF), diferenciando a gasolina e o etanol.



Fonte: Autor (2024).

Este contraste deixa clara a disparidade entre as emissões dos tanques contendo gasolina e aqueles contendo etanol. A escolha desses dois produtos foi proposital, pois possuem pressões de vapor muito diferentes. E assim como relatado por Martins (2004), a gasolina, com uma pressão de vapor mais alta, volatiliza-se facilmente devido à temperatura, movimentação do produto e outros fatores, facilitando a mudança da fase líquida para gasosa e, conseqüentemente, aumentando a emissão atmosférica. A fim de evidenciar ainda mais a diferença dos resultados de emissões evaporativas dos reservatórios, foi comparado o volume de emissão dos tanques de teto fixo após abatimento com as emissões dos tanques de teto flutuante sem abatimento, o resultado está presente na Figura 31.

Figura 31 – Gráfico de comparação entre as emissões evaporativas dos tanques de teto fixo (TQ) com abatimento e dos tanques de teto flutuante (TQF) sem abatimento.

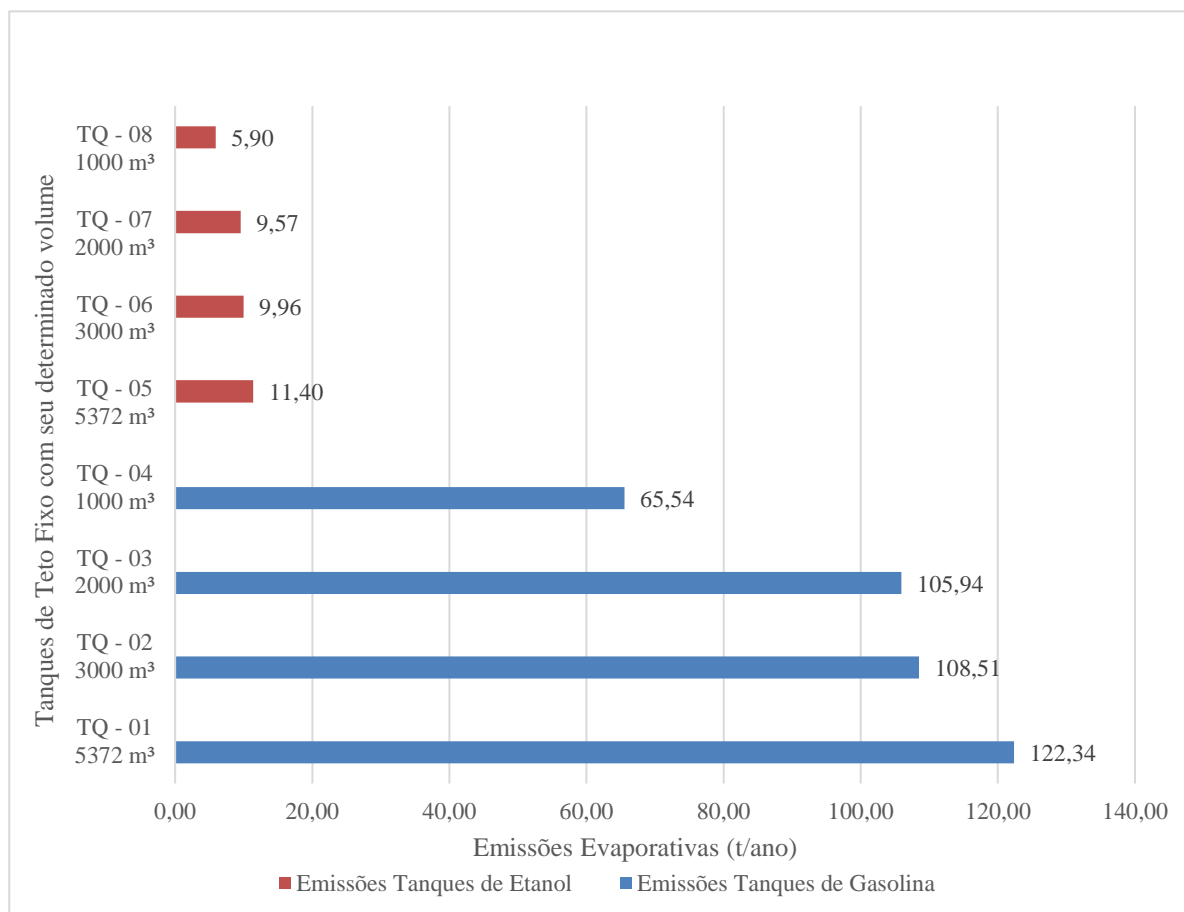


Fonte: Autor (2024).

Também de acordo com Martins (2004) as perdas pelo processo de movimentação são maiores do que as emissões por respiração e isto se deve à variação de nível do produto dentro do tanque, por causa de enchimento e esvaziamento, promovendo uma maior emissão de líquido volatilizado pelos suspiros dos tanques. Fato que se confirma analisando os volumes de emissão de cada conjunto de tanques deste estudo.

A Figura 32 traz a comparação entre a quantidade de emissão e o volume (capacidade) de um mesmo tanque.

Figura 32 – Gráfico de comparação entre as emissões evaporativas dos tanques de teto fixo (TQ), evidenciando seus respectivos volumes e diferenciando a gasolina e o etanol.



Fonte: Autor (2024).

Observa-se que, a diferença entre as emissões dos tanques não é tão significativa quanto a diferença entre os volumes armazenados, por exemplo o TQ-04 tem um volume 5,3 vezes, aproximadamente, menor que o tanque TQ-01, porém a emissão do tanque de 5372 m³ é apenas 1,87 vezes maior do que o valor do tanque TQ-04.

Como afirmado por Klepikov, Klepikova e Shahbaz (2022), utilizar tanques com capacidades maiores, principalmente superiores a 2000 m³, é recomendado para reduzir as emissões globais, além disso para promover um maior abatimento o emprego de tanques com teto flutuante é altamente recomendada. Esta disparidade entre os valores pode ocorrer por dois fatores: com uma maior capacidade de armazenamento, o tanque passa por um menor número de esvaziamentos e enchimentos completos, os chamados “giros por ano”, que reduzem as

emissões por movimentação; e, principalmente, por haver um maior volume de líquido armazenado, as variações térmicas são menos significativas, demorando mais para aquecer um volume maior de produto e, conseqüentemente, reduzindo consideravelmente as emissões por evaporação.

Além disto, na simulação feita neste trabalho a área da superfície dos tanques permaneceu próxima, pois a variação do diâmetro dos 4 tipos de tanques foi maior do que a variação na altura dos mesmos; este fator pode ter contribuído para a proximidade dos valores de emissão dos reservatórios, principalmente de 2000 m³, 3000 m³ e 5372 m³.

6. CONCLUSÃO

Analisando os resultados obtidos, conclui-se que foi possível atingir com sucesso os objetivos previamente estabelecidos. O cálculo teórico das estimativas de emissões foi realizado com êxito, atribuindo maior propriedade à simulação do empreendimento. Este feito só foi alcançado, pois não só as dimensões dos tanques de armazenamento utilizadas foram condizentes com reservatórios reais que operam com este tipo de serviço, como também o *software* empregado é usado como referência pelos órgãos ambientais de fiscalização dentro e fora do Brasil.

Além disso, foram devidamente estruturados e comparados os dois cenários que representavam diferentes tecnologias de armazenamento, e, a partir disto, foi possível contrastar os resultados e identificar qual escolha deveria ser feita a fim de evitar emissões atmosféricas em empreendimentos do tipo estudado. Entretanto, é preciso reconhecer as limitações deste trabalho, por exemplo um estudo feito baseado em um empreendimento real, com valores de movimentação e produtos verdadeiros, e seguindo as objeções do órgão fiscalizador teria uma maior aplicação.

Com base nos resultados obtidos de 43,33 t/ano para o Cenário 1 e de 21,72 t/ano para o Cenário 2, um empreendimento, com os parâmetros da simulação deste trabalho, que opte pela instalação de tanques apenas com teto fixo estaria distante de cumprir o valor de corte de 40 t/ano estabelecido pelo Decreto Estadual 59.113/13 e, conseqüentemente, teria a necessidade de se realizar um licenciamento ambiental. Por outro lado, com o Cenário 2, seria viável expandir o número de tanques, aumentar a movimentação e até trabalhar com produtos mais voláteis que a gasolina.

Portando, considerando que neste estudo teórico foi abordada a instalação de um novo empreendimento, algumas recomendações imprescindíveis são: investir em tanques de teto flutuante, que apesar de possuírem um valor agregado mais alto, reduzem expressivamente as emissões; instalar uma URV para recuperar os produtos que volatilizaram; e realizar o monitoramento com o LDAR anualmente a fim de verificar se há e reparar vazamentos.

Além de ajudar a precaver o ar ambiente da poluição, e suas consequências, a redução de emissões também contribui com a qualidade de vida da população do entorno e como um todo; inclusive, esta prática é muito incentivada para todas as empresas administradoras deste tipo de empreendimento, não só pelos motivos já citados, mas também porque emitir produtos

volatilizados para a atmosfera gera uma perda financeira enorme. E na realidade atual, onde cada vez mais as grandes marcas se preocupam menos com o ambiental e o social e mais com a obtenção de lucro, incentivar a implementação dessas práticas, com a justificativa de prevenir ou mitigar o impacto ambiental, aliadas ao retorno financeiro, se torna um caminho promissor a ser seguido.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLGAYER, M. L. **Determinação do Fator de Saturação e Recuperação de Vapores nas Operações de Carregamento de Derivados de Petróleo.** Tese (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

AMARAL, C. H. C.; RÊGO, R. C.; NORTHCROSS, A. L. Comparação dos padrões de qualidade do ar entre o Brasil e países dos cinco continentes. **Revista Sustainability in Debate**, Brasília, v. 14, n.3, p. 234-245, dez/2023.

AUTORIDADE PORTUÁRIA DE SANTOS. **Terminal de Granéis Líquidos – STS08.** Disponível em: <<https://www.portodesantos.com.br/wp-content/uploads/STS08-Secao-A-Apresentacao.pdf>> Acesso em: Junho de 2024.

BARBOSA, R. V. R. (2009). **Estudo do campo térmico urbano de São Carlos (SP): análise da intensidade da ilha de calor urbano em episódio climático de verão.** Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

BELEM, C.P.; VARGAS, R.M.F. **Redução da Emissão de VOCs Durante Carga e Descarga de Hidrocarbonetos Líquidos em Indústrias Petroquímicas.** 2008. Artigo - Pontifícia Universidade Católica – PUC, Rio Grande do Sul, 2008.

BRASIL. Lei Nº 14.850, de 02 de maio de 2024. Institui a Política Nacional de Qualidade do Ar. Brasília. DF: Diário Oficial da União, 2024.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Decisão de Diretoria nº 118/2021/I/C, de 26 de novembro de 2021. **Diário Oficial Estado de São Paulo:** seção 1, Brasília, DF, ed. nº 131 (234), p. 68, 09 dez. 2021.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Decisão de Diretoria nº 118/2021/I/C, de 26 de novembro de 2021. **Diário Oficial Estado de São Paulo**: seção 1, Brasília, DF, ed. nº 131 (234), p. 68, 09 dez. 2021.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Decisão de Diretoria nº 119/2021/I/C, de 26 de novembro de 2021. **Diário Oficial Estado de São Paulo**: seção 1, Brasília, DF, ed. nº 131 (232), p. 137-140, 07 dez. 2021.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Plano de Redução de Emissões de Fontes Estacionárias – PREFE**. 2014.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Plano de Redução de Emissões de Fontes Estacionárias – PREFE**: Guia de Melhor Tecnologia Prática Disponível (MTPD). Cap. 5, p. 87-116. 2017.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Sistema de Informações da Qualidade do Ar - QUALAR**. Disponível em: <<https://qualar.cetesb.sp.gov.br/qualar/home.do>> Acesso em: Março de 2024.

CONAMA - Comissão Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 481 de 19/11/2018. Dispõe sobre qualidade do ar. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ed. nº 223, p. 155, 21 nov. 2018.

CONCAWE. **VOC emissions from loading gasoline onto sea-going tankers in EU-15: control technology and cost-effectiveness**. Report No. 6/02. Brussels, 2002.

COMISSÃO DE NORMALIZAÇÃO TÉCNICA – CONTEC. **PETROBRAS N-270 REV. G**: Projeto de Tanque de Armazenamento Atmosférico. CONTEC - SC-02, 2020.

EMBRAPA, EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Estação de Monitoramento de Condições Meteorológicas – Embrapa Pecuária Sudeste. Disponível em: <<https://www.cppse.embrapa.br/meteorologia/index.php?pg=inicio>> Acesso em: Março de 2024.

ENESENS®. **LDAR, mais que um programa de detecção de vazamentos e reparos, uma decisão econômica.** Disponível em: < <https://enesens.com.br/ldar-mais-que-um-programa-de-deteccao-de-vazametos-e-reparos-uma-decisao-economica/>>. Acesso em: Junho de 2024.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Leak Detection and Repair: A Best Practices Guide.** US. Environmental, Out. 2007. Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-02/documents/ldarguide.pdf>> Acesso em: Maio 2024.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Compilation of Air Pollutant Emissions Factors, AP-42. 5ª Ed. Vol. I, Cap. 7.1: **Liquid storage tanks.** Research Triangle Park. North Carolina, Mar. 2020. p. 7.1-1 - 7.1-102 Disponível em: < <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/ch07s01.pdf>> Acesso em: Maio de 2024.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Protocol for Equipment Leak Emission Estimates EPA-453/R-95-017.** Research Triangle Park. North Carolina, Nov. 1995. Disponível em: < https://19january2021snapshot.epa.gov/sites/static/files/2020-09/documents/protocol_for_equipment_leak_emission_estimates.pdf> Acesso em: Maio 2024.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Technical Overview of Volatile Organic Compounds.** US. Environmental, Mar. 2024. Disponível em: <<https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds>> Acesso em: Maio de 2024.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Compilation of Air Pollutant Emissions Factors, AP-42. 5ªEd. Vol. I, Cap. 5.2: **Transportation And Marketing Of Petroleum Liquids**. Research Triangle Park. North Carolina, Mar. 2020. p. 7.1-1 - 7.1-102 Disponível em: < https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-09/documents/5.2_transportation_and_marketing_of_petroleum_liquids.pdf> Acesso em: Maio de 2024.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Storage Tank Emissions Calculation Software, Version 4.09: **User's Guide to Tanks**. Emission Factor and Inventory Group Emissions, Monitoring, and Analysis Division Office of Air Quality Planning and Standards, September.1999. p.1 – 87. Disponível em: < <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-11/documents/tank4man.pdf>> Acesso em: Maio de 2024.

EPPELSON, DAVID. Et al. Equivalent Leak Definitions for Smart LDAR (Leak Detection and Repair) When Using Optical Imaging Technology, **Journal of the Air & Waste Management Association**, 57:9, 1050-1060, 2007. DOI: <10.3155/1047-3289.57.9.1050> Disponível em: <<https://doi.org/10.3155/1047-3289.57.9.1050>>. Acesso em: Maio de 2024.

Google Earth Pro. Versão 7.3.6.9796. [S. l.]: Google LLC ,2024. Software livre.

HUNTER, P.; OYAMA, S. T. **Control of Volatile Organic Compound Emissions: Conventional and Emerging Technologies**, New York: J. Wiley & Sons, Inc., 2000.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades: Panorama - Censo 2022. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-carlos/panorama>>. Acesso em: Maio de 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS – IBP. **Controle de Emissões de Compostos Orgânicos Voláteis na Indústria do Petróleo**. Gutierrez, R.; Moreira, A. C. C. A. *Rio Oil & Gas Expo and Conference*, Rio de Janeiro, 2004. (Relatório Técnico IBP77104).

KHAN, Faisal I.; GHOSHAL, Alope Kr. Removal of Volatile Organic Compounds from pollute air. **Journal of Loss Prevention in the process industries**, vol. 13, p. 527-545, 2000.

KLEPIKOV, V. P; KLEPIKOVA, L. V; SHAHBAZ, M. Oil tank farm emission trends of Russian refineries. **Energy Reports**, v. 8, p. 1236-1244, 2022.

KOLICHESKI, M. B.; CASTILHO, J. A.; KAWANO, M. Tanques de armazenamento de combustíveis: critérios de projeto visando a redução de emissões de compostos orgânicos voláteis (COV). **Revista Gestão e Desenvolvimento**, v. 20, n. 1, p. 54-76, jan/jun 2023. DOI: <<https://doi.org/10.25112/rgd.v20i1.2803>> Disponível em: <<https://periodicos.feevale.br/seer/index.php/revistagestaoedesenvolvimento/article/view/280>>. Acesso em: Abril de 2024.

LV, D.; LU, A.; TAN, X.; SHAO, M.; XIE, S.; WANG, L. Source profiles, emission factors and associated contributions to secondary pollution of volatile organic compounds (VOCs) emitted from a local petroleum refinery in Shandong. **Environmental Pollution**, n. 274, 2021. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116589.

MARTINS, D. C. **Estudo Do Controle de Emissões de Compostos Orgânicos Voláteis em Tanques de Armazenamento de Produtos Químicos**. Tese (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) –, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.

MHT Shopping. **Bomba Centrífuga Me 1 Wdm 2,0 Cv Motor Weg Monofásico**. Disponível em: <<https://www.mhtshopping.com.br/bomba-centrifuga-me-1-wdm-20-cv-motor-weg-monofasico>>. Acesso em: Junho de 2024.

PETRAGLIA, J.; GATI, A. M.; YU, A. S. O.; NASCIMENTO, P. T. S.; JUNIOR, A. S. C. Análise do processo decisório na ampliação da armazenagem de etanol no porto de santos: Um estudo de caso. **REGE – Revista de Gestão**, v. 21, n. 3, p. 361-378, jul./set. 2014. DOI: 10.5700/rege535.

PETROBLOG BY SANTINI. **Proteção e Segurança de Tanques de Armazenamento com Teto Fixo.** 2015. Disponível em: <<https://www.petroblog.com.br/wp-content/uploads/Prote%C3%A7%C3%A3o-e-seguran%C3%A7a-de-tanques-de-armazenamento-com-teto-fixo2.pdf>> Acesso em: Abril de 2024.

PROTEGO®. **Deflagration Flame Arrester, endurance burning-proof, End-of-Line.** Disponível em: <https://www.protego.com/products/product-search/eb/?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIqYXM1a2hhgMVLfNIAB3DpAOAEAAAYASAAEgIpPPD_BwE> Acesso em: Maio de 2024.

SÃO CARLOS. Prefeitura Municipal. **Plano Diretor.** São Carlos, 2016. Disponível em: <<http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/utilidade-publica/plano-diretor.html>> Acesso em: Abril de 2024.

SÃO PAULO. Decreto nº 8.468, de 08 de setembro de 1976. **Diário Oficial Estado de São Paulo.** Regulamento da Lei n.º 997, de 31 de Maio de 1976, que Dispõe Sobre a Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente.

SÃO PAULO. Decreto nº 59.113, de 23 de abril de 2013. **Diário Oficial Estado de São Paulo.** Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas.

TANKS 4.09d: Emission Factor and Inventory Group. Versão 4.09. [S. l.]: Environmental Protection Agency - EPA, 1999. Software livre.