

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOSÉ AUGUSTO CASTILHO

ESTABELECIMENTO DE CRITÉRIOS DE PROJETO DE TANQUES DE  
ARMAZENAMENTO A PARTIR DA AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DE EMISSÕES  
DE COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS

CURITIBA

2018

JOSÉ AUGUSTO CASTILHO

ESTABELECIMENTO DE CRITÉRIOS DE PROJETO DE TANQUES DE  
ARMAZENAMENTO A PARTIR DA AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DE EMISSÕES  
DE COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS

Dissertação apresentada como requisito parcial à  
obtenção do título de mestre, do Programa de  
Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e  
Industrial – PPGMAUI, Setor de Tecnologia, da  
Universidade Federal do Paraná, Universidade de  
Stuttgart e SENAI-PR.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Mônica Beatriz Kolichski  
Coorientador: Prof. MSc. Mauricy Kawano

CURITIBA

2018

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

C352e

Castilho, José Augusto

Estabelecimento de critérios de projeto de tanques de armazenamento a partir da avaliação da redução de emissões de compostos orgânicos voláteis [recurso eletrônico] / José Augusto Castilho. – Curitiba, 2018.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, 2018.

Orientador: Mônica Beatriz Kolicheski – Coorientador: Mauricy Kawano.

1. Ar – Poluição. 2. Hidrocarbonetos. 3. Compostos orgânicos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Kolicheski, Mônica Beatriz. III. Kawano, Mauricy. IV. Título.

CDD: 363.7392

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MEIO AMBIENTE  
URBANO E INDUSTRIAL

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **JOSÉ AUGUSTO CASTILHO** intitulada: **ESTABELECIMENTO DE CRITÉRIOS DE PROJETO DE TANQUES DE ARMAZENAMENTO A PARTIR DA AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 29 de Agosto de 2018.

  
MÔNICA BEATRIZ KOLICHESKI  
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

  
EDSON JOSÉ JOAQUIM DE SOUZA  
Avaliador Externo (PETROBRAS)

  
PATRICIA CHARVET  
Avaliador Interno (UFPR)

## RESUMO

O armazenamento de hidrocarbonetos é gerador de impactos ambientais relevantes na indústria de petróleo e petroquímica. A emissão de compostos orgânicos voláteis (COV), provenientes de tanques de armazenamento, pode implicar em diferentes problemas de poluição do ar, com prejuízo à saúde das pessoas, impactos à flora e fauna, degradação de materiais e mudanças climáticas. Além da questão ambiental, a liberação destes compostos significa perda econômica dos produtos volatilizados. Este estudo teve como objetivo estabelecer critérios ambientais para o desenvolvimento de projetos de tanques de armazenamento de hidrocarbonetos. As emissões de COV de três tipos de tanques de armazenamento de hidrocarbonetos foram estimadas, variando parâmetros de dimensionamento, taxa de transferência e cor e integridade do revestimento externo, para os produtos gasolina, óleo diesel e petróleo cru. Os tipos de tanques avaliados foram: tanque de teto fixo, tanque de teto flutuante externo e tanque de teto flutuante interno. As estimativas de emissão foram realizadas utilizando o programa Tanks, desenvolvido e disponibilizado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. EPA), que utiliza fatores de emissão para os cálculos. Os resultados indicaram que o dimensionamento adequado dos tanques de armazenamento pode levar a reduções de mais de 50% nas emissões de COV. Critérios adequados relacionados à taxa de transferência permitem reduções de até 80%, enquanto que o revestimento adequado do equipamento permite diminuir até 40% das emissões de COV. Critérios de relevância da aplicação das tecnologias testadas foram estabelecidos, e podem ser utilizados para auxiliar na decisão da melhor tecnologia a ser aplicada em projetos de novos tanques, resultando no aumento da eficiência dos processos de armazenamento de hidrocarbonetos e contribuindo para a minimização da poluição atmosférica.

Palavras-chave: Poluição do ar; hidrocarbonetos; COV; fatores de emissão; AP-42; programa Tanks; emissões fugitivas.

## ABSTRACT

*The storage of hydrocarbons generates relevant environmental impacts in the petroleum and petrochemical industry. The emission of volatile organic compounds (VOC) proceeding from storage tanks can implicate in different air pollution problems, with damage to human health, impacts on flora and fauna, material degradation and climate changes. In addition to the environmental issue, the release of these compounds implies economic loss of the volatilized products. This study aimed establish environmental criterion for the development of hydrocarbon storage tanks projects. Therefore, the VOC emissions of three types of hydrocarbon storage tanks were estimated, varying parameters of design, transfer rate and color and integrity of the external covering, for gasoline, diesel and crude oil products. The tanks evaluated were: fixed roof tank, external floating roof tank and internal floating roof tank. The emission estimates were made using the software Tanks, developed and made available by the United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA), which uses emission factors for calculations. The results indicate that proper design of storage tanks can lead to reductions of more than 50% in VOC emissions. Appropriate transfer rate criteria allows reductions of up to 80%, while adequate external covering of the equipment allows a reduction of up to 40% in VOC emissions. Criteria for the relevance of the application of the technologies tested have been established and can be used to assist in the decision of the best technology to be applied in new tank projects, resulting in increased efficiency of hydrocarbon storage processes and contributing to the minimization of atmospheric pollution.*

*Keywords: Air pollution; hydrocarbons storage; VOC; emission factors; AP-42; software Tanks; fugitive emissions.*

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - IMAGEM AÉREA DA REFINARIA DE PETRÓLEO PRESIDENTE BERNARDES, EM CUBATÃO - SP.....	19
FIGURA 2 - TANQUE DE TETO FIXO.....	21
FIGURA 3 - TANQUE DE TETO FLUTUANTE EXTERNO, DO TIPO PONTÃO.....	23
FIGURA 4 - TANQUE DE TETO FLUTUANTE EXTERNO, DO DUPLO DECK.....	23
FIGURA 5 – DETALHE DO SELO DE VEDAÇÃO DO TANQUE DE TETO FLUTUANTE.....	23
FIGURA 6 - TANQUE DE TETO FLUTUANTE INTERNO.....	25
FIGURA 7 - TANQUE DE TETO FLUTUANTE COM DOMO EXTERNO.....	26
FIGURA 8 - ESQUEMA DE UMA UNIDADE DE RECUPERAÇÃO DE VAPOR, ACOPLADA A UM TANQUE DE ARMAZENAMENTO.....	27
FIGURA 9 - CURVAS COM POSSIBILIDADES DE VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DIÂMETRO E ALTURA, PARA OS VOLUMES UTILIZADOS NO ESTUDO.....	44
FIGURA 10 - PERCENTUAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES EM RELAÇÃO A VARIAÇÃO DA RAZÃO DIÂMETRO/ALTURA (D/H) NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E OS QUATRO DIFERENTES VOLUMES, PARA O PRODUTO GASOLINA.....	50
FIGURA 11 - PERCENTUAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES EM RELAÇÃO A VARIAÇÃO DA RAZÃO DIÂMETRO/ALTURA (D/H) NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E OS QUATRO DIFERENTES VOLUMES, PARA O PRODUTO DIESEL.....	51
FIGURA 12 - PERCENTUAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES EM RELAÇÃO A VARIAÇÃO DA RAZÃO DIÂMETRO/ALTURA (D/H) NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E UM VOLUME DE 80.000 M <sup>3</sup> , PARA O PRODUTO PETRÓLEO.....	51
FIGURA 13 - ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE COV EM TANQUES DE TETO FIXO, EM FUNÇÃO DE VARIAÇÕES DOS PARAMETROS RELACIONADOS A TAXA DE TRANSFERÊNCIA PARA GASOLINA E DIESEL EM DIFERENTES VOLUMES (EM M <sup>3</sup> ).....	54
FIGURA 14 - ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE COV EM TANQUES DE TETO FLUTUANTE EXTERNO, EM FUNÇÃO DE VARIAÇÕES DOS PARAMETROS RELACIONADOS A TAXA DE TRANSFERÊNCIA PARA GASOLINA E DIESEL EM DIFERENTES VOLUMES (EM M <sup>3</sup> ).....	55
FIGURA 15 - ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE COV EM TANQUES DE TETO FLUTUANTE INTERNO, EM FUNÇÃO DE VARIAÇÕES DOS PARAMETROS RELACIONADOS A TAXA DE	

TRANSFERÊNCIA PARA GASOLINA E DIESEL EM DIFERENTES VOLUMES (EM M <sup>3</sup> ).....	55
FIGURA 16 - REDUÇÃO PERCENTUAL DAS EMISSÕES DE TANQUES, COMPARANDO AS DIFERENTES CONDIÇÕES TESTADAS PARA AVALIAÇÃO DA COR E INTEGRIDADE DO REVESTIMENTO PARA A GASOLINA, NO TANQUE DE 80.000 M <sup>3</sup> .....	64
FIGURA 17 - REDUÇÃO PERCENTUAL DAS EMISSÕES DE TANQUES, COMPARANDO AS DIFERENTES CONDIÇÕES TESTADAS PARA AVALIAÇÃO DA COR E INTEGRIDADE DO REVESTIMENTO PARA O DIESEL NO TANQUE DE 80.000 M <sup>3</sup> .....	65
FIGURA 18 - REDUÇÃO PERCENTUAL DAS EMISSÕES DE TANQUES, COMPARANDO AS DIFERENTES CONDIÇÕES TESTADAS PARA AVALIAÇÃO DA COR E INTEGRIDADE DO REVESTIMENTO PARA O PETRÓLEO, NO TANQUE DE 80.000 M <sup>3</sup> .....	65
FIGURA 19 - VALORES DO FATOR DE GIROS, $K_N$ , CONFORME O NÚMERO DE GIROS.....	70

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DOS PRODUTOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES.....	34
TABELA 2 – DADOS METEOROLÓGICOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES. DADOS REFERENTES AO ANO DE 2017.....	36
TABELA 3 – CONFIGURAÇÕES TESTADAS PARA DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES REFERENTES AO DIMENSIONAMENTO.....	45
TABELA 4 – RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES EM FUNÇÃO DO DIMENSIONAMENTO, PARA OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E OS PRODUTOS GASOLINA E DIESEL.....	46
TABELA 5 – RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES EM FUNÇÃO DO DIMENSIONAMENTO, PARA OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E O PRODUTO PETRÓLEO.....	47
TABELA 6 – PERCENTUAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E OS PRODUTOS GASOLINA E DIESEL.....	48
TABELA 7 – PERCENTUAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E O PRODUTO PETRÓLEO.....	49
TABELA 8 – CONFIGURAÇÕES PARA ESTIMATIVA DAS EMISSÕES REFERENTES À TAXA DE TRANSFERÊNCIA.....	52
TABELA 9 – RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DA TAXA DE TRANSFERÊNCIA, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E OS PRODUTOS GASOLINA E DIESEL.....	53
TABELA 10 - EMISSÕES DE TANQUES, COM TAXA DE TRANSFERÊNCIA CONSTANTE E VOLUME E Nº DE GIROS VARIÁVEIS.....	56
TABELA 11 - REDUÇÃO PERCENTUAL DAS EMISSÕES DE COV EM TANQUES, COM TAXA DE TRANSFERÊNCIA CONSTANTE E VOLUME E Nº DE GIROS VARIÁVEIS.....	57
TABELA 12- EMISSÕES DE COV EM TANQUES, COM TAXA DE TRANSFERÊNCIA FIXA, Nº DE GIROS CONSTANTE E COM VOLUME E Nº DE TANQUES VARIÁVEIS PARA GASOLINA E DIESEL.....	57
TABELA 13 – EMISSÕES DE COV EM TANQUES, COM TAXA DE TRANSFERÊNCIA E Nº DE GIROS CONSTANTES E COM VOLUME E Nº DE TANQUES VARIÁVEIS PARA O PETRÓLEO.....	58

TABELA 14 – REDUÇÃO PERCENTUAL DAS EMISSÕES DE TANQUES, COM TAXA DE TRANSFERÊNCIA E Nº DE GIROS CONSTANTES E COM VOLUME E Nº DE TANQUES VARIÁVEIS PARA OS PRODUTOS GASOLINA E DIESEL.....	59
TABELA 15 – REDUÇÃO PERCENTUAL DAS EMISSÕES DE TANQUES, COM TAXA DE TRANSFERÊNCIA E Nº DE GIROS CONSTANTES E COM VOLUME E Nº DE TANQUES VARIÁVEIS PARA O PETRÓLEO.....	59
TABELA 16 – RELAÇÕES DIÂMETRO/ALTURA (D/H) TESTADOS PARA ESTIMATIVA DAS EMISSÕES RELACIONADAS A COR E INTEGRIDADE DE REVESTIMENTO EXTERNO.....	61
TABELA 17 – RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE COV EM FUNÇÃO DA COR E INTEGRIDADE DO REVESTIMENTO EXTERNO, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E OS PRODUTOS GASOLINA E DIESEL.....	61
TABELA 18 – RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE COV EM FUNÇÃO DA COR E INTEGRIDADE DO REVESTIMENTO EXTERNO, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E O PRODUTO PETRÓLEO.....	62
TABELA 19 – PERCENTUAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE COV PARA AVALIAÇÃO DA COR E INTEGRIDADE DO REVESTIMENTO EXTERNO, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E OS PRODUTOS GASOLINA E DIESEL.....	63
TABELA 20 – PERCENTUAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE COV PARA AVALIAÇÃO DA COR E INTEGRIDADE DO REVESTIMENTO EXTERNO, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E O PRODUTO PETRÓLEO.....	63
TABELA 21 – REDUÇÃO PERCENTUAL DAS EMISSÕES DE COV NA AVALIAÇÃO DA INFLUENCIA DO DIMENSIONAMENTO, CONSIDERANDO RELAÇÕES D/H DE 4 E 6, PARA TANQUES DE TETO FIXO E PRODUTO GASOLINA.....	68
TABELA 22 – FATORES $\alpha$ PARA DIVERSAS CORES DE TANQUES DE ARMAZENAMENTO DE HIDROCARBONETOS.....	73
TABELA 23 – EMISSÕES DE COV DA PETROBRAS ENTRE 2014 E 2016.....	75

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - PRINCIPAIS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS E SUAS FONTES EM PETROQUÍMICAS.....	15
QUADRO 2 - VARIÁVEIS DO PROGRAMA TANKS PARA CADA UM DOS TANQUES AVALIADOS NO ESTUDO .....	35
QUADRO 3 - MASSAS ESPECÍFICAS DOS PRODUTOS AVALIADOS.....	71
QUADRO 4 - TIPOS DE TANQUES RECOMENDADOS PELA NORMA N-270 PARA ARMAZENAMENTO DOS PRODUTOS AVALIADOS NESTE TRABALHO.....	76
QUADRO 5 - CRITÉRIOS PARA PROJETOS DE TANQUES PARA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE COV.....	79

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AOS	Aerossóis Orgânicos Secundários
API	<i>American Petroleum Institute</i> (Instituto Americano do Petróleo)
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
EIA	<i>U.S Energy Information and Administration</i> (Informação e Administração de Energia dos Estados Unidos)
GNL	Gás Natural Liquefeito
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de hidrogênio
NH <sub>3</sub>	Amônia
NO	Monóxido de nitrogênio
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrogênio
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
PAN	Peroxiacetilnitrato
QAV	Querosene de aviação
SEMA	Secretaria Estadual do Meio Ambiente
SI	Sistema Internacional de Unidades
SO <sub>x</sub>	Óxidos de enxofre
URE	Unidade de Recuperação de Enxofre
URV	Unidade de Recuperação de Vapor
U.S. EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i> (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)

## LISTA DE VARIÁVEIS

A	Área superficial, m <sup>2</sup>
C <sub>S</sub>	Fator de ancoragem do costado, bbl/1000 ft <sup>2</sup>
D	Diâmetro, ft
D/H	Relação diâmetro/altura, adimensional
F <sub>C</sub>	Diâmetro efetivo das colunas, ft
F <sub>F</sub>	Fator de emissão por acessórios, dependente do número e tipo de acessório e de fatores de emissão próprios de cada acessório, lb-mol/ano
H	Altura, ft
H <sub>VO</sub>	Altura efetiva do tanque + altura do teto – altura do líquido, ft
I	Irradiação total média diária, Btu/(ft <sup>2</sup> .dia)
K <sub>C</sub>	Fator de produto, adimensional
K <sub>D</sub>	Fator de emissão de costuras por unidade de comprimento de costuras, lb-mol/ft.ano
K <sub>E</sub>	Fator de expansão do espaço vapor, adimensional
K <sub>N</sub>	Fator de giros do tanque, adimensional
K <sub>P</sub>	Fator de produto, adimensional
K <sub>Ra</sub>	Fator de emissão com velocidade do vento nula, lb-mol/ft.ano
K <sub>Rb</sub>	Fator de emissão dependente da velocidade do vento, lb-mol/(mph) <sup>n</sup> .ft.ano
K <sub>S</sub>	Fator de saturação do vapor expelido, adimensional
L <sub>D</sub>	Emissões de costuras do teto, lb/ano
L <sub>F</sub>	Emissões de acessórios do teto, lb/ano
L <sub>R</sub>	Emissões do anel de vedação do teto, lb/ano
L <sub>S</sub>	Emissões de armazenamento, lb/ano
L <sub>T</sub>	Emissões totais, lb/ano
L <sub>W</sub>	Emissões de operação, lb/ano
L <sub>WD</sub>	Emissões de descarregamento, lb/ano
M <sub>V</sub>	Massa molecular média do vapor, lb/lb-mol
n	Expoente da selagem relacionada a velocidade do vento, adimensional
N	Número de giros por ano, ano <sup>-1</sup>

$N_C$	Número de colunas do teto, adimensional
$P^*$	Função da pressão de vapor, adimensional
$P_{abs}$	Taxa de absorção de energia
$P_A$	Pressão atmosférica média, psia
$P_{VA}$	Pressão de vapor na temperatura média diária da superfície do líquido psia
$Q$	Movimentação anual do tanque, bbl/ano
$S_D$	Fator de comprimento das costuras, ft/ft <sup>2</sup>
$T_{amb}$	Temperatura ambiente, K
$T_{AA}$	Temperatura média ambiente diária, °R
$T_B$	Temperatura média diária da massa líquida, °R
$T_{LA}$	Temperatura diária da superfície do líquido, °R
$v$	Velocidade média do vento no local, mph
$V$	Volume, ft <sup>3</sup>
$V_V$	Volume do espaço vapor, ft <sup>3</sup>
$W_L$	Massa específica do líquido, lb/gal
$W_V$	Massa específica do vapor, lb/ft <sup>3</sup>
$\alpha$	Fator de absorção de energia luminosa, adimensional
$\Delta P_B$	Faixa de ajuste da válvula de pressão – vácuo, psi
$\Delta P_V$	Variação diária da pressão de vapor, psi
$\Delta T_A$	Variação da temperatura ambiente média, expressa em °R
$\Delta T_V$	Variação diária da temperatura de vapor, °R
$\epsilon$	Emissividade da superfície do objeto, entre 0 e 1, dependendo da composição da superfície
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann ( $s = 5,6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	OBJETIVOS.....	13
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	14
2.1	EMISSÕES ATMOSFÉRICAS .....	14
2.2	COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS E SEUS EFEITOS.....	15
2.3	TRANSFERÊNCIA E ESTOCAGEM DE HIDROCARBONETOS.....	18
2.3.1	Tanques de armazenamento .....	19
2.3.1.1	Tanque de teto fixo .....	20
2.3.1.2	Tanque de teto flutuante externo .....	20
2.3.1.3	Tanque de teto flutuante interno .....	23
2.3.1.4	Tanque de teto flutuante com domo.....	25
2.3.1.5	Outros tipos de tanque.....	26
2.4	ESTIMATIVAS DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS .....	27
2.5	ASPECTOS LEGAIS .....	27
3	METODOLOGIA .....	31
3.1	DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES PARA DIFERENTES TIPOLOGIAS DE TANQUES .....	31
3.1.1	Avaliação do dimensionamento dos tanques na emissão de compostos orgânicos voláteis .....	32
3.1.2	Avaliação da taxa de transferência de produtos na emissão de compostos orgânicos voláteis .....	32
3.1.3	Avaliação da cor e integridade do revestimento externo dos tanques nas emissões de compostos orgânicos voláteis .....	33
3.1.4	Produtos avaliados .....	34
3.1.5	Entrada de dados no programa Tanks.....	34
3.1.5.1	Dados meteorológicos .....	36
3.2	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS SIMULADOS NAS EMISSÕES DE COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS .....	36
3.2.1	TANQUES DE TETO FIXO.....	37

3.3	ESTABELECIMENTO DE CRITÉRIOS PARA PROJETOS DE TANQUES .....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	42
4.1	DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES PARA DIFERENTES TIPOLOGIAS DE TANQUES.....	42
4.1.1	Tanques de armazenamento: determinação dos tipos e volumes dos tanques de armazenamento .....	42
4.1.2	Estimativa das emissões de COV em função do dimensionamento dos tanques de armazenamento .....	43
4.1.3	Estimativa das emissões de COV em função da taxa de transferência.....	52
4.1.4	Estimativa das emissões de COV em função da cor e integridade do revestimento externo dos tanques .....	60
4.2	INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS SIMULADOS NAS EMISSÕES DE COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS.....	66
4.2.1	Dimensionamento .....	67
4.2.2	Taxa de transferência .....	70
4.2.3	Cor e integridade do revestimento externo de costado e teto .....	72
4.3	ESTABELECIMENTO DE CRITÉRIOS PARA PROJETOS DE TANQUES .....	75
4.3.1	Dimensionamento .....	77
4.3.2	Taxa de transferência .....	77
4.3.3	Cor e integridade do revestimento externo de costado e teto .....	78
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	81
	REFERÊNCIAS .....	83
	APÊNDICE 1 – DADOS DE ENTRADA UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES NO PROGRAMATANKS.....	91
	APÊNDICE 2 – EXEMPLOS DE TELA DO PROGRAMA TANKS PARA INSERÇÃO DOS DADOS.....	96

## 1 INTRODUÇÃO

O consumo crescente de energia para sustentar o desenvolvimento industrial tem como consequência a degradação ambiental, observada pelo consumo de recursos naturais e pela geração de resíduos e contaminantes.

O armazenamento de hidrocarbonetos constitui-se num dos focos de impacto ambiental relevantes da indústria de petróleo e petroquímica. Segundo Prezotti e Tresmondi (2006), tanques de armazenamento são responsáveis pela emissão de 79% de compostos orgânicos voláteis em refinarias e plantas petroquímicas. A emissão de compostos orgânicos voláteis (COV) pode implicar em diferentes problemas de poluição do ar. Alguns de seus componentes são tóxicos e perigosos para a saúde, e todos eles contribuem para a formação de ozônio na baixa troposfera (JAECKER-VOIROL, 2000).

O ozônio troposférico é o subproduto mais importante da degradação dos COV. A substância é tóxica e afeta o crescimento de plantas, a saúde humana e os materiais (MARTINS, 2004). O ozônio é fator de preocupação em muitas cidades do Brasil. A redução das emissões de COV apresenta, dessa forma, uma relevante contribuição para melhoria da qualidade do ar de boa parte da população do país.

Além do ozônio, outros subprodutos da degradação dos COV, como o peroxiacetilnitrato (PAN), tem efeito similar nos danos ao meio ambiente.

Um aspecto importante é que as perdas por evaporação de hidrocarbonetos provenientes de armazenamentos em tanques apresentam, além do impacto ambiental, consequências econômicas, fazendo com que exista, adicionalmente, um interesse econômico das indústrias na minimização das emissões.

As emissões em tanques de armazenamento podem ser minimizadas se aplicadas tecnologias de armazenamento e condições de operação adequadas para cada condição observada. A avaliação dessas alternativas é o que se propõe com este estudo. As emissões de processos específicos, como a de tanques de armazenamento, podem ser avaliadas com o uso de fatores de emissão.

Os fatores de emissão são valores representativos, que tentam relacionar a quantidade de um poluente liberado para a atmosfera, com uma atividade associada

à liberação desse poluente. Os fatores de emissão são uma ferramenta importante na gestão de emissões, pois permitem avaliações de grandes volumes de informação, de maneira rápida e com razoável confiabilidade.

## 1.1 OBJETIVOS

Objetivo geral:

Estabelecer critérios para o desenvolvimento de projetos de tanques de armazenamento de hidrocarbonetos, com o propósito de redução das emissões.

Objetivos específicos:

- Determinar as emissões de compostos orgânicos voláteis de três tipos diferentes de tanques de armazenamento de hidrocarbonetos, variando parâmetros relacionados ao dimensionamento, taxas de transferência, cor e integridade do revestimento externo, com o uso de fatores de emissão do programa Tanks, considerando três produtos armazenados.
- Avaliar a influência de parâmetros relacionados ao dimensionamento, taxas de transferência, cor e integridade do revestimento externo do tanque, nas emissões de compostos orgânicos voláteis.
- Propor critérios para a elaboração de projetos de tanques de armazenamento de hidrocarbonetos, com vistas à redução das emissões de COV.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Entre os aspectos ambientais mais significativos decorrentes do desenvolvimento industrial estão as emissões atmosféricas. A emissão de poluentes na atmosfera pode causar problemas à saúde, ao meio ambiente e aos materiais.

De acordo com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 03, publicada em 28 de junho de 1990, entende-se como poluente atmosférico, qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar:

I - impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;

II - inconveniente ao bem-estar público;

III - danoso aos materiais, à fauna e flora.

IV - prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade (BRASIL, 1990).

Os poluentes atmosféricos podem ser classificados em dois tipos, de acordo com suas origens. Poluentes primários são emitidos diretamente por fontes de emissão. Os poluentes secundários são produtos de reações químicas ocorridas sobre os poluentes primários (JALLAD; ESPADA JALLAD, 2010).

Na indústria em geral, as fontes de emissões atmosféricas podem ser divididas em pontuais e difusas (MIHELICIC; ZIMMERMAN, 2015). As fontes pontuais são caracterizadas por serem pontos de emissão contínua de um determinado processo, como por exemplo, chaminés, tubulações ou desgaseificação de equipamentos. Já as fontes difusas são pontos eventuais de emissão, cujas características são normalmente variáveis e influenciadas por condições ambientais locais, como tanques de estocagem, emissões evaporativas de processo e emissões fugitivas (QUINTANILHA, 2009).

Em refinarias, de forma geral, o petróleo bruto é fracionado gerando gás liquefeito de petróleo, nafta, querosene para a aviação, óleo diesel, gasolina e óleo combustível, entre outros produtos utilizados como matéria-prima para a indústria petroquímica. O petróleo passa por vários processos físico-químicos, sendo o mais importante a destilação atmosférica. Os produtos mais pesados são encaminhados para as unidades de conversão, tais como unidades de craqueamento catalítico e de coqueamento retardado, para agregar valor ao produto. Outros tratamentos, como hidrodessulfurização, hidrotratamento e remoção de águas e gases ácidos, são adotados com o objetivo de estabilizar e melhorar os produtos (CETESB, 2017).

Todos estes processos petroquímicos geram emissões atmosféricas. Um resumo das emissões geradas pode ser visualizado no Quadro 1.

Os processos de transferência e estocagem de hidrocarbonetos, dentro das indústrias petroquímicas, levam a emissão de COV, poluentes primários responsáveis por diversos problemas ambientais. Esses poluentes são, adicionalmente, precursores de poluentes secundários, causadores de problemas ambientais igualmente importantes, após reações com outros componentes presentes na atmosfera (MARTINS, 2004).

## 2.2 COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS E SEUS EFEITOS

A Resolução nº 16, da Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Paraná (SEMA), publicada em 15 de abril de 2014 (PARANÁ, 2014), define que os COV são compostos orgânicos que possuem ponto ebulição de até 130°C, na pressão atmosférica, e podem contribuir na formação dos oxidantes fotoquímicos.

Segundo Dai et al. (2017), os COV podem, a curto e a longo prazo, causar efeitos adversos à saúde, incluindo irritação, alergias, redução das funções pulmonares, asma e até mesmo leucemia, especialmente em populações vulneráveis.

QUADRO 1 - PRINCIPAIS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS E SUAS FONTES EM PETROQUÍMICAS

POLUENTES	FONTE E/OU PROCESSO
Monóxido de carbono (CO)	Fornos e caldeiras, regeneradores de craqueamento catalítico fluidizado, caldeiras de CO, unidades de recuperação de enxofre (URE), sistemas de tocha, incineradores, dessalinização de petróleo bruto, destilação atmosférica, destilação a vácuo, craqueamento térmico, coque, craqueamento catalítico, hidrocraqueamento catalítico, hidrotreatamento/hidroprocessamento, alquilação, isomerização, reformação catalítica e desasfaltação a propano.
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	Fornos de processo, caldeiras, turbinas a gás, regeneradores de craqueamento catalítico fluidizado, caldeiras de CO, sistemas de tocha, incineradores, separação de CO <sub>2</sub> de plantas de gás natural liquefeito (GNL).
Óxidos de nitrogênio (NO, NO <sub>2</sub> )	Fornos de processo, caldeiras, turbinas a gás, regeneradores de craqueamento catalítico fluidizado, caldeiras de CO, calcinadores de coque, incineradores, sistemas de tocha, ou em processos como dessalinização de petróleo bruto, destilação atmosférica, destilação a vácuo, craqueamento térmico, coque, craqueamento catalítico, hidrocraqueamento catalítico, hidrotreatamento/hidroprocessamento, alquilação, isomerização, reformação catalítica e desasfaltação a propano.
Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)	Regeneradores de craqueamento catalítico fluidizado.
Particulado (incluindo metais)	Fornos e caldeiras, particularmente quando se queima combustíveis líquidos de refinaria, regeneradores de craqueamento catalítico fluidizado, caldeiras de CO, plantas de coque, incineradores, ou em processos como dessalinização de petróleo bruto, destilação atmosférica, destilação a vácuo, craqueamento térmico, coque, craqueamento catalítico, hidrocraqueamento catalítico, hidrotreatamento/hidroprocessamento, alquilação, isomerização, reformação catalítica e desasfaltação a propano.
Óxidos de enxofre (SO <sub>x</sub> )	Fornos e caldeiras, regeneradores de craqueamento catalítico fluidizado, caldeiras de CO, unidades de recuperação de enxofre, sistemas de tocha, incineradores, ou em processos como dessalinização de petróleo bruto, destilação atmosférica, destilação a vácuo, craqueamento térmico, coque, craqueamento catalítico, hidrocraqueamento catalítico, hidrotreatamento / hidroprocessamento, alquilação, isomerização, reformagem catalítica e desasfaltação a propano.
Compostos Orgânicos Voláteis (COV)	Instalações de transferência e estocagem (tancagem), unidades de separação, sistemas de separação óleo/água, emissões fugitivas (válvulas, flanges, etc.), vents e sistemas de tocha.
Hidrocarbonetos	Dessalinização de petróleo bruto, destilação atmosférica, destilação a vácuo, craqueamento térmico, coque, craqueamento catalítico, hidrocraqueamento catalítico, hidrotreatamento/hidroprocessamento, alquilação, isomerização, reformagem catalítica, desasfaltação a propano e tratamento de efluentes.
Particulado de catalisador	Hidrocraqueamento catalítico.
Ácido clorídrico	Isomerização.
H <sub>2</sub> S	Lavagem cáustica em polimerização e no tratamento de efluentes.
NH <sub>3</sub>	Tratamento de efluentes.
Solventes	Extração de solventes e desparafinação.
Propano	Desasfaltação a propano.

FONTE: Adaptado de JAFARINEJAD, 2017.

As concentrações de COV em locais próximos a complexos petroquímicos são muito maiores que em áreas residenciais (WU et al., 2014; CETIN, ODABASI e SEYFIOGLU, 2003). No caso de refinarias, a emissão de COV depende, dentre outros fatores, das características do óleo processado e as emissões totais típicas variam entre 50 a 1000 toneladas por milhão de toneladas de óleo cru processado (MALAKAR et al., 2017).

Nos Estados Unidos, a Agência Ambiental Americana (U.S. EPA) elabora métodos reconhecidos mundialmente para o cálculo das emissões atmosféricas. Países da comunidade europeia também desenvolvem tecnologias próprias de controle e recuperação de COV (MARTINS, 2004).

Diversos estudos têm se preocupado, recentemente, com os problemas ambientais relacionados aos COV. Poluentes secundários provenientes de reações envolvendo esse poluente, como os chamados aerossóis orgânicos secundários (AOS), além do ozônio e do peroxiacetilnitrato (PAN), têm recebido considerável atenção, como em Zhang et al.(2017), Li et al. (2015) e Huang et al. (2015). Esses autores avaliaram origens e distribuição dos COV e seus poluentes secundários.

O número de publicações relacionadas à COV na China, por exemplo, que passa por uma recente expansão industrial, cresceu exponencialmente nos últimos 10 anos. Os estudos são relacionados a abundância dos compostos, composição e fontes, assim como os processos químicos responsáveis pela geração de ozônio, e estratégias para controle dos poluentes primários (GUO et al., 2017).

Os COV, em reação com óxidos de nitrogênio e com oxigênio atmosférico, na presença de luz solar, conduzem a geração do ozônio troposférico. O gás é azul claro, com odor característico. É tóxico e prejudica as funções pulmonares em pessoas saudáveis. Estudos que avaliam a exposição em longo prazo tem demonstrado aumento do risco de morte por problemas respiratórios (JALLAD; ESPADA-JALLAD, 2010).

Atualmente existem métodos para avaliar o impacto dos COV pelo seu potencial de geração de ozônio. O estado da Califórnia, nos Estados Unidos, por exemplo, tem adotado regulamentações sobre compostos orgânicos voláteis baseadas no impacto do ozônio troposférico gerado pelos COV. Esses impactos são quantificados usando a escala da Máxima Reatividade Incrementada (*Maximum*

*Incremental Reactivity – MIR*). Os COV reativos fotoquimicamente podem ser consultados numa tabela que relaciona os COV e seu respectivo potencial (quantidade de O<sub>3</sub> formado por unidade de COV) (CARTES, 2009).

Estudos mostram que os poluentes precursores do ozônio não apresentam apenas efeitos locais. Elevações nas concentrações deste gás no oeste dos Estados Unidos foram atribuídas ao transporte de poluentes da Ásia (RYOO, 2017).

### 2.3 TRANSFERÊNCIA E ESTOCAGEM DE HIDROCARBONETOS

Um parque de tancagem é um depósito de hidrocarbonetos, uma instalação para armazenamento de produtos químicos líquidos, como petróleo, gasolina, diesel, querosene de aviação, solventes, petroquímicos, dentre outros (SENGUPTA; GUPTA; MISHRA, 2011).

Os diversos processos necessários para a obtenção dos produtos do petróleo exigem grandes equipamentos de armazenamento de líquidos, que ocupam grandes áreas de uma refinaria, como se pode verificar na Figura 1. Ainda existem os terminais de petróleo e derivados, onde praticamente toda a área destina-se à tancagem.

FIGURA 1 – IMAGEM AÉREA DA REFINARIA DE PETRÓLEO PRESIDENTE BERNARDES, EM CUBATÃO - SP.



FONTE: Adaptado de GOOGLE, 2018

Nestas áreas de armazenamento ocorrem perdas por evaporação, que de modo geral ocorrem durante o armazenamento, carregamento, esvaziamento, transporte e reabastecimento (FARHAN et al., 2017).

### 2.3.1 Tanques de armazenamento

Os tanques de armazenamento de hidrocarbonetos são encontrados em indústrias como as de produção e refinação de petróleo, produção química e petroquímica, estocagem a granel e operações de transferência, entre outras.

Esses equipamentos permitem que as indústrias mantenham estoques estratégicos dentro de seus limites, garantindo a continuidade operacional em casos de interrupção do fornecimento de algum produto. Os tanques apresentam ainda a finalidade de acumular produtos para garantir o seu fornecimento contínuo aos clientes (MARTINS, 2004).

O tipo de tanque de armazenamento é fundamental na quantidade de emissões. Além dos aspectos construtivos, condições de movimentação de produtos e aspectos climáticos interferem nas emissões. Algumas medidas simples podem ser efetivas para reduzir as emissões, como, por exemplo, pintar o casco de branco (MARTINS, 2004).

O padrão mundial usado para o projeto de tanques cilíndrico de grande porte para armazenamento de produtos líquidos é a norma API STD 650. No Brasil existe ainda a norma N-270, da Petrobras, que complementa a primeira.

Segundo a norma N-270 (PETROBRAS, 2014), a seleção do tipo de tanque de armazenamento deve ser feita com o uso de um estudo adequado, levando em consideração: condições e requisitos ambientais, segurança operacional, custo do tanque, perdas operacionais e qualidade exigida no produto armazenado.

Quatro modelos básicos são usados tipicamente para tanques de armazenamento: teto fixo, teto flutuante externo, teto flutuante interno, teto flutuante com domo externo.

### 2.3.1.1 Tanque de teto fixo

Este tipo de tanque consiste de uma armação de aço cilíndrica, com um teto permanentemente afixado, que pode variar num formato cônico ou domo. Nos projetos atuais de tanques, os de teto fixo são os mais econômicos para construir e são considerados como o equipamento mínimo aceitável para armazenamento de compostos orgânicos líquidos (U.S EPA, 2006).

As perdas de hidrocarbonetos em tanques de teto fixo são causadas por mudanças de temperatura, pressão e nível do produto. Os tanques de tetos fixos são naturalmente ventilados ou equipados com uma válvula de pressão ou vácuo. A segunda opção permite que os tanques funcionem com uma ligeira pressão interna para evitar a liberação de vapores durante mudanças pequenas na temperatura, pressão ou nível do produto (U.S EPA, 2006).

De acordo com a NBR 15.724-1, os tanques de teto fixo geram as maiores emissões de hidrocarbonetos quando comparados os quatro tipos principais de tanques, devido principalmente ao espaço de vapor que existe entre a superfície do líquido e o teto fixo. A exposição do tanque às variações de temperatura ambiente e radiação solar leva a formação de uma mistura contendo vapor do líquido armazenado e ar, que é emitida através do respiro ou de uma válvula de pressão e vácuo (ABNT, 2009a).

A redução de emissões em tanques de teto fixo pode ser conseguida pela sua conversão em um tanque de teto flutuante e instalação de selos para minimizar a evaporação do produto estocado (U.S. EPA, 2006).

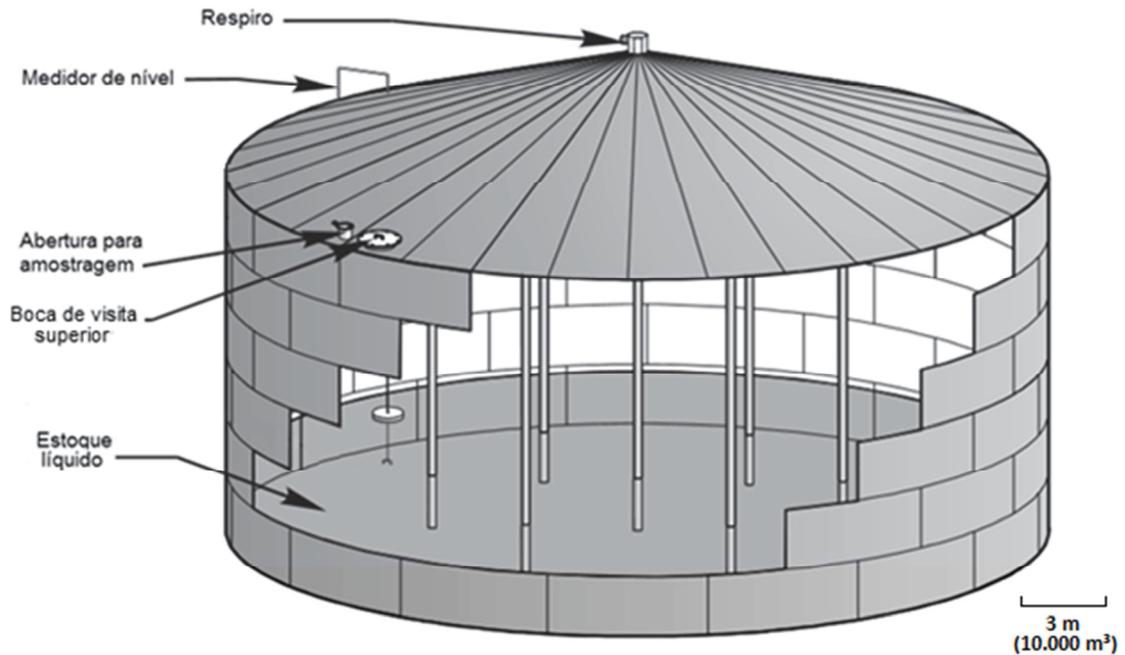
Um tanque de teto fixo típico e seus respectivos elementos estão ilustrados na Figura 2.

### 2.3.1.2 Tanque de teto flutuante externo

O tanque de teto flutuante externo típico consiste de um casco de aço cilíndrico aberto, equipado com um teto que flutua na superfície do líquido armazenado. Os tetos flutuantes atualmente em uso são construídos em chapa de

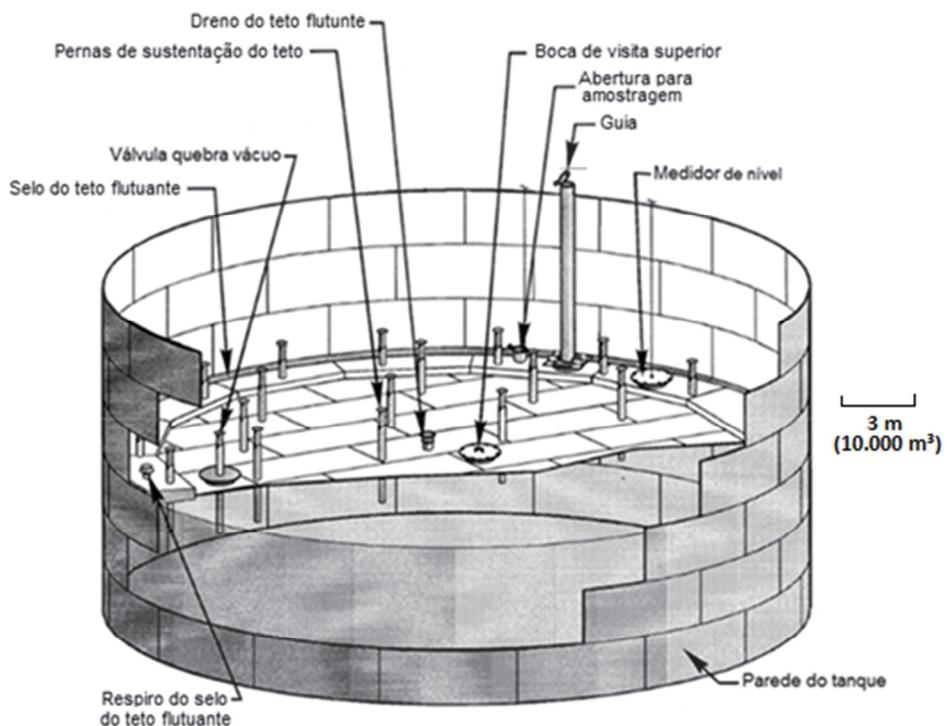
aço soldada e são de dois tipos gerais: pontão ou teto duplo, conforme mostrado nas Figuras 3 e 4 (U.S EPA, 2006).

FIGURA 2 - TANQUE DE TETO FIXO



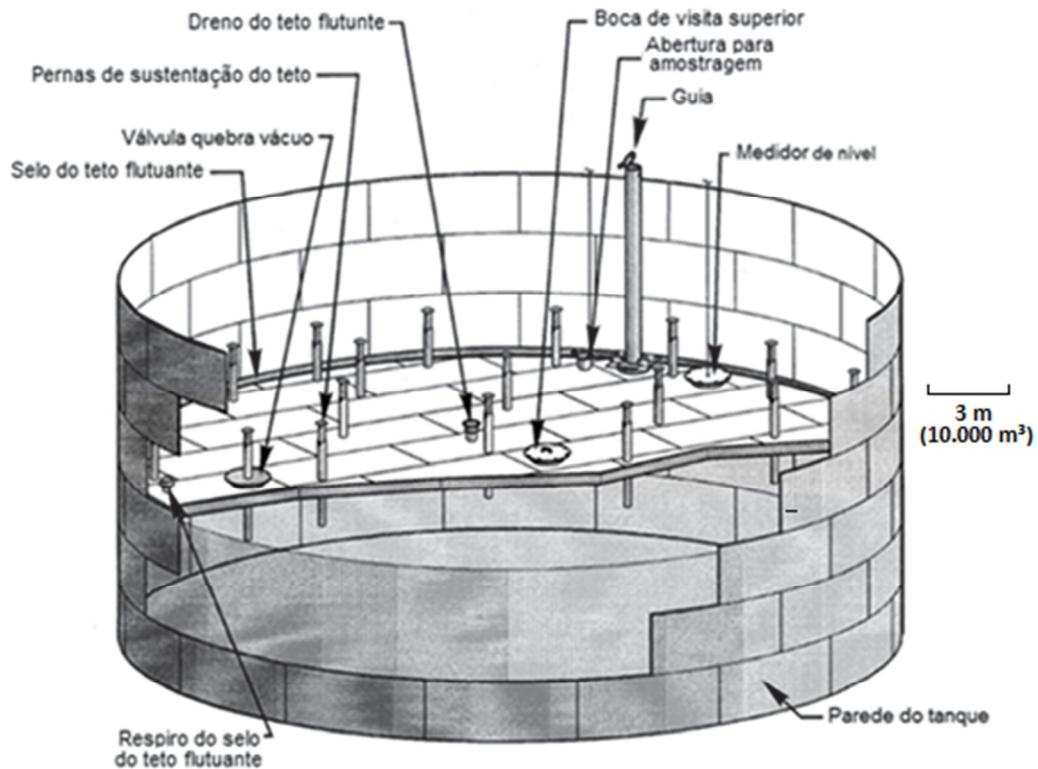
FONTE: Adaptado de U.S. EPA, 2006.

FIGURA 3 - TANQUE DE TETO FLUTUANTE EXTERNO, DO TIPO PONTÃO



FONTE: Adaptado de U.S. EPA (2006).

FIGURA 4 - TANQUE DE TETO FLUTUANTE EXTERNO, DO DUPLO DECK



FONTE: Adaptado de U.S. EPA (2006).

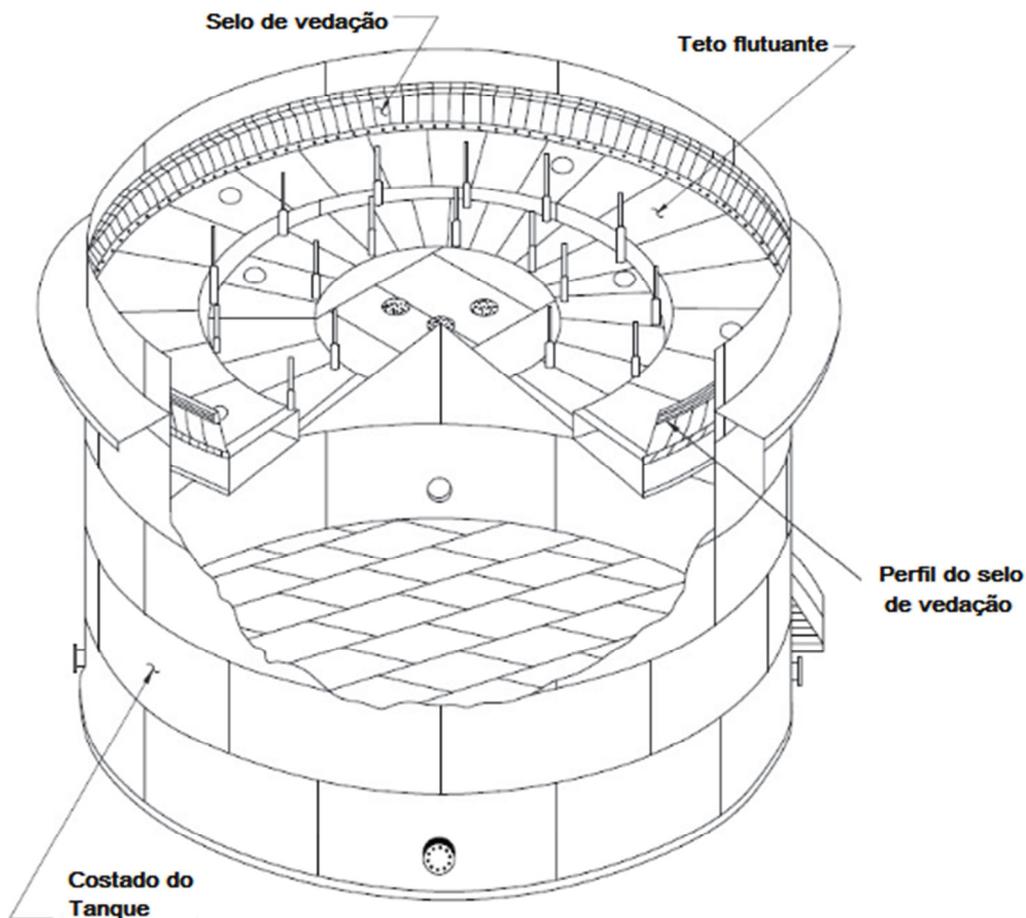
De acordo com a NBR 15.724-1, o funcionamento do tanque de teto flutuante externo consiste na subida e descida do teto conforme a variação do nível de líquido no interior do tanque. Os tetos flutuantes são equipados com um selo de vedação, que está localizado no entorno do teto e faz contato com a parede do tanque (Figura 5). O anel desliza contra a parede do tanque quando o teto sobe ou desce, reduzindo perdas evaporativas decorrentes de possíveis folgas anulares entre o teto flutuante e o costado do tanque (ABNT, 2009a).

O objetivo do sistema flutuante é reduzir a perda evaporativa do líquido armazenado, mas alguns espaços ainda permanecem entre o sistema de vedação e a parede do tanque, permitindo que ocorram as emissões. Segundo Martins (2004), a aplicação de tetos flutuantes externos proporciona uma redução das emissões em aproximadamente 48% em comparação com tanques de teto fixo, dependendo das condições de aplicação.

Segundo a norma NBR 15.724-1, os tetos flutuantes exigem o emprego de vários acessórios para uma operação segura, dos quais podem ser destacados as pernas de sustentação do teto flutuante, para impedir que o teto encoste no fundo do

tanque, e a guia, que impede que ele gire enquanto flutua sobre o líquido (ABNT, 2009a). Esses componentes promovem pontos de emissão, pois a vedação sempre possui um fator de perda (VILLAS BOAS, 2003).

FIGURA 5 – DETALHE DO SELO DE VEDAÇÃO DO TANQUE DE TETO FLUTUANTE



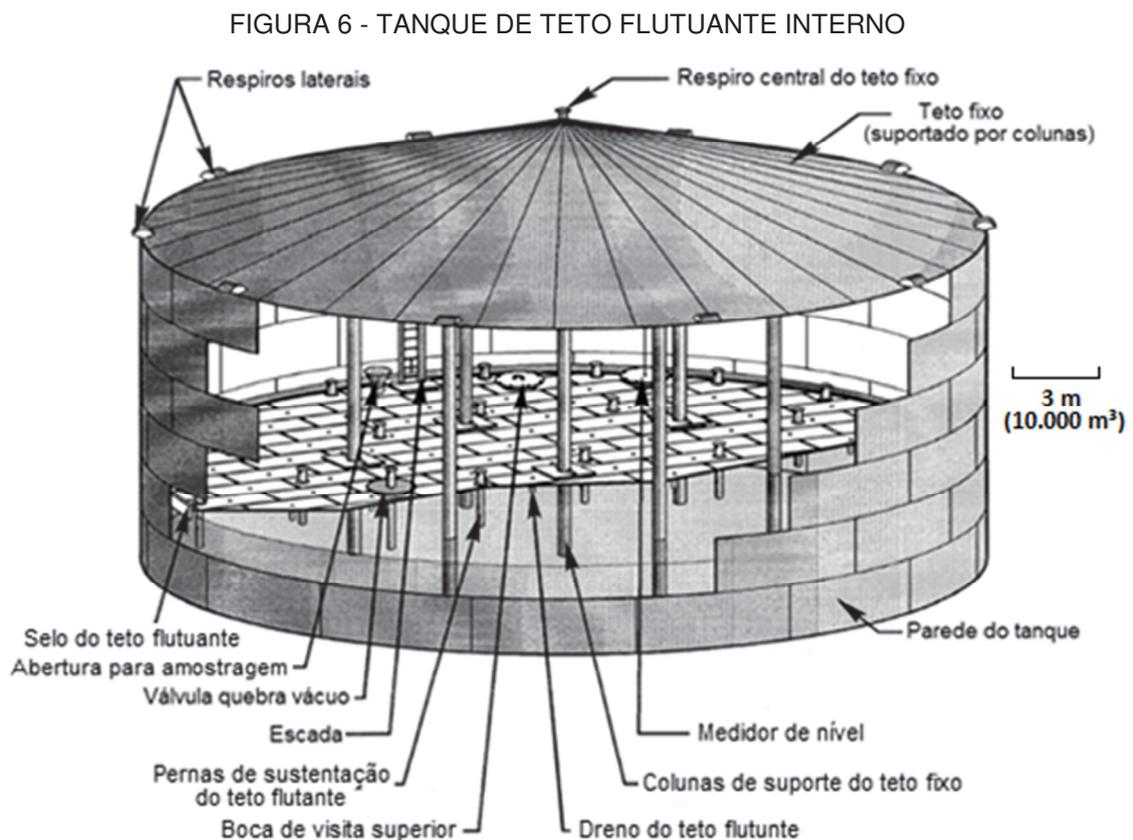
FONTE: Adaptado de PETROBRAS (2002).

### 2.3.1.3 Tanque de teto flutuante interno

Conforme NBR 15.724-1, o tanque de teto flutuante interno possui um teto fixo, com um teto flutuante no seu interior. Existem dois tipos básicos de tanques de teto flutuante interno: tanques em que o teto é suportado por colunas verticais dentro do tanque e tanques com teto fixo autoportante, sem suporte interno de colunas (ABNT, 2009a).

O teto no interior dos tanques sobe ou desce de acordo com o nível do líquido, e flutua diretamente sobre a superfície líquida (teto de contato) ou repousa em pontões a alguns centímetros acima da superfície do líquido (teto sem contato). De acordo com U.S EPA (2006), a maioria dos tetos flutuantes internos atualmente em serviço é construída em alumínio, e possuem tetos sem contato.

As perdas evaporativas de tetos flutuantes internos podem vir de acessórios ou do espaço entre o teto e a parede do tanque. Esses tanques são ventilados por respiros no topo do teto fixo. As aberturas minimizam a possibilidade de acumulação de vapor orgânico no espaço vapor do tanque em concentrações próximas da faixa de explosividade. Um tanque de teto flutuante interno não ventilado livremente é considerado um tanque de pressão (U.S. EPA, 2006). Um exemplo de tanque de teto flutuante interno pode ser visto na Figura 6.



FONTE: Adaptado de U.S. EPA(2006).

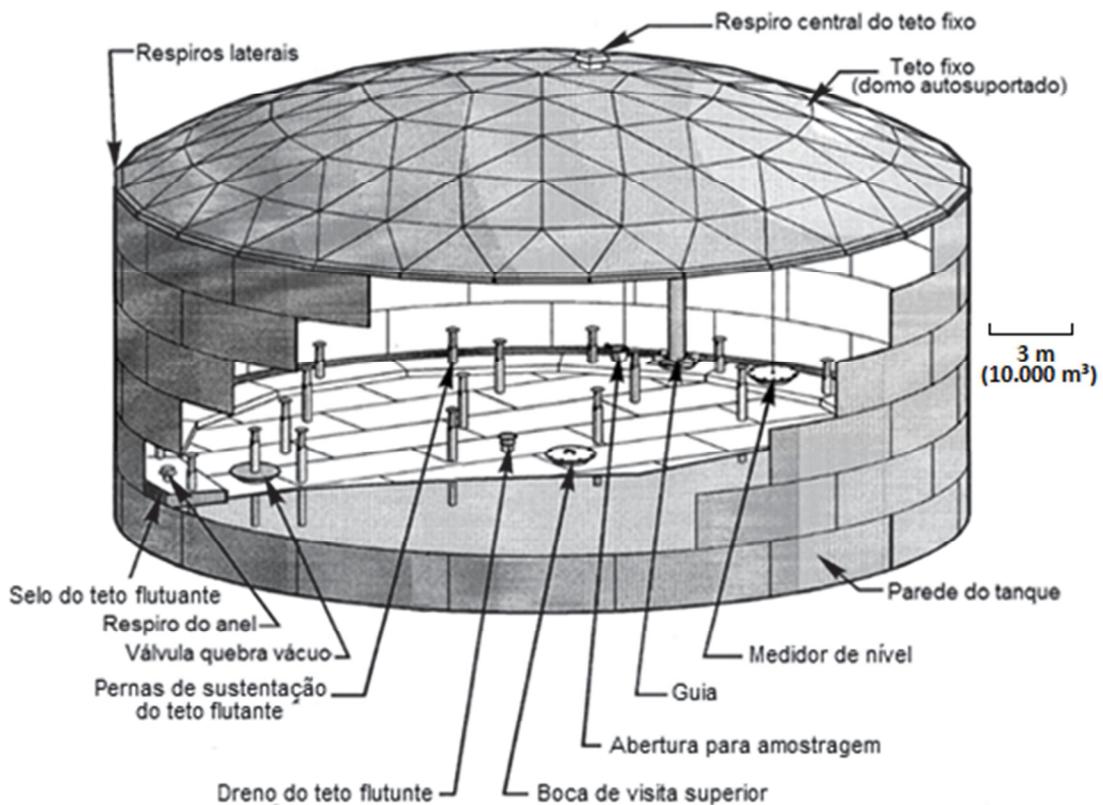
### 2.3.1.4 Tanque de teto flutuante com domo

Tanques de teto flutuante cobertos com domo utilizam um teto fixo no topo, assim como os tanques de teto flutuante interno, como pode ser visto na Figura 7.

Tal como acontece com os tanques de teto flutuante interno, a função do teto fixo não é agir como uma barreira aos gases, mas reduzir interferências externas, como o vento, por exemplo. O tipo de teto fixo mais utilizado tem o formato de cúpula, normalmente construído em alumínio e autosuportado (U.S. EPA, 2006).

Esses tanques são livremente ventilados por respiros no topo do teto fixo. Os acessórios e o anel de vedação, no entanto, são idênticos aos dos tanques de teto flutuante externo (U.S. EPA, 2006). Uma das vantagens desta configuração é a facilidade na fabricação e montagem, além do fato do teto geodésico (domo) ser autoportante, eliminando o inconveniente de emissões por conta de colunas fixas de sustentação do teto (OLIVEIRA, 2015).

FIGURA 7 - TANQUE DE TETO FLUTUANTE COM DOMO EXTERNO



FONTE: Adaptado de U.S. EPA (2006).

### 2.3.1.5 Outros tipos de tanque

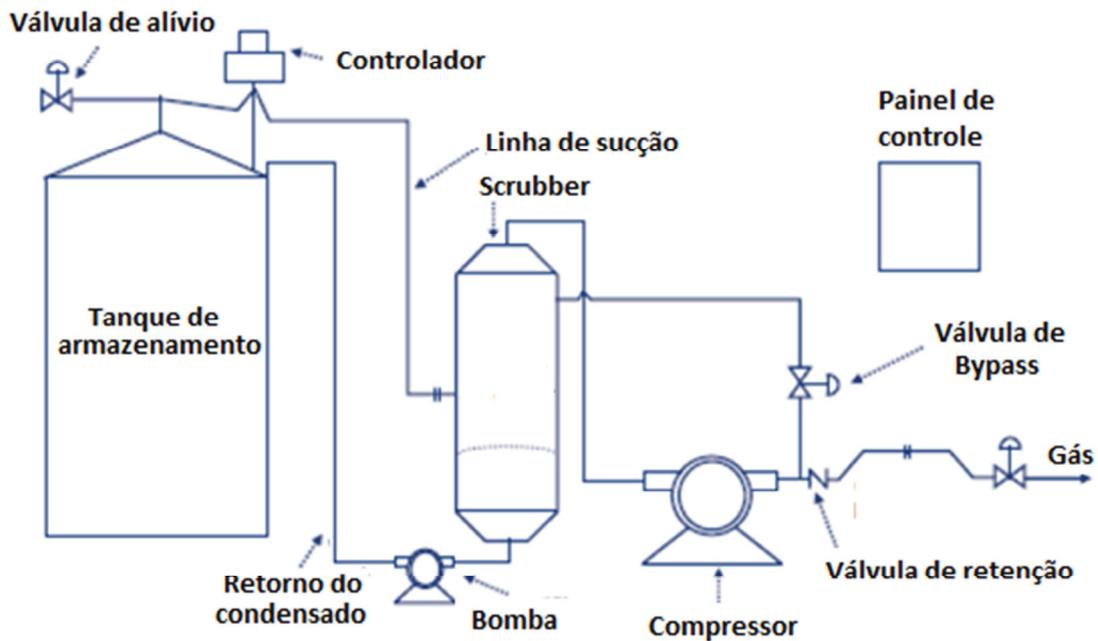
Existem ainda outras tipologias de tanques de armazenamento, como os tanques de espaço de vapor variável, tanques sob pressão e tanques com sistema de recuperação de vapor.

Os tanques de espaço de vapor variável são tanques equipados com depósitos de vapor com capacidade variável, para acumular o vapor produzido devido às flutuações de volume que são atribuídos a mudanças de pressão e de temperatura. A atuação do tanque de espaço de vapor variável ocorre durante o enchimento do tanque, quando o vapor é deslocado pelo líquido. Perdas de vapor ocorrem apenas quando a capacidade de armazenamento de vapor do tanque é excedida (U.S. EPA, 2006).

Os tanques sob pressão apresentam duas classes de uso geral: baixa pressão (2,5 a 15 psig) e alta pressão (superior a 15 psig). Os tanques de pressão geralmente são usados para armazenar líquidos orgânicos e gases com altas pressões de vapor e são encontrados em vários tamanhos e formas, dependendo da pressão de operação do tanque (U.S. EPA, 2006).

Uma das opções para o controle das emissões é realizar a recuperação dos vapores, encaminhando para a linha de entrada do tanque, ou para outra linha/tanque, por meio da instalação de uma Unidade de Recuperação de Vapor (URV), conforme figura 8 (U.S EPA, 2016).

FIGURA 8 – ESQUEMA DE UMA UNIDADE DE RECUPERAÇÃO DE VAPOR, ACOPLADA A UM TANQUE DE ARMAZENAMENTO



FONTE: Adaptado de U.S. EPA (2016).

Quando bem operada, a unidade tem uma eficiência próxima de 100%, no entanto, tem um alto custo (U.S. EPA, 2016).

## 2.4 ESTIMATIVAS DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Estimativas de emissão com o uso de fatores de emissão e inventários são ferramentas fundamentais para a gestão da qualidade do ar.

Um fator de emissão é um valor representativo que tenta relacionar a quantidade de um poluente liberado para a atmosfera, com uma atividade associada à liberação desse poluente. Esses fatores são geralmente expressos como o peso do poluente dividido por um peso unitário, volume, distância ou duração da atividade que emite o poluente. Os fatores facilitam a estimativa de emissões de várias fontes de poluição do ar (JAFARINEJAD, 2017).

A U.S. EPA elaborou o documento AP-42 – *Compilation of air emission factors*, publicado inicialmente em 1972, com a última revisão em 2006, como subsídio para estimativas de emissões de diversas atividades produtivas potencialmente poluidoras. O documento contém fatores de emissão e informações de processo para mais de 200 categorias de fontes de poluição do ar. Os fatores de

emissão da publicação foram obtidos por diferentes métodos, alguns com a análise de dados medidos em fontes de emissão, outros por balanços de massa e outros ainda utilizando estimativas (U.S. EPA, 2018).

A quinta edição do AP-42 apresenta em seu capítulo 7, publicado em 2006, os fatores de emissão para tanques de armazenamento de produtos químicos (U.S. EPA, 2018).

## 2.5 ASPECTOS LEGAIS

Os empreendimentos que armazenam hidrocarbonetos no Brasil não estão sujeitos a limitações nas emissões de COV em tanques de armazenamento por meio de legislações federais. Existem, contudo, exigências específicas em alguns estados.

No Paraná, a Resolução SEMA nº 16 de 2014 solicita que estes empreendimentos apresentem um relatório de emissões, conforme o artigo 16:

Art. 16. Os empreendimentos que possuem armazenamento de líquidos e/ou produtos químicos com potencial de emissão de COV's deverão apresentar Relatório de Emissões atmosféricas conforme Portaria 001/2008, Quadro 6 disponibilizado pelo IAP, até 1 ano após a publicação desta Resolução (PARANÁ, 2014, p.14).

Além disso, a resolução paranaense apresenta conceitos abrangentes, que podem também ser aplicados a estes empreendimentos, como os artigos 70 e 89:

Art. 70. Os empreendimentos e atividades, públicos ou privados, que abriguem fontes efetiva ou potencialmente poluidoras do ar, deverão adotar o automonitoramento ambiental, através de ações e mecanismos que evitem, minimizem, controlem e monitorem tais emissões (PARANÁ, 2014, p.67).

Art. 89. O Órgão Ambiental poderá exigir que as fontes potenciais de poluição controlem suas emissões utilizando a melhor tecnologia prática disponível, ou que se transfiram para outro local, quando situadas em desconformidade com as normas de zoneamento urbano ou sejam incompatíveis com o uso desolo circunvizinho (PARANÁ, 2014, p.79).

No estado de São Paulo, o Decreto nº 50.753 de 2006, que regulamenta a Lei nº 997, de 1976, exige que qualquer empreendimento localizado em áreas

saturadas<sup>1</sup> ou em vias de saturação<sup>2</sup>, que apresente emissões de COV acima de 40 toneladas/ano, integre-se em um programa de redução de emissões atmosféricas, sendo obrigados a compensar emissões adicionadas (SÃO PAULO, 2006).

Além disso, a Lei nº 997 de 1976 definiu que os empreendimentos localizados nas áreas saturadas e em vias de saturação precisam implantar o que se chama de “a melhor tecnologia prática disponível”. O documento intitulado Guia de Melhor Técnica Prática Disponível, publicado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB estabelece que a armazenagem de líquidos voláteis (petróleo cru e produtos leves na faixa da gasolina e da nafta leve) deve ser realizada mediante a aplicação das seguintes técnicas (CETESB, 2017):

- Tanques de teto flutuante munidos de selagem.
- Tanques com teto fixo com selo flutuante.
- Tanques com teto fixo ligado a sistemas de recuperação de vapores.

A Agência Ambiental dos Estados Unidos (U.S. EPA) apresenta também um guia de recomendações de práticas de controle de COV para serem aplicadas em áreas com concentrações mais significativas de poluentes atmosféricos, classificadas pela agência como “moderadas” ou acima desta classificação. De acordo com o guia, práticas de redução devem ser aplicadas em tanques de armazenamento com potencial para emitir a partir de 6 toneladas de COV por ano. Para estes tanques, devem ser aplicados métodos para a redução de 95% das emissões ou manter as emissões abaixo de 4 toneladas por ano (U.S EPA, 2016).

A União Europeia possui desde 1990 regulamentos para controle de emissão de COV. A Diretiva 94/63/CEE trata do controle das emissões de COV resultantes do armazenamento de gasolinas e da sua distribuição, dos terminais de armazenamento até os postos de combustíveis. Esta Diretiva exige, por exemplo (UNIÃO EUROPEIA, 1994):

---

<sup>1</sup>Uma área é considerada saturada, de acordo com o Decreto nº 50.753/2006, quando a média aritmética das médias anuais dos últimos 3 (três) anos é maior que o padrão de qualidade do ar da Resolução CONAMA nº 03/90.

<sup>2</sup>Uma área é considerada em vias de saturação, de acordo com o Decreto nº 50.753/2006, quando a média aritmética das médias anuais dos últimos 3 (três) anos é maior que 90% (noventa por cento) do padrão de qualidade do ar da Resolução CONAMA nº 03/1990.

- Tanques dos terminais de armazenamento devem ser revestidos com tinta que possua um coeficiente de reflexão total do calor de 70% ou mais.
- Tanques de teto flutuante externo tenham eficiência de pelo menos 95%, tendo como base tanques de teto fixo.
- Tanques de teto flutuante interno tenham eficiência de pelo menos 90%, tendo como base tanques de teto fixo.

### 3 METODOLOGIA

Este estudo foi dividido em três etapas:

- I. Determinação das emissões de compostos orgânicos voláteis por simulação de diferentes tipologias de tanques, variando parâmetros relacionados ao dimensionamento, taxa de transferência, cor e integridade do revestimento externo, para três produtos (gasolina, óleo diesel e petróleo cru).
- II. Avaliação da influência dos parâmetros utilizados na etapa I, nas emissões de compostos orgânicos voláteis.
- III. Comparação dos resultados obtidos para estabelecimento de critérios ambientais para o desenvolvimento de projetos de tanques de armazenamento.

#### 3.1 DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES PARA DIFERENTES TIPOLOGIAS DE TANQUES

Na primeira etapa foram realizadas simulações para a obtenção de estimativas de emissão, possibilitando uma avaliação quantitativa entre cada tipo de tanque, configuração e produto.

O programa utilizado para as simulações foi o Tanks 4.0.9d, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S EPA, 1999). O programa é de uso público, para fins não comerciais. As premissas e critérios de cálculo do programa estão descritos no decorrer do item 3.

As simulações foram realizadas utilizando diferentes tipos de tanques de armazenamento. Os tanques foram escolhidos com base na disponibilidade de fatores de emissão no programa Tanks, e na representatividade das tipologias no parque brasileiro de armazenamento de hidrocarbonetos.

O programa Tanks dispõe de fatores de emissão para quatro tipologias de tanques: tanque de teto fixo, tanque de teto flutuante externo, tanque de teto flutuante interno e tanque de teto flutuante com domo. Os tanques avaliados nas simulações foram os três primeiros. O tanque de teto flutuante com domo foi

excluído pela baixa representatividade nos parques de armazenamento de combustíveis brasileiros.

As seguintes situações foram avaliadas para cada tanque: dimensionamento, taxa de transferência de produto, cor e integridade do revestimento externo.

As emissões de COV foram determinadas, em kg/ano, para os três produtos avaliados.

Em todos os casos foram avaliados tanques com 2.000 m<sup>3</sup>, 10.000 m<sup>3</sup>, 40.000 m<sup>3</sup> e 80.000 m<sup>3</sup>, que são usuais na indústria brasileira.

### 3.1.1 Avaliação do dimensionamento dos tanques na emissão de compostos orgânicos voláteis

A influência do dimensionamento nas emissões de COV foi avaliada em função da variação da relação diâmetro/altura (D/H) em tanques de tipologias e com volumes operacionais diferentes.

A relação diâmetro/altura determina a área superficial dos tanques, assim como outras características que contribuem para as emissões, como selos de vedação, volumes de espaço vapor e número de acessórios. Sendo assim, a relação influencia diretamente nas emissões dos compostos orgânicos voláteis.

Os valores de diâmetro e altura admissíveis para cada um dos quatro volumes avaliados foram determinados. Estes valores variam dentro de limites construtivos. O diâmetro, por exemplo, não pode ser tão grande que ocupe uma área muito considerável do parque de tancagem.

Após esta etapa, foram estabelecidas as configurações a serem testadas. Foram simulados os valores máximos e mínimos da relação diâmetro/altura e alguns valores intermediários.

### 3.1.2 Avaliação da taxa de transferência de produtos na emissão de compostos orgânicos voláteis

A taxa de transferência de produto, que corresponde ao volume movimentado de líquido ao longo de um ano, determina impactos nas emissões de

hidrocarbonetos. Alguns tipos de tanque são mais afetados do que outros quando há variação nesta condição.

A taxa de transferência é determinada pelo volume do tanque multiplicado pelo número de “giros”, que representa o número de enchimentos e esvaziamentos completos realizados no tanque ao longo de um ano.

O número de giros é, indiretamente, um dos critérios de projeto do tanque e depende do período de estocagem desejado pelo usuário. Os valores testados estão entre 1 e 365 giros, o que permitiu uma avaliação muito ampla das possibilidades de variação desta condição, que vai desde um usuário que renova o estoque de produtos uma vez por dia até o que o faz uma vez por ano.

Neste estudo foram testados valores intermediários, referentes a um giro completo a cada mês, semana e duas vezes na semana.

Assim como na avaliação do dimensionamento, as variações foram testadas nos três tipos de tanques e nos quatro volumes apresentados neste item. Todas as simulações foram realizadas utilizando valores de diâmetro e altura mantendo a relação (D/H) igual a 4.

### 3.1.3 Avaliação da cor e integridade do revestimento externo dos tanques nas emissões de compostos orgânicos voláteis

Mudanças na cor e a integridade do revestimento externo do costado e do teto dos tanques, apesar de parecer sutil, podem causar variações significativas nas emissões fugitivas em tanques de armazenamento de hidrocarbonetos.

Os tanques testados apresentavam as seguintes cores e condições de costado e teto: branco em bom estado, branco em mal estado, cinza médio em bom estado, vermelho primer em bom estado.

Tanques brancos e cinzas são os mais comuns no Brasil. O tanque vermelho primer representa uma condição em que o metal encontra-se na sua condição de fabricação.

As variações foram testadas utilizando a relação diâmetro/altura que implica na menor área superficial possível (relação D/H = 2) ou na mais próxima desta relação, para cada volume testado.

### 3.1.4 Produtos avaliados

As simulações foram realizadas com três produtos presentes no banco de dados do programa Tanks: gasolina (*gasoline* RVP10), diesel (*distillate oil n°2*)<sup>3</sup> e petróleo (*crude oil* RVP5). As características dos produtos estão na Tabela 1, nas unidades originais do programa<sup>4</sup>.

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DOS PRODUTOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

Nome	Gasolina	Diesel	Petróleo
Peso molecular líquido	92	387	207
Densidade (lb/gal a 60 F)	5,6	7,9	7,1
Peso molecular vapor	66	190	50
Pressão de vapor (psia a 100 F)	10	$1,9 \times 10^{-4}$	5

FONTE: Banco de dados do programa Tanks, 1999.

### 3.1.5 Entrada de dados no programa Tanks

O programa Tanks, utilizado para a simulação das emissões dos diferentes cenários descritos anteriormente, precisa ser alimentado com uma série de informações das condições iniciais de cada cenário.

<sup>3</sup>De acordo com a *U.S Energy Information and Administration* (EIA), *distillate oil* é uma classificação geral para uma fração do petróleo produzida a partir da operação de destilação convencional, que inclui diesel e óleo combustível. O *distillate oil n°2* é um produto intermediário entre o *distillate oil n° 1* e o *fuel n° 4*, que pode ser usado como combustível em motores diesel, e também como óleo combustível em queimadores para aquecimento (EIA, 2018)

<sup>4</sup>O programa Tanks, assim como seu documento de referência, o AP-42 (U.S EPA, 2006), utilizam unidades inglesas. Para não alterar os coeficientes de muitas equações do AP-42 que são provenientes de regressões de dados experimentais e calculadas nestas unidades, optou-se por manter as unidades no sistema inglês. Os resultados do estudo, assim como qualquer outra equação que não seja proveniente do programa Tanks ou do AP-42 são apresentados em unidades do Sistema Internacional – SI.

Os dados inseridos no programa Tanks, para cada um dos tipos de tanques e para cada configuração, são mostrados no Apêndice 1. As variáveis para cada um dos tanques podem ser visualizadas no Quadro 2.

QUADRO 2 – VARIÁVEIS DO PROGRAMA TANKS PARA CADA UM DOS TANQUES AVALIADOS NO ESTUDO

<b>Teto Fixo</b>	<b>Teto Flutuante Externo</b>	<b>Teto Flutuante Interno</b>
Altura do costado (altura efetiva) (ft)	Diâmetro (ft)	Diâmetro (ft)
Diâmetro (ft)	Volume do tanque (gal)	Volume do tanque (gal)
Altura máx. do líq. (altura operacional) (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 autosuportado
Taxa de transferência (gal/ano)	Cor do costado	Número de colunas
Aquecimento	Condição do costado	Diâmetro efetivo 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
Vácuo do respirador (psig)	-	Tipo de deck
Pressão do respirador (psig)	-	Categoria de acessórios de teto

FONTE: O autor, 2018.

Os cálculos anuais foram realizados considerando uma distribuição homogênea das vazões dos tanques nos 12 meses do ano.

Alguns exemplos de telas de alimentação de dados no programa Tanks estão mostrados no Apêndice 2, para ilustrar a inserção dos dados.

### 3.1.5.1 Dados meteorológicos

Dados meteorológicos confiáveis são muito importantes para as simulações realizadas no programa Tanks, pois estas informações têm grande importância nos resultados.

Os dados meteorológicos (TABELA 2) foram obtidos em uma estação de monitoramento localizada em uma unidade industrial localizada em São Mateus do Sul (Paraná). Os dados são referentes ao ano de 2017.

TABELA 2 – DADOS METEOROLÓGICOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES. DADOS REFERENTES AO ANO DE 2017

Temperaturas	Média mensal (°C)	Média máx. diária (°C)	Média mín. diária (°C)
Janeiro	25,3	30,9	21,6
Fevereiro	25,9	31,8	21,8
Março	22,8	28,0	19,1
Abril	20,0	25,2	16,0
Maiο	18,9	23,5	15,0
Junho	16,2	22,0	11,6
Julho	14,8	23,0	9,0
Agosto	17,6	23,8	12,8
Setembro	21,6	29,1	16,2
Outubro	20,5	26,2	15,9
Novembro	21,9	27,9	16,9
Dezembro	23,7	29,1	19,9
Temperatura Média	20,8 °C		
Radiação Global Média	188,2 W/m <sup>2</sup>		
Velocidade do Vento Média	1,2 m/s		
Pressão Atmosférica Média	925,3 hPa		

FONTE: Estação meteorológica da Petrobras, São Mateus do Sul-PR. 2018.

## 3.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS SIMULADOS NAS EMISSÕES DE COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS

A segunda etapa deste estudo constituiu na avaliação das equações que compõem o programa Tanks, de modo a verificar a influência de cada parâmetro nas emissões de COV obtidas nas simulações.

O programa tem como base os fatores de emissão do AP-42, da U.S EPA (2006). Os mecanismos de emissão apresentados no documento são descritos também na ABNT NBR 15724-2 (2013) e são a melhor representação dos processos geradores de emissão no armazenamento de hidrocarbonetos em tanques atmosféricos.

A seguir são apresentadas as principais equações utilizadas pelo programa, que foram avaliadas para verificar a influência dos parâmetros relacionados ao dimensionamento, taxa de transferência e cor e integridade do revestimento dos tanques nos resultados obtidos nas simulações. O detalhamento para a obtenção de cada uma das variáveis das equações mostradas na sequência pode ser encontrado no AP-42 (U.S EPA, 2006).

As equações estão descritas no seu formato original, com unidades inglesas. Os resultados das simulações foram convertidos para o sistema internacional (SI).

### 3.2.1 Tanques de teto fixo

As emissões totais dos tanques de teto fixo são definidas por:

$$L_T = L_S + L_W \quad (1)$$

Onde:

$L_T$  = Emissões totais, lb/ano.

$L_S$  = Emissões de armazenamento, lb/ano.

$L_W$  = Emissões de operação, lb/ano.

#### a) Emissões de armazenamento

As emissões de armazenamento são estimadas pela equação 2.

$$L_S = 365 V_V W_V K_E K_S \quad (2)$$

Onde:

$V_V$  = Volume do espaço vapor, ft<sup>3</sup>

$W_V$  = Massa específica do vapor, lb/ft<sup>3</sup>.

$K_E$  = Fator de expansão do espaço vapor, adimensional.

$K_S$  = Fator de saturação do vapor expelido, adimensional.

365 = Constante, o número de eventos diários em um ano, ano<sup>-1</sup>.

*b) Emissões de operação*

As emissões de operação são estimadas pela equação 3.

$$L_W = 0,0010 M_V P_{VA} Q K_N K_P \quad (3)$$

Onde:

$M_V$  = Massa molecular do vapor, lb/lb-mol.

$P_{VA}$  = Pressão de vapor na temperatura média diária da superfície do líquido, psia.

$Q$  = movimentação anual do tanque, bbl/ano.

$K_N$  = Fator de giros do tanque, adimensional:

Para giros > 36,  $K_N = (180 + N)/6N$ .

Para giros ≤ 36,  $K_N = 1$ .

$N$  = número de giros por ano, adimensional.

$K_P$  = Fator de produto, adimensional:

Para óleo cru,  $K_P = 0,75$ .

Para outros líquidos orgânicos,  $K_P = 1$ .

### 3.2.2 Tanques de teto flutuante

As emissões totais dos tanques de teto flutuante são definidas pela equação 4.

$$L_T = L_R + L_{WD} + L_F + L_D \quad (4)$$

Onde:

$L_R$  = Emissões do anel de vedação do teto, lb/ano.

$L_{WD}$  = Emissões de descarregamento, lb/ano.

$L_F$  = Emissões de acessórios do teto, lb/ano.

$L_D$  = Emissões de costuras do teto, lb/ano.

a) *Emissões do anel de vedação*

As emissões do anel de vedação são descritas pela equação 5.

$$L_R = (K_{Ra} + K_{Rb}v^n) DP^* M_V K_C \quad (5)$$

Onde:

$K_{Ra}$  = Fator de emissão com velocidade do vento nula, lb-mol/ft.ano.

$K_{Rb}$  = Fator de emissão dependente da velocidade do vento, lb-mol/(mph)<sup>n</sup>.ft.ano.

$v$  = velocidade média do vento no local, mph.

$n$  = expoente da selagem relacionada a velocidade do vento, adimensional.

$D$  = diâmetro do tanque, ft.

$P^*$  = função da pressão de vapor, adimensional.

$M_V$  = massa molecular média do vapor, lb/lb-mol.

$K_C$  = fator de produto, adimensional.

Para óleo cru,  $K_C = 0,4$ .

Para outros líquidos orgânicos,  $K_C = 1$ .

b) *Emissões de descarregamento*

As emissões de descarregamento são estimadas conforme equação 6.

$$L_{WD} = [(0.943) Q C_S W_L / D] [1 + (N_C F_C / D)] \quad (6)$$

Onde:

$Q$  = movimentação anual do tanque, bbl/ano.

$C_S$  = fator de ancoragem do costado, bbl/1000 ft<sup>2</sup>.

$W_L$  = massa específica do líquido, lb/gal.

$D$  = diâmetro do tanque, ft.

$N_C$  = número de colunas do teto, adimensional.

$F_C$  = diâmetro efetivo das colunas, ft.

c) *Emissões de acessórios do teto*

As emissões devido aos acessórios do teto são estimadas pela equação 7.

$$L_F = F_F P^* M_V K_C \quad (7)$$

Onde:

$F_F$  = Fator de emissão por acessórios, dependente do número e tipo de acessório e de fatores de emissão próprios de cada acessório, lb-mol/ano.

$P^*$  = função da pressão de vapor, adimensional.

$M_V$  = massa molecular média do vapor, lb/lb-mol.

$K_C$  = fator de produto, adimensional:

Para óleo cru,  $K_C = 0,4$

Para outros líquidos orgânicos,  $K_C = 1$

d) *Emissões de costuras no teto*

As emissões de costuras no teto são estimadas de acordo com a equação 8.

$$L_D = K_D S_D D^2 P^* M_V K_C \quad (8)$$

Onde:

$K_D$  = Fator de emissão de costuras por unidade de comprimento de costuras, lb-mol/ft.ano:

$K_D = 0$  para tetos soldados.

$K_D = 0,14$  para tetos parafusados.

$S_D$  = fator de comprimento das costuras, ft/ft<sup>2</sup>.

$P^*$  = função da pressão de vapor, adimensional.

$M_V$  = massa molecular média do vapor, lb/lb-mol.

$K_C$  = fator de produto, adimensional.

Para óleo cru,  $K_C = 0,4$ .

Para outros líquidos orgânicos,  $K_C = 1$ .

### 3.3 ESTABELECIMENTO DE CRITÉRIOS PARA PROJETOS DE TANQUES

Após as etapas de determinação das emissões e avaliação da influência dos parâmetros, foram comparados os cenários obtidos, de modo a observar variações significativas nas emissões que permitam estabelecer critérios que auxiliem na redução das emissões de COV em projetos de tanques de armazenamento de hidrocarbonetos.

Os critérios foram obtidos por meio da avaliação, de maneira abrangente, dos resultados das simulações das tipologias de tanques e os produtos armazenados, para as diversas configurações propostas. A relevância da aplicação de cada critério citado é diferente de acordo com o tipo de tanque e do produto armazenado, e por isso, para cada condição foi indicada a respectiva relevância.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos no estudo. Inicialmente são apresentados os resultados das simulações das diversas tipologias de tanques de armazenamento. Na sequência é discutida a influência dos parâmetros das equações do programa Tanks nas emissões, e por fim, são apresentados os critérios para projetos de tanques, estabelecidos neste estudo.

### 4.1 DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES PARA DIFERENTES TIPOLOGIAS DE TANQUES

As estimativas de emissões de COV em tanques atmosféricos de armazenamento de hidrocarbonetos foram obtidas por simulações, utilizando o programa Tanks, sendo avaliados parâmetros relacionados ao dimensionamento do tanque, taxa de transferência de produtos e a cor e integridade do revestimento externo de teto e costado. Os resultados para três produtos (gasolina, óleo diesel e petróleo cru) são apresentados na sequência.

#### 4.1.1 Tanques de armazenamento: determinação dos tipos e volumes dos tanques de armazenamento

A determinação dos tipos de tanques avaliados neste estudo levou em conta a disponibilidade de fatores de emissão para o respectivo tipo no programa Tanks, e também a representatividade das tipologias no parque de armazenamento de hidrocarbonetos do Brasil.

O programa Tanks dispõe de fatores de emissão para quatro tipologias: tanque de teto fixo, tanque de teto flutuante externo, tanque de teto flutuante interno e tanque de teto flutuante com domo.

Um banco de dados dos tanques das 11 refinarias de petróleo em operação no país foi avaliado, que totalizam aproximadamente 1120 tanques de

armazenamento de hidrocarbonetos, para verificar os tipos mais comuns no Brasil (INVENTÁRIO DE EMISSÕES PETROBRAS, 2018).

De acordo com a avaliação, 57% dos tanques são do tipo teto fixo, 35% são de teto flutuante externo, 8% teto flutuante interno e menos de 1% de teto flutuante com domo. Devido a baixa representatividade, a avaliação dos tanques com teto flutuante com domo não foi realizada. Assim, os tipos de tanques avaliados no estudo foram: tanque de teto fixo, tanque de teto flutuante externo e tanque de teto flutuante interno.

O Inventário de Emissões Petrobras (2018) permitiu ainda a avaliação dos volumes típicos dos tanques de armazenamento das 11 refinarias. Segundo a avaliação, os volumes de armazenamento variam de aproximadamente 50 m<sup>3</sup> até aproximadamente 85.000 m<sup>3</sup>, sendo que a maioria dos tanques, 37%, estão entre 10.000 m<sup>3</sup> e 40.000 m<sup>3</sup>. De modo a representar esta realidade, foram utilizados no estudo volumes de 2.000 m<sup>3</sup>, 10.000 m<sup>3</sup>, 40.000 m<sup>3</sup> e 80.000 m<sup>3</sup>.

#### 4.1.2 Estimativa das emissões de COV em função do dimensionamento dos tanques de armazenamento

O dimensionamento dos tanques foi avaliado por suas dimensões básicas, o diâmetro e a altura.

Devido a limitações de engenharia, os valores de diâmetro e altura apresentam possibilidades de combinação diferentes para cada volume.

As dimensões limitantes utilizadas foram:

- Altura: entre 4 metros e 18,5 metros;
- Diâmetro: máximo de 100 metros.

A altura adotada neste estudo foi a operacional, que corresponde a altura máxima do líquido no interior do tanque. A altura efetiva é a altura operacional, somada a altura entre o nível máximo de líquido e a base do teto do tanque.

O programa Tanks permite uma variação na altura efetiva entre 1,52 m e 19,81 m. Uma avaliação no Inventário de Emissões da Petrobras (2018) indicou que

a diferença entre a altura operacional e altura efetiva nos tanques de teto fixo é de 1,1 m, em média. Esse foi o valor utilizado para as estimativas.

Os tanques de teto flutuante também possuem diferenças entre a altura operacional e efetiva, porém, o programa Tanks não leva em consideração tal diferença e, por isso, para este tipo de tanque foi considerada apenas a altura operacional.

Os tanques com altura inferior a 4 m e com diâmetros maiores que 100 m, apesar de possíveis de serem estimados, são pouco representativos, com menos de 1% da tancagem das refinarias do Brasil (INVENTÁRIO DE EMISSÕES PETROBRAS, 2018).

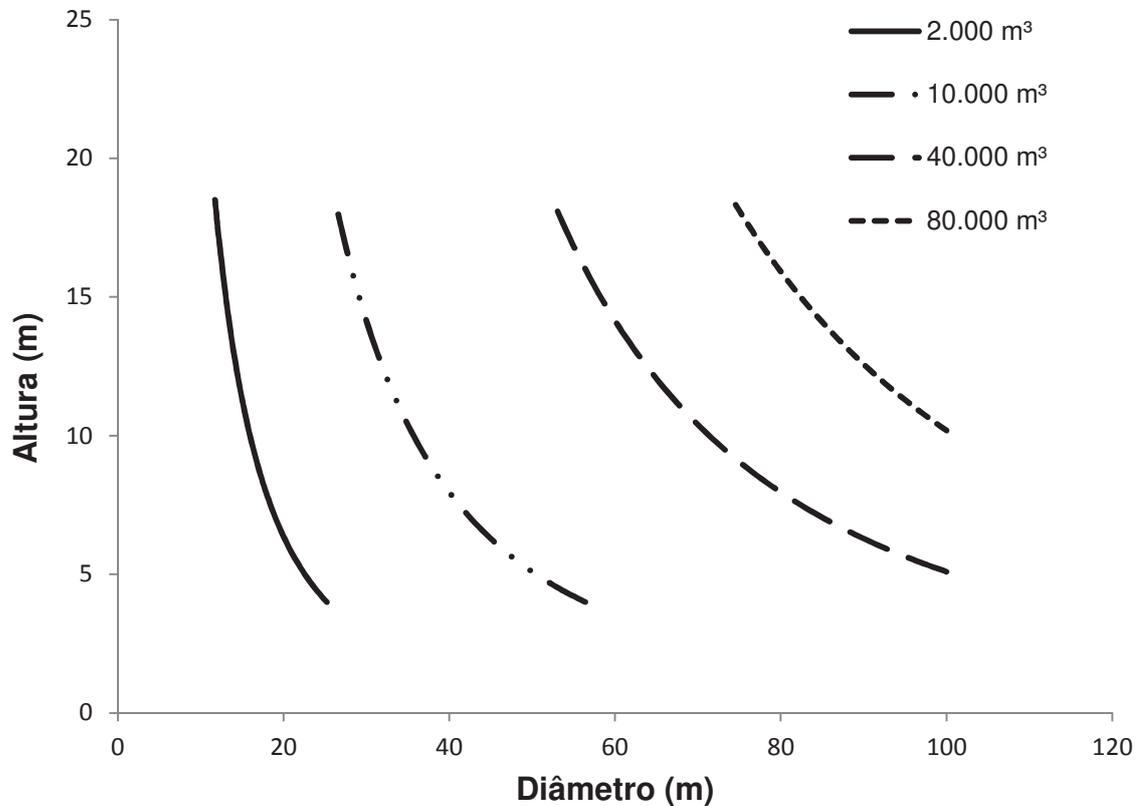
No projeto de tanques de armazenamento é importante observar que a economicidade indica o uso de chapas de aço de tamanhos comerciais. De acordo com a norma Petrobras N-270 (PETROBRAS, 2014), os padrões comerciais de alturas de chapas são 1500 mm e 1800 mm para chapas finas e 2440 mm para chapas grossas. A altura do tanque, neste caso, é um múltiplo destes valores, para que não haja corte de chapas. Esta consideração não foi aplicada neste estudo, pois o objetivo foi avaliar o comportamento geral dos tanques em relação a emissões fugitivas. Em casos específicos, esta avaliação é importante e não deve ser desconsiderada.

Considerando os quatro volumes representativos indicados no item 3.1.1 (2.000 m<sup>3</sup>, 10.000 m<sup>3</sup>, 40.000 m<sup>3</sup> e 80.000 m<sup>3</sup>) foram construídas curvas com as possibilidades de variação das medidas de diâmetro e altura. As curvas são apresentadas na Figura 9.

As configurações a serem testadas para avaliação das emissões de COV em função do dimensionamento foram estabelecidas com base nas informações da Figura 8. Estas configurações estão mostradas na Tabela 3.

O parâmetro utilizado foi a relação diâmetro/altura (D/H), que possibilita a comparação entre os diferentes volumes testados. Os valores máximos e mínimos possíveis para a relação diâmetro/altura foram utilizados, calculados com base nos valores limite para estas medidas (Figura 8), intercalando números inteiros e com preferência para relações menores, que tendem a apresentar menores emissões.

FIGURA 9 – CURVAS COM POSSIBILIDADES DE VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DIÂMETRO E ALTURA, PARA OS VOLUMES UTILIZADOS NO ESTUDO



FONTE: O autor, 2018

As configurações indicadas na Tabela 3 foram simuladas para as três tipologias de tanques escolhidas, totalizando 164 simulações. Os resultados para gasolina e diesel estão mostrados na Tabela 4.

Para petróleo foram simuladas apenas as condições para o tanque de 80.000 m³, uma vez que os tanques deste produto geralmente são de grandes proporções. Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 5.

Os resultados mostram que, para todos os tipos de tanques, as emissões de COV para a gasolina e petróleo são menores quanto menor for a relação diâmetro/altura. A condição não é sempre esta para o diesel. No caso de tanques com teto flutuante com este combustível, as emissões de COV aumentam a medida que a relação diâmetro/altura diminui. A intensidade das emissões, no entanto, é menor para o diesel, atingindo um máximo de 9,15 toneladas emitidas anualmente

no pior caso analisado (tanque de teto fixo, 80.000 m<sup>3</sup>, na relação D/H = 9,82), contra 2.890,54 toneladas/ano para a gasolina na mesma condição e 932,03 toneladas/ano para o petróleo, justificada pela variação da pressão de vapor de cada produto.

TABELA 3 – CONFIGURAÇÕES TESTADAS PARA ESTIMATIVA DAS EMISSÕES REFERENTES AO DIMENSIONAMENTO

<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>D/H</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Diâmetro (m)</b>
2.000	6,31	4,00	25,23
	6,00	4,14	24,81
	4,00	5,42	21,68
	2,00	8,60	17,21
	1,00	13,66	13,66
	0,63	18,50	11,73
10.000	14,10	4	56,42
	10,00	5,03	50,31
	8,00	5,84	46,70
	6,00	7,07	42,43
	4,00	9,27	37,07
	2,00	14,71	29,42
	1,42	18,5	26,23
40.000	19,63	5,09	100,00
	12,00	7,07	84,86
	10,00	7,99	79,86
	8,00	9,27	74,14
	6,00	11,23	67,36
	4,00	14,71	58,84
	2,84	18,50	52,47
80.000	9,82	10,19	100,00
	8,00	11,68	93,40
	6,00	14,14	84,86
	4,01	18,50	74,20

FONTE: O autor, 2018

TABELA 4 – RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES EM FUNÇÃO DO DIMENSIONAMENTO, PARA OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E OS PRODUTOS GASOLINA E DIESEL.

Volume (m <sup>3</sup> )	Relação D/H	Emissões (t/ano)					
		Teto Fixo		Teto flutuante			
				Externo		Interno	
		Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel
2.000	6,31	90,06	0,24	5,63	0,03	3,63	0,02
	6,00	89,14	0,24	5,58	0,03	3,59	0,02
	4,00	82,56	0,23	5,14	0,03	3,15	0,03
	2,00	74,33	0,22	4,50	0,03	2,55	0,03
	1,00	69,26	0,22	3,96	0,04	2,11	0,04
	0,63	66,19	0,22	3,71	0,04	1,90	0,04
10.000	14,10	453,26	1,24	10,31	0,06	8,66	0,06
	10,00	422,88	1,20	9,37	0,06	7,56	0,06
	8,00	406,16	1,17	8,78	0,06	6,97	0,06
	6,00	387,84	1,15	8,17	0,07	6,27	0,06
	4,00	366,76	1,12	7,35	0,07	5,40	0,07
	2,00	340,55	1,09	6,29	0,08	4,28	0,08
	1,42	331,05	1,08	5,84	0,09	3,81	0,09
40.000	19,63	1.695,79	4,95	17,15	0,12	17,96	0,12
	12,00	1.556,01	4,70	14,76	0,13	14,47	0,13
	10,00	1.514,51	4,64	13,93	0,13	13,36	0,13
	8,00	1.469,44	4,56	13,05	0,14	12,15	0,14
	6,00	1.419,87	4,49	11,99	0,15	10,81	0,15
	4,00	1.362,94	4,41	10,71	0,16	9,20	0,16
	2,84	1.324,51	4,36	9,74	0,18	8,05	0,18
80.000	9,82	2.890,54	9,15	17,21	0,12	18,02	0,21
	8,00	2.823,61	9,04	16,16	0,12	16,47	0,21
	6,00	2.741,61	8,90	14,84	0,13	14,55	0,23
	4,01	2.649,68	8,76	13,14	0,14	12,29	0,25

FONTE: O autor, 2018.

TABELA 5 – RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES EM FUNÇÃO DO DIMENSIONAMENTO, PARA OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E O PRODUTO PETRÓLEO.

Volume (m <sup>3</sup> )	Relação D/H	Emissões (t/ano)		
		Teto Fixo	Teto flutuante	
			Externo	Interno
80.000	9,82	932,03	3,12	3,27
	8,00	909,78	3,01	3,09
	6,00	882,32	2,88	2,88
	4,01	851,12	2,75	2,66

FONTE: O autor, 2018.

Zinke et al. (2018) simularam as emissões de um tanque de teto flutuante interno armazenando gasolina, usando padrões da API 2517/19 e VDI 3479. O tanque tinha um volume de 12.000 m<sup>3</sup>, com uma relação D/H de aproximadamente 4. O resultado alcançado foi de 6.521 ± 3.168 kg/ano. O resultado é coerente com o observado na Tabela 4, no tanque de 10.000 m<sup>3</sup> e D/H = 4, que foi de 5.399 kg/ano.

Nas Tabelas 6 e 7 pode-se verificar o percentual de redução das emissões a medida que é reduzida a relação diâmetro/altura (D/H).

Considerando a gasolina, as emissões são reduzidas mais significativamente (percentualmente) nos tanques de teto flutuante interno, onde as reduções chegam a ser superiores a 50%. No caso dos tanques de teto fixo, as vantagens da redução da relação diâmetro/altura (D/H) são mais importantes nos tanques menores. No tanque de 80.000 m<sup>3</sup>, a redução é de apenas 8,33%, contra 26,96% no tanque com 10.000 m<sup>3</sup>. O comparativo entre tipologias de tanques pode ser visualizado na Figura 10.

TABELA 6 – PERCENTUAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E OS PRODUTOS GASOLINA E DIESEL.

Volume (m <sup>3</sup> )	Relação D/H	Redução de emissões <sup>1</sup> (%)					
		Teto Fixo		Teto flutuante			
		Gasolina	Diesel	Externo		Interno	
		Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel
2.000	6,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	6,00	1,03	0,43	0,96	-0,57	1,06	-0,80
	4,00	8,32	3,52	8,74	-5,82	13,20	-6,97
	2,00	17,46	7,10	20,14	-18,56	29,73	-22,33
	1,00	23,09	9,31	29,75	-36,64	41,79	-44,48
	0,63	26,50	10,29	34,12	-52,36	47,62	-63,27
10.000	14,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10,00	6,70	3,50	9,16	-4,37	12,65	-3,90
	8,00	10,39	5,35	14,90	-8,47	19,55	-7,38
	6,00	14,43	7,27	20,83	-13,94	27,59	-12,82
	4,00	19,08	9,35	28,77	-23,13	37,66	-22,31
	2,00	24,87	11,73	39,06	-44,31	50,52	-44,44
	1,42	26,96	12,53	43,40	-57,42	56,04	-58,13
40.000	19,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	12,00	8,24	4,97	13,92	-8,09	19,43	-6,13
	10,00	10,69	6,34	18,79	-11,76	25,59	-9,25
	8,00	13,35	7,78	23,91	-16,93	32,33	-13,77
	6,00	16,27	9,27	30,09	-24,50	39,81	-21,03
	4,00	19,63	10,88	37,52	-37,25	48,79	-32,64
	2,84	21,89	11,91	43,17	-50,00	55,18	-44,79
80.000	9,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	8,00	2,32	1,26	6,10	-3,01	8,63	-4,13
	6,00	5,15	2,74	13,80	-8,09	19,29	-10,90
	4,01	8,33	4,28	23,63	-16,86	31,84	-22,32

<sup>1</sup> Redução percentual das emissões em relação a maior razão diâmetro/altura para cada volume

FONTE: O autor, 2018.

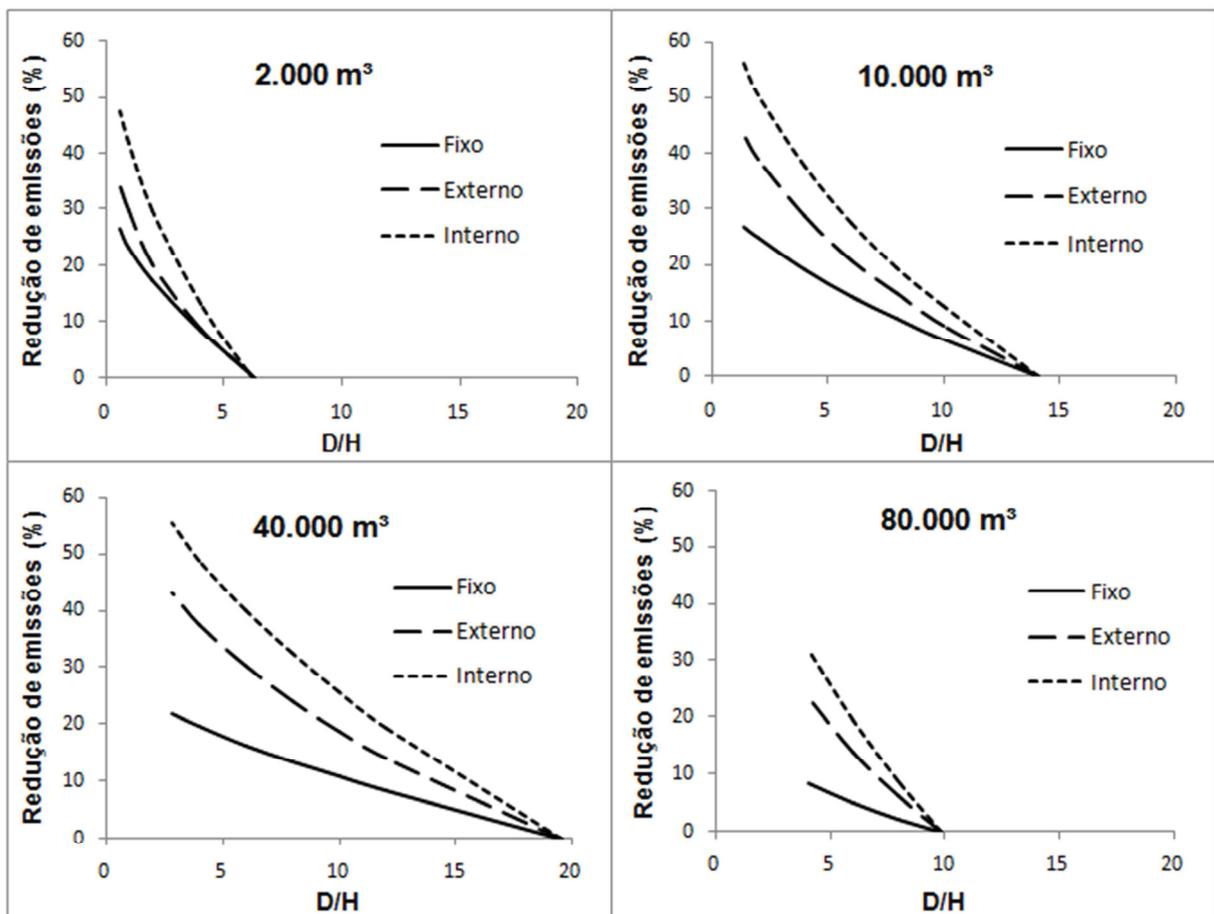
TABELA 7 – PERCENTUAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E O PRODUTO PETRÓLEO

Volume (m <sup>3</sup> )	D/H	Redução das emissões <sup>1</sup> (%)		
		Teto Fixo	Teto flutuante	
			Externo	Interno
80.000	9,82	0,00	0,00	0,00
	8,00	2,39	3,53	5,50
	6,00	5,33	7,69	11,93
	4,01	8,68	11,86	18,65

<sup>1</sup> Redução percentual das emissões em relação a maior razão diâmetro/altura

FONTE: O autor, 2018.

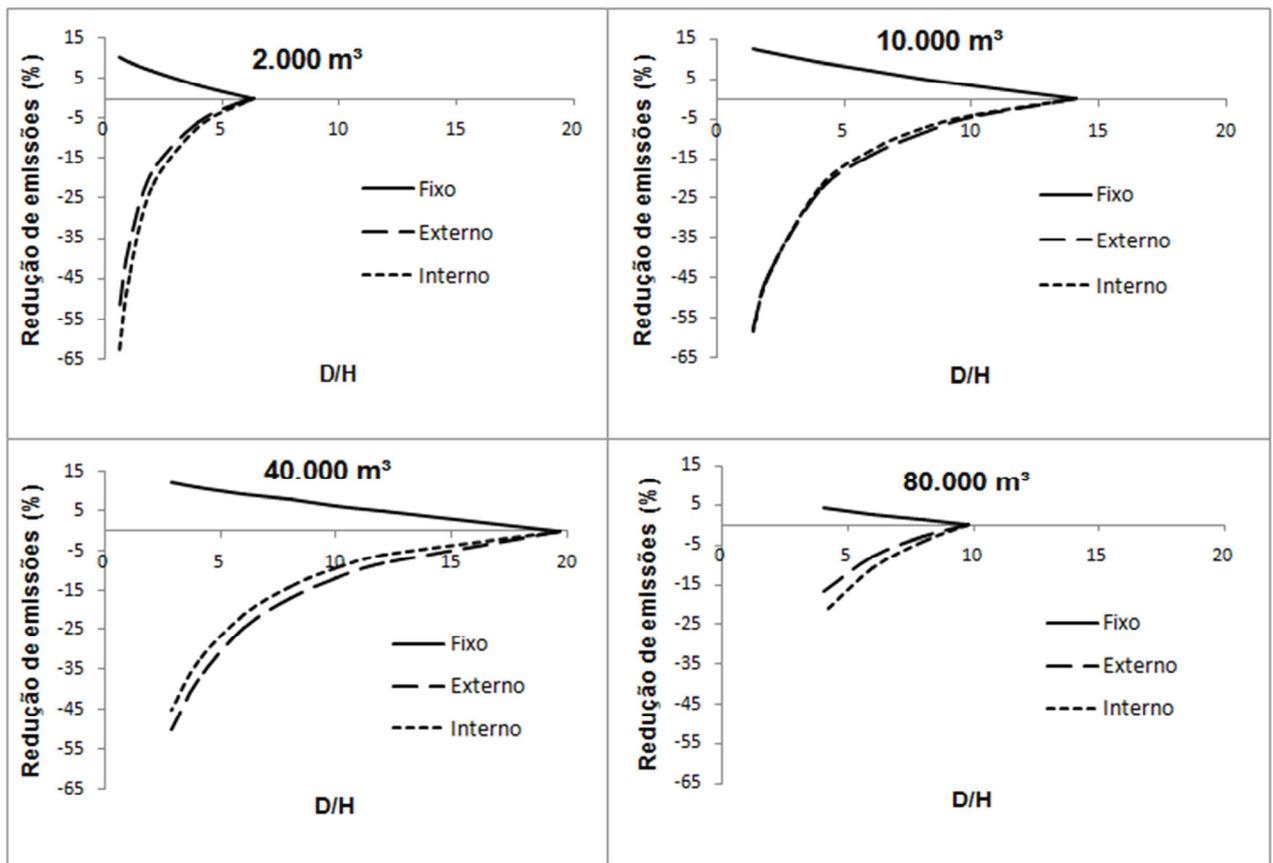
FIGURA 10 – PERCENTUAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES EM RELAÇÃO A VARIAÇÃO DA RAZÃO D/H NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E OS QUATRO DIFERENTES VOLUMES, PARA O PRODUTO GASOLINA



FONTE: O autor, 2018.

A redução das emissões para o diesel, nos tanques de teto fixo, são bem menores do que da gasolina, ficando próximas a 10%. Nos tanques de teto flutuante, onde o efeito é o oposto, o aumento das emissões podem ser superiores a 60%, como pode ser visualizado na Figura 11.

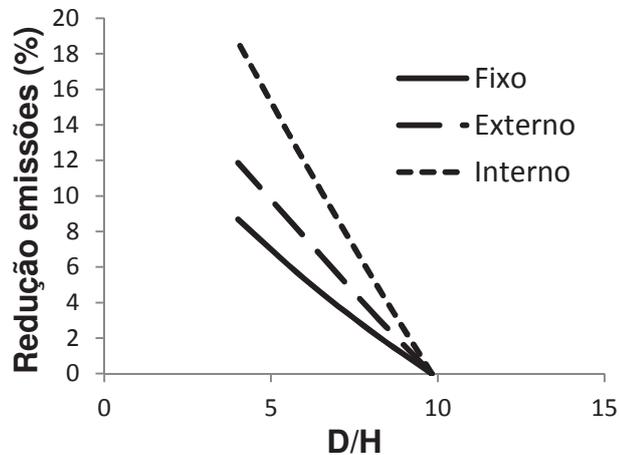
FIGURA 11 – PERCENTUAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES EM RELAÇÃO A VARIAÇÃO DA RAZÃO D/H NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E OS QUATRO DIFERENTES VOLUMES, PARA O PRODUTO DIESEL



FONTE: O autor, 2018.

O mesmo comportamento da gasolina foi verificado para o petróleo, porém, os percentuais de redução são menores, chegando ao máximo de 18,65% nos tanques de teto flutuante interno, conforme pode-se verificar na Figura 12.

FIGURA 12 – PERCENTUAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES EM RELAÇÃO A VARIACÃO DA RAZÃO D/H NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E UM VOLUME DE 80.000 M<sup>3</sup>, PARA O PRODUTO PETRÓLEO



FONTE: O autor, 2018.

#### 4.1.3 Estimativa das emissões de COV em função da taxa de transferência

As simulações para avaliação das emissões em função da taxa de transferência foram realizadas para as três tipologias de tanques, totalizando 181 simulações. As configurações testadas são mostradas na Tabela 8. Os valores de giros correspondem ao enchimento e esvaziamento completo ocorrendo uma vez ao ano (1), uma vez por mês (12), uma vez por semana (52), duas vezes por semana (104) e uma vez por dia (365). Em todas as simulações foram utilizados os valores de diâmetro e altura mantendo a relação (D/H) igual a 4.

Os resultados para gasolina e diesel estão apresentados na Tabela 9.

Avaliando os resultados obtidos com as simulações foi possível observar que a taxa de transferência de produtos nos tanques de armazenamento de hidrocarbonetos resulta em diferentes emissões conforme se altera o volume e número de giros dos tanques. Com os resultados das simulações para tanques de teto fixo que armazenam gasolina, para uma mesma taxa de transferência, 4.160.000 m<sup>3</sup>/ano, por exemplo, seriam emitidos para a atmosfera 2.493,92 toneladas de COV/ano, se for utilizado um tanque com volume de 40.000 m<sup>3</sup> e 4.071,12 toneladas de COV/ano se for utilizado um tanque de 80.000 m<sup>3</sup>.

TABELA 8 – CONFIGURAÇÕES PARA ESTIMATIVA DAS EMISSÕES REFERENTES À TAXA DE TRANSFERÊNCIA

<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Giros (ano<sup>-1</sup>)</b>	<b>Taxa de transferência (m<sup>3</sup>/ano)</b>
2.000	1	2.000
	12	24.000
	52	104.000
	104	208.000
	365	730.000
10.000	1	10.000
	12	120.000
	52	520.000
	104	1.040.000
	365	3.650.000
40.000	1	40.000
	12	480.000
	52	2.080.000
	104	4.160.000
	365	14.600.000
80.000	1	80.000
	12	960.000
	52	4.160.000
	104	8.320.000
	365	29.200.000

FONTE: O autor, 2018.

Nos tanques de teto fixo, as emissões de COV aumentam à medida que se aumenta o volume dos tanques e também, à medida que se aumenta o número de giros. Este comportamento ocorre para os três produtos analisados.

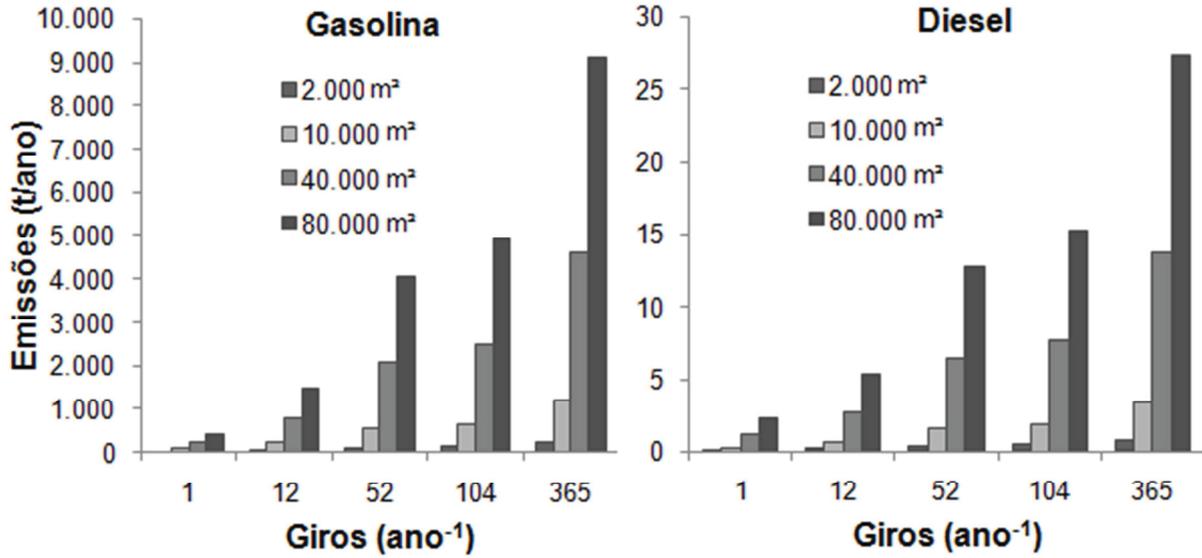
Nos tanques de teto flutuante com gasolina, o número de giros não teve grande alteração, apenas a variação do volume foi importante na avaliação. No caso dos tanques de teto flutuante armazenando diesel, as duas condições são importantes. Isto fica claro quando se observam as Figuras 13, 14 e 15.

TABELA 9 – RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DA TAXA DE TRANSFERÊNCIA, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E OS PRODUTOS GASOLINA E DIESEL

Volume (m <sup>3</sup> )	Giros (ano <sup>-1</sup> )	Taxa de transferência (m <sup>3</sup> /ano)	Emissões (t/ano)					
			Fixo		Flutuante			
			Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel
2.000	1	2.000	26,82	0,07	5,13	0,01	3,13	0,01
	12	24.000	53,48	0,15	5,13	0,02	3,14	0,02
	52	104.000	118,11	0,33	5,16	0,05	3,17	0,05
	104	208.000	139,12	0,40	5,19	0,09	3,20	0,09
	365	730.000	244,54	0,70	5,36	0,31	3,36	0,30
10.000	1	10.000	88,09	0,32	7,31	0,02	5,36	0,01
	12	120.000	221,36	0,70	7,33	0,04	5,38	0,04
	52	520.000	544,46	1,64	7,40	0,14	5,45	0,13
	104	1.040.000	649,46	1,94	7,50	0,26	5,55	0,26
	365	3.650.000	1.176,51	3,46	7,98	0,88	6,03	0,87
40.000	1	40.000	248,13	1,20	10,36	0,03	9,09	0,03
	12	480.000	781,30	2,74	10,41	0,09	9,14	0,09
	52	2.080.000	2.073,84	6,46	10,60	0,33	9,33	0,33
	104	4.160.000	2.493,92	7,67	10,84	0,64	9,57	0,64
	365	14.600.000	4.602,38	13,74	12,06	2,19	10,79	2,19
80.000	1	80.000	419,24	2,34	12,72	0,04	12,07	0,04
	12	960.000	1.485,72	5,41	12,80	0,14	12,15	0,14
	52	4.160.000	4.071,12	12,86	13,11	0,52	12,45	0,52
	104	8.320.000	4.911,37	15,28	13,48	1,01	12,84	1,01
	365	29.200.000	9.128,79	27,43	15,42	3,47	14,78	3,47

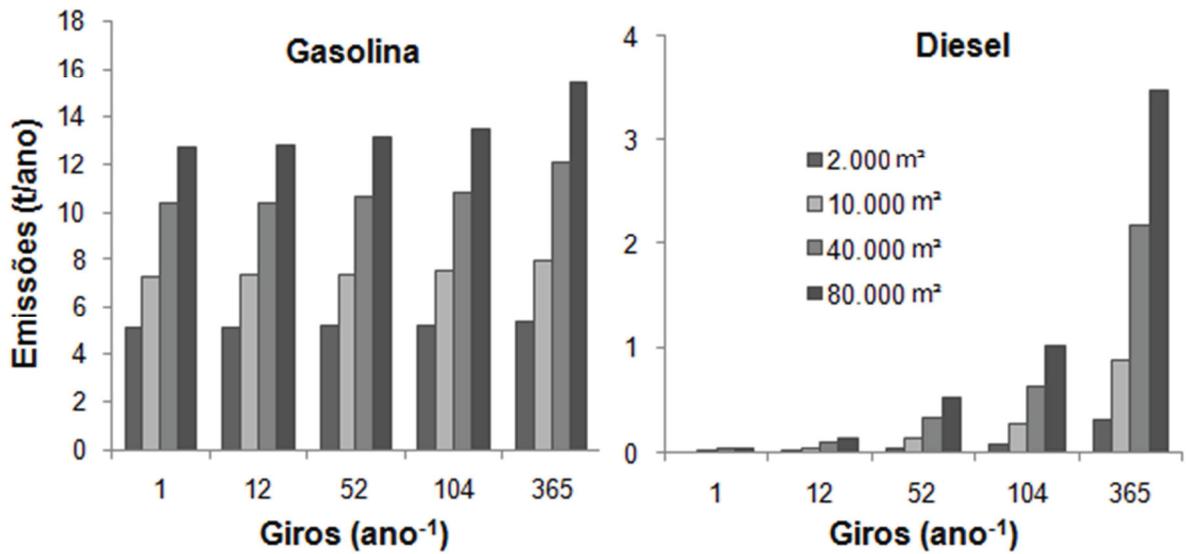
FONTE: O autor, 2018.

FIGURA 13 – ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE COV EM TANQUES DE TETO FIXO, EM FUNÇÃO DE VARIAÇÕES DOS PARAMETROS RELACIONADOS A TAXA DE TRANSFERÊNCIA PARA GASOLINA E DIESEL EM DIFERENTES VOLUMES (EM M<sup>3</sup>)



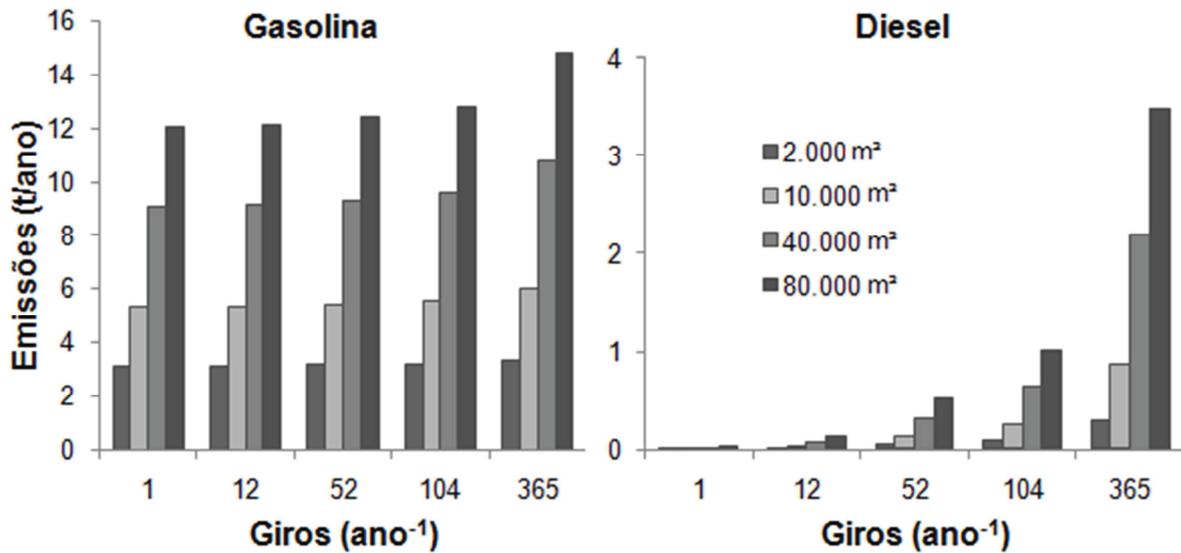
FONTE: O autor, 2018

FIGURA 14 – ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE COV EM TANQUES DE TETO FLUTUANTE EXTERNO, EM FUNÇÃO DE VARIAÇÕES DOS PARAMETROS RELACIONADOS A TAXA DE TRANSFERÊNCIA PARA GASOLINA E DIESEL EM DIFERENTES VOLUMES (EM M<sup>3</sup>)



FONTE: O autor, 2018

FIGURA 15 – ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE COV EM TANQUES DE TETO FLUTUANTE INTERNO, EM FUNÇÃO DE VARIAÇÕES DOS PARAMETROS RELACIONADOS A TAXA DE TRANSFERÊNCIA PARA GASOLINA E DIESEL EM DIFERENTES VOLUMES (EM M<sup>3</sup>)



FONTE: O autor, 2018

A Tabela 10 mostra uma comparação da quantidade de COV emitida por ano para cada um dos volumes testados, considerando gasolina e diesel, e uma taxa de transferência fixa de 80.000 m<sup>3</sup>/ano. Nesta condição o número de giros varia, tanto para tanques de teto fixo como flutuante, de forma a atender a relação:

$$N = Q/V$$

Onde;

N = número de giros, ano<sup>-1</sup>

Q = taxa de transferência, m<sup>3</sup>/ano

V = volume, m<sup>3</sup>.

Os resultados obtidos para a gasolina (Tabela 10) evidenciam a redução das emissões de COV a medida que é reduzido o volume do tanque. Pode-se atingir até 76% de redução para tanques de teto fixo, 59% para tanques de teto flutuante externo e 74% para tanques de teto flutuante interno (Tabela 11).

TABELA 10 - EMISSÕES DE TANQUES, COM TAXA DE TRANSFERÊNCIA CONSTANTE E VOLUME E Nº DE GIROS VARIÁVEIS.

Volume (m <sup>3</sup> )	Giros (ano <sup>-1</sup> )	Emissões (t/ano)					
		Teto Fixo		Teto flutuante			
				Externo		Interno	
		Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel
80.000	1,00	419,24	2,34	12,71	0,04	12,07	0,04
40.000	2,00	347,92	1,34	10,36	0,03	9,09	0,03
10.000	8,00	212,05	0,56	7,32	0,03	5,37	0,03
2.000	40,00	100,10	0,32	5,15	0,04	3,16	0,04

FONTE: O autor, 2018.

No caso do diesel, a redução só ocorre nos tanques de teto fixo, atingindo até 86% de redução nas emissões de COV. Para os tanques de teto flutuante os valores variam sem uma tendência clara de aumento ou redução (Tabela 11).

TABELA 11 - REDUÇÃO PERCENTUAL DAS EMISSÕES DE COV EM TANQUES, COM TAXA DE TRANSFERÊNCIA CONSTANTE E VOLUME E Nº DE GIROS VARIÁVEIS

Volume (m <sup>3</sup> )	Giros (ano <sup>-1</sup> )	Redução(%)					
		Teto Fixo		Teto flutuante			
				Externo		Interno	
		Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel
80.000	1,00	0	0	0	0	0	0
40.000	2,00	17	43	18	8	25	11
10.000	8,00	49	76	42	7	56	14
2.000	40,00	76	86	59	-16	74	-11

FONTE: O autor, 2018.

O empreendedor precisa verificar se o número de giros atende a necessidade do seu parque de tancagem, pois neste caso há uma variação bastante significativa. Embora a massa emitida seja muito diferente, o tanque de 2.000 m<sup>3</sup> permite um estoque de produto de 9 dias (40 giros em um ano) e o de 80.000 m<sup>3</sup>, de um ano.

Tipicamente o estoque de produto e, portanto, o número de giros, é um critério básico para o projeto dos tanques, sendo assim, realizou-se complementarmente uma avaliação das emissões de três cenários, onde se variou o volume e a quantidade de tanques, mantendo a taxa de transferência e o número de giros constante. Os cenários consideram que a taxa de transferência em análise seria operacionalizada com um único tanque de 80.000 m<sup>3</sup>, dois tanques de 40.000 m<sup>3</sup> ou oito tanques de 10.000 m<sup>3</sup>. Os resultados estão mostrados na Tabela 12.

TABELA 12– EMISSÕES DECOV EM TANQUES, COM TAXA DE TRANSFERÊNCIA FIXA, Nº DE GIROS CONSTANTE E COM VOLUME E Nº DE TANQUES VARIÁVEIS PARA GASOLINA E DIESEL

Nº de tanques	Volume (m <sup>3</sup> )	Giros (ano <sup>-1</sup> )	Emissões (t/ano)					
			Teto Fixo		Teto flutuante			
					Externo		Interno	
			Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel
1	80.000	1	419,24	2,34	12,71	0,04	12,07	0,04
2	40.000	1	496,26	2,40	20,72	0,06	18,18	0,05
8	10.000	1	704,70	2,56	58,44	0,14	42,86	0,11
1	80.000	52	4.071,11	12,86	13,11	0,52	12,45	0,52
2	40.000	52	4.147,69	12,92	21,19	0,66	18,66	0,66
8	10.000	52	4.355,67	13,08	59,20	1,10	43,61	1,07
1	80.000	365	9.128,79	27,43	15,42	3,47	14,78	3,47
2	40.000	365	9.204,75	27,49	24,13	4,38	21,59	4,37
8	10.000	365	9.412,10	27,65	63,85	7,00	48,26	6,97

FONTE: O autor, 2018.

A mesma condição foi simulada para o petróleo, com o objetivo de comparar as várias possibilidades. Os resultados estão mostrados na Tabela 13.

Os resultados das Tabelas 12 e 13 permitiram obter o potencial de redução de emissões do COV para os três produtos avaliados (Tabelas 14 e 15).

TABELA 13 – EMISSÕES DE COV EM TANQUES, COM TAXA DE TRANSFERÊNCIA E Nº DE GIROS CONSTANTES E COM VOLUME E Nº DE TANQUES VARIÁVEIS PARA O PETRÓLEO

Nº de tanques	Volume (m <sup>3</sup> )	Giros(ano <sup>-1</sup> )	Emissões (t/ano)		
			Teto Fixo	Teto flutuante	
				Externo	Interno
1	80.000	1	145,90	1,88	1,79
2	40.000	1	171,81	3,05	2,68
8	10.000	1	239,67	8,55	6,29
1	80.000	52	1.300,53	3,80	3,71
2	40.000	52	1.326,30	5,47	5,10
8	10.000	52	1.394,02	12,39	10,13
1	80.000	365	2.899,65	15,60	15,51
2	40.000	365	2.925,23	20,34	19,97
8	10.000	365	2.992,74	35,99	33,73

FONTE: O autor, 2018

TABELA 14 – REDUÇÃO PERCENTUAL DAS EMISSÕES DE TANQUES, COM TAXA DE TRANSFERÊNCIA E Nº DE GIROS CONSTANTES E COM VOLUME E Nº DE TANQUES VARIÁVEIS PARA OS PRODUTOS GASOLINA E DIESEL

Nº de tanques	Volume (m <sup>3</sup> )	Giros (ano <sup>-1</sup> )	Redução(%)					
			Teto Fixo		Teto flutuante			
			Gasolina	Diesel	Externo		Interno	
				Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	
1	80.000	1	41	9	78	74	72	68
2	40.000	1	30	6	65	60	58	54
8	10.000	1	0	0	0	0	0	0
1	80.000	52	7	2	78	53	71	52
2	40.000	52	5	1	64	40	57	39
8	10.000	52	0	0	0	0	0	0
1	80.000	365	3	1	76	50	69	50
2	40.000	365	2	1	62	37	55	37
8	10.000	365	0	0	0	0	0	0

FONTE: O autor, 2018.

TABELA 15 – REDUÇÃO PERCENTUAL DAS EMISSÕES DE TANQUES, COM TAXA DE TRANSFERÊNCIA E Nº DE GIROS CONSTANTES E COM VOLUME E Nº DE TANQUES VARIÁVEIS PARA O PETRÓLEO

Nº de tanques	Volume (m <sup>3</sup> )	Giros(ano <sup>-1</sup> )	Redução(%)		
			Teto Fixo	Teto flutuante	
				Externo	Interno
1	80.000	1	39	78	72
2	40.000	1	28	64	57
8	10.000	1	0	0	0
1	80.000	52	7	69	63
2	40.000	52	5	56	50
8	10.000	52	0	0	0
1	80.000	365	3	57	54
2	40.000	365	2	43	41
8	10.000	365	0	0	0

FONTE: O autor, 2018.

Os resultados obtidos indicaram que para tanques de teto flutuante, um tanque único de grande volume é sempre a melhor opção, para todos os produtos. Considerando a gasolina (Tabela 14) e o petróleo (Tabela 15), a diferença nas emissões chega a 78% para tanques de teto flutuante externo quando o número de giros é igual a 1.

Nos tanques de teto fixo o uso de um único tanque também é mais vantajoso, mas a diferença é menor do que para os tanques de teto flutuante. Quando se avaliam números de giros mais altos, a vantagem é ainda menor. No caso do diesel a redução é de apenas 1% quando o número de giros é de 365 (Tabela 14).

#### 4.1.4 Estimativa das emissões de COV em função da cor e integridade do revestimento externo dos tanques

Segundo Martins (2004), a pintura branca do tanque reflete 70% da energia solar, o que resulta em uma menor energia transferida para o tanque, menores temperaturas internas e menos emissões.

De acordo com U.S EPA (2006) tanques de cor metálica natural são os que emitem menos e tanques com aspectos de ferrugem recobrimdo a pintura original apresentam considerável aumento nas emissões.

O Inventário de Emissões Petrobras (2018), indica que tanques brancos e cinzas correspondem a grande maioria dos tanques em operação nas refinarias do país, correspondendo a 99% dos tanques.

O dimensionamento utilizado nesta avaliação foi padronizado, de maneira a possibilitar a comparação entre os diferentes volumes de tanques. A relação diâmetro/altura foi mais uma vez utilizada para esta padronização. Foram estimadas as emissões de COV/ano considerando a relação D/H que implica na menor área superficial possível.

A menor área superficial possível pode ser obtida igualando a zero a derivada da equação do volume do cilindro (forma geométrica do tanque). Os cálculos indicam que a relação  $D/H = 2$  é a solução. Onde há limitações de engenharia para a relação  $D/H = 2$  (tanques de grandes volumes), foi utilizada a relação possível mais próxima desta.

A Tabela 16 mostra os valores das relações diâmetro/altura para cada volume testado.

TABELA 16 – RELAÇÕES DIÂMETRO/ALTURA (D/H) TESTADOS PARA ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE COV RELACIONADAS A COR E INTEGRIDADE DE REVESTIMENTO EXTERNO

<b>Volume</b>	<b>D/H</b>
2.000 m <sup>3</sup>	2
10.000 m <sup>3</sup>	2
40.000 m <sup>3</sup>	2,84
80.000 m <sup>3</sup>	4,01

FONTE: O autor, 2018.

As configurações foram simuladas para as três tipologias de tanques, totalizando 108 simulações. Os resultados para gasolina e diesel estão mostrados na Tabela 17.

TABELA 17 - RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE COV EM FUNÇÃO DA COR E INTEGRIDADE DO REVESTIMENTO EXTERNO, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E OS PRODUTOS GASOLINA E DIESEL

Volume (m <sup>3</sup> ) Cor / Estado	Emissões (t/ano)						
	Teto fixo		Teto flutuante				
			Externo		Interno		
	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	
2.000	BB <sup>1</sup>	74,33	0,22	4,50	0,03	2,55	0,03
	BR <sup>2</sup>	84,19	0,26	4,80	0,03	2,72	0,03
	CB <sup>3</sup>	107,57	0,35	5,47	0,04	3,10	0,03
	VB <sup>4</sup>	125,19	0,42	5,95	0,04	3,37	0,03
10.000	BB	340,55	1,09	6,29	0,08	4,29	0,08
	BR	376,01	1,28	6,70	0,09	4,57	0,08
	CB	458,50	1,69	7,64	0,09	5,21	0,08
	VB	519,38	2,00	8,31	0,09	5,66	0,08
40.000	BB	1.324,51	4,36	9,74	0,18	8,05	0,18
	BR	1.449,68	5,10	10,39	0,18	8,58	0,18
	CB	1.738,24	6,72	11,84	0,18	9,77	0,18
	VB	1.949,16	7,93	12,86	0,19	10,62	0,18
80.000	BB	2.649,68	8,76	13,15	0,09	12,29	0,25
	BR	2.900,20	10,25	14,01	0,09	13,09	0,25
	CB	3.477,78	13,54	15,97	0,10	14,92	0,26
	VB	3.899,95	16,00	17,35	0,10	16,21	0,26

<sup>1</sup>BB = Branco / Bom    <sup>2</sup>BR = Branco / Ruim    <sup>3</sup>CB = Cinza / Bom    <sup>4</sup>VB = Vermelho primer / Bom

FONTE: O autor, 2018.

O petróleo foi avaliado apenas para o tanque de 80.000 m<sup>3</sup>, condizente com a condição usual. Os resultados estão mostrados na Tabela 18.

Na Tabela 19, obtida com os resultados da Tabela 17, pode-se verificar o percentual de redução das emissões na comparação entre as diferentes cores e condições. A cor branca em bom estado foi adotada como referência para a comparação da redução das emissões de COV/ano para a gasolina e o diesel. Na Tabela 20 estão mostrados os percentuais para o petróleo.

TABELA 18 - RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE COV EM FUNÇÃO DA COR E INTEGRIDADE DO REVESTIMENTO EXTERNO, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E O PRODUTO PETRÓLEO

Volume (m <sup>3</sup> )	Cor / estado	Emissões (t/ano)		
		Teto Fixo	Teto flutuante	
			Externo	Interno
80.000	BB <sup>1</sup>	851,12	2,75	2,66
	BR <sup>2</sup>	932,44	2,85	2,76
	CB <sup>3</sup>	1109,70	3,08	2,97
	VB <sup>4</sup>	1168,79	3,23	3,12

<sup>1</sup>BB = Branco / Bom    <sup>2</sup>BR = Branco / Ruim    <sup>3</sup>CB = Cinza / Bom    <sup>4</sup>VB = Vermelho primer / Bom

FONTE: O autor, 2018.

TABELA 19 – PERCENTUAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE COV PARA AVALIAÇÃO DA COR E INTEGRIDADE DO REVESTIMENTO EXTERNO, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E OS PRODUTOS GASOLINA E DIESEL

Volume (m <sup>3</sup> )	Cor / Estado	Redução das emissões (%)					
		Teto fixo		Teto flutuante			
				Externo		Interno	
		Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel
2.000	BB <sup>1</sup>	40,62	46,25	24,40	9,16	24,34	6,08
	BR <sup>2</sup>	32,75	36,75	19,37	7,12	19,33	4,74
	CB <sup>3</sup>	14,07	15,76	8,03	3,05	8,01	2,02
	VB <sup>4</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10.000	BB	34,43	45,21	24,31	5,33	24,24	3,86
	BR	27,60	35,88	19,30	4,14	19,24	3,00
	CB	11,72	15,38	8,00	1,77	7,98	1,28
	VB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
40.000	BB	32,05	45,01	24,24	3,84	24,19	3,31
	BR	25,63	35,72	19,25	2,99	19,21	2,57
	CB	10,82	15,30	7,98	1,28	7,96	1,10
	VB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
80.000	BB	32,06	45,22	24,23	5,95	24,21	3,54
	BR	25,63	35,89	19,24	4,63	19,22	2,75
	CB	10,83	15,38	7,97	1,98	7,97	1,18
	VB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

<sup>1</sup>BB = Branco / Bom    <sup>2</sup>BR = Branco / Ruim    <sup>3</sup>CB = Cinza / Bom    <sup>4</sup>VB = Vermelho primer / Bom

FONTE: O autor, 2018.

TABELA 20 – PERCENTUAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE COV PARA AVALIAÇÃO DA COR E INTEGRIDADE DO REVESTIMENTO EXTERNO, COMPARANDO OS TRÊS TIPOS DE TANQUES E O PRODUTO PETROLEO

Volume (m <sup>3</sup> )	Cor / estado	Redução das emissões %		
		Teto Fixo	Teto flutuante	
			Interno	Externo
80.000	BB <sup>1</sup>	27	15	15
	BR <sup>2</sup>	20	12	12
	CB <sup>3</sup>	5	5	5
	VB <sup>4</sup>	0	0	0

<sup>1</sup>BB = Branco / Bom    <sup>2</sup>BR = Branco / Ruim    <sup>3</sup>CB = Cinza / Bom    <sup>4</sup>VB = Vermelho primer / Bom

FONTE: O autor, 2018.

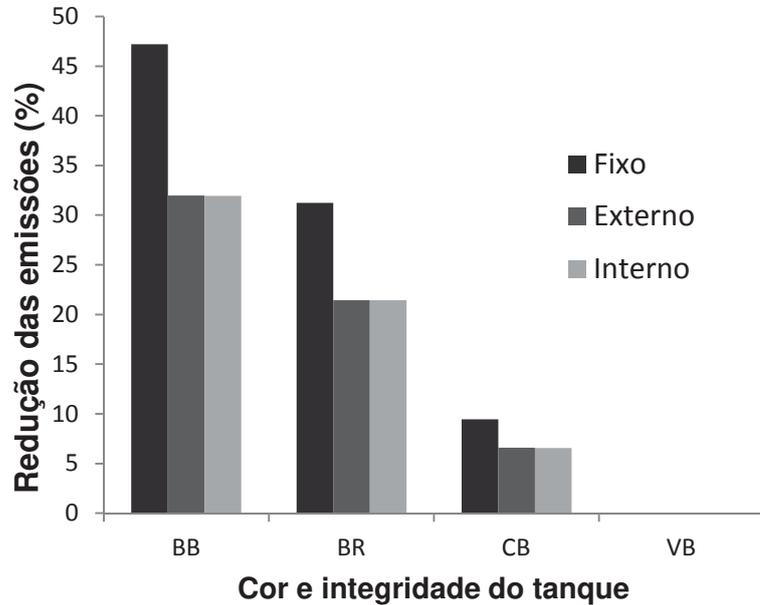
Os resultados mostrados nas Tabelas 19 e 20 indicam que reduções nas emissões de COV/ano podem ser alcançadas se utilizados critérios adequados relacionados a cor e a integridade do revestimento externo. No caso da gasolina (Tabela 19), os tanques de teto flutuante apresentam redução das emissões próxima de 25%. Já para o diesel (Tabela 19) a redução para tanques de teto fixo é maior do que 40%. O petróleo (Tabela 20) apresenta reduções que chegam a 27% nos tanques de teto fixo e 15% nos de teto flutuante.

A redução nas emissões de COV obtidas nas simulações também pode ser observada nas Figuras 16, 17 e 18, que mostram a porcentagem de redução de emissões para gasolina, diesel e petróleo, respectivamente, em tanques de 80.000 m<sup>3</sup>.

Os resultados evidenciam uma redução mais relevante nos tanques de teto fixo, independente do produto, corroborando com as demais análises que este tipo de tanque é mais sensível a mudanças externas do que os demais.

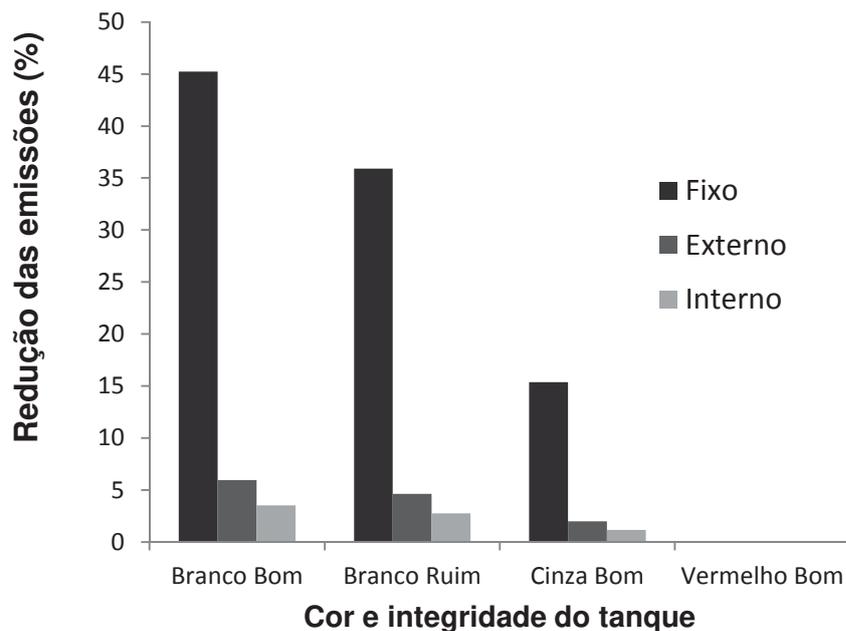
No caso do óleo diesel, a diferença na redução das emissões entre o tanque de teto fixo e os demais é ainda maior (de 45,01% para 3,31% entre teto fixo e teto flutuante interno). Dessa forma, as emissões derivadas deste produto se mostram mais influenciadas pelas variações ambientais externas do que os demais produtos. Os mecanismos de emissão envolvidos são detalhados no item 4.2.

FIGURA 16 – REDUÇÃO PERCENTUAL DAS EMISSÕES DE COV EM TANQUES, COMPARANDO AS DIFERENTES CONDIÇÕES TESTADAS PARA AVALIAÇÃO DA COR E INTEGRIDADE DO REVESTIMENTO PARA A GASOLINA, NO TANQUE DE 80.000 M<sup>3</sup>



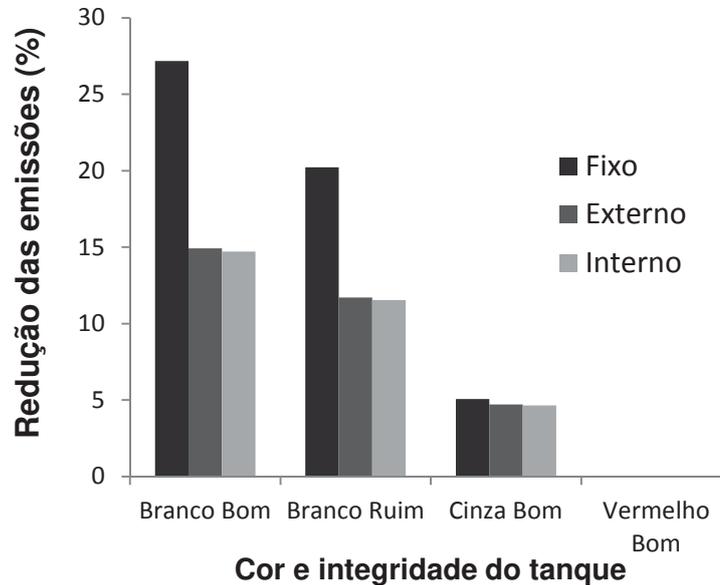
FONTE: O autor, 2018.

FIGURA 17 – REDUÇÃO PERCENTUAL DAS EMISSÕES DE COV EM TANQUES, COMPARANDO AS DIFERENTES CONDIÇÕES TESTADAS PARA AVALIAÇÃO DA COR E INTEGRIDADE DO REVESTIMENTO PARA O DIESEL, NO TANQUE DE 80.000 M<sup>3</sup>



FONTE: O autor, 2018.

FIGURA 18 – REDUÇÃO PERCENTUAL DAS EMISSÕES DE COV EM TANQUES, COMPARANDO AS DIFERENTES CONDIÇÕES TESTADAS PARA AVALIAÇÃO DA COR E INTEGRIDADE DO REVESTIMENTO PARA O PETRÓLEO, NO TANQUE DE 80.000 M<sup>3</sup>



FONTE: O autor, 2018.

#### 4.2 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS SIMULADOS NAS EMISSÕES DE COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS

O ponto mais evidente dos resultados obtidos nas simulações é a grande diferença nas emissões entre os tanques de teto fixo e de teto flutuante. Essa diferença era esperada, uma vez que os tanques de teto fixo são livres, e qualquer mudança no equilíbrio do líquido armazenado gera emissões.

De acordo com Zinke et al. (2018), para compostos altamente voláteis, como a gasolina, tanques com teto flutuante vão apresentar menores emissões do que tanques de teto fixo.

A alteração de tanques de teto fixo para tanques de teto flutuante permite reduções de 60% a 99% nas emissões de COV, dependendo do tipo de teto e selos instalados, e do tipo de líquido orgânico estocado (U.S. EPA, 2006).

Segundo a U.S EPA, 2006, duas formas de emissão são significativas para os tanques de teto fixo: emissões de armazenamento, emissões de operação.

As emissões de armazenamento ocorrem devido a expansão e contração do vapor, resultante de mudanças de temperatura e pressão, independente de mudanças nos níveis do líquido presente.

As emissões de operação estão relacionadas às ações de enchimento e esvaziamento. O enchimento ocasiona um aumento de pressão no tanque, expulsando vapor para fora. O esvaziamento, por outro lado, leva ao aumento da capacidade do espaço de vapor, aumentando a liberação de hidrocarbonetos para o ar.

De acordo com Zinke et al. (2018) os tanques de teto flutuante apresentam emissões devido a imperfeições nas selagens e a formação de filmes na parede interna durante o descarregamento do tanque.

Segundo a U.S EPA, 2006, as emissões de tanques de teto flutuante são uma soma de emissões de armazenamento e emissões pelo descarregamento do tanque. As emissões de descarregamento ocorrem quando o nível de líquido baixa e expõe no costado do tanque líquido remanescente, que evapora. Isto ocorre também nas colunas de sustentação de tanques de teto flutuante interno, quando estes possuem este tipo de suporte. As emissões de armazenamento incluem emissões provenientes do anel de vedação do teto e de acessórios do teto. Tanques de teto flutuante interno incluem ainda emissões por costuras do teto.

#### 4.2.2 Dimensionamento

Os resultados das estimativas de emissões de COV em função do dimensionamento dos tanques evidencia uma tendência de redução das emissões com a diminuição da relação D/H, na maioria dos casos avaliados. Apenas para os tanques de teto flutuante armazenando diesel a tendência é invertida. Esta característica será esclarecida na avaliação dos parâmetros das equações.

No caso dos tanques de teto fixo, a diminuição da relação D/H gera uma redução do espaço vapor do tanque. Considerando que a altura entre o nível máximo do líquido e o nível do teto permanece a mesma, independente do diâmetro do tanque, a redução deste diâmetro leva a redução do volume disponível para o vapor. Esta situação pode ser visualizada analisando a equação (2). O termo  $V_v$

(volume do espaço vapor) é diretamente proporcional às emissões. Segundo a U.S EPA (2006),  $V_V$  é dado por:

$$V_V = \pi D^2 H_{VO} / 4 \quad (9)$$

Onde:

D = Diâmetro, ft.

$H_{VO}$  = Altura efetiva do tanque + altura do teto – altura do líquido, ft.

Verificando os resultados mostrados no item 4.1.2, Tabela 6 e 7, observa-se adicionalmente, que as emissões nos tanques menores são mais afetadas pela redução D/H do que os tanques grandes. Isto ocorre porque o espaço considerado entre a altura efetiva e a altura operacional, que implica no volume do espaço vapor, é o mesmo em todos os tanques, e assim, quanto maior o volume do tanque, menos representativa é esta diferença.

Isto pode ser observado com os dados mostrados na Tabela 21, onde foram comparadas as reduções nas emissões de COV em duas relações D/H que abrangem todos os volumes testados.

TABELA 21 – REDUÇÃO PERCENTUAL DAS EMISSÕES DE COV NA AVALIAÇÃO DA INFLUENCIA DO DIMENSIONAMENTO, CONSIDERANDO RELAÇÕES D/H DE 4 E 6, PARA TANQUES DE TETO FIXO E PRODUTO GASOLINA

Volume (m <sup>3</sup> )	D/H	Redução %
2.000	6	0
	4	7,37
10.000	6	0
	4	5,44
40.000	6	0
	4	4,01
80.000	6	0
	4	3,35

FONTE: O autor, 2018.

Tanques muito pequenos ou muito grandes apresentam ainda outra característica, que é a maior limitação para os valores de diâmetro e altura, reduzindo a diferença entre a menor e a maior relação D/H. Isso justifica que as reduções nas emissões da gasolina, por exemplo, atinjam mais de 25% em tanques entre 20.000 m<sup>3</sup> e 40.000 m<sup>3</sup>, e aproximadamente 8% no tanque de teto fixo de 80.000 m<sup>3</sup>.

Ainda conforme as tabelas 6 e 7, as emissões nos tanques de tetos flutuantes sofrem maiores reduções, percentualmente, que os tanques de teto fixo. Considerando a gasolina, as emissões podem ser reduzidas em mais de 50% nos tanques de teto flutuante interno e 40% nos tanques de teto flutuante externo, quando se comparam as configurações com menor e maior relação D/H. Com o diesel a tendência de diminuição das emissões conforme se diminui a relação D/H é invertida, e essa condição leva ao aumento das emissões. Podem-se verificar aumentos de mais de 60% nas emissões, muito embora a massa total emitida seja pequena, quando comparada com as variações dos outros combustíveis.

Nos tanques de teto flutuante, as emissões ocorrem devido às perdas no selo de vedação e nos acessórios de teto. As emissões devido à vedação são calculadas pela equação (5). O entendimento das diferenças nas emissões devido a variações no dimensionamento nesses casos é simples. Diâmetros maiores implicam em tetos flutuantes com circunferências maiores. O aumento leva a mais perdas, uma vez que o selo de vedação acompanha a circunferência do teto.

Entre os tanques de teto flutuante interno e externo, a diferença é que os tanques de teto flutuante interno não são sujeitos às variações ambientais decorrentes de ventos, já que possuem um teto fixo sobre o teto flutuante, fazendo que o termo  $K_{Rb}$  (fator de emissão dependente da velocidade do vento) seja nulo.

As emissões relacionadas aos acessórios de teto são calculadas pela equação (7). Tanques com diâmetros maiores precisam de mais acessórios do que tanques com diâmetros menores, causando maiores emissões.

As perdas por descarregamento (equação 6) são as únicas que seguem caminho oposto a todos os outros mecanismos. As emissões neste caso são inversamente proporcionais ao diâmetro, fazendo com que relações menores de D/H

gerem mais emissões. A massa de emissões devido a esse mecanismo, entretanto, é muito baixa, não chegando a 2% do total emitido.

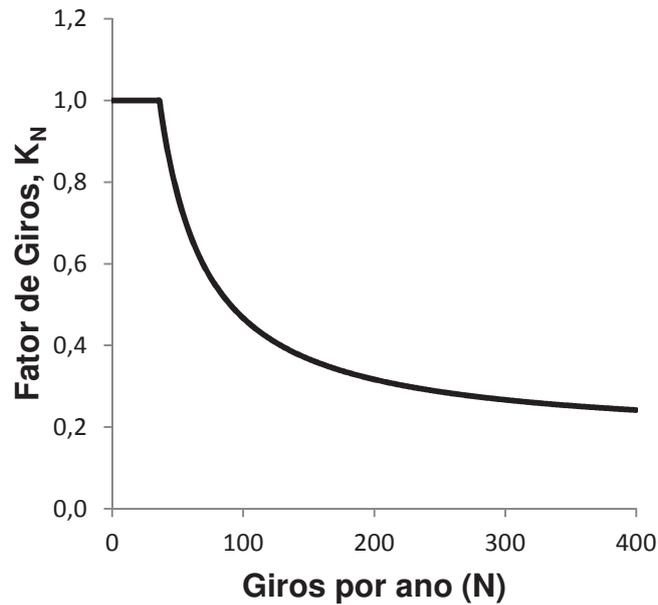
Nos tanques de teto flutuante que armazenam gasolina ou petróleo, os mecanismos que dominam as emissões são os relacionados ao armazenamento, diretamente ligados a vedação do tanque. Esses mecanismos, causam aumento das emissões a medida que o diâmetro aumenta. Nos tanques de teto flutuantes que armazenam diesel, o mecanismo dominante é o de descarregamento, que tem efeito oposto aos que armazenam gasolina e petróleo, e diminui as emissões conforme aumenta-se o diâmetro.

#### 4.2.3 Taxa de transferência

Os resultados das simulações mostram que os tanques de teto fixo são bastante afetados por variações nos parâmetros relacionados a taxa de transferência. No caso destes tanques, a variação do volume ocasiona a alteração do espaço de vapor, pois se altera a altura e o diâmetro dos tanques, dois componentes da equação (9), que calcula o espaço vapor, mencionados anteriormente.

A variação no número de giros, por outro lado, interfere no mecanismo de emissão de operação do tanque de teto fixo. As emissões por operação são determinadas pela equação (3). A movimentação anual do tanque, ou taxa de transferência ( $Q$ ,  $m^3$ /ano), é diretamente proporcional às emissões no caso dos tanques de teto fixo, aplicando-se a equação (3). Outra variável da mesma equação, que influencia nesse caso, é o  $K_N$ , fator de giros. Quando o cenário em avaliação apresenta mais do que 36 giros,  $K_N = (180 + N)/6N$  ( $N$  = número de giros,  $ano^{-1}$ ). Se apresentar 36 giros ou menos,  $K_N = 1$  (Figura 19).

A variação no número de giros não causa significativa variação das emissões no caso dos tanques de teto flutuante, pois os mecanismos mais importantes neste caso são relacionados às vedações do tanque, que não são afetadas pelo número de giros. Neste caso, o mecanismo de “descarregamento” é mais significativo.

FIGURA 19 – VALORES DO FATOR DE GIROS,  $K_N$ , CONFORME O NÚMERO DE GIROS

FONTE: Adaptado de AP-42 (U.S EPA, 2006)

A equação utilizada para calcular as emissões de descarregamento é a equação (6). Observando a equação, nota-se que as emissões de COV são diretamente proporcionais à taxa de transferência ( $Q$ ,  $m^3/ano$ ), assim, o maior volume deslocado ao longo do ano causa invariavelmente maiores emissões.

A massa específica dos produtos avaliados também interfere nos resultados. Quanto maior a massa específica, mais emissões serão geradas. Observando as massas específicas dos produtos avaliados no Quadro 3, o mais impactado neste aspecto é o diesel.

QUADRO 3 – MASSAS ESPECÍFICAS DOS PRODUTOS AVALIADOS

<b>Produto</b>	<b>Massa específica (kg/m<sup>3</sup> a 15,5°C)</b>
Gasolina	671
Diesel	947
Petróleo	851

FONTE: O autor, 2018.

As emissões por descarregamento podem representar mais de 90% das emissões para o diesel, enquanto representa menos de 10% do total das emissões para a gasolina.

#### 4.2.4 Cor e integridade do revestimento externo de costado e teto

A diferença entre as emissões observadas nos tanques com variadas cores e integridade do revestimento está relacionada à absorção de radiação solar que cada condição oferece.

A taxa com a qual um objeto absorve energia da radiação térmica do ambiente depende da área superficial do objeto e da temperatura do ambiente, conforme a equação 10 (HALLIDAY; RESNICK, 2012):

$$P_{\text{abs}} = \sigma \varepsilon A T_{\text{amb}}^4 \quad (10)$$

Onde:

$P_{\text{abs}}$  = Taxa de absorção de energia

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )

$\varepsilon$  = Emissividade da superfície do objeto, entre 0 e 1, dependendo da composição da superfície

$A$  = Área superficial do objeto,  $\text{m}^2$

$T_{\text{amb}}$  = Temperatura ambiente, K

No AP-42, a absorção de radiação térmica é representada pelo fator  $\alpha$ , chamado no documento de fator de absorção de energia luminosa, que varia conforme a cor e integridade da superfície dos tanques.

A equação (2) regula as emissões de armazenamento nos tanques de teto fixo, e nesta equação observa-se o termo  $K_E$ , correspondente ao fator de expansão do espaço vapor, adimensional. Esse mecanismo de emissão é o mais afetado pela

alteração da cor e integridade dos tanques. A obtenção do termo  $K_E$  provém da equação (11).

$$K_E = \Delta T_V / T_{LA} + [(\Delta P_V - \Delta P_B) / (P_A - P_{VA})] \quad (11)$$

Onde:

$\Delta T_V$  é a variação diária da temperatura de vapor, expressa em °R.

$T_{LA}$  é a temperatura diária da superfície do líquido, expressa em °R.

$\Delta P_V$  é a variação diária da pressão de vapor, expressa em psi.

$\Delta P_B$  é a faixa de ajuste da válvula de pressão – vácuo, expressa em psi.

$P_A$  é a pressão atmosférica média, expressa em psia.

$P_{VA}$  é a pressão de vapor na temperatura média da superfície do líquido, expressa em psia.

O termo  $\Delta T_V$  é calculado usando a Equação 12:

$$\Delta T_V = 0,72 \Delta T_A + 0,028 \cdot \alpha \cdot I \quad (12)$$

Onde:

$\Delta T_A$  é a variação da temperatura ambiente média, expressa em °R.

$\alpha$  é o fator de absorção de energia luminosa, adimensional (ver tabela 19).

$I$  é a irradiação total média diária, expressa em Btu/(ft<sup>2</sup>.dia).

O termo  $T_{LA}$  é calculado usando a Equação (13):

$$T_{LA} = 0,44 T_{AA} + 0,56 T_B + 0,0079 \cdot \alpha \cdot I \quad (13)$$

Onde:

$T_{AA}$  é a temperatura média ambiente diária, expressa em °R.

$T_B$  é a temperatura média diária da massa líquida, expressa em °R.

O termo  $P_{VA}$  é obtido de coeficientes disponíveis no documento AP-42, sendo dependente do termo  $T_{LA}$ .

Quando se varia a cor e/ou a integridade do revestimento externo do tanque, o fator  $\alpha$  é modificado. Observando as equações, fica evidente que o aumento do valor deste fator ocasionará o aumento das emissões. Esse aumento, contudo, não é proporcional ao valor do fator  $\alpha$  porque depende, adicionalmente, das condições meteorológicas e características físicas do líquido estocado. Os fatores  $\alpha$  fornecidos pela U.S EPA estão na Tabela 22.

TABELA 22 – FATORES  $\alpha$  PARA DIVERSAS CORES DE TANQUES DE ARMAZENAMENTO DE HIDROCARBONETOS

Cor	Tipo	Fatores $\alpha$	
		Integridade do revestimento	
		Boa	Ruim
Alumínio	Especular	0,39	0,49
Alumínio	Difuso	0,60	0,68
Alumínio	Sem pintura	0,10	0,15
Bege/Creme		0,35	0,49
Preto		0,97	0,97
Marron		0,58	0,67
Cinza	Claro	0,54	0,63
Cinza	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
Bronze		0,43	0,55
Branco	NA	0,17	0,34

FONTE: Adaptado de U.S EPA, 2006.

As emissões de operação dos tanques de teto fixo também são afetadas pela mudança na cor e integridade do tanque. A equação 3, que calcula essa emissão, apresenta a variável  $P_{VA}$  (pressão de vapor na temperatura média da

superfície do líquido, kPa), que por sua vez, depende do termo  $T_{LA}$  (temperatura diária da superfície do líquido, K), já apresentados anteriormente.

Os tanques de teto flutuante sofrem a mesma influência, sendo dependentes igualmente do termo  $P_{VA}$  (pressão de vapor na temperatura média da superfície do líquido, psia). Esse termo está presente nas equações das emissões do anel de vedação do teto (equação 5), e nas emissões dos acessórios de teto (equação 7), indiretamente através do termo  $P^*$  (função da pressão de vapor, adimensional), como se observa na equação 14.

$$P^* = (P_{VA}/P_A) / [1+(1- P_{VA}/P_A)^{0,5}]^2 \quad (14)$$

Nenhuma característica específica entre os tanques de teto flutuante externo e interno é afetada, e desta forma, as emissões destes dois tipos de tanques variam igualmente em função das mudanças na cor e integridade dos tanques.

#### 4.3 ESTABELECIMENTO DE CRITÉRIOS PARA PROJETOS DE TANQUES

A norma técnica API STD 650, desenvolvida pelo *American Petroleum Institute* (API) é o padrão mundialmente usado para projeto de tanques cilíndricos de grande porte para armazenamento de produtos líquidos, especialmente para petróleo e derivados (AZZUNI; GUZEI, 2015).

Esta norma apresenta recomendações para o projeto e instalação de tanques com “segurança e economia”. O documento de mais de 500 páginas fornece critérios para o projeto, fabricação, montagem, inspeção e manutenção de tanques e de todos os acessórios e componentes necessários.

Este documento possui ainda uma gama de apêndices para condições e alternativas de construção, que vão desde pressão ou vácuo acima dos limites de corpo da norma, tanques em aço inoxidável, tetos flutuantes internos, externos, geodésicos, dentre outras situações específicas (OLIVEIRA, 2015).

Existem também normas específicas de algumas empresas, como a Norma Petrobras N-270 (PETROBRAS, 2014), que tem o objetivo de complementar a API STD 650.

Apesar da abrangência e complexidade das duas normas, nenhuma delas menciona critérios ambientais para o desenvolvimento dos projetos. Embora possa haver o entendimento de que tais critérios devem ser estabelecidos e exigidos pelos órgãos ambientais, sua aplicação pode trazer benefícios inclusive para o empreendedor, que reduz a carga de produtos liberados para a atmosfera.

Os ganhos econômicos podem ser significativos, pois de acordo com o Relatório de Sustentabilidade Petrobras 2017, as emissões de COV relacionadas às operações da empresa no ano de 2016 foram de 233.366 toneladas, como se vê na Tabela 23 (PETROBRAS, 2017).

Um melhor entendimento da massa de poluentes emitido para a atmosfera pode ser obtido se estas emissões forem valoradas e as perdas financeiras quantificadas. Assim, considerando o valor médio ao consumidor dos três principais combustíveis (gasolina, diesel e GLP), informado pela ANP em março de 2018, de R\$ 4.236,60 (U\$ 1.303,57) por tonelada (ANP, 2018), pode-se verificar perdas anuais próximas de R\$ 1.000.000.000,00.

TABELA 23 – EMISSÕES DE COV DA PETROBRAS ENTRE 2014 E 2016

Ano	2014	2015	2016
<b>Emissão de COV (tonelada)</b>	234.558	230.159	233.366

Fonte: PETROBRAS, 2017.

Do ponto de vista ambiental, a minimização das emissões dos tanques permite a melhoria da qualidade do ar não só do local próximo do empreendimento, que sofre com os efeitos diretos dos hidrocarbonetos, mas também de regiões mais distantes, onde os COV transportados, em combinação com óxidos de nitrogênio de outras fontes, permite a geração do ozônio troposférico.

Avaliando os resultados apresentados neste estudo, fica evidente que o fator mais importante em um projeto de tanque de armazenamento, do ponto de vista de emissões atmosféricas, é o tipo do teto. Para produtos voláteis, como a gasolina, tanques de teto flutuante apresentam facilmente uma redução de mais de 90% em comparação a tanques de teto fixo.

Com relação ao tipo de teto, a norma N-270 apresenta uma tabela com o tipo de teto recomendado para cada combustível. Para os produtos avaliados neste estudo, a recomendação pode ser vista no Quadro 4.

QUADRO 4 – TIPOS DE TANQUES RECOMENDADOS PELA NORMA N-270 PARA ARMAZENAMENTO DOS PRODUTOS AVALIADOS NESTE TRABALHO

<b>Produto Armazenado</b>	<b>Tipo de tanque</b>
Produtos leves da faixa da gasolina. Petróleo cru.	--Tanque atmosférico de teto flutuante externo. --Tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno. --Tanque atmosférico para pequena pressão interna, segundo a API STD 650 "Annex F". --Tanque para baixa pressão de teto cônico, segundo a API STD 620.
Óleo diesel classes I e II.	--Tanque atmosférico de teto flutuante externo. --Tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno.
Óleo diesel classe III.	--Tanque atmosférico de teto fixo.

Fonte: Adaptado de PETROBRAS, 2014.

Em conjunto com a decisão do tipo de tanque a ser instalado, outras variáveis também importantes devem ser verificadas. Na sequência são apresentadas as recomendações para cada situação avaliada neste estudo.

#### 4.3.2 Dimensionamento

A relação entre o diâmetro e altura de um tanque pode ser um fator importante na minimização das emissões. Considerando um mesmo volume e mesma taxa de transferência, o dimensionamento ideal pode reduzir as emissões em mais de 50%.

Recomenda-se que tanques que armazenam gasolina e petróleo cru, independente do tipo de tanque, sejam dimensionados com o menor diâmetro possível. A aplicação desta condição é muito relevante para estes dois produtos quando se considera a emissão de COV.

Nos tanques que armazenam óleo diesel, se o modelo for o tanque de teto fixo, deve-se dimensionar com o menor diâmetro possível. A medida não é tão relevante quanto para os outros dois produtos (gasolina e petróleo cru). Se o modelo for de teto flutuante, independentemente se externo ou interno, o ideal é que o tanque seja dimensionado com o maior diâmetro possível. As reduções nessa condição, no entanto, são pouco relevantes.

#### 4.3.3 Taxa de Transferência

Embora o valor da taxa de transferência não possa ser alterado por ser uma condição de entrada do projeto, a avaliação das suas variáveis pode influenciar na configuração do parque de tancagem.

Os parques de tancagem devem possuir o menor volume útil possível. Produtos armazenados por longos períodos em tanques grandes podem aumentar significativamente as emissões.

Por outro lado, o volume de cada um dos tanques deve ser maximizado, de modo a haver o menor número possível de tanques. Essa condição aplica-se para qualquer tanque e produto, contudo, é mais relevante para gasolina e petróleo cru, em tanques de teto flutuante.

#### 4.3.4 Cor e integridade do revestimento externo

De um modo geral, os tanques com pintura branca apresentam vantagem nas emissões em todos os tipos de tanques e para todos os produtos. Em comparação com tanques revestidos com cor cinza médio, as emissões podem ser quase 25% menores.

Nos tanques que armazenam gasolina e petróleo cru, independente do tipo de tanque, o revestimento branco é o recomendado. Tanques de óleo diesel, sendo do tipo teto fixo, o revestimento branco apresenta vantagem. Tanques de teto flutuante, independente do tipo, pintados de brancos ou cinza médio apresentam condições semelhantes. Revestimentos de tanques que apresentem fator de absorção de calor ( $\alpha$ ) maior do que o fator de absorção para a cor cinza médio não devem ser aplicadas.

Um resumo de todas essas recomendações, com indicação da relevância da ação, pode ser verificado no Quadro 5.

Ao construir tanques com o menor diâmetro possível, possibilita-se uma redução muito relevante nas emissões da gasolina e um pouco menos para o petróleo, independente do tipo de tanque. Diâmetros menores apresentam redução importante para o óleo diesel também, mas apenas se o tanque for de teto fixo. Se o tanque for do tipo teto flutuante, a melhor condição é a aplicação do maior diâmetro possível.

A instalação do menor número de tanques, mantendo-se o volume constante, é a melhor condição para todos os produtos avaliados e para todos os tipos de tanques. Esta condição é muito relevante se o tanque for de teto flutuante armazenando gasolina ou petróleo e apresenta pouca relevância para tanques de teto fixo, a não ser que o período de estocagem seja alto.

A aplicação da cor branca é a melhor opção para todos os tanques e produtos, mas é pouco relevante para tanques flutuantes de diesel. A relevância é alta na existência de um tanque de teto fixo armazenando gasolina, e média para todos os outros casos.

A aplicação dos critérios estabelecidos pode ser muito útil na gestão de projetos de parques de tancagem. Os critérios, nesse caso, devem ser utilizados para auxiliar na decisão da melhor tecnologia a ser aplicada. Uma análise das emissões pode demonstrar que um investimento inicial mais alto para a instalação de uma determinada tecnologia pode eventualmente ser compensada pela redução das perdas de produtos durante a vida útil do tanque. Vantagem neste caso para o empreendedor, que aumenta suas margens financeiras, e para a sociedade, que recebe uma menor carga de poluentes atmosféricos.

QUADRO 5 – CRITÉRIOS PARA PROJETOS DE TANQUES PARA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE COV.

<b>Dimensionamento</b>				
<b>Produto</b>	<b>Tipo de tanque</b>		<b>Melhor condição</b>	<b>Relevância</b>
<b>Gasolina</b>	Teto fixo		Menor diâmetro possível	MR <sup>1</sup>
	Teto flutuante externo			
	Teto flutuante interno			
<b>Diesel</b>	Teto fixo		Menor diâmetro possível	R <sup>2</sup>
	Teto flutuante externo		Maior diâmetro possível	PR <sup>3</sup>
	Teto flutuante interno		Maior diâmetro possível	PR
<b>Petróleo</b>	Teto fixo		Menor diâmetro possível	R
	Teto flutuante externo			
	Teto flutuante interno			
<b>Quantidade de tanques</b>				
<b>Produto</b>	<b>Tipo de tanque</b>		<b>Melhor condição</b>	<b>Relevância</b>
<b>Gasolina</b>	Teto fixo	Estocagem < 7 dias	Menor número de tanques	PR
		Estocagem entre 7 e 30 dias		R
		Estocagem >30 dias		MR
	Teto flutuante externo			MR
	Teto flutuante interno			MR
<b>Diesel</b>	Teto fixo		Menor número de tanques	PR
	Teto flutuante externo			R
	Teto flutuante interno			R
<b>Petróleo</b>	Teto fixo	Estocagem < 7 dias	Menor número de tanques	PR
		Estocagem entre 7 e 30 dias		R
		Estocagem >30 dias		MR
	Teto flutuante externo			MR
	Teto flutuante interno			MR
<b>Cor do revestimento externo</b>				
<b>Produto</b>	<b>Tipo de tanque</b>		<b>Melhor condição</b>	<b>Relevância</b>
<b>Gasolina</b>	Teto fixo		Branco	MR
	Teto flutuante externo			R
	Teto flutuante interno			R
<b>Diesel</b>	Teto fixo		Branco	R
	Teto flutuante externo		Branco ou cinza	PR
	Teto flutuante interno		Branco ou cinza	PR
<b>Petróleo</b>	Teto fixo		Branco	R
	Teto flutuante externo			R
	Teto flutuante interno			R

<sup>1</sup>MR – Muito Relevante <sup>2</sup>R - Relevante <sup>3</sup>PR – Pouco Relevante

Fonte: O autor, 2018

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ao verificar as normas construtivas de tanques, pode-se observar que os critérios de projetos dos equipamentos têm caráter predominantemente funcional e econômico, sem ênfase para questões relacionadas à poluição do ar causada pelas emissões relacionadas a estes equipamentos.

A avaliação das emissões de compostos orgânicos voláteis em diferentes tipologias de tanques de armazenamento de hidrocarbonetos indica que a aplicação de alguns critérios construtivos pode representar consideráveis vantagens ambientais, com vantagens econômicas associadas.

A opção por tanques com relação diâmetro/altura menores para o mesmo volume pode significar reduções nas emissões da ordem de 40% em tanques de teto flutuante externo armazenando gasolina e mais de 50% em tanques de teto flutuante interno com o mesmo produto. A redução desta relação, ainda aproxima as dimensões do tanque para aquelas que apresentam menores áreas superficiais, reduzindo a quantidade de chapas para a construção do tanque e manutenções do revestimento externo.

A aplicação de critérios adequados para as variáveis relacionados à taxa de transferência também pode trazer benefícios ambientais e econômicos. Embora a taxa de transferência, propriamente, não possa ser alterada, a forma como a taxa será distribuída na área de armazenamento faz diferença para as emissões de COV. A utilização de tanques de tamanhos e na quantidade adequados num parque de tancagem pode conduzir a reduções de até 80% das emissões no armazenamento de gasolina e de petróleo.

O uso da cor branca nos tanques de armazenamento, ao invés do cinza, relativamente comum nos parques de tancagem, pode representar uma redução de até 40% das emissões de COV. A ação simples de manter o revestimento externo em boas condições implica em reduções das emissões em torno de 10%.

O estudo permitiu a elaboração de alguns critérios para projetos de tanques, que podem auxiliar na redução de COV em parques de armazenamento de hidrocarbonetos, contribuindo para a redução da concentração de poluentes

emitidos na atmosfera e, ainda, para a minimização de perdas econômicas para as empresas envolvidas nestas atividades.

Os critérios ambientais identificados neste estudo não devem sobrepor outros critérios relevantes para o empreendedor, como os logísticos, de manutenção, facilidades operacionais e de construção/instalação. Recomenda-se que sejam avaliados em conjunto com estes, ou seja, que projetos de tanques considerem estimativas de emissão na decisão da melhor alternativa construtiva.

A lista de critérios estabelecida neste trabalho pode ainda ser complementada com a avaliação de outros parâmetros, como tipos de selagem, tetos suportados por colunas, tipos e número de acessórios, válvulas de alívio com pressões diferenciadas e tanques com tetos fixos geodésicos.

Outros produtos de amplo uso, como querosene de aviação (QAV), nafta, etanol e óleos combustíveis também se recomenda que sejam avaliados. Uma avaliação econômica associada a ambiental também pode ser interessante e trazer benefícios.

## REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17505:1. **Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis.** Rio de Janeiro, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15724 1 - **Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis – Bases e terminais de distribuição de combustíveis – Métodos de avaliação quantitativa de emissões de compostos orgânicos voláteis no armazenamento e movimentação de produtos.** Rio de Janeiro, 2009a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15724 2 - **Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis – Bases e terminais de distribuição de combustíveis – Métodos de avaliação quantitativa de emissões de compostos orgânicos voláteis no armazenamento e movimentação de produtos.** Rio de Janeiro, 2009b.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETROLEO. **Armazenamento e movimentação de produtos líquidos.** Disponível em: <https://bit.ly/2Ind9xl>. Acesso em: 26 de janeiro de 2018.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETROLEO. **Resumo semanal de preços de combustíveis.** <https://bit.ly/1e15eUO>. Disponível em: Acesso em: 15 de março de 2018b.

API STD 650. American Petroleum Institute. **Welded tanks for oilstorage.**11ª edição. 2010.

AZZUNI, E.; GUZEY, S. **Comparison of the shell design methods for cylindrical liquid storage tanks.** Engineering Structures Vol 101, 621–630 (2015).

BAIRD, C.; CANN, M. **Química Ambiental.**4ª Edição. Editora Bookman, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 03, 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. **Diário Oficial da República.** Brasília, 22 de agosto de 1990.

CARTER, W. P. L. **Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications.** California Air Resources Board Contract. 2009.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Guia de melhor tecnologia prática disponível – Plano de Redução de Emissões de Fontes Estacionárias – PREFE.** 2017.

CETIN, E; ODABASI, M; SEYFIOGLU, R. **Ambient volatile organic compound (VOC) concentrations around a petrochemical complex and a petroleum refinery.** The Science of the Total Environment.Vol.312, 103–112 (2003).

DAI, H; JING, S; WANG, HONGLI; MA, Y; LI, L; SONG, W; KAN, H. **VOC characteristics and inhalation health risks in newly renovated residences in Shanghai, China.** Science of Total Environment.Vol.577, 73-83 (2017).

EIA. U. S. Energy Information and Administration. **Glossário.** Disponível em: <https://bit.ly/2Owll0u>. Acesso em: 10 de agosto de 2018.

FARHAN, M.M; AL-JUMIALY,M.M; AL-MUHAMMADI, A.D; ISMAIL,A.S. **Development of a new method for reducing the loss of light hydrocarbons at breather valve of oil tanks.** Energy Procedia. Vol. 141, 471 – 478 (2017).

GOOGLE MAPS. Disponível em: <http://www.maps.google.com>. Acesso em: 28 de janeiro de 2018.

GUO, H; LING, Z.H; CHENG, H.R; SIMPSON, I.J; LYU, X.P; SHAO, W. M; LU, H.X; AYOKO,G; ZHANG Y.L; SAUDERS, S.M; LAM, S.H.M; WANG, J.L; BLAKE, D.R. **Tropospheric volatile organic compounds in China.** Science of the Total Environment.Vol.574 1021- 1043 (2017).

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos de Física, Volume 2.** 9ª edição. LTC, 2012

HASSIM, M.H.; HURME, M. AMYOTTE, P.R.; KHAND, F.I. **Fugitive emissions in chemical processes: The assessment and prevention based on inherent and add-on approaches.** Journal of Loss Prevention in the Process Industries 25, 820-829 (2012).

HUANG, C; WANG, H.L; LI, L; WANG, Q; LU, Q; GOUW, J.A; ZHOU, M; JING, S.A; LU, J; CHEN, C.H. **VOC species and emission inventory from vehicles and their SOA formation potentials estimation in Shanghai, China.** Atmos. Chem. Phys., Vol. 15, 11081-11096 (2015).

HUGLEN, O; VIK, R. **Reducing VOC emissions from large crude carriers.** Offshore Technology Conference. Houston, Texas, 30 April – 3 May (2001).

JAECKER-VOIROL, A. **VOC - Volatile Organic Compounds.** Pollutants from Combustion, Vol. 547, NATO Science Series, 241-261 (2000).

JAFARINEJAD, SHAHRYAR. **Petroleum waste treatment and pollution control.** 1ª Edição. Butterworth-Heinemann. 2017.

JALLAD, K.N; ESPADA-JALLAD, C. **Analysis of ambient ozone and precursor monitoring data in a densely populated residential area of Kuwait.** Journal of Saudi Chemical Society. Vol14, 363-372 (2010).

LI, J; XIE, S. D; ZENG, L.M; LI, L.Y; LI, Y.Q; WU, R.R. **Characterization of ambient volatile organic compounds and their sources in Beijing, before, during, and after Asia-Pacific Economic Cooperation China 2014.** Atmos. Chem. Phys., Vol. 15, 7945-7959 (2015).

LULLO, G. D; ZHANG, H; KUMAR A. **Evaluation of uncertainty in the well-to-tank and combustion greenhouse gas emissions of various transportations fuels.** Applied Energy, Vol. 184, 413-426 (2016).

MALAKAR, S; SAHA, P. D; BASKARAN, D; RAJAMANICKAM, R. **Comparative study of biofiltration process for treatment of VOCs emission from petroleum refinery wastewater – a review.** Environmental Technology e Innovation. Vol. 8, 441-461 (2017).

MARTINS, D. O. **Estudo do controle de emissões de compostos orgânicos voláteis em tanques de armazenamento de produtos químicos.** Dissertação de Mestrado. UFBA. Salvador, 2004.

OLIVEIRA, R. A. A. **Modelo matemático para avaliação ambiental e financeira da aplicação de dispositivos de controle de emissão em tanques de armazenamento: tetos flutuantes internos.** Dissertação de Mestrado. UFPR. Curitiba, 2015.

PARANÁ. Secretária Estadual do Meio Ambiente. Resolução nº 16, 15 de abril de 2014. Definir critérios para o controle da qualidade do ar como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem-estar da população e melhoria da qualidade de vida, com o objetivo de permitir o desenvolvimento econômico e social do Estado do Paraná de forma ambientalmente segura. **Diário Oficial do Estado do Paraná.** Curitiba, 15 de abril de 2014.

PETROBRAS. **Inventário de Emissões Petrobras 2017**. Rio de Janeiro, 2018.

PETROBRAS. **Relatório de Sustentabilidade 2016**. Rio de Janeiro, 2017.

PETROBRAS – NORMAS TÉCNICAS, N-1742. **Tanque de Teto Flutuante – Selo PW**. Rio de Janeiro, 2002.

PETROBRAS – NORMAS TÉCNICAS, N-270. **Projeto de tanques de armazenamento atmosférico**. Rio de Janeiro, 2014.

PREZOTTI, P.R; TRESMONDI, A. C. C. L. **Inventário de emissões de compostos orgânicos voláteis de uma indústria petroquímica: tanques e emissões fugitivas**. Engenharia Ambiental, Vol. 3, No. 2, p. 58-72, jul/dez 2006.

QUINTANILHA.L; **O universo das emissões atmosféricas e a atuação do setor industrial**. Revista Meio Ambiente Industrial. São Paulo, 2009.

RYOO, J; JOHNSON,M.S; IRACI,L.T; YATES,E.L; GORE, W. **Investigating sources of ozone over California using AJAX airborne measurement and models: Assessing the contribution from long-range transport**. Atmospheric Environment. Vol.155, 53-67 (2017).

SÃO PAULO. Assembléia Legislativa do Estado de São Paulo. Decreto nº 70.753, 28 de abril de 2006. Altera a redação e inclui dispositivos no Regulamento aprovado pelo Decreto nº 8,468, de 8 de setembro de 1976, disciplina a execução da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente e dá providências correlatas. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**. 29 de abril de 2006.

SÃO PAULO. Assembléia Legislativa do Estado de São Paulo. Lei nº 997, 31 de maio de 1976. Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**. 01 de junho de 1976.

SENGUPTA, A.; GUPTA, A.K.; MISHRA, I.M. **Engineering layout of fuel tanks in a tank farm**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 24, 568-574 (2011).

UNIÃO EUROPEIA. Parlamento Europeu e Conselho. Diretiva 94/63/CEE, de 20 de dezembro de 1994. Relativa ao controle das emissões de compostos orgânicos voláteis (COV) resultantes do armazenamento de gasolinas e da sua distribuição

dos terminais para as estações de serviço. **Jornal Oficial das Comunidades Europeias**. 31 de dezembro de 1994.

U.S. EPA – United States Environmental Protection Agency. **User guide to TANKS – Storage tank emission calculation software - version 4.09d**. 1999.

U.S. EPA – United States Environmental Protection Agency. **AP-42 – Compilation of air emission factor. Capítulo 7 – Liquid storage tanks**. 5ª edição, 2006.

U.S. EPA – United States Environmental Protection Agency. **Control Techniques Guidelines for Oil and Natural Gas Industry**. 2016.

U.S. EPA – United States Environmental Protection Agency. **Air Emission Factors and Quantification**. Disponível em: <https://bit.ly/2KFt7V9> 2018. Acesso em 19/05/2018.

VILLAS BOAS, F; **Apostila de Tanques de Armazenamento de Combustíveis**. Centro de desenvolvimento de recursos humanos. Rio de Janeiro, 2003.

WU, C. F; WU, T. G; HASHMONAY, R. A; CHANG, S. Y; WU, Y. S; CHAO, C. P; HSU, C. P; CHASE, M. J; KAGANN, R. H. **Measurement of volatile organic compound emission from a petrochemical tank farm using open-path Fourier transform infrared spectrometry**. Atmospheric Environment. Vol 82, 335-342 (2014).

ZHANG, Z.; CHEN, H. W. D; LI, Q; THAI, P.; GONG, D.; LI, Y; ZHANG, C; GU, Y; ZHOU, L; MORAWSKA, L; WANG, B. **Emission characteristics of volatile organic compounds and their secondary organic aerosol formation potentials from a petroleum refinery in Pearl River Delta, China**. Science of the Total Environment Vol. 585, 1162-1174 (2017).

ZINKE, R.; KOHLER, F.; KRAUSE, U. **Long term emission measurements at a floating roof tank for gasoline storage**. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* (2018), doi: 10.1016/j.jlp.2018.05.004.

## APÊNDICE 1 – DADOS DE ENTRADA UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES NO PROGRAMA TANKS

### a) Tanque de teto fixo – Dimensionamento

Parâmetro	Valor aplicado
Altura do costado (altura efetiva) (ft)	Altura máx. do líq. + 3,61 ft (1,1 m)
Diâmetro (ft)	Variável
Altura máx. do líq. (altura operacional) (ft)	Variável
Volume de trabalho (gal)	Variável <sup>1</sup>
Giros por ano	24
Taxa de transferência (gal/ano)	Variável <sup>1</sup>
Aquecimento	Não
Cor do costado	Branco
Condição do costado	Bom
Cor do teto	Branco
Condição do teto	Bom
Tipo do teto	Cônico
Altura do teto (ft)	Variável <sup>1</sup>
Inclinação do teto (ft/ft)	0,0625
Vácuo do respirador (psig)	-0,03
Pressão do respirador (psig)	0,03

<sup>1</sup>cálculo automático, sem entrada de dados do usuário do programa

FONTE: O autor, 2018.

## b) Tanque de teto fixo – Taxa de transferência

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor aplicado</b>
Altura do costado (altura efetiva) (ft)	Variável(D/H=4)
Diâmetro (ft)	Variável(D/H=4)
Altura máx. do líq. (altura operacional) (ft)	Variável(D/H=4)
Volume de trabalho (gal)	Variável <sup>1</sup>
Giros por ano	Variável
Taxa de transferência (gal/ano)	Variável <sup>1</sup>
Aquecimento	Não
Cor do costado	Branco
Condição do costado	Bom
Cor do teto	Branco
Condição do teto	Bom
Tipo do teto	Cônico
Altura do teto (ft)	Variável <sup>1</sup>
Inclinação do teto (ft/ft)	0,0625
Vácuo do respirador (psig)	-0,03
Pressão do respirador (psig)	0,03

<sup>1</sup>cálculo automático, sem entrada de dados do usuário do programa

FONTE: O autor, 2018.

## c) Tanque de teto fixo – Cor e integridade

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor aplicado</b>
Altura do costado (altura efetiva) (ft)	Variável
Diâmetro (ft)	Variável
Altura máx. do líq. (altura operacional) (ft)	Variável
Volume de trabalho (gal)	Variável <sup>1</sup>
Giros por ano	24
Taxa de transferência (gal/ano)	Variável <sup>1</sup>
Aquecimento	Não
Cor do costado	Variável
Condição do costado	Variável
Cor do teto	Variável
Condição do teto	Variável
Tipo do teto	Cônico
Altura do teto (ft)	Variável <sup>1</sup>
Inclinação do teto (ft/ft)	0,0625
Vácuo do respirador (psig)	-0,03
Pressão do respirador (psig)	0,03

<sup>1</sup>cálculo automático, sem entrada de dados do usuário do programa

FONTE: O autor, 2018.

## d) Tanque de teto flutuante externo – Dimensionamento

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor aplicado</b>
Diâmetro (ft)	Variável
Volume do tanque (gal)	Variável
Giros por ano	24
Taxa de transferência (gal/ano)	Variável <sup>1</sup>
Condições internas do costado	Ferrugem leve
Cor do costado	Branco
Condição do costado	Bom
Tipo de teto	Variável <sup>2</sup>
Categoria de acessórios de teto	Típico
Construção do tanque	Soldado
Selo primário	Mecânico
Selo secundário	Nenhum

<sup>1</sup>cálculo automático, sem entrada de dados do usuário do programa

FONTE: O autor, 2018.

## e) Tanque de teto flutuante externo – Taxa de transferência

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor aplicado</b>
Diâmetro (ft)	Variável (D/H=4)
Volume do tanque (gal)	Variável
Giros por ano	Variável
Taxa de transferência (gal/ano)	Variável <sup>1</sup>
Condições internas do costado	Ferrugem leve
Cor do costado	Branco
Condição do costado	Bom
Tipo de teto	Variável <sup>2</sup>
Categoria de acessórios de teto	Típico
Construção do tanque	Soldado
Selo primário	Mecânico
Selo secundário	Nenhum

<sup>1</sup>cálculo automático, sem entrada de dados do usuário do programa

FONTE: O autor, 2018.

## f) Tanque de teto flutuante externo – Cor e integridade

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor aplicado</b>
Diâmetro (ft)	Variável (D/H 1 e D/H 2)
Volume do tanque (gal)	Variável
Giros por ano	24
Taxa de transferência (gal/ano)	Variável <sup>1</sup>
Condições internas do costado	Ferrugem leve
Cor do costado	Variável
Condição do costado	Variável
Tipo de teto	Variável <sup>2</sup>
Categoria de acessórios de teto	Típico
Construção do tanque	Soldado
Selo primário	Mecânico
Selo secundário	Nenhum

<sup>1</sup>cálculo automático, sem entrada de dados do usuário do programa

FONTE: O autor, 2018.

## g) Tanque de teto flutuante interno – Dimensionamento

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor aplicado</b>
Diâmetro (ft)	Variável
Volume do tanque (gal)	Variável
Giros por ano	24
Taxa de transferência (gal/ano)	Variável <sup>1</sup>
Teto autosuportado?	Sim
Número de colunas	0
Diâmetro efetivo das colunas (ft)	0
Condições internas do costado	Ferrugem leve
Cor do costado	Branco
Condição do costado	Bom
Cor do teto	Branco
Condição do teto	Bom
Selo primário	Mecânico
Selo secundário	Nenhum
Tipo de deck (teto)	Soldado
Categoria de acessórios de teto	Típico

<sup>1</sup>cálculo automático, sem entrada de dados do usuário do programa

FONTE: O autor, 2018.

## h) Tanque de teto flutuante interno – Taxa de transferência

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor aplicado</b>
Diâmetro (ft)	Variável (D/H=4)
Volume do tanque (gal)	Variável
Giros por ano	Variável
Taxa de transferência (gal/ano)	Variável <sup>1</sup>
Teto autosuportado?	Sim
Número de colunas	0
Diâmetro efetivo das colunas (ft)	0
Condições internas do costado	Ferrugem leve
Cor do costado	Branco
Condição do costado	Bom
Cor do teto	Branco
Condição do teto	Bom
Selo primário	Mecânico
Selo secundário	Nenhum
Tipo de deck (teto)	Soldado
Categoria de acessórios de teto	Típico

<sup>1</sup>cálculo automático, sem entrada de dados do usuário do programa

FONTE: O autor, 2018.

## i) Tanque de teto flutuante interno – Cor e integridade

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor aplicado</b>
Diâmetro (ft)	Variável
Volume do tanque (gal)	Variável
Giros por ano	24
Taxa de transferência (gal/ano)	Variável <sup>1</sup>
Teto autosuportado?	Sim
Número de colunas	0
Diâmetro efetivo das colunas (ft)	0
Condições internas do costado	Ferrugem leve
Cor do costado	Variável
Condição do costado	Variável
Cor do teto	Variável
Condição do teto	Variável
Selo primário	Mecânico
Selo secundário	Nenhum
Tipo de deck (teto)	Soldado
Categoria de acessórios de teto	Típico

<sup>1</sup>cálculo automático, sem entrada de dados do usuário do programa

FONTE: O autor, 2018.

## APÊNDICE 2 – EXEMPLOS DE TELA DO PROGRAMA TANKS PARA INSERÇÃO DOS DADOS

a) Tanque de teto fixo

**Vertical Fixed Roof Tank**

Identification | **Physical Characteristics** | Site Selection | Tank Contents | Monthly Calculations

---

**Dimensions:**

Shell Height (ft):   
 Shell Diameter (ft):   
 Maximum Liquid Height (ft):   
 Average Liquid Height (ft):   
 Working Volume (gal):   
 Turnovers per Year:   
 Net Throughput (gal/yr):   
 Is Tank Heated?

**Roof Characteristics:**

Color/Shade:   
 Condition:   
 Type:   
 Height (ft):   
 Slope (ft/ft) (Cone Roof):

**Shell Characteristics:**

Shell Color/Shade:   
 Shell Condition:

**Breather Vent Settings:**

Vacuum Setting (psig):   
 Pressure Setting (psig):

|  |  |  |

FONTE: O autor, 2018

b) Tanque de teto flutuante externo

**External Floating Roof Tank**

Identification | Physical Characteristics | Site Selection | Tank Contents | Monthly Calculations

**Physical Characteristics**

**Tank Characteristics:**

Diameter (ft):	112
Tank Volume (gal):	21.133.760,00
Turnovers per year:	24,00
Net Throughput (gal/yr):	507.210.240,00

**Roof Characteristics:**

Roof Type:	Pontoon
Roof Fitting Category:	Typical

**Tank Construction and Rim-Seal System:**

Internal Shell Condition:	Light Rust (D)	Tank Construction:	Welded
Paint Color/Shade:	White/White (D)	Primary Seal:	Mechanical Shoe
Paint Condition:	Good (D)	Secondary Seal:	None

[View/Add Fittings](#)

Copy | Run Report | Save | Close | Help

FONTE: O autor, 2018

c) Tanque de teto flutuante interno

**Internal Floating Roof Tank**

**Physical Characteristics**

**Tank Characteristics:**

Diameter (ft):

Tank Volume (gal):

Turnovers per year:

Net Throughput (gal/yr):

Self Supporting Roof?

Number of Columns:

Effective Column Diameter:

Internal Shell Condition:

External Shell Color/Shade:

External Shell Condition:

Roof Color/Shade:

Roof Paint Condition:

**Rim Seal System:**

Primary Seal:

Secondary Seal:

**Deck Characteristics:**

Deck Type:

Deck Fitting Category:

FONTE: O autor, 2018

## d) Dados meteorológicos

**Vertical Fixed Roof Tank**

Identification | Physical Characteristics | **Site Selection** | Tank Contents | Monthly Calculations

**Nearest Major City:**

**Daily Average Ambient Temperature (F):**

**Annual Average Maximum Temperature (F):**

**Annual Average Minimum Temperature (F):**

**Average Wind Speed (mph):**

**Annual Average Solar Insulation Factor (Btu/(ft\*ft\*day)):**

**Atmospheric Pressure (psia):**

FONTE: O autor, 2018

e) Conteúdo do tanque

**Vertical Fixed Roof Tank**

Identification | Physical Characteristics | Site Selection | **Tank Contents** | Monthly Calculations

Chemical Category of Liquid: Crude Oils  
Single or Multi-Component Liquid: Single

Chemical Name: Crude oil (RVP 5)  
CAS Number:

Average Liquid Surface Temperature (F):	80,403109
Minimum Liquid Surface Temperature (F):	69,072973
Maximum Liquid Surface Temperature (F):	91,733245
Bulk Liquid Temperature (F):	73,15
Vapor Pressure (psia) at Liquid Surface Temperature:	4,2317
Liquid Molecular Weight:	207
Vapor Molecular Weight:	50

Calculate Mixture Properties  
Delete Mixture  
Next Mixture >  
< Previous Mixture  
Add Mixture  
Mixture 1 of 1

Copy Run Report Save Close Help

FONTE: O autor, 2018

## f) Cálculos mensais

**Vertical Fixed Roof Tank**

Identification  
  Physical Characteristics  
  Site Selection  
  Tank Contents  
  Monthly Calculations

	Throughput	Mixture Name	
JAN: <input checked="" type="checkbox"/>	42.272.829,90	Crude oil (RVP 5)	<b>Annual Throughput Specified</b> 507.273.958,8763  <b>Total for Months</b> 507.273.948,0  <b>Fill Mixture Names With First Mixture Name</b>  <b>Distribute Throughput</b>
FEB: <input checked="" type="checkbox"/>	42.272.829,90	Crude oil (RVP 5)	
MAR: <input checked="" type="checkbox"/>	42.272.829,90	Crude oil (RVP 5)	
APR: <input checked="" type="checkbox"/>	42.272.829,90	Crude oil (RVP 5)	
MAY: <input checked="" type="checkbox"/>	42.272.829,90	Crude oil (RVP 5)	
JUN: <input checked="" type="checkbox"/>	42.272.829,90	Crude oil (RVP 5)	
JUL: <input checked="" type="checkbox"/>	42.272.829,90	Crude oil (RVP 5)	
AUG: <input checked="" type="checkbox"/>	42.272.829,90	Crude oil (RVP 5)	
SEP: <input checked="" type="checkbox"/>	42.272.829,90	Crude oil (RVP 5)	
OCT: <input checked="" type="checkbox"/>	42.272.829,90	Crude oil (RVP 5)	
NOV: <input checked="" type="checkbox"/>	42.272.829,90	Crude oil (RVP 5)	
DEC: <input checked="" type="checkbox"/>	42.272.829,90	Crude oil (RVP 5)	

FONTE: O autor, 2018