



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Eduardo Iuorno de Barros Rodrigues da Silveira

Avaliação de métodos de estimativa de emissões de compostos orgânicos voláteis de tanques de armazenamento de petróleo e derivados e modelagem de dispersão atmosférica

Rio de Janeiro

2017

Eduardo Iuorno de Barros Rodrigues da Silveira

Avaliação de métodos de estimativa de emissões de compostos orgânicos voláteis de tanques de armazenamento de petróleo e derivados e modelagem de dispersão atmosférica

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental – Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Monteiro Martins

Coorientador: Prof. Dr. Sergio Machado Corrêa

Rio de Janeiro

2017

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S587 Silveira, Eduardo Iuorno de Barros Rodrigues da.
Avaliação de métodos de estimativa de emissões de compostos orgânicos voláteis de tanques de armazenamento de petróleo e derivados e modelagem de dispersão atmosférica / Eduardo Iuorno de Barros Rodrigues da Silveira – 2017.
152f.

Orientador: Eduardo Monteiro Martins.
Coorientador: Sergio Machado Corrêa.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Ambiental. 2. Emissões de gases poluentes - Dissertações. 3. Compostos orgânicos voláteis - Dissertações. 4. Dispersão - Modelos matemáticos - Dissertações. 5. Petróleo - Armazenamento - Dissertações. I. Martins, Eduardo Monteiro. II. Corrêa, Sergio Machado. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. IV. Título.

CDU 502.7

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Eduardo Iuorno de Barros Rodrigues da Silveira

Avaliação de métodos de estimativa de emissões de compostos orgânicos voláteis de tanques de armazenamento de petróleo e derivados e modelagem de dispersão atmosférica

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental – Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovado em 16 de maio de 2017.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Monteiro Martins
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Sergio Machado Corrêa (Coorientador)
Faculdade de Tecnologia – UERJ

Prof.^a Dra. Simone Lorena Quitério de Souza
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro

Luciana Maria Baptista Ventura, D.Sc.
Instituto Estadual do Ambiente

Prof. Dr. Glauco Favilla Bauerfeldt
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro

2017

AGRADECIMENTOS

A toda a minha família, pelo incentivo e pelo suporte em todas as etapas da minha vida.

Aos meus amigos, pelo apoio e cumplicidade nos momentos felizes e, principalmente, nos momentos difíceis.

Aos meus orientadores Eduardo e Sergio, pela compreensão e pelo estímulo ao meu desenvolvimento.

Ao João Mannarino, que na posição de gerente fez todo o possível pela aprovação deste curso de Mestrado na Petrobras.

À Luciana Loureiro e José Claudino pelo apoio e pelos ensinamentos desde o início, na definição do tema, até a modelagem de dispersão.

À Rafaela que, apesar de ausente no desfecho, foi essencial para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

SILVEIRA, E. I. B. R. *Avaliação de métodos de estimativa de emissões de compostos orgânicos voláteis de tanques de armazenamento de petróleo e derivados e modelagem de dispersão atmosférica*. 2017. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2017.

O ozônio troposférico é um dos principais problemas de qualidade do ar dos grandes centros urbanos. Para que estratégias de controle sejam efetivas, é importante o conhecimento dos percursos deste poluente secundário. Os tanques de armazenamento de hidrocarbonetos são grandes emissores de compostos orgânicos voláteis (COV) para a atmosfera. No entanto, técnicas de medição destas emissões para a alimentação de inventários podem ser muito custosas, imprecisas e nem sempre viáveis. O presente trabalho tem como objetivo realizar estimativas de emissões de compostos orgânicos voláteis em tanques de armazenamento, observando o comportamento de diferentes metodologias. Os resultados de emissões foram posteriormente inseridos em um modelo de dispersão atmosférica (AERMOD) para avaliar como a variação das emissões altera a concentração de poluentes no ar. As equações do capítulo 7 do AP 42 da Agência Ambiental Americana na base mensal se mostraram como o método mais adequado para a estimativa de emissões. Foram estimadas as emissões de seis tanques com três diferentes metodologias, de forma a permitir a análise da variabilidade dos resultados. Foi possível determinar os passos essenciais para um cálculo adequado das perdas de COVs, bem como os pontos de atenção e os dados de entrada mais significativos para cada tipo de tanque. O modelo de dispersão se mostrou sensível às emissões de cada cenário, reforçando a importância da utilização da ferramenta adequada para o cálculo de inventários de emissões e avaliações de impacto ambiental.

Palavras-chave: Tanques; Estimativa de emissões; Modelagem de dispersão atmosférica; AERMOD; TANKS.

ABSTRACT

SILVEIRA, E. I. B. R. *Evaluation of emission estimation methods of volatile organic compounds from crude oil and petroleum products tanks and atmospheric dispersion modelling*. 2017. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2017.

Tropospheric ozone is one of the major air quality problems in big cities. It is important to fully understand the precursors of this secondary pollutant so that strategy controls can be effective. Hydrocarbon storage tanks are great contributors of volatile organic compounds (VOC) to the atmosphere. Nonetheless, measurement techniques of these emissions can be expensive and are not always possible. This paper aims to estimate VOC emissions from storage tanks using different methodologies. Results were afterwards put into an atmospheric dispersion model (AERMOD) to analyze how emission variations alter pollutant concentrations in the air. Literature research showed that monthly calculations using EPA's AP 42 chapter 7 equations are the most adequate method for storage tanks emission estimation. In order to evaluate the variability of the results, emissions of six tanks were calculated using three different methods. It was possible to determine footprints for adequate calculation of VOC losses, as well as points of attention and the most significant input data for each type of tank. The air dispersion model proved to be sensible to the emission of each scenario, reinforcing the importance for using the right tool for both emission inventories calculation and environmental impact assessments.

Keywords: Storage tanks; Emission estimation; Atmospheric dispersion modelling; AERMOD; TANKS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tanque elevado instalado em estrutura acima do nível do solo.....	24
Figura 2 – Tanque de superfície com base apoiada no nível do solo	24
Figura 3 – Tanque com eixo vertical com base apoiada sobre a superfície	25
Figura 4 – Tanque horizontal construído no nível do solo	25
Figura 5 – Tanque de teto fixo com cobertura em formato cônico	26
Figura 6 – Tanque de teto flutuante externo com cobertura do tipo pontão.....	27
Figura 7 – Tanque de teto flutuante externo com cobertura do tipo deque duplo.....	28
Figura 8 – Esquema de um tanque de teto fixo com selo flutuante interno	29
Figura 9 – Tanque de teto flutuante externo com cobertura geodésica	30
Figura 10 – Boca de visita presente em deques de coberturas flutuantes.....	31
Figura 11 – Boia para a medição de nível em tanques com cobertura flutuante.....	32
Figura 12 – Ponto localizado no teto para tomada de amostra do líquido armazenado	32
Figura 13 – Exemplo de vent de selo do aro do tipo sapata mecânica	33
Figura 14 – Dreno para escoamento de água no deque	34
Figura 15 – Exemplo de perna ajustável do deque.....	35
Figura 16 – Guia não-perfurada que evita movimentos rotacionais da cobertura.....	35
Figura 17 – Guias perfuradas, além de evitarem movimentos rotacionais podem ser utilizadas para a tomada de amostras.....	36
Figura 18 – Exemplo de válvula de quebra de vácuo em um tanque	37
Figura 19 – Coluna de sustentação do teto fixo em tanques de selo flutuante interno.....	37
Figura 20 – Escada para acesso ao interior do tanque.....	38
Figura 21 – Tipos de sistema de selagem de aro (continua).....	40
Figura 22 – Sensibilidade dos diferentes métodos de estimativa de emissões.....	52
Figura 23 – Localização dos seis tanques propostos (dentro da área em azul) e locais de coleta dos dados meteorológicos utilizados (pontos verde e amarelo)	76
Figura 24 – Domínio definido para a realização da modelagem de dispersão atmosférica	79
Figura 25 – Plumões de dispersão da concentração máxima horária	134
Figura 26 – Plumões de dispersão da concentração média anual.....	137

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Relação entre temperatura ambiente e as emissões de trabalho do tanque 1 em meses com movimentação de 120 mil barris por dia	86
Gráfico 2 – Relação entre temperatura ambiente e as emissões de trabalho do tanque 1 em meses com movimentação de 150 mil barris por dia	86
Gráfico 3 – Relação entre a temperatura média mensal e as emissões pelo selo do aro do tanque 3	91
Gráfico 4 – Relação entre a velocidade média do vento e emissões pelo selo do aro do tanque 3	91
Gráfico 5 – Relação entre a temperatura média mensal e as emissões pelos acessórios do tanque 3	93
Gráfico 6 – Relação entre a velocidade do vento e as emissões pelos acessórios do tanque 3	93
Gráfico 7 – Correlação entre as temperaturas médias mensais e as emissões pelo selo do aro do tanque 4.....	97
Gráfico 8 – Correlação entre as temperaturas médias mensais e as emissões pelo selo do aro do tanque 5.....	100
Gráfico 9 – Correlação entre as velocidades médias do vento e as emissões pelo selo do aro do tanque 5.....	101
Gráfico 10 – Correlação entre as temperaturas médias mensais e as emissões pelos acessórios do tanque 5	103
Gráfico 11 – Correlação entre as velocidades médias do vento e as emissões pelos acessórios do tanque 5	103
Gráfico 12 – Correlação entre as temperaturas médias mensais e as emissões pelo selo do aro do tanque 6	105
Gráfico 13 – Comparação das emissões estacionárias mensais do tanque 1 no cenário-base equações e cenário-base TANKS.....	108
Gráfico 14 – Comparação das emissões de trabalho mensais do tanque 1 no cenário-base equações e cenário-base TANKS.....	109
Gráfico 15 – Comparação das emissões mensais pelo selo do aro do tanque 3 nos cenários-base equações e TANKS	112
Gráfico 16 – Comparação das emissões mensais pelos acessórios do tanque 3 nos cenários-base equações e TANKS	113

Gráfico 17 – Comparação das emissões mensais pelo selo do aro do tanque 4 nas simulações com as equações e com o TANKS	115
Gráfico 18 – Comparação das emissões mensais pelos acessórios do tanque 4 nas simulações com as equações e com o TANKS	116
Gráfico 19 – Variação mensal das emissões pelo selo do aro do tanque 5 em dois métodos de cálculo	118
Gráfico 20 – Comparação entre as temperaturas da massa do líquido do tanque 5 em dois cenários de estimativa diferentes	118
Gráfico 21 – Comparação entre as emissões mensais pelos acessórios do tanque 5 em dois cenários de estimativa	119
Gráfico 22 – Comparação entre as emissões mensais pelo selo do aro do tanque 6 simuladas com as equações e com o TANKS	120
Gráfico 23 – Comparação entre as emissões mensais pelos acessórios do tanque 6 simuladas com as equações e com o TANKS	121
Gráfico 24 – Comparação entre as curvas de pressão de vapor do diesel e do <i>Distillate Fuel Oil No 2</i>	124
Gráfico 25 – Comparação entre as curvas de pressão de vapor do óleo combustível e do <i>Residual Oil No. 6</i>	125
Gráfico 26 – Emissões do tanque 3 por componente com diferentes métodos de estimativa	127
Gráfico 27 – Curvas de pressão de vapor do petróleo e do <i>Crude Oil RVP 5</i>	127
Gráfico 28 – Emissões do tanque 4 por componente com diferentes métodos de estimativa	129
Gráfico 29 – Curvas de pressão de vapor da gasolina e da <i>Gasoline RVP 10</i>	130
Gráfico 30 – Emissões do tanque 5 por componente com diferentes métodos de estimativa	131
Gráfico 31 – Emissões do tanque 6 por componente com diferentes métodos de estimativa	132
Gráfico 32 – Diferenças entre emissões mensais e anuais no cenário-base equações	142
Gráfico 33 – Diferenças entre emissões mensais e anuais no cenário-base TANKS	142
Gráfico 34 – Diferenças entre emissões mensais e anuais no cenário TANKS padrão	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número típico de pernas em tanques de teto flutuante externo.....	45
Tabela 2 – Número típico de válvulas de quebra de vácuo e drenos de deque em tanques de cobertura flutuante	46
Tabela 3 – Número típico de colunas por intervalo de diâmetro do tanque.....	47
Tabela 4 – Cálculo da temperatura do líquido em função da cor do tanque	59
Tabela 5 – Fatores de emissão de COVs por produto movimentado para tanques de armazenamento quando não há detalhamento dos dados de entrada	62
Tabela 6 – Dados dos produtos necessários ao cálculo de emissões de COVs.....	73
Tabela 7 – Movimentação mensal de produtos nos tanques	74
Tabela 8 – Dados meteorológicos compilados para uso nos modelos de simulação das emissões	76
Tabela 9 – Características físicas dos tanques de armazenamento.....	77
Tabela 10 – Detalhes construtivos de tanques de cobertura flutuante.....	77
Tabela 11 – Detalhes dos acessórios dos tanques de teto fixo com selo flutuante interno	77
Tabela 12 – Detalhes dos acessórios dos tanques de teto flutuante externo.....	78
Tabela 13 – Coordenadas dos tanques.....	80
Tabela 14 – Emissões do tanque 1 na simulação do cenário-base equações.....	83
Tabela 15 – Emissões de trabalho no tanque 1 de meses com movimentação de 120 mil barris por dia.....	85
Tabela 16 – Emissões de trabalho no tanque 1 de meses com movimentação de 150 mil barris por dia.....	85
Tabela 17 – Emissões do tanque 2 na simulação do cenário-base equações.....	87
Tabela 18 – Emissões do tanque 3 na simulação do cenário-base equações.....	89
Tabela 19 – Comparação dos valores mensais de temperatura média e velocidade do vento com as emissões pelo selo do aro do tanque 3	90
Tabela 20 – Comparação dos valores mensais de temperatura média e velocidade do vento com as emissões pelos acessórios do tanque 3.....	94
Tabela 21 – Detalhamento das perdas por tipo de acessório.....	94
Tabela 22 – Emissões do tanque 4 na simulação do cenário-base equações.....	95
Tabela 23 – Comparação entre as temperaturas médias mensais e as emissões pelo selo do aro do tanque 4	96

Tabela 24 – Detalhamento das perdas por tipo de acessório.....	98
Tabela 25 – Emissões do tanque 5 na simulação do cenário-base equações.....	99
Tabela 26 – Comparação dos valores mensais de temperatura média e velocidade do vento com as emissões pelo selo do aro do tanque 5	100
Tabela 27 – Comparação dos valores mensais de temperatura média e velocidade do vento com as emissões pelos acessórios do tanque 5	102
Tabela 28 – Emissões do tanque 6 na simulação do cenário-base equações.....	104
Tabela 29 – Comparação entre as temperaturas médias mensais e as emissões pelo selo do aro do tanque 6.....	104
Tabela 30 – Emissões do tanque 1 na simulação do cenário-base TANKS	107
Tabela 31 – Emissões do tanque 2 na simulação do cenário-base TANKS	110
Tabela 32 – Emissões do tanque 3 na simulação do cenário-base TANKS	111
Tabela 33 – Emissões do tanque 4 na simulação do cenário-base TANKS	114
Tabela 34 – Emissões do tanque 5 na simulação do cenário-base TANKS	117
Tabela 35 – Emissões do tanque 6 na simulação do cenário-base TANKS	120
Tabela 36 – Dados dos produtos-padrão do TANKS considerados para simulações	122
Tabela 37 – Resultados de emissões do tanque 1 utilizando o produto-padrão do TANKS..	123
Tabela 38 – Resultados de emissões do tanque 2 utilizando o produto-padrão do TANKS..	125
Tabela 39 – Resultados de emissões do tanque 3 utilizando o produto-padrão do TANKS..	126
Tabela 40 – Resultados de emissões do tanque 4 utilizando o produto-padrão do TANKS..	128
Tabela 41 – Resultados de emissões do tanque 5 utilizando o produto-padrão do TANKS..	130
Tabela 42 – Resultados de emissões do tanque 6 utilizando o produto-padrão do TANKS..	132
Tabela 43 – Taxas de emissão em gramas por segundo para alimentação do modelo de dispersão	133
Tabela 44 – Data, hora e as maiores concentrações ambientais de cada cenário	135
Tabela 45 – Variação percentual entre a taxa de emissão e maiores concentrações do cenário de referência e dos demais cenários	136
Tabela 46 – Variação percentual entre a taxa de emissão e maiores concentrações do cenário de referência e dos demais cenários	138
Tabela 47 – Resumo das emissões em cada cenário – tanque 1	139
Tabela 48 – Resumo das emissões em cada cenário – tanque 2.....	139
Tabela 49 – Resumo das emissões em cada cenário – tanque 3.....	140
Tabela 50 – Resumo das emissões em cada cenário – tanque 4.....	140
Tabela 51 – Resumo das emissões em cada cenário – tanque 5.....	140

Tabela 52 – Resumo das emissões em cada cenário – tanque 6.....	141
Tabela 53 – Variações dos resultados das simulações em comparação com o cenário de referência.....	143

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Emissão
A	Fator de atividade
FE	Fator de emissão
ER	Eficiência de remoção
L _S	Emissões estacionárias
L _W	Emissões de trabalho
L _T	Emissões totais
V _V	Volume do espaço de vapor
W _V	Densidade do vapor
K _E	Fator de expansão do espaço-vapor
K _S	Fator de saturação do vapor ventado
D	Diâmetro do tanque
H _{VO}	Altura equivalente do espaço-vapor
°R	Grau Rankine
Btu	<i>British thermal unit</i>
psia	<i>Pounds per square inch absolute</i>
psig	<i>Pounds per square inch gauge</i>
ΔT _V	Varição diária de temperatura do vapor
T _{AX}	Temperatura ambiente máxima diária
T _{AN}	Temperatura ambiente mínima diária
α	Absorbância solar da cor do tanque
I	Insolação diária solar total em uma superfície horizontal
ΔT _V	Varição diária de temperatura do vapor
ΔP _V	Varição diária de pressão de vapor
ΔP _B	Varição do ajuste pressão das válvulas
P _A	Pressão atmosférica
P _{VA}	Pressão de vapor na temperatura média diária da superfície do líquido armazenado
T _{LA}	Temperatura média diária da superfície do líquido
H _S	Altura do costado do tanque
H _L	Altura do líquido
H _{RO}	Altura equivalente do teto

M_V	Peso molecular da fase vapor
R	Constante dos gases ideais
T_{AA}	Temperatura média diária
Q	Movimentação anual de produto
K_N	Fator de <i>turnover</i> para perdas de trabalho
N	Número de <i>turnovers</i>
K_P	Fator do produto para perdas de trabalho
L_R	Perdas pelo selo do aro
L_{WD}	Perdas de movimentação
L_F	Perdas pelos acessórios
L_D	Perdas pelo teto
K_{Ra}	Fator de perda do selo para a velocidade do vento zero
K_{Rb}	Fator de perda do selo dependente do vento
mph	Milhas por hora
v	Velocidade média do vento
n	Expoente da velocidade do vento ligada ao tipo de selo
K_C	Fator do produto
P^*	Função de pressão de vapor
C_S	Fator de aderência do costado
bb1	Barris por dia
W_L	Massa específica do líquido orgânico
N_C	Número de colunas de suporte de teto fixo
F_C	Diâmetro efetivo da coluna
F_F	Fator resultante de perdas por acessórios
N_{Fi}	Número de acessórios de um determinado tipo
K_{Fi}	Fator de perdas para cada acessório
N_f	Número total de tipos de acessórios diferentes
K_{Fa_i}	Fator de perda na condição de calmaria de cada acessório
K_{Fb_i}	Fator de perda dependente da velocidade do vento de cada acessório
m_i	Fator de perda para um determinado acessório
K_V	Fator de correção da velocidade do vento no acessório
K_D	Fator de perdas nas juntas por unidade de comprimento
S_D	Fator de comprimento das juntas do deque

L_{seam}	Comprimento total das juntas
A_{deck}	Área do deque
lb	Libra
lb-mol	Libra-mol
gal	Galão
$^{\circ}\text{F}$	Grau Fahrenheit
MJ	Megajoule
W	Watt
hPa	Hectopascal
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celcius
m	Metro
s	Segundo
μg	Microgramas
R\$	Reais

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	19
1.	OBJETIVO	22
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Tanques de armazenamento	23
2.1.1	<u>Tipos de tanques</u>	23
2.1.1.1	Tanques de teto fixo.....	26
2.1.1.2	Tanques de teto flutuante externo.....	27
2.1.1.3	Tanques de teto fixo com selo flutuante interno.....	28
2.1.1.4	Tanque de teto flutuante com cobertura geodésica.....	29
2.1.2	<u>Elementos e acessórios dos tanques</u>	30
2.1.2.1	Boca de visita (<i>Access hatch</i>).....	31
2.1.2.2	Nível de boia (<i>Gauge-float well</i>).....	31
2.1.2.3	Ponto de amostragem (<i>Gauge-hatch/sample ports</i>).....	31
2.1.2.4	Vents de aro (<i>Rim vents</i>).....	32
2.1.2.5	Drenos de deque (<i>Stub drain</i>).....	33
2.1.2.6	Pernas do deque (<i>Deck legs</i>).....	34
2.1.2.7	Guias não-perfuradas (<i>Unslotted guidepoles</i>).....	34
2.1.2.8	Guias perfuradas (<i>Slotted guidepoles</i>).....	35
2.1.2.9	Válvulas de quebra de vácuo (<i>Vacuum breaker</i>).....	36
2.1.2.10	Colunas (<i>Columns</i>).....	36
2.1.2.11	Escadas de acesso (<i>Ladder wells</i>).....	38
2.1.2.12	Drenos e juntas (<i>Stub drains e deck seams</i>).....	38
2.1.2.13	Selos.....	38
2.1.3	<u>Emissões de COVs</u>	41
2.1.3.1	Emissões em tanques de teto fixo.....	42
2.1.3.2	Emissões em tanques de cobertura flutuante.....	42
2.1.3.2.1	Bocas de visita (<i>Access hatches</i>).....	43
2.1.3.2.2	Nível de boia (<i>Gauge-float well</i>).....	44
2.1.3.2.3	Ponto de amostragem (<i>Gauge-hatch/sample ports</i>).....	44
2.1.3.2.4	Vent do aro (<i>Rim vents</i>).....	44
2.1.3.2.5	Pernas do deque (<i>Deck legs</i>).....	44
2.1.3.2.6	Guias perfuradas e não-perfuradas (<i>Slotted e unslotted guidepoles</i>).....	44

2.1.3.2.7	Válvulas de quebra de vácuo e drenos de deque (<i>Vacuum breakers e stub drains</i>)	46
2.1.3.2.8	Colunas (<i>Columns</i>)	46
2.1.3.2.9	Escadas de acesso (<i>Ladder wells</i>).....	46
2.1.3.2.10	Drenos do selo flutuante interno (<i>Stub drains</i>)	47
2.2	Quantificação de COVs em tanques de armazenamento	47
2.2.1	<u>Medição direta</u>	48
2.2.2	<u>Medição indireta</u>	48
2.2.3	<u>Estimativa de emissões</u>	50
2.2.3.1	Estimativa de emissões segundo o AP 42.....	53
2.2.3.1.1	Tanques de teto fixo.....	54
2.2.3.1.2	Tanques com cobertura flutuante.....	58
2.2.3.2	Estimativas de emissões com o TANKS 4.09D	61
2.2.3.3	Estimativa de emissões por fatores de emissão	62
2.2.4	<u>Análise das ferramentas de estimativa de emissões em comparação com os métodos de monitoramento</u>	62
2.3	Inventários de emissões	65
2.3.1	<u>Tipos de inventário</u>	67
2.3.2	<u>Emissões a serem inventariadas</u>	67
2.4	Modelagem de dispersão atmosférica	68
2.4.1	<u>Dispersão atmosférica</u>	68
2.4.2	<u>Modelos de dispersão</u>	68
2.4.3	<u>O AERMOD</u>	69
3.	METODOLOGIA	71
3.1	Uso do AP 42 para estimativa de emissões de COVs em tanques de armazenamento	71
3.2	Desenho do experimento	71
3.2.1	<u>Caracterização dos dados de entrada das estimativas</u>	73
3.2.1.1	Produto armazenado	73
3.2.1.2	Movimentação	74
3.2.1.3	Dados meteorológicos	74
3.2.1.4	Características físicas dos tanques.....	77
3.2.2	<u>Caracterização dos dados de entrada da modelagem de dispersão</u>	79
3.2.2.1	Domínio da modelagem.....	79
3.2.2.2	Fontes de emissão	80
3.2.2.3	Dados meteorológicos	82

4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
4.1	Simulação das emissões do cenário-base equações	83
4.1.1	<u>Resultados do tanque 1</u>	83
4.1.1.1	Emissões estacionárias.....	83
4.1.1.2	Emissões de trabalho	84
4.1.1.3	Emissões totais.....	87
4.1.2	<u>Resultados do tanque 2</u>	87
4.1.2.1	Emissões estacionárias.....	88
4.1.2.2	Emissões de trabalho	88
4.1.2.3	Emissões totais.....	89
4.1.3	<u>Resultados do tanque 3</u>	89
4.1.3.1	Emissões pelo selo do aro.....	89
4.1.3.2	Emissões de movimentação.....	92
4.1.3.3	Emissões pelos acessórios	92
4.1.4	<u>Resultados do tanque 4</u>	95
4.1.4.1	Emissões pelo selo do aro.....	96
4.1.4.2	Emissões de movimentação.....	97
4.1.4.3	Emissões pelos acessórios	98
4.1.5	<u>Resultados do tanque 5</u>	99
4.1.5.1	Emissões pelo selo do aro.....	99
4.1.5.2	Emissões de movimentação.....	101
4.1.5.3	Emissões pelos acessórios	101
4.1.6	<u>Resultados do tanque 6</u>	103
4.1.6.1	Emissões pelo selo do aro.....	104
4.1.6.2	Emissões de movimentação.....	105
4.1.6.3	Emissões pelos acessórios	105
4.2	Simulação das emissões do cenário-base TANKS	106
4.2.1	<u>Resultados do tanque 1</u>	106
4.2.1.1	Emissões estacionárias.....	107
4.2.1.2	Emissões de trabalho	108
4.2.1.3	Emissões totais.....	109
4.2.2	<u>Resultados do tanque 2</u>	109
4.2.2.1	Emissões estacionárias.....	110
4.2.2.2	Emissões de trabalho	110
4.2.2.3	Emissões totais.....	110

4.2.3	<u>Resultados do tanque 3</u>	111
4.2.3.1	Emissões pelo selo do aro.....	111
4.2.3.2	Emissões de movimentação.....	113
4.2.3.3	Emissões pelos acessórios	113
4.2.4	<u>Resultados do tanque 4</u>	114
4.2.4.1	Emissões pelo selo do aro.....	114
4.2.4.2	Emissões de movimentação.....	115
4.2.4.3	Emissões pelos acessórios	116
4.2.5	<u>Resultados do tanque 5</u>	116
4.2.5.1	Emissões pelo selo do aro.....	117
4.2.5.2	Emissões de movimentação.....	118
4.2.5.3	Emissões pelos acessórios	119
4.2.6	<u>Resultados do tanque 6</u>	119
4.2.6.1	Emissões pelo selo do aro.....	120
4.2.6.2	Emissões de movimentação.....	121
4.2.6.3	Emissões pelos acessórios	121
4.3	Simulação das emissões do cenário TANKS padrão	121
4.3.1	<u>Resultados do tanque 1</u>	123
4.3.2	<u>Resultados do tanque 2</u>	124
4.3.3	<u>Resultados do tanque 3</u>	126
4.3.4	<u>Resultados do tanque 4</u>	128
4.3.5	<u>Resultados do tanque 5</u>	129
4.3.6	<u>Resultados do tanque 6</u>	131
4.4	Modelagem de dispersão	133
4.4.1	<u>Resultado das concentrações máximas horárias</u>	133
4.4.2	<u>Resultados das concentrações anuais</u>	137
4.5	Discussão	139
4.5.1	<u>Varição entre as estimativas nas bases mensal e anual</u>	141
4.5.2	<u>Varição entre as ferramentas de estimativa</u>	143
4.5.3	<u>Sensibilidade da variação dos dados de entrada nos resultados</u>	144
4.5.4	<u>Modelagem de dispersão atmosférica</u>	146
	CONCLUSÃO	147
	REFERÊNCIAS	149

INTRODUÇÃO

A partir da Revolução Industrial, com o aumento da utilização dos recursos naturais e da produção de energia, os impactos do ser humano sobre o meio ambiente tornaram-se mais intensos. A poluição atmosférica logo ficou evidente com os episódios de *smog* industrial na Inglaterra a partir do século XVIII. No entanto, foi o grande *smog* de 1952 que gerou diversas mortes e que mais chamou a atenção para o assunto, tendo como consequência a criação do “*Clean Air Act*”, para a melhoria da qualidade do ar (MET OFFICE, 2015). Mesmo após grande avanço científico e desenvolvimento de novas tecnologias, a qualidade do ar continua sendo um problema nos grandes centros urbanos (WHO, 2014). Isto se deve tanto às atividades industriais quanto aos veículos automotores.

Os poluentes atmosféricos são bastante diversos. Eles podem ser gasosos, sólidos ou pequenas gotículas que, junto com as partículas sólidas são denominadas de material particulado. Os poluentes podem ainda ser primários, emitidos diretamente por alguma fonte, ou secundários, quando se formam na atmosfera por processos físico-químicos. Além disso, a escala de seus impactos depende de seus tempos de vida na atmosfera e sua toxicidade. Os principais poluentes atmosféricos que causam impactos na qualidade do ar¹ são o material particulado (MP) de diferentes tamanhos, os óxidos de nitrogênio (NO_x), o dióxido de enxofre (SO₂) e o ozônio (O₃) troposférico (WHO, 2006).

O ozônio troposférico é um poluente secundário formado a partir da reação entre os compostos orgânicos voláteis (COVs) e NO_x na atmosfera na presença de luz solar. O fenômeno de formação é denominado *smog* fotoquímico (BAIRD; CANN, 2011). A Resolução CONAMA 03/90 estabelece como padrão de qualidade do ar para este poluente o valor de 160 µg m⁻³ na média de uma hora.

O Instituto Energia e Meio Ambiente (IEMA) compilou dados de vários anos de monitoramento da qualidade do ar no Brasil. O monitoramento realizado pelas agências ambientais estaduais apresenta valores superiores ao limite nacional para ozônio na maior parte das estações de Belo Horizonte, da região metropolitana do Rio de Janeiro, do interior do Estado de São Paulo, em todas as estações da região metropolitana de São Paulo, da Baixada Santista, Campinas, Vale do Paraíba e Litoral Norte (SP) (IEMA, 2014).

A química relacionada à formação do ozônio é complexa e outros oxidantes fotoquímicos também são formados na reação, que depende significativamente das

¹ Além de alteração da qualidade do ar, poluentes atmosféricos também têm como impactos a mudança do clima e a depleção da camada de ozônio.

concentrações de COV e NO_x na atmosfera (BAIRD; CANN, 2011). Sendo assim, o estudo destes precursores é fundamental para uma gestão adequada deste poluente.

COV é uma nomenclatura utilizada para caracterizar um grupo de substâncias. No Brasil, a definição de COV é dado pela Resolução CONAMA 382/06 como “compostos orgânicos que possuem ponto ebulição até 130 °C à pressão atmosférica e podem contribuir na formação dos oxidantes fotoquímicos” (CONAMA, 2006). Nos Estados Unidos a definição de COV (VOC na sigla em inglês) está na legislação: “Compostos Orgânicos Voláteis são qualquer composto de carbono, exceto monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido carbônico, carbetos ou carbonatos metálicos e carbonato de amônio, que participa de reações fotoquímicas na atmosfera”² (EUA, [S.d.], tradução nossa). Após esta definição há uma lista de compostos orgânicos que foram definidos como tendo reatividade fotoquímica negligenciável. A lista inclui a maior parte dos clorofluorcarbonos. Os dois compostos orgânicos mais importantes que não são classificados como COVs são o metano e o etano. A União Europeia, através da Directiva 2004/42/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, define de forma mais genérica que composto orgânico volátil é um composto orgânico cujo ponto de ebulição inicial, à pressão normal de 101,3 kPa, seja inferior ou igual a 250 °C (UNIÃO EUROPEIA, 2004).

Apesar das diferentes denominações é consenso que os COVs são poluentes atmosféricos relevantes, não só por sua reatividade fotoquímica e formação de ozônio troposférico (BAIRD; CANN, 2011), mas também pelo risco que representam à saúde. Alguns COVs, como o benzeno, comprovadamente causam câncer em humanos, como concluído pela Agência de Substâncias Tóxicas e Registro de Doenças dos Estados Unidos (*Agency for Toxic Substances and Disease Registry – ATSDR*, na sigla em inglês) (2007). Além disso, diversos COVs fazem parte da lista de 187 poluentes atmosféricos tóxicos elaborada pela Agência Ambiental Americana (U.S.EPA, na sigla em inglês).

Os COVs não são rotineiramente avaliados em estações de monitoramento da qualidade do ar por não haver padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 03/90 ou diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS). Normalmente são monitoradas espécies químicas mais específicas como BTEX³, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) ou hidrocarbonetos totais (HCT) (SANTANA et al., 2012). Ainda assim, quantificar suas emissões e entender os

² O texto em língua estrangeira é: “Volatile organic compounds (VOC) means any compound of carbon, excluding carbon monoxide, carbon dioxide, carbonic acid, metallic carbides or carbonates, and ammonium carbonate, which participates in atmospheric photochemical reactions”

³ Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos.

seus impactos na qualidade do ar são ferramentas essenciais para uma gestão ambiental adequada.

No Brasil, o Compromisso pela Qualidade do Ar e Saúde Ambiental, estabelecido em 2009 entre os Ministérios do Meio Ambiente (MMA), das Cidades (MC) e da Saúde (MS), admite que não há nenhuma iniciativa nacional para a regulamentação das emissões de COVs e estabelece a importância da quantificação a partir da elaboração e manutenção de inventário de fontes industriais e veiculares contendo a quantidade, localização e natureza dos COVs no país (MMA, 2009).

A indústria do petróleo é uma grande contribuinte na emissão de compostos orgânicos voláteis para a atmosfera. A definição de COVs inclui diversos hidrocarbonetos e estes fazem parte tanto da matéria-prima quanto dos derivados gerados pelo processo de refino. Em uma refinaria de petróleo os produtos são armazenados dentro de tanques e a grande movimentação associada às condições meteorológicas tem potencial para gerar emissões significativas. Chambers et al. (2008) afirmam que um monitoramento apontou o parque de tancagem como o responsável por 50% das emissões de hidrocarbonetos em uma refinaria.

A quantificação das emissões de COVs em tanques de armazenamento é complexa pois é dependente das características do tanque, da movimentação de produto e de fatores meteorológicos. A medição direta e contínua de tanques de armazenamento é difícil e tem elevados custos associados, além de só ser possível na prática para tanques de teto fixo (CONCAWE, 1995). Sendo assim é preciso utilizar ferramentas alternativas para elaborar um inventário destas emissões.

Os inventários de emissões são dados de entrada fundamentais para os estudos de dispersão atmosférica. Tais estudos são importantes para avaliação da qualidade do ar e podem prever impactos decorrentes da implantação de novas fontes de emissões antes de efetivamente ocorrerem. Estes dados também são essenciais nos processos de licenciamento ambiental.

1. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar as diferenças entre os métodos de estimativa de emissões de COVs em tanques de armazenamento de hidrocarbonetos. São objetivos específicos:

- a) Identificar como são geradas as emissões em cada tipo de tanque de armazenamento;
- b) Identificar os métodos disponíveis para a estimativa das emissões de tanques;
- c) Avaliar a significância de cada parcela (dados de entrada) no cálculo das emissões;
- d) Comparar os resultados de emissões obtidos a partir da aplicação dos diferentes métodos de estimativa;
- e) Avaliar como emissões obtidas a partir dos diferentes métodos de estimativa se comportam com a aplicação de um modelo de dispersão gaussiano (AERMOD).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tanques de armazenamento

Para a compreensão de como são geradas e estimadas as emissões atmosféricas é essencial conhecer os diferentes tipos de tanques de armazenamento. Os tanques de armazenamento são compostos por elementos básicos como o costado e o teto. O costado é a parede, ou a estrutura externa do tanque (ABNT, 2013). O teto é a cobertura superior que caracteriza o tipo do tanque. Cada tanque tem um tipo de teto que engloba diversos elementos e acessórios, por onde ocorrem as emissões. Variações nos tipos de teto, elementos e acessórios, promovem significativas alterações na quantidade de emissões geradas.

2.1.1 Tipos de tanques

Segundo a ABNT NBR 17505-1:2013 (Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis – Parte 1: Disposições gerais), tanques de armazenamento são vasos com capacidade líquida superior a 230 L, destinados à instalação fixa e não utilizados no processamento. Tanques de armazenamento de líquidos orgânicos são metálicos e podem ser aquecidos ou não, a depender da viscosidade de seu conteúdo. O dimensionamento de tanques de armazenamento pode ser realizado segundo a norma API STD 650:2007 ou a ABNT NBR 7821:1983. Tanques normalmente são cilíndricos e podem ser classificados de diferentes formas.

Por tipo de apoio:

- a) Tanque elevado (Figura 1): instalado acima do nível do solo, apoiado em uma estrutura e com espaço livre sob esta.
- b) Tanque de superfície (Figura 2): base totalmente apoiada acima da superfície, na superfície ou abaixo da superfície sem aterro
- c) Tanque subterrâneo: tanque horizontal construído e instalado para operar abaixo do nível do solo e totalmente enterrado.

Figura 1 – Tanque elevado instalado em estrutura acima do nível do solo



Fonte: BENEDITO, 2013

Figura 2 – Tanque de superfície com base apoiada no nível do solo



Fonte: PEYNEAU, 2016

Pelo formato (Figura 3 – Tanque com eixo vertical, Figura 4 – Tanque horizontal):

- a) Tanque vertical: com eixo vertical, instalado com sua base totalmente apoiada sobre a superfície do solo.
- b) Tanque horizontal: com eixo horizontal que pode ser construído e instalado para operar acima do nível, no nível ou abaixo do nível do solo

Figura 3 – Tanque com eixo vertical com base apoiada sobre a superfície



Fonte: SOUZA, 2013

Figura 4 – Tanque horizontal construído no nível do solo



Fonte: PETROBRAS, 2007

Pela pressão interna:

- a) Tanque atmosférico: projetado para operar com pressão manométrica de até 6,9 kPa, medida no topo do tanque.
- b) Tanque de baixa pressão: projetado para operar com pressão interna superior a 6,9 kPa, mas não superior a 103,4 kPa, medida no topo do tanque.
- c) Vasos de pressão: reservatório ou outro componente que opera com pressão manométrica interna superior a 103,4 kPa.

Quanto ao teto, a norma API STD 650:2007 complementa a ABNT NBR 17505-1:2013 ao considerar tipologias adicionais para tanques atmosféricos de superfície cilíndricos verticais que armazenam líquidos orgânicos. São eles:

- a) Tanque de teto fixo: tanque vertical com teto fixo metálico, com possibilidade de formação de espaço vapor⁴;

⁴ Espaço vapor é o espaço localizado entre a superfície do líquido e a cobertura do tanque. Este espaço tende a ficar saturado com o vapor do líquido armazenado.

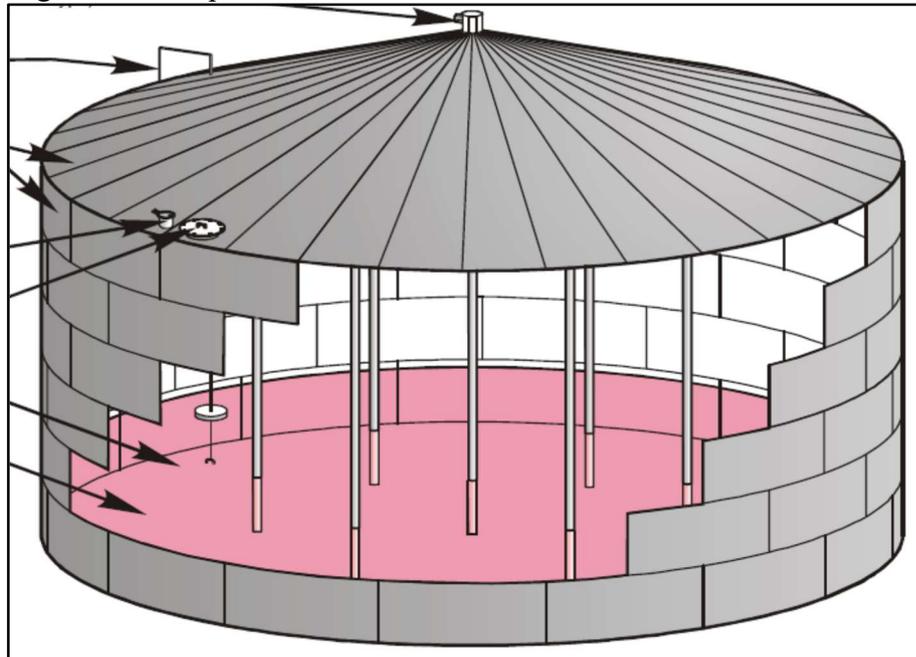
- b) Tanque de teto fixo com selo flutuante (ABNT NBR 17505-1:2013): tanque vertical com teto fixo metálico que dispõe em seu interior de um selo flutuante metálico suportado por dispositivos herméticos de flutuação metálicos;
- c) Tanque com teto flutuante (ABNT NBR 17505-1:2013): tanque vertical projetado para operar à pressão atmosférica, cujo teto flutua sobre a superfície do líquido.
- d) Tanque de teto flutuante com cobertura geodésica (API STD 650:2007): tanque de teto flutuante com um domo treliçado de alumínio estruturalmente suportado pelo costado.

2.1.1.1 Tanques de teto fixo

Tanques classificados como de teto fixo (Figura 5) contam com uma cobertura metálica permanente que pode ser cônica, em domo ou reta. Nestes tanques as perdas evaporativas ocorrem por variações na temperatura, pressão e nível do líquido armazenado (U.S.EPA, 2006b).

A parte superior destes tanques pode ter comunicação direta com a atmosfera, entretanto, normalmente contam com válvulas de alívio de pressão e vácuo, o que evita a emissão de vapores decorrentes de pequenas variações de temperatura, pressão e nível (U.S.EPA, 2006b).

Figura 5 – Tanque de teto fixo com cobertura em formato cônico



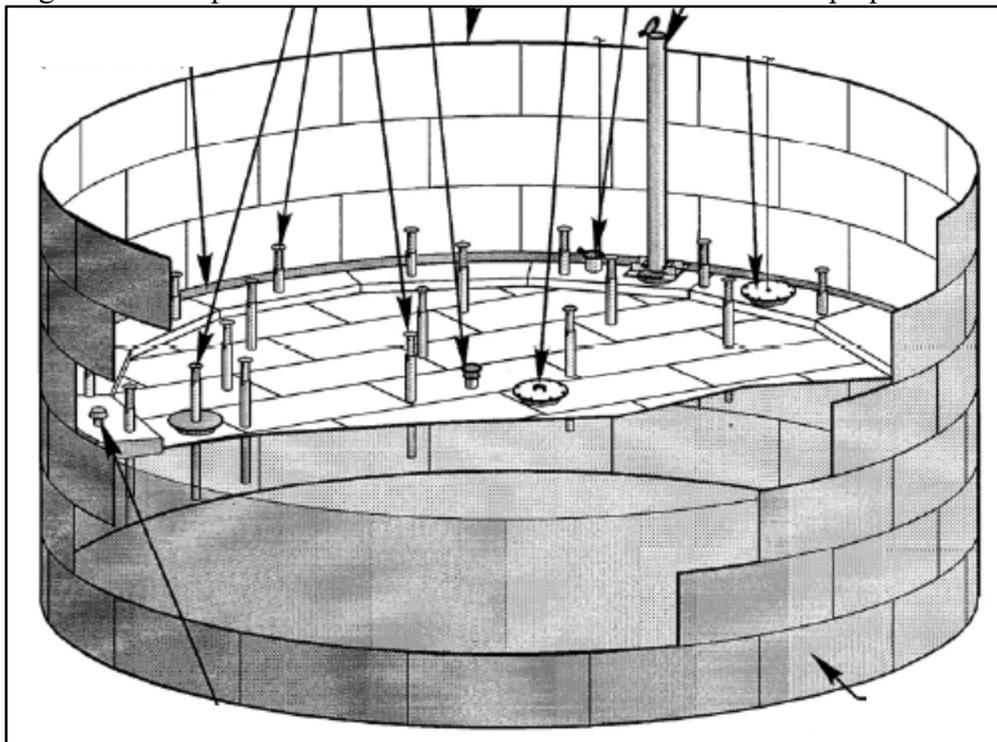
Fonte: U.S.EPA, 2006b

2.1.1.2 Tanques de teto flutuante externo

O tanque de teto flutuante externo é aberto no topo e, ao invés de preso à lateral (costado), o teto flutua sobre e se movimentava em conjunto com a superfície do líquido. O teto é composto por um deque, acessórios e selo. O deque é a estrutura da cobertura e pode ser de dois tipos: pontão ou deque duplo. O selo tem como função promover o contato entre o teto e o costado de forma a reduzir as emissões evaporativas do produto armazenado. Os diversos acessórios no deque servem à operação e manutenção do tanque (U.S.EPA, 2006b).

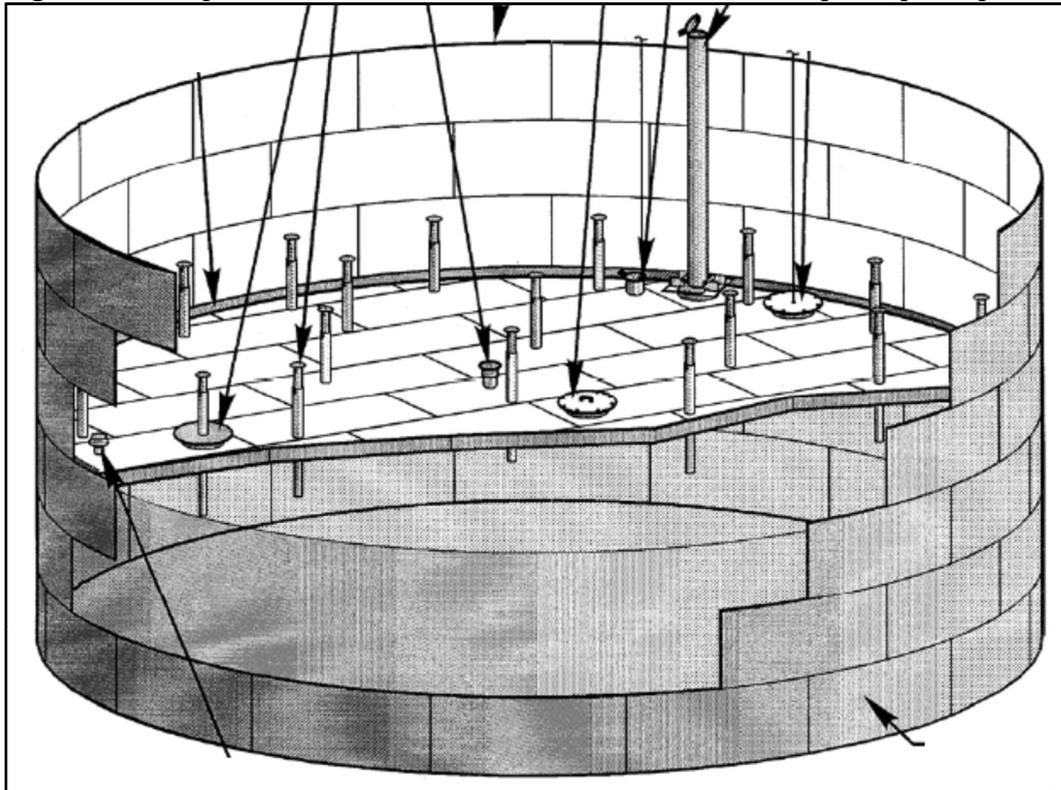
A Figura 6 – Tanque de teto flutuante externo com cobertura do tipo pontão apresenta um esquema de um tanque de teto flutuante externo com deque do tipo pontão e a Figura 7 – Tanque de teto flutuante externo com cobertura do tipo deque duplo apresenta um tanque com deque duplo.

Figura 6 – Tanque de teto flutuante externo com cobertura do tipo pontão



Fonte: U.S.EPA, 2006b

Figura 7 – Tanque de teto flutuante externo com cobertura do tipo deque duplo



Fonte: U.S.EPA, 2006b

2.1.1.3 Tanques de teto fixo com selo flutuante interno

Alguns tanques podem ter tanto um teto fixo como um selo flutuante interno (Figura 8). O teto fixo pode ser suportado por colunas verticais ou ser autoportante. Tanques de teto fixo que foram adaptados normalmente são do primeiro tipo, enquanto que tanques de teto flutuante externo convertidos para selo flutuante interno geralmente têm coberturas autoportantes (U.S.EPA, 2006b).

A cobertura interna, denominada deque, se eleva e desce de acordo com o nível do líquido armazenado e pode flutuar diretamente sobre ele (deque de contato) ou se apoiar sobre pontões (estruturas de flutuação) alguns centímetros acima da superfície do líquido (deque sem contato).

Deques de contato podem ser:

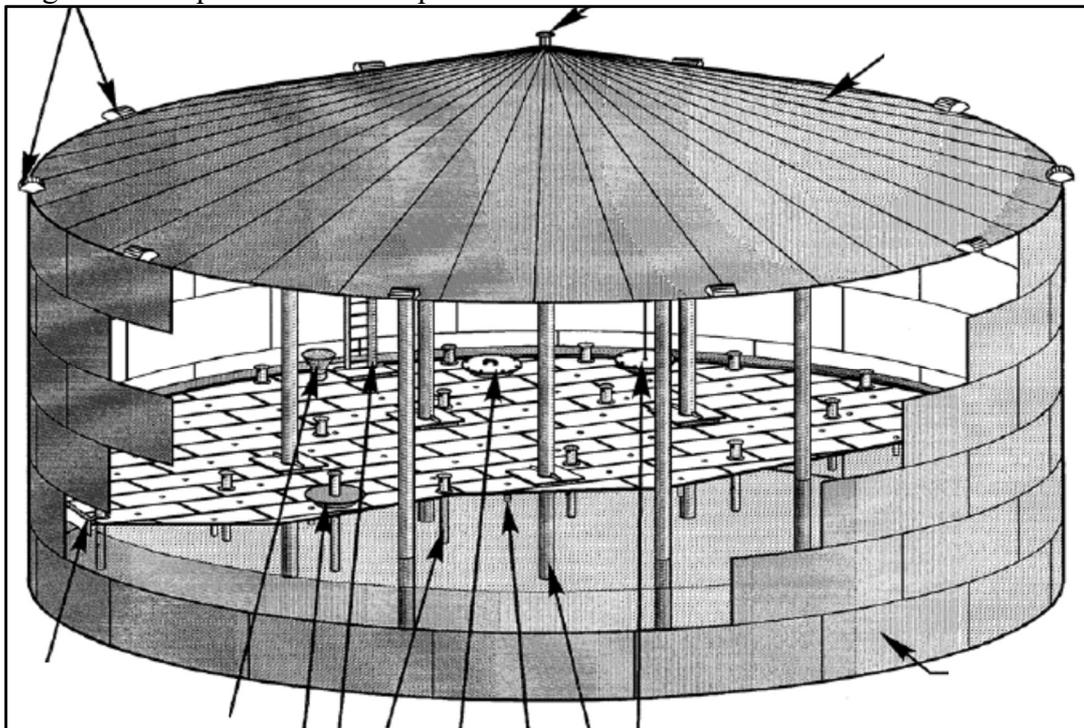
- a) Painéis de alumínio rebitados com um recheio de alumínio, flutuando sobre o líquido;
- b) Deques de aço flutuando em contato com o líquido com ou sem pontões;
- c) Painéis flutuantes de poliéster reforçado com fibra de vidro cobertos por resina.

Deques sem contato geralmente são construídos em alumínio com uma moldura do mesmo material suportada acima da superfície do líquido por pontões tubulares de alumínio ou outra estrutura flutuante. Deques sem contato normalmente são rebitados (U.S.EPA, 2006b).

Deques com e sem contato contam com selos e acessórios com as mesmas funções do teto flutuante externo. A instalação de uma cobertura flutuante minimiza as perdas por evaporação. Tais perdas tem como forma de escape os acessórios do teto, costuras do deque não soldadas e o espaço entre o deque e o costado do tanque (U.S.EPA, 2006b).

Esta tipologia de tanque tem uma troca livre de vapores com a atmosfera no teto fixo (sem válvulas de alívio de pressão ou vapor), a fim de evitar o acúmulo em concentrações próximas ao limite de inflamabilidade (U.S.EPA, 2006b).

Figura 8 – Esquema de um tanque de teto fixo com selo flutuante interno



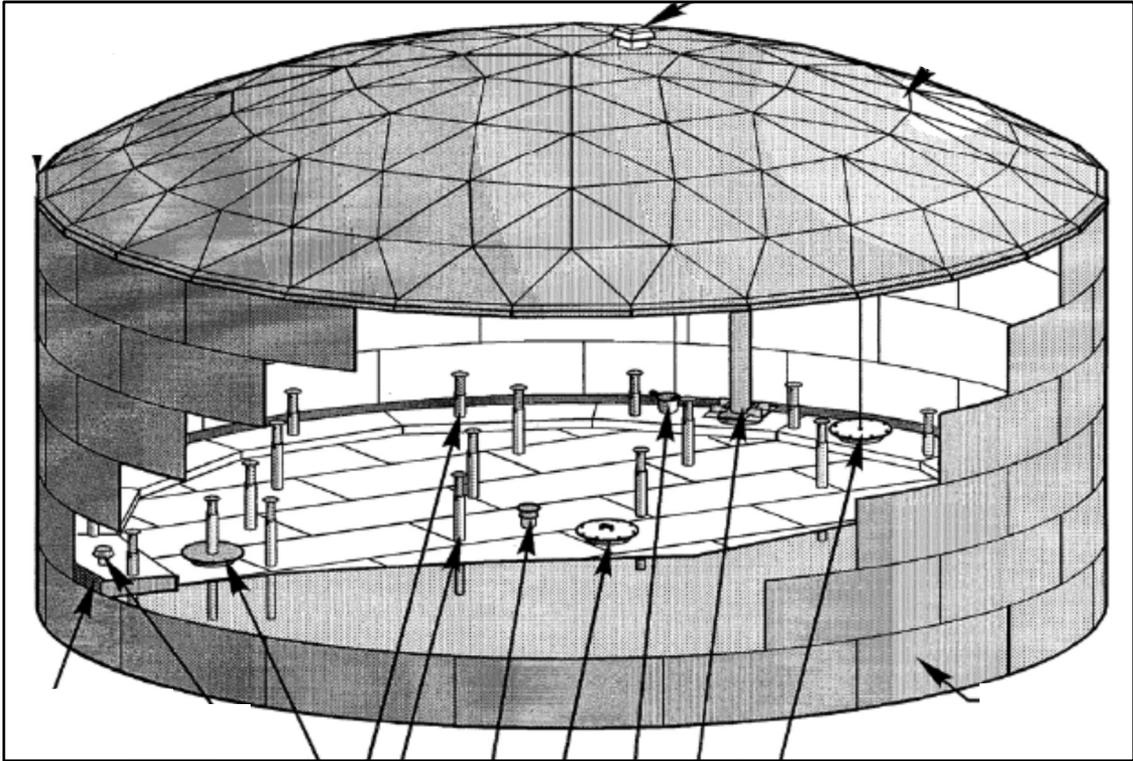
Fonte: U.S.EPA, 2006b

2.1.1.4 Tanque de teto flutuante com cobertura geodésica

Tanques de teto flutuante externo podem ter uma cobertura geodésica ao invés de um teto fixo (Figura 9). A cobertura tem formato de domo composto por triângulos de alumínio, como uma treliça. Essa cobertura tem como objetivo principal evitar que águas pluviais entrem em contato com o produto armazenado, porém, atua também como uma barreira para o vento, reduzindo a emissão de emissões evaporativas. Assim como ocorre com os tanques de teto

fixo com selo flutuante interno, esta tipologia tem uma troca livre de vapores com a atmosfera, sem válvulas de alívio de pressão ou vapor (U.S.EPA, 2006b).

Figura 9 – Tanque de teto flutuante externo com cobertura geodésica



Fonte: U.S.EPA, 2006b

2.1.2 Elementos e acessórios dos tanques

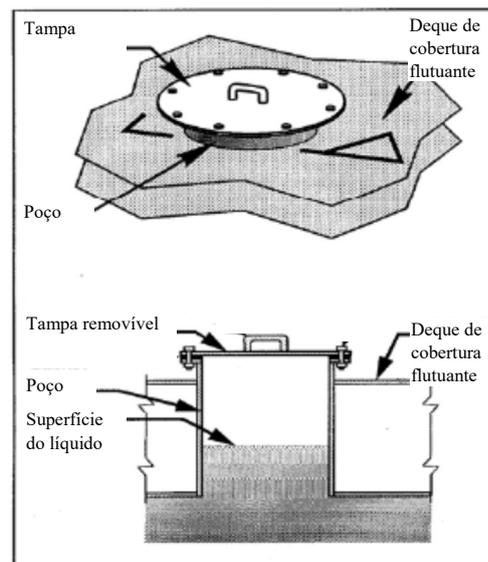
Tanques de superfície atmosféricos cilíndricos verticais têm como elementos básicos o costado e o teto. O costado é a estrutura lateral, ou parede, externa do tanque. Conforme visto no item anterior o teto diferencia o tipo do tanque.

Tanques com algum tipo de cobertura flutuante contam com um conjunto de acessórios além de selo entre esta cobertura e o costado. Outros itens também podem estar presentes nos tanques de armazenamento.

2.1.2.1 Boca de visita (*Access hatch*)⁵

Uma boca de visita é uma abertura no deque, como um poço, que permite a passagem de trabalhadores e material para a construção ou manutenção (Figura 10). A tampa pode ser aparafusada ou vedada com gaxeta (U.S.EPA, 2006b).

Figura 10 – Boca de visita presente em deques de coberturas flutuantes



Fonte: Adaptado de U.S.EPA, 2006b

2.1.2.2 Nível de boia (*Gauge-float well*)

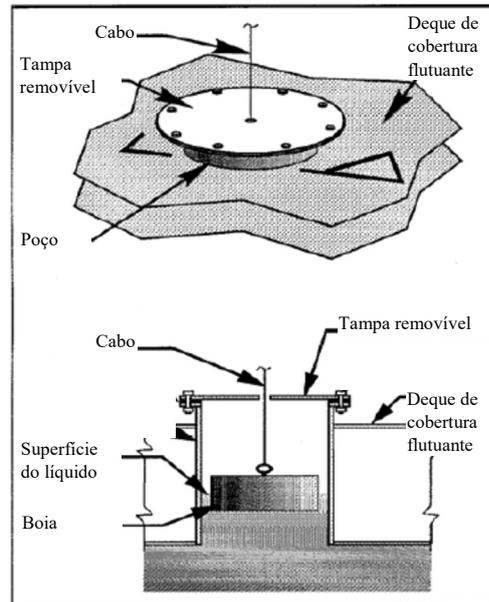
Uma boia é utilizada para indicar o nível do líquido em um tanque (Figura 11). A boia flutua sobre a superfície do líquido e fica localizada em um poço fechado com uma tampa, a qual pode ser aparafusada e/ou vedada com gaxeta (U.S.EPA, 2006b).

2.1.2.3 Ponto de amostragem (*Gauge-hatch/sample ports*)

Um ponto de amostragem é composto por um tubo com fechamento automático com uma tampa vedada com gaxeta (Figura 12). Ele permite que, de forma manual, seja feita a medição de nível, ou seja, tomada amostra do líquido armazenado. O ponto de amostragem normalmente é localizado abaixo da plataforma de amostragem, que fica no topo do costado do tanque (U.S.EPA, 2006b).

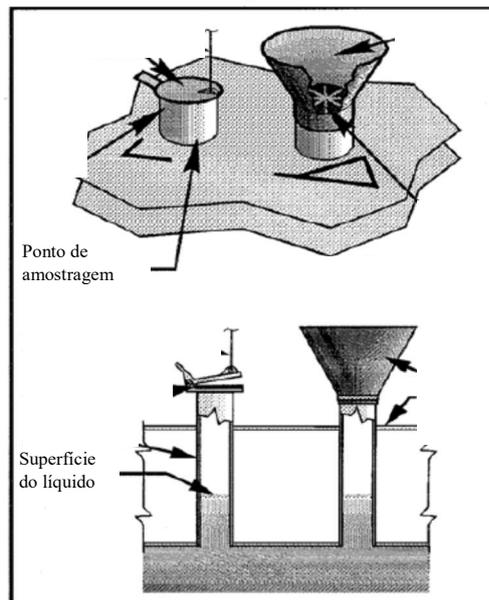
⁵ Os termos originais que indicam os acessórios dos tanques são em inglês. A tradução foi do autor e em algumas menções aos termos foi optado por manter a indicação do nome original para facilitar a identificação por parte do leitor.

Figura 11 – Boia para a medição de nível em tanques com cobertura flutuante



Fonte: Adaptado de U.S.EPA, 2006b

Figura 12 – Ponto localizado no teto para tomada de amostra do líquido armazenado



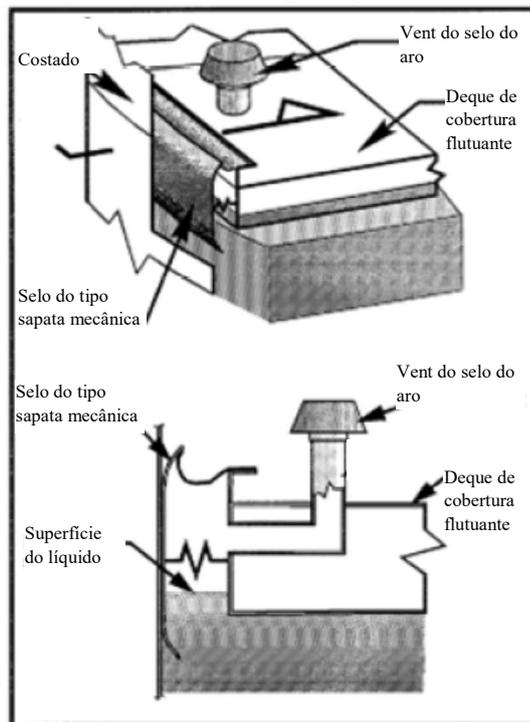
Fonte: Adaptado de U.S.EPA, 2006b

2.1.2.4 Vents de aro (*Rim vents*)

Vents de aro estão presentes em tanques equipados com um selo que cria um bolsão de vapor no espaço entre o selo e aro, como o selo de sapata mecânica. A Figura 13 apresenta um vent em aro. O vent é utilizado para evitar a criação de pressão ou vácuo no espaço vapor

formado entre a sapata do selo primário e o aro do teto flutuante e entre o tecido do selo primário e a superfície do líquido. Vents de aro normalmente consistem de uma lingueta sobre uma tampa vedada e estão presentes somente em tanques com selo primário do tipo sapata mecânica (U.S.EPA, 2006b).

Figura 13 – Exemplo de vent de selo do aro do tipo sapata mecânica

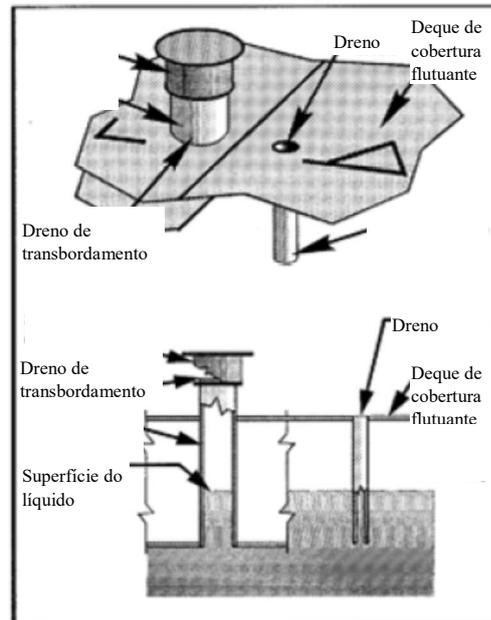


Fonte: Adaptado de U.S.EPA, 2006b

2.1.2.5 Drenos de deque (*Stub drain*)

Como o nome indica, o dreno visa escoar a água de chuva acumulada sobre a superfície do deque flutuante (Figura 14). Os drenos podem ser abertos ou fechados. Drenos abertos podem ser do tipo descarga ou transbordo. Ambos consistem em um tubo que se estende para abaixo do deque, permitindo o escoamento da água pluvial para o líquido armazenado. Os de transbordo se situam acima do nível do deque e limitam a quantidade de água acumulada, promovendo drenagem emergencial em caso de necessidade. Drenos fechados conduzem a água por um duto flexível através do líquido, porém, sem entrar em contato com ele (U.S.EPA, 2006b).

Figura 14 – Dreno para escoamento de água no deque



Fonte: Adaptado de U.S.EPA, 2006b

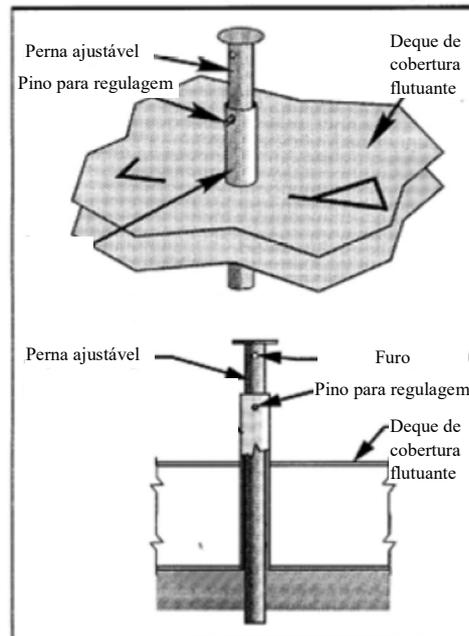
2.1.2.6 Pernas do deque (*Deck legs*)

As pernas servem para evitar danos aos acessórios da parte inferior do deque quando o teto assenta para limpeza ou reparos (Figura 15). Assim, é mantida uma distância definida até o assoalho do tanque. As pernas podem ser fixas ou ajustáveis e presas ao deque flutuante ou na forma suspensa a partir do teto fixo. Pernas ajustáveis ou suspensas contém elementos que passam por dentro do deque. A altura pode ser regulada através de um conjunto de furos e pinos (U.S.EPA, 2006b).

2.1.2.7 Guias não-perfuradas (*Unslotted guidepoles*)

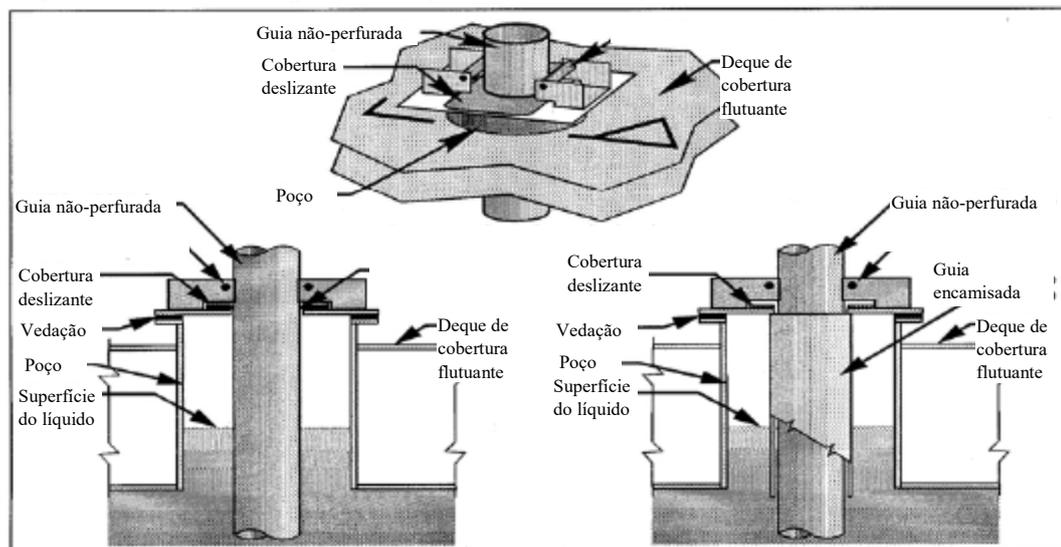
Uma guia não-perfurada (Figura 16) é um componente antirrotacional fixado no topo e no assoalho do tanque que passa por uma abertura no teto flutuante. A guia evita movimentos do teto que possam danificar os acessórios e selos. Seu espaço interno oco pode ser utilizado para medição, mas é possível que haja diferenças de pressão, nível e composição entre o líquido presente dentro e fora da guia (U.S.EPA, 2006b).

Figura 15 – Exemplo de perna ajustável do deque



Fonte: Adaptado de U.S.EPA, 2006b

Figura 16 – Guia não-perfurada que evita movimentos rotacionais da cobertura

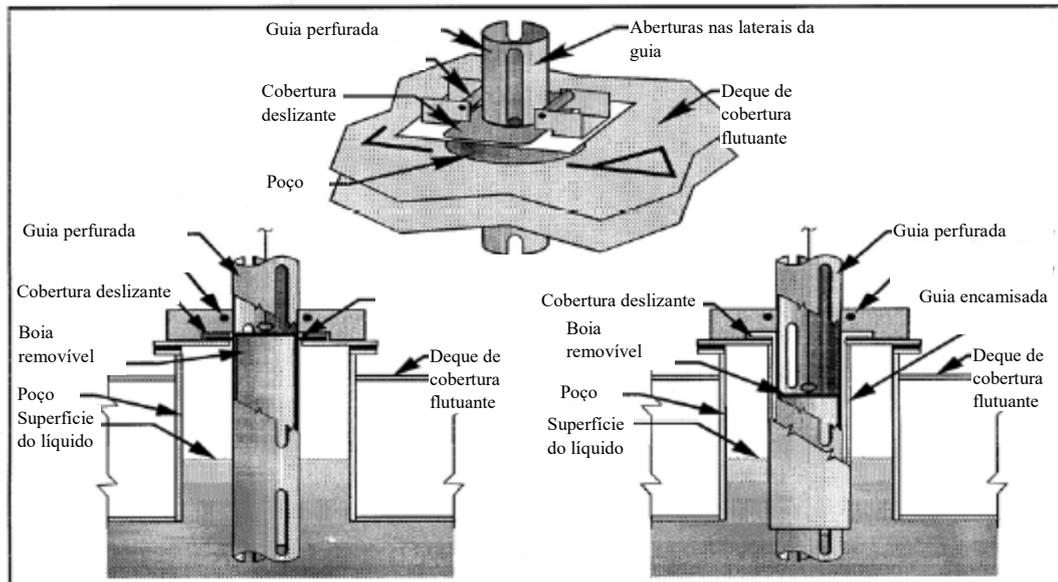


Fonte: Adaptado de U.S.EPA, 2006b

2.1.2.8 Guias perfuradas (*Slotted guidepoles*)

Algumas guias podem ter aberturas laterais, permitindo a entrada do líquido armazenado. Assim é garantido que este tenha a mesma composição e nível do produto no tanque. Amostras mais representativas podem ser tomadas de tais guias em comparação com as que não são perfuradas (Figura 17) (U.S.EPA, 2006b).

Figura 17 – Guias perfuradas, além de evitarem movimentos rotacionais podem ser utilizadas para a tomada de amostras



Fonte: Adaptado de U.S.EPA, 2006b

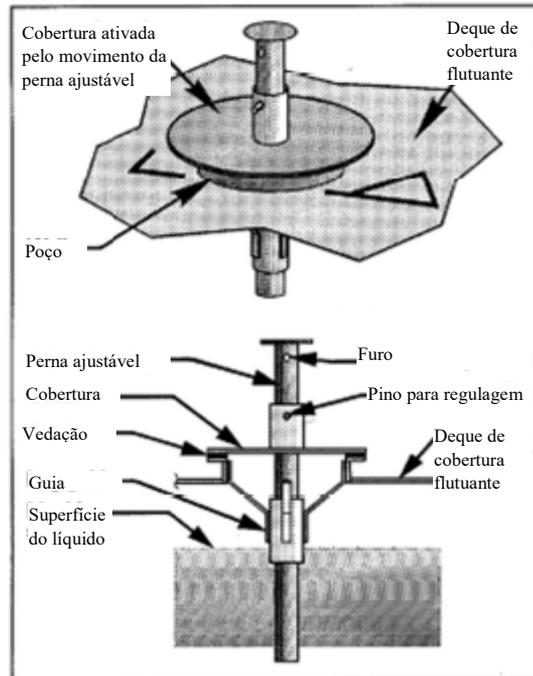
2.1.2.9 Válvulas de quebra de vácuo (*Vacuum breaker*)

Válvulas de quebra de vácuo (Figura 18) equalizam a pressão no espaço vapor abaixo do deque quando este está sendo assentado ou erguido de suas pernas. A válvula consiste em um buraco com uma cobertura, a qual em sua parte inferior tem uma perna que toca o fundo à medida que o teto se aproxima. A cobertura se eleva em relação ao buraco e o abre quando o teto está assentado. Ao se levantar válvula se fecha. O fechamento da válvula pode contar ou não com vedação (U.S.EPA, 2006b).

2.1.2.10 Colunas (*Columns*)

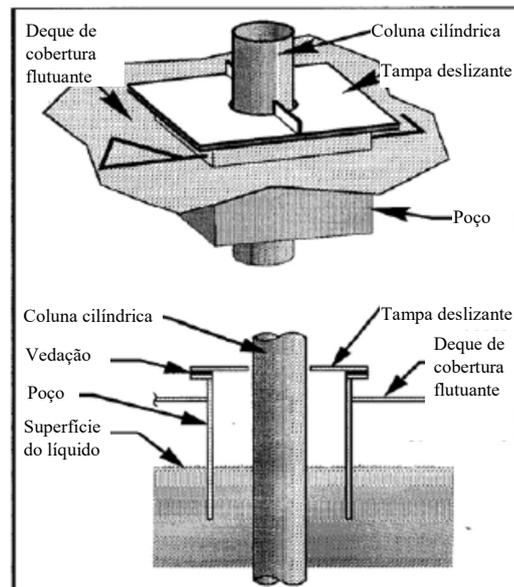
Caso não seja autoportante, a estrutura do teto fixo deve ser suportada por colunas na parte interna do tanque. Estas colunas passam pelo selo flutuante interno e são similares às guias de tetos flutuantes externos. As colunas podem ter seção transversal circular ou irregular. A quantidade de colunas pode variar de uma até dezenas de acordo com o diâmetro do tanque. As colunas (Figura 19) passam pelo deque por aberturas que podem ser cerradas por diferentes aparatos como tampas deslizantes ou mangas de tecido (U.S.EPA, 2006b).

Figura 18 – Exemplo de válvula de quebra de vácuo em um tanque



Fonte: Adaptado de U.S.EPA, 2006b

Figura 19 – Coluna de sustentação do teto fixo em tanques de selo flutuante interno

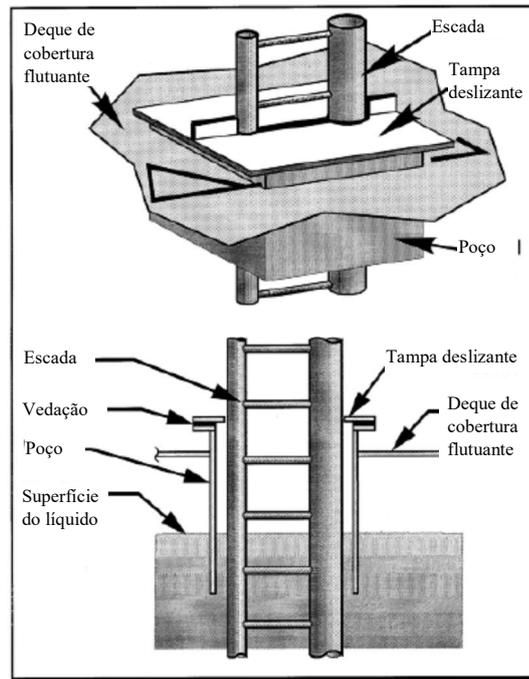


Fonte: Adaptado de U.S.EPA, 2006b

2.1.2.11 Escadas de acesso (*Ladder wells*)

Alguns tanques de selo flutuante interno podem ser equipados com escadas para inspeção e entrada de pessoas, que se estendem desde um poço de visita no teto fixo até o assoalho. A abertura do deque para a passagem da escada é similar à das colunas (Figura 20).

Figura 20 – Escada para acesso ao interior do tanque



Fonte: Adaptado de U.S.EPA, 2006b

2.1.2.12 Drenos e juntas (*Stub drains e deck seams*)

As juntas em um selo flutuante interno podem não ser estanques caso sejam rebitadas e não soldadas, promovendo perda por evaporação. Além disso, é possível a passagem de produto ainda na fase líquida por elas, sendo necessária a utilização de drenos para que quaisquer produtos que possam estar na superfície do deque possam retornar à parte interna.

2.1.2.13 Selos

Tetos e selos flutuantes internos contam com um sistema de selagem do aro⁶ (*rim seal system*) que auxilia a cobertura a flutuar de acordo com o nível do líquido armazenado. Os selos

⁶ As nomenclaturas originais dos acessórios dos tanques são em inglês e a tradução livre pode gerar situações de entendimento ambíguo. Para evitar confusões, sempre que for citada a cobertura do tanque será utilizada a expressão “selo flutuante interno” e o sistema de selagem de aro será denominado apenas “selo”.

da tancagem auxiliam também no preenchimento do espaço entre o perímetro da cobertura e o costado. O sistema de selagem pode consistir de um selo primário somente ou este em conjunto com um secundário, localizado acima do primário.

O selo primário atua mantendo o vapor acima do líquido no espaço entre a cobertura e o costado. Três tipos são mais utilizados em tanques de teto flutuante:

- a) Sapata mecânica (metálico)
- b) Selo resiliente de espuma
- c) Selo flexível de contato

Em coberturas flutuantes externas o selo primário pode ser protegido por uma barreira contra variáveis meteorológicas, prolongando sua vida útil. Tanques com selo flutuante interno normalmente contém um dos selos flexíveis (de contato ou de espuma).

Um selo mecânico utiliza uma banda metálica como um contato deslizante com o costado, como apresentado na Figura 21 (a). Esta banda é formada por diversas folhas unidas, formando uma sapata com cerca de 10 centímetros e posicionadas contra o costado por um dispositivo mecânico. Ao passar pela parede do tanque o selo pode se contrair ou expandir levemente, seguindo irregularidades. A parte inferior da sapata se estende para dentro do líquido de forma a confinar o vapor. O espaço vapor é limitado lateralmente pelo deque e pela sapata, na parte inferior pela superfície do líquido e na parte superior por um tecido revestido para isolá-lo da atmosfera. O tecido do selo primário geralmente é fixado nas partes superiores da sapata e do deque, mas pode ser preso mais próximo da superfície do líquido para reduzir o espaço vapor. Como apresentado anteriormente, vents de aro podem ser utilizados para aliviar pressões ou vácuo neste tipo de selagem.

Um selo resiliente de espuma pode se apoiar diretamente sobre a superfície do líquido, como mostrado na Figura 21 (b), eliminando o espaço vapor (apoiado sobre o líquido), ou se localizar acima do espaço vapor (apoiado sobre o vapor), como apresentado na Figura 21 (c). O material resiliente mantém o contato com o costado do tanque mesmo com a variação do espaço ao longo do movimento da cobertura. Este selo consiste em um núcleo de espuma revestido por um tecido. Para o controle das emissões é fundamental garantir uma boa junção entre o deque e o selo e que este último tenha um bom contato com o costado.

Selos flexíveis de contato são constituídos de lâminas de material flexível presas ao perímetro do deque e que raspam o costado do tanque e são do tipo “apoiado sobre o vapor” (Figura 21 (d)). Para garantia da redução de emissões é importante que a junção da lâmina com o deque seja estanque e que haja um bom contato com a parede. As lâminas podem ser de

material simples, como borracha, ou de espuma recoberta com tecido e sua elasticidade garante certa pressão contra o costado, mantendo o contato.

Um selo secundário pode fornecer mais mecanismos para o controle de emissões. Selos secundários podem ser do tipo resiliente de espuma ou flexíveis de contato. Em tetos flutuantes externos selos secundários podem ser apoiados sobre a sapata ou sobre o deque. Os selos apoiados sobre o deque são mais efetivos por recobrirem todo o espaço anular entre a cobertura e o costado. O uso de um selo secundário pode, em alguns casos, limitar a altura que alcança a cobertura, de forma a não interferir com elementos estruturais ou perder o contato com o costado (U.S.EPA, 2006b).

Figura 21 – Tipos de sistema de selagem de aro (continua)

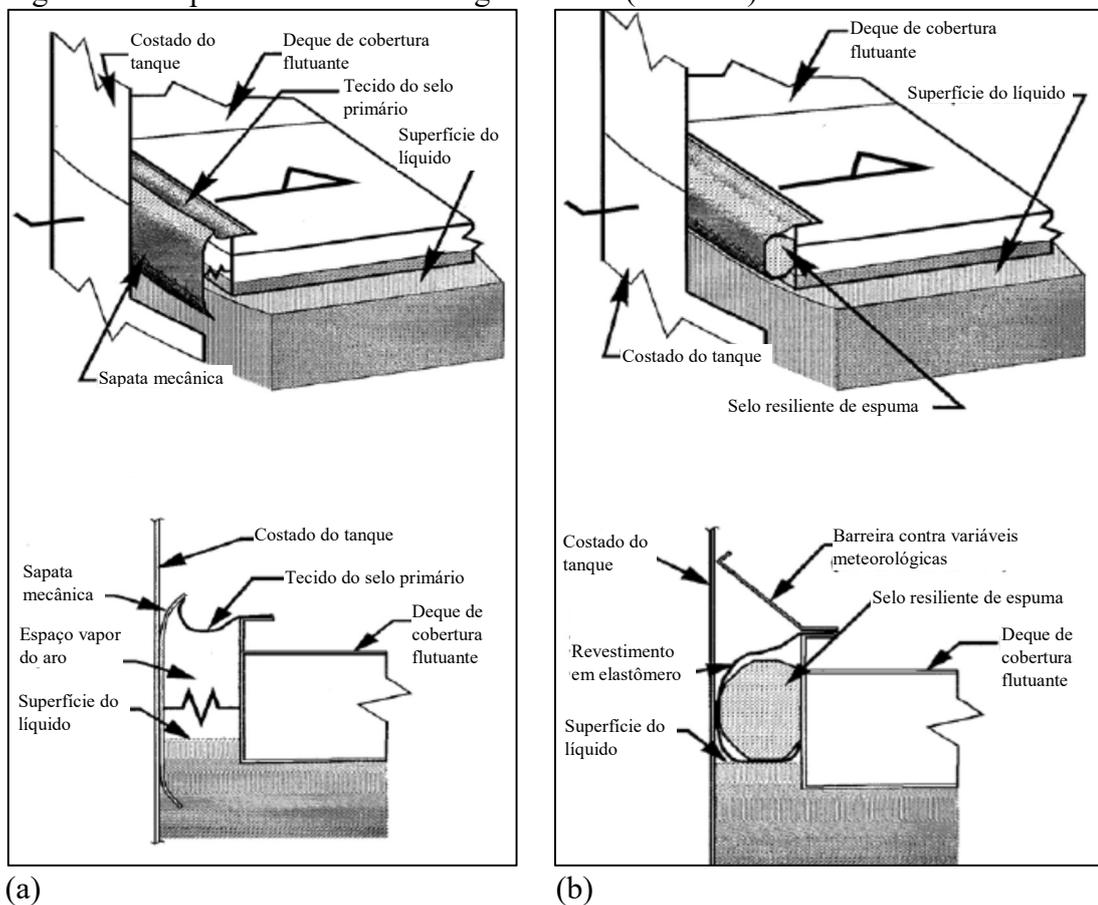
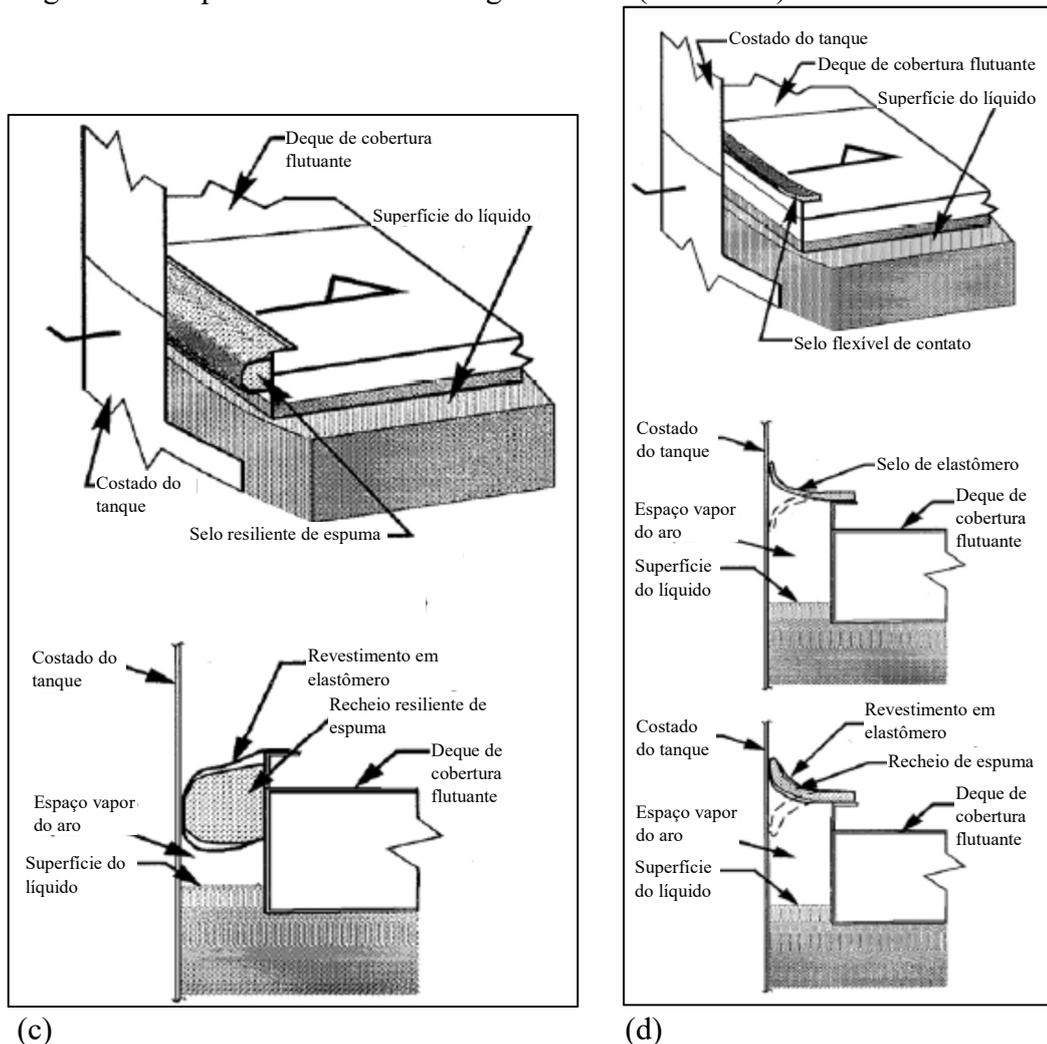


Figura 21 – Tipos de sistema de selagem de aro (conclusão)



(c)

(d)

Legenda: (a) – Selo do tipo sapata mecânica (metálico); (b) – Selo resiliente de espuma apoiado sobre o líquido; (c) – Selo resiliente de espuma apoiado sobre o vapor; (d) – Selo flexível de contato apoiado sobre o vapor.

Fonte: Adaptado de U.S.EPA, 2006b

2.1.3 Emissões de COVs

As emissões de COVs em tanques são decorrentes da evaporação do produto armazenado. A emissão é dependente de diversas variáveis, como características do tanque, produto armazenado, temperatura interna e condições meteorológicas (U.S.EPA, 2006b).

Os tanques têm duas componentes básicas de emissões: as emissões estacionárias e as emissões de trabalho. As emissões estacionárias são as que ocorrem sem variação no nível do tanque, ao passo que as emissões de trabalho podem ocorrer tanto durante o enchimento quanto o esvaziamento dos tanques.

2.1.3.1 Emissões em tanques de teto fixo

Em tanques de teto fixo as emissões estacionárias podem ocorrer por variações na temperatura e/ou pressão. Aumento da temperatura interna ou redução da pressão atmosférica geram uma expansão do vapor, que é liberado para atmosfera pelas válvulas de alívio (U.S.EPA, 2006b).

Quando um tanque tem seu nível de líquido reduzido, ar é admitido pelas válvulas em seu teto de forma que a pressão seja equilibrada e não se forme vácuo. Este ar ficará saturado com vapores de compostos orgânicos e as emissões de trabalho acontecerão quando o nível aumentar novamente e este ar saturado for expulso para reequilibrar a pressão no tanque (U.S.EPA, 2006b).

As variáveis meteorológicas e as características do tanque e do líquido armazenado são fundamentais pois irão determinar a concentração de COVs no espaço vapor entre o nível do líquido e o teto. As emissões estacionárias dependem significativamente da variação da temperatura do líquido, que afetará a expansão e retração do vapor, juntamente com outras características. Já as emissões de trabalho são bastante afetadas pela movimentação do tanque, além de outras condições que serão mais detalhadas nos cálculos para estimativa (U.S.EPA, 2006b).

A movimentação do tanque pode ser calculada pela quantidade de produto que entra e sai do tanque ou pelo número de giros (*turnovers*). O número de giros é considerado como o número de vezes que um tanque recebeu uma quantidade de produto equivalente à sua capacidade máxima. Sendo assim, é igual à movimentação de produto em um determinado intervalo de tempo dividido por sua capacidade total. Teoricamente o número de giros seria a quantidade de vezes que o tanque se encheu e esvaziou no período considerado (U.S.EPA, 2006b).

Para estes tanques, tanto as emissões estacionárias como as de trabalho são liberadas para a atmosfera pela válvula de alívio de pressão localizada no teto fixo.

2.1.3.2 Emissões em tanques de cobertura flutuante

Em tanques com coberturas flutuantes também ocorrem perdas estacionárias. De forma geral estas emissões ocorrem através dos acessórios presentes no deque e do selo, uma vez que estes permitem o contato do líquido com alguma parcela de ar. Diferentes tipos de acessórios e selos promoverão a evaporação do líquido armazenado de formas variadas, de acordo com a

configuração. Especificamente para tanques de selo flutuante interno, deques com juntas rebitadas ao invés de soldadas também poderão ser uma fonte de emissões estacionárias (U.S.EPA, 2006b).

As emissões de trabalho acontecem durante o esvaziamento e redução do nível do líquido e, conseqüentemente, da cobertura. Mesmo com a atuação dos selos, algum resquício de produto fica aderido às paredes do tanque e ao entrar em contato com o ar este evapora. Em tanques de selo flutuante interno nos quais colunas atravessam o deque também haverá a aderência de produto a estas, incrementando as perdas de trabalho. Estas perdas cessam quando o tanque é novamente enchido e as colunas e o costado são cobertos (U.S.EPA, 2006b).

Assim como nos tanques de teto fixo, as emissões totais de tanques com cobertura flutuante não são distribuídas igualmente no tempo. Porém, esta tipologia têm uma complexidade maior pois nestes tanques também não há um ponto único de emissão. As estacionárias acontecem em todos os acessórios e as de trabalho ao longo de todo o costado. Logo, além de acontecerem em toda uma superfície sua distribuição não é uniforme.

Conforme apresentado anteriormente, diversos acessórios estão presentes em deques flutuantes, cumprindo tanto funções estruturais como operacionais. Os acessórios em tetos flutuantes externos, em geral, são diferentes daqueles em selos flutuantes internos devido ao papel de desempenham. Os acessórios podem ser uma fonte de emissão quando estes promovem a abertura do deque e o contato do líquido com o ar. As formas como cada acessório pode contribuir para as emissões estacionárias será detalhada a seguir.

2.1.3.2.1 Bocas de visita (*Access hatches*)

As bocas de visita atravessam o deque perpendicularmente e são cobertas por uma tampa. A contribuição da boca de visita para as emissões vai depender se esta é ou não aparafusada e se é vedada com gaxeta ou não. Tanques com teto flutuante externo e com domo geodésico tipicamente terão tampas aparafusadas e vedadas, enquanto que para tanques com selo flutuante interno é mais comum que estão não sejam aparafusadas nem vedadas. Normalmente a cobertura flutuante somente tem uma boca de visita (U.S.EPA, 2006b).

2.1.3.2.2 Nível de boia (*Gauge-float well*)

Assim como a da boca de visita, a tampa do nível de boia também poderá ser ou não aparafusada e vedada. É esperado que haja apenas um acessório como este por tanque e que a tampa não seja nem aparafusada nem vedada (U.S.EPA, 2006b).

2.1.3.2.3 Ponto de amostragem (*Gauge-hatch/sample ports*)

A tampa do poço de medição normalmente é única e tem fechamento automático. Em tetos flutuantes externos ou com domo é mais comum que esta conte com vedação. Já em selos flutuantes internos é mais razoável considerar que o poço é coberto por uma cortina que mantém uma abertura mínima em torno de 10% (U.S.EPA, 2006b).

2.1.3.2.4 Vent do aro (*Rim vents*)

O vent de atuação mecânica poderá ter ou não vedação. Em tetos flutuantes externos é comum que haja somente uma unidade deste acessório e com vedação (U.S.EPA, 2006b).

2.1.3.2.5 Pernas do deque (*Deck legs*)

Pernas fixas à cobertura não geram emissões. Pernas ajustáveis passam por dentro do deque e o espaço formado entre elas e abertura permite o contato do líquido armazenado com o ar. Pernas ajustáveis são a condição mais comum em selos flutuantes internos. Em tetos flutuantes externos a condição padrão é que o espaço não seja vedado. A Tabela 1 apresenta uma lista com as quantidades típicas de pernas em tetos flutuantes externos (U.S.EPA, 2006b). Em selos flutuantes internos a quantidade típica de pernas pode ser obtida pela Equação 1.

2.1.3.2.6 Guias perfuradas e não-perfuradas (*Slotted e unslotted guidepoles*)

Tipicamente há apenas uma guia antirrotacional do tipo não-perfurada em tanques. O poço por onde passa a guia é considerado como tendo 21 polegadas de diâmetro, enquanto que a guia tem um diâmetro de apenas 8 polegadas. Este grande espaço vazio entre a guia e o contorno no poço é coberto, mas normalmente não vedado (U.S.EPA, 2006b).

Tabela 1 – Número típico de pernas em tanques de teto flutuante externo

Diâmetro do tanque (pés)	Teto do tipo pontão		Número de pernas no deque duplo
	Número de pernas do pontão	Número de pernas centrais	
30	4	2	6
40	4	4	7
50	6	6	8
60	9	7	10
70	13	9	13
80	15	10	16
90	16	12	20
100	17	16	25
110	18	20	29
120	19	24	34
130	20	28	40
140	21	33	46
150	23	38	52
160	26	42	58
170	27	49	66
180	28	56	74
190	29	62	82
200	30	69	90
210	31	77	98
220	32	83	107
230	33	92	115
240	34	101	127
250	35	109	138
260	36	118	149
270	36	128	162
280	37	138	173
290	38	148	186
300	38	156	200
310	39	168	213
320	39	179	226
330	40	190	240
340	41	202	255
350	42	213	270
360	44	226	285
370	45	238	300
380	46	252	315
390	47	266	330
400	48	281	345

Fonte: U.S.EPA, 2006b

$$\text{Número de pernas} = 5 + \frac{D}{10} + \frac{D^2}{600} \quad (\text{D em pés}). \quad (1)$$

2.1.3.2.7 Válvulas de quebra de vácuo e drenos de deque (*Vacuum breakers e stub drains*)

As válvulas de quebra de vácuo podem ser vedadas ou não. As primeiras são mais comuns tanto em tanques de teto flutuante externo quanto selos flutuantes internos. Somente drenos de tanque abertos estão sujeitos a perdas por evaporação. A Tabela 2 apresenta o número típico de válvulas e drenos (U.S.EPA, 2006b).

Tabela 2 – Número típico de válvulas de quebra de vácuo e drenos de deque em tanques de cobertura flutuante

Diâmetro do tanque (pés)	Número de válvulas de quebra de vácuo		Número de drenos de deque
	Teto pontão	Deque duplo	
50	1	1	1
100	1	1	1
150	2	2	2
200	3	2	3
250	4	3	5
300	5	3	7
350	6	4	ND
400	7	4	ND

Fonte: U.S.EPA, 2006b

2.1.3.2.8 Colunas (*Columns*)

Caso o tanque de selo flutuante interno não tenha um teto fixo autoportante, é necessário que haja colunas de sustentação, conforme apresentado no item 2.1.2.10. As colunas e seus respectivos poços geram emissões de duas formas: o espaço formado entre as colunas e o poço permite que o líquido armazenado entre em contato com o ar; quando o nível do tanque baixa as colunas ficam com produto aderido, o qual evapora. A Tabela 3 apresenta o número típico de colunas de sustentação para cada intervalo de diâmetro de tanques de teto fixo com selo flutuante interno. Caso o diâmetro efetivo das colunas não seja conhecido pode ser utilizado o valor de 1 pé (U.S.EPA, 2006b).

2.1.3.2.9 Escadas de acesso (*Ladder wells*)

As escadas de acesso influenciam de forma similar às colunas as emissões em tanques de teto fixo com selo flutuante interno. No entanto, geralmente há somente uma escada por tanque (U.S.EPA, 2006b).

Tabela 3 – Número típico de colunas por intervalo de diâmetro do tanque

Intervalo de diâmetro (pés)	Número típico de colunas
0<D≤85	1
85<D≤100	6
100<D≤120	7
120<D≤135	8
135<D≤150	9
150<D≤170	16
170<D≤190	19
190<D≤220	22
220<D≤235	31
235<D≤270	37
270<D≤275	43
275<D≤290	49
290<D≤330	61
330<D≤360	71
360<D≤400	81

Fonte: U.S.EPA, 2006b

2.1.3.2.10 Drenos do selo flutuante interno (*Stub drains*)

Estes drenos estão presentes apenas em tanques de selo flutuante interno cujo deque não é soldado. Normalmente eles têm uma polegada de diâmetro e sua quantidade varia em função do diâmetro do tanque segundo a Equação 2 (U.S.EPA, 2006b):

$$\text{Número de drenos} = \frac{D^2}{125} \text{ (D em pés)} \quad (2)$$

2.2 Quantificação de COVs em tanques de armazenamento

Para a elaboração de inventários de COVs em tanques de armazenamento é necessário quantificar adequadamente cada uma das parcelas que compõem as emissões. Como já foi citado, a medição direta em tanques é complexa e nem sempre é possível. Somente tanques de teto fixo têm uma saída pontual para os vapores, permitindo uma medição direta e contínua.

Tanques de teto ou selo flutuantes têm diversos pontos de geração de vapores como o costado do tanque, o selo ou os acessórios do teto. Sendo assim, as emissões destes tanques somente podem ser medidas através de métodos indiretos. A geração de COVs de um tanque também pode ser estimada a partir de protocolos de cálculo complexos ou de fatores de emissão padrão relacionados a algumas atividades específicas. A seguir serão detalhadas algumas

técnicas de monitoramento e de estimativa, bem como a comparação entre elas de forma a identificar o método mais adequado para elaborar inventários de emissões de tanques.

2.2.1 Medição direta

A quantificação direta das emissões de tanques somente é possível a partir da medição da vazão e da concentração. Existem publicações, como o capítulo 19.3 do *Manual of Petroleum Measurement Standards* do *American Petroleum Institute* (API) que detalham procedimentos de quantificação de perdas. No entanto, para a aplicação é necessária a montagem de um aparato e obtenção de dados experimentais. A metodologia não pode ser aplicada a tanques já em funcionamento.

Como já citado, a medição direta somente é viável em tanques de teto fixo, uma vez que nestes há uma saída única das perdas evaporativas e é possível o encaminhamento destas sem interferir na geração das mesmas. A massa de COVs emitida em um determinado período pode ser obtida pela medição instantânea de ambos os parâmetros e pelo do produto da vazão pela concentração mássica.

Lu et al. (2013) realizaram o monitoramento durante um ano das emissões de COVs de três tanques cilíndricos verticais de teto fixo que armazenavam p-xileno. Foi utilizado um compressor de ar de velocidade variável para coletar os gases através de dutos de aço inoxidável acoplados ao respiro do tanque. Um medidor de vazão foi acoplado a um detector de COVs para obter a massa de poluentes. As emissões estacionárias e de trabalho foram quantificadas separadamente. A movimentação total dos tanques foi de 70.446 t e as emissões totalizaram 9,425 t. As perdas estacionárias representaram 53,54%, com 5,046 t e as de trabalho ficaram em 4,379 t. Os resultados medidos foram comparados com emissões calculadas a partir de um programa de computador desenvolvido com base nas equações do capítulo 7 do AP 42 da U.S.EPA e esta análise será apresentada no item 2.2.3. O AP 42 é uma biblioteca de métodos e fatores de emissão criada pela agência ambiental americana para orientar as estimativas de emissões.

2.2.2 Medição indireta

As emissões de tanques de teto fixo ou flutuante podem ser medidas de forma indireta a partir de metodologias que abrangem uma área (ou um volume) no espaço ao invés de

unicamente o ponto de saída das emissões. Para a medição indireta de COVs foram identificados os métodos DIAL e FTIR, ambos métodos óticos.

O DIAL (*Differential Absorption Light Detection and Ranging* – Detecção por absorção diferencial de luz) é um método ótico baseado em laser que tem a capacidade de medir a concentração de certas espécies gasosas em um ponto remoto da atmosfera a centenas de metros do instrumento. Ele permite o monitoramento simultâneo de diversas fontes e a obtenção de taxas de emissão ao combinar os perfis obtidos de concentração com velocidade e direção do vento. Os valores de emissões obtidos podem ser comparados com resultados estimados (CHAMBERS et al., 2008). Esta metodologia foi utilizada para monitoramento de emissões de tanques de armazenamento pelo CONCAWE (divisão de meio ambiente da *European Petroleum Refiners Association*) (1995) e Chambers et al. (2008).

Outra técnica que pode ser utilizada para monitorar COVs na atmosfera é a FTIR (*Fourier transform infrared spectroscopy* – Espectrofotometria de infravermelho por transformada de Fourier). Assim como o DIAL, esta técnica tem como princípio a forma como os compostos absorvem a luz pelas ligações químicas (neste caso a infravermelha) para obter a concentração de espécies químicas. No entanto, ao contrário do DIAL, na FTIR são utilizados refletores que fazem com que o feixe de luz retorne ao ponto de emissão. Esta técnica, aliada à metodologia de mapeamento vertical radial de pluma (VRPM – da sigla em inglês) permite o monitoramento de emissões fugitivas de fontes não pontuais, como tanques de armazenamento (WU et al., 2014). O mapeamento vertical radial de pluma é descrito no método US EPA OTM-10. Esta metodologia utiliza feixes que não se cruzam e que formam um *grid* e mapeiam um plano vertical a sotavento da área de interesse. Este mapeamento, em conjunto com informações de direção e velocidade do vento permitem a obtenção do fluxo em massa de poluentes que atravessa o referido plano. O fluxo é então utilizado para estimar a taxa de emissão de fontes selecionadas a barlavento (U.S.EPA, 2006c). Esta técnica foi utilizada por Wu et al. (2014) para a quantificação das emissões de um parque de tancagem.

Chambers et al. (2008) tiveram como objetivo avaliar o DIAL como método de monitoramento das emissões de hidrocarbonetos em diversas fontes, bem como comparar a taxa de emissão medida com valores estimados. O monitoramento foi realizado por 10 dias (não contínuos) em diversos pontos de uma refinaria canadense. As emissões do parque de tancagem (onze tanques de produto acabado) representaram, aproximadamente, 50% das emissões totais de C₂₊ e mais de 60% das emissões de benzeno. Foi identificado que a velocidade do vento tem influência significativa nas emissões, principalmente de tanques com coberturas flutuantes. Em condições de ventos na faixa de 24 a 34 quilômetros por hora a emissão do parque de tancagem

era quatro vezes maior que em condições de ventos na faixa de 7 a 15 quilômetros por hora. A taxa de emissão de C_{2+} obtida pelo estudo para a área de tancagem foi de 631 kg h^{-1} . Os resultados do monitoramento foram comparados com estimativas de emissões realizadas através do programa TANKS 4.09d da U.S.EPA. Esta comparação será apresentada e discutida no item 2.2.3.

A técnica DIAL também foi utilizada em um estudo do CONCAWE em 1995 que buscou monitorar emissões de um grupo de tanques de teto flutuante externo de gasolina por um período de 90 horas. O objetivo foi avaliar as emissões do *turnover* completo de um tanque, enquanto os demais permaneciam estáticos. As emissões obtidas foram comparadas com estimativas calculadas a partir das equações do capítulo 7 do AP 42. O item seguinte apresentará a comparação e a análise dos resultados.

Wu et al. (2014) realizaram a medição de COVs em um parque de tanques de produtos petroquímicos utilizando a técnica de mapeamento vertical radial de pluma com cinco refletores e um FTIR. Foi realizado monitoramento de cinco COVs de interesse (benzeno, tolueno e o-, m-, p-xileno) durante catorze dias e foram encontradas taxas de emissão totais variando de $0,86$ a $2,18 \text{ g s}^{-1}$. O hexafluoreto de enxofre (SF_6) foi utilizado como traçador de forma a verificar os resultados da medição. O parque continha 12 tanques de selo flutuante interno, dos quais cinco armazenavam xileno, quatro tolueno e três gasolina. Os resultados obtidos foram comparados com emissões estimadas através das equações do capítulo 7 do AP 42. A comparação e análise dos resultados serão apresentados juntamente com esta metodologia.

2.2.3 Estimativa de emissões

Para a quantificação de emissões é sempre mais adequada a utilização de informações de monitoramento contínuo da fonte. No entanto, conforme apresentado, nem sempre é possível medir todas as emissões atmosféricas. Além disso, monitoramentos pontuais podem apresentar valores adequados, mas que não representam variabilidade das emissões no tempo e nas diferentes condições de operação. Neste contexto, é necessário utilizar ferramentas alternativas para a quantificação das emissões (U.S.EPA, 1995).

Os balanços de massa são ferramentas que têm potencial para fornecer estimativas razoáveis para alguns tipos de fontes. Em alguns casos, os balanços podem fornecer informações mais assertivas do que o monitoramento. Usualmente os balanços são adequados para os casos em que uma grande parte de material é perdida para a atmosfera, como as emissões de enxofre na combustão. Por outro lado, os balanços não são adequados quando há consumo

por reações químicas ou quando é perdida para a atmosfera apenas uma pequena parcela do total envolvido no processo. É necessário estabelecer com confiabilidade as entradas e saídas do processo para realizar uma estimativa de emissões adequada (U.S.EPA, 1995).

Informações ou garantias do fabricante podem fornecer estimativas confiáveis para certas tipologias de fontes novas. É necessário garantir que a fonte mantém as condições originais de fábrica e previstas pelo fabricante para que estes valores sejam representativos. É possível também obter informações de emissões de equipamentos similares com certa confiabilidade (U.S.EPA, 1995).

Quando dados de emissões de uma fonte não estão disponíveis podem ser utilizados fatores de emissão. Fatores de emissão são valores que relacionam a quantidade gerada de um poluente com um fator de atividade de uma determinada fonte. Geralmente tais fatores são expressos em massa de poluente por massa, volume, distância, tempo, ou outra unidade relacionada à atividade. Na maioria dos casos, tais fatores são obtidos a partir de uma média de diversos dados disponíveis e de qualidade para cada tipologia de fonte (U.S.EPA, 1995).

Em termos gerais a estimativa por fatores de emissão tem como base a equação 3:

$$E = A \times FE \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right) \quad (3)$$

E = Emissão

A = Fator de atividade

FE = Fator de emissão

ER = Eficiência de remoção (caso haja equipamentos de controle que reduzam a emissão)

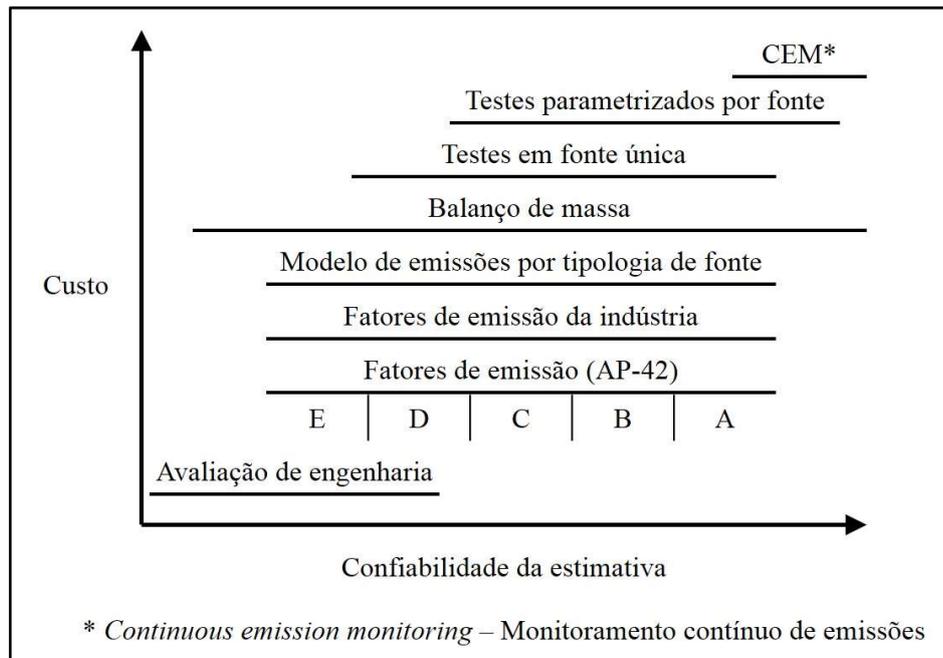
O fator de atividade utilizado deve ser representativo das condições da fonte ao longo do período considerado para que a estimativa tenha a confiabilidade adequada. Como os fatores de emissão são obtidos a partir de médias de emissões de diversas fontes, a sua utilização em estimativas de períodos curtos (horas ou dias) embute muitas incertezas. Em um curto espaço de tempo pode haver grande variação das emissões de uma fonte devido a condições intrínsecas do processo, condições de operação e variações da matéria-prima. Tais flutuações que alteram as emissões por um curto período normalmente não são consideradas durante medições, logo, não estarão incluídas nos fatores de emissão utilizados (U.S.EPA, 1995).

A U.S.EPA mantém uma biblioteca de fatores de emissão para diversas tipologias de atividades denominada AP 42. Esta extensa base de dados inclui, além dos fatores de emissão, o detalhamento a partir de dados e como eles foram obtidos e as condições para sua utilização. Neste documento os fatores são classificados de A a E de acordo com a qualidade e quantidade

dos dados utilizados e sua representatividade para o cálculo de uma emissão média (U.S.EPA, 1995).

A Figura 22 apresenta uma hierarquia para a utilização de diversas ferramentas de estimativas comparando a confiabilidade e os custos associados.

Figura 22 – Sensibilidade dos diferentes métodos de estimativa de emissões



Fonte: O autor, 2016 (traduzido de U.S.EPA, 1995)

É necessário avaliar a quantificação de emissões de COVs em tanques de armazenamento sob o prisma das ferramentas de estimativa para a determinação da mais adequada.

Segundo Schmitt et al. (1993) *apud* CONCAWE (1995), emissões evaporativas de tanques são muito pequenas para serem calculadas por balanço de massa. Levando em consideração uma situação hipotética de um tanque com 80 metros de diâmetro que armazena um petróleo com massa específica de $0,85 \text{ g cm}^{-3}$, a emissão de cada tonelada de COV levaria a uma diminuição de apenas 0,2 mm no nível do produto estocado. Tal variação seria muito pequena para ser percebida com instrumentos de medição de nível e provavelmente também seria mascarada por dilatação ou retração do líquido e do tanque.

Com relação à modelagem das emissões, o órgão ambiental americano disponibiliza duas ferramentas para a estimativa de COVs em tanques de armazenamento. O Capítulo 7 (*Liquid Storage Tanks*) do AP 42 fornece um arcabouço mais complexo que a simples aplicação da Equação 3. É apresentada uma modelagem de estimativa de emissões aprimorada com dados empíricos que leva em consideração variáveis como características do tanque, do líquido

armazenado e condições meteorológicas. Por ter mais variáveis de entrada este tipo de modelagem tende a ser mais realista do que os fatores de emissão mais simples. É disponibilizado também um *software* denominado TANKS para a estimativa de emissões de COVs e HAP (*Hazardous Air Pollutant* – Poluentes orgânicos perigosos). O TANKS é baseado nas equações do capítulo 7 do AP 42.

Quando não há o detalhamento necessário dos dados de entrada o órgão ambiental americano prevê metodologia para estimativa de emissões de tanques de armazenamento de refinarias a partir de outras informações do processo.

2.2.3.1 Estimativa de emissões segundo o AP 42

O capítulo 7 do AP 42 vem sendo utilizado para a estimativa de emissões de COV por alguns autores ao longo dos anos. Wu et al. (2014) estimaram as emissões de alguns compostos de um parque de tancagem de uma indústria petroquímica e os comparou com dados de monitoramento indireto. A estimativa foi realizada para 14 dias e foram obtidos valores estimados uma ordem de grandeza abaixo dos medidos.

Lu et al. (2013) também utilizaram as equações do AP 42 para estimar emissões de 3 tanques de teto fixo com p-xileno e compará-las com monitoramento direto por um ano. As emissões de trabalho obtidas no cálculo foram 36% menores que as medidas e as estacionárias foram 20% superiores.

Howari (2015) calculou as emissões de COVs de tanques de teto fixo e flutuante para simular sua dispersão em diferentes cenários com diferentes *softwares*. Na visão do autor foram obtidos resultados coerentes.

O Ministério do Meio Ambiente (20--) determina que o capítulo 7 do AP 42 é o método de cálculo mais indicado para a estimativa de emissões de tanques de armazenamento para reporte no Registro de Emissão e Transferência de Poluentes (RETP), ferramenta do IBAMA.

Os itens a seguir apresentam as equações utilizadas para a estimativa de emissões de compostos orgânicos voláteis em tanques de armazenamento. Como estas equações foram desenvolvidas pelo API, elas são escritas com base no sistema de unidades americano. A conversão de tais equações para o sistema internacional de unidades, além de dar margem a muitos erros, não é a forma como estas equações são aplicadas em outros estudos científicos (Wu et al., 2014; Lu et al., 2013; Howari, 2015). Assim, as equações serão apresentadas em suas unidades originais.

A U.S.EPA (2006a) afirma que as equações foram desenvolvidas, originalmente, para fornecer estimativas em uma base de tempo anual. Os procedimentos utilizados para a estimativa de emissões podem (e devem) ser utilizados para períodos mais curtos desde que sejam ajustados os parâmetros de entrada para a escala temporal de interesse. É fundamental observar que um mês é o menor período de tempo recomendado para o cálculo de emissões.

2.2.3.1.1 Tanques de teto fixo

As emissões de tanques de teto fixo são compostas por emissões de trabalho e emissões estacionárias. Sendo assim, as emissões totais são a soma destas duas componentes. Segundo o capítulo 7 do AP 42, a estimativa das emissões estacionárias em libras por ano pode ser obtida a partir da Equação 4:

$$L_S = 365 V_V W_V K_E K_S \quad (4)$$

Onde:

V_V = Volume do espaço de vapor [pés cúbicos] (Equação 5)

W_V = Densidade do vapor [libras por pé cúbico] (Equação 10)

K_E = Fator de expansão do espaço-vapor [adimensional] (Equações 6 e 7)

K_S = Fator de saturação do vapor ventado [adimensional] (Equação 9)

365 = Constante, número de eventos em um ano⁷ [ano⁻¹]

$$V_V = \left(\frac{\pi}{4} D^2\right) H_{VO} \quad (5)$$

Onde:

D = Diâmetro do tanque [pés]

H_{VO} = Altura equivalente do espaço-vapor⁸ [pés] (Equação 8)

O cálculo de K_E – Fator de expansão do espaço-vapor depende da propriedade do líquido armazenado e do ajuste de pressão das válvulas de alívio e vácuo. Se o líquido armazenado tem uma pressão de vapor menor que 0,1 e o ajuste de pressão é $\pm 0,03$ psig⁹ deve ser utilizada a Equação 6.

⁷ O produto $V_V W_V K_E K_S$ fornece como resultado as emissões de um “evento” que equivale a um dia. Sendo assim, para a obtenção de emissões anuais é necessário multiplicar pela constante 365 ano⁻¹.

⁸ Altura equivalente do espaço-vapor é a altura de um cilindro cujo volume é equivalente ao espaço entre a superfície do líquido e o teto do tanque (em domo ou cone).

⁹ *Pounds per square inch gauge* – libras por polegada quadrada manométrica, ou seja, independe da altitude.

$$K_E = 0,0018 \cdot \Delta T_V = 0,0018 [0,72(T_{AX} - T_{AN}) + 0,028\alpha I] \quad (6)$$

Onde:

ΔT_V = Variação diária de temperatura do vapor [$^{\circ}\text{R}$]

T_{AX} = Temperatura ambiente máxima diária [$^{\circ}\text{R}$]

T_{AN} = Temperatura ambiente mínima diária [$^{\circ}\text{R}$]

α = Absorbância solar da cor do tanque [adimensional]

I = Insolação diária solar total em uma superfície horizontal [Btu/pé²dia]

0,0018 = Constante [$^{\circ}\text{R}^{-1}$]

0,72 = Constante [adimensional]

0,028 = Constante [$^{\circ}\text{R}$ pé² dia / Btu]

Se o líquido armazenado tem uma pressão de vapor acima de 0,1 psia¹⁰ ou se o ajuste de pressão das válvulas é maior do que o valor típico de $\pm 0,03$ psig, uma estimativa mais precisa pode ser obtida a partir da Equação 7. Se K_E for menor do que zero não haverá emissões estacionárias.

$$K_E = \frac{\Delta T_V}{T_{LA}} + \frac{\Delta P_V - \Delta P_B}{P_A - P_{VA}} > 0 \quad (7)$$

Onde:

ΔT_V = Variação diária de temperatura do vapor [$^{\circ}\text{R}$] (equação 6)

ΔP_V = Variação diária de pressão de vapor [psi]

ΔP_B = Variação do ajuste pressão das válvulas [psi]

P_A = Pressão atmosférica [psia]

P_{VA} = Pressão de vapor na temperatura média diária da superfície do líquido armazenado [psia]

T_{LA} = Temperatura média diária da superfície do líquido [$^{\circ}\text{R}$]

A temperatura média diária da superfície do líquido (T_{LA}) deve ser obtida a partir dos dados da escala de tempo de interesse. Este valor deve ser utilizado também para o cálculo da pressão de vapor.

A variação diária de pressão de vapor é composta pela diferença entre a pressão de vapor na temperatura máxima diária da superfície do líquido e a pressão de vapor na temperatura mínima diária da superfície do líquido.

¹⁰ *Pounds per square inch absolute* – libras por polegada quadrada absoluta, ou seja, incluindo a pressão atmosférica

$$H_{VO} = H_S - H_L + H_{RO} \quad (8)$$

Onde:

H_S = Altura do costado do tanque [pés]

H_L = Altura do líquido [pés]

H_{RO} = Altura equivalente do teto [pés] (o cálculo desta altura varia em função do formato do teto, em domo ou em cone)

Para um teto cônico, H_{RO} é igual a um terço da altura real do teto, uma vez que o volume de um cone é igual a um terço o volume de um cilindro de mesma altura. A altura do teto pode ser obtida a partir do raio do tanque e a inclinação que, se desconhecida, pode ser assumida como 0,0625.

Em um teto em domo, H_{RO} deve ser obtido a partir do cálculo do volume do domo.

O fator de saturação do vapor ventado K_S pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$K_S = \frac{1}{1 + 0,053 P_{VA} H_{VO}} \quad (9)$$

Onde:

P_{VA} = Pressão de vapor na temperatura média diária da superfície do líquido [psia]

H_{VO} = Altura equivalente do espaço-vapor¹¹ [pés] (Equação 8)

0,053 = Constante [(psia pé)⁻¹]

A densidade do vapor W_V pode ser calculada a partir da equação:

$$W_V = \frac{M_V P_{VA}}{R T_{LA}} \quad (10)$$

Onde:

M_V = Peso molecular da fase vapor (a 60 °F)¹² [libras/libra-mol]

R = Constante dos gases ideais: 10,731 [psia pé³/libra-mol °R]

P_{VA} = Pressão de vapor na temperatura média diária da superfície do líquido [psia]

T_{LA} = Temperatura média diária da superfície do líquido [°R] (Equação 11)

Caso a temperatura média diária da superfície do líquido seja desconhecida, é possível estimá-la a partir de dados meteorológicos e da característica do tanque utilizando a Equação

¹¹ Altura equivalente do espaço-vapor é a altura de um cilindro cujo volume é equivalente ao espaço entre a superfície do líquido e o teto do tanque (em domo ou cone).

¹² O termo “peso molecular da fase vapor” está sendo utilizado desta forma por ser uma tradução literal do original “*vapor molecular weight*”. Seu conceito equivale ao da massa molar da fase vapor de uma substância ou a massa molar aparente de uma mistura gasosa complexa como a gasolina ou o petróleo.

11. Caso o tanque seja aquecido e esta temperatura seja regulada por um termostato é possível substituir a equação pelo valor da temperatura de aquecimento.

Anker e Ferry (2014) afirmam que tanques aquecidos e/ou com isolamento devem ter suas características criteriosamente avaliadas para a inserção em modelos de simulação. Deve-se avaliar se além do costado o teto também é isolado para garantir que não haja troca de calor com o meio externo. Em tanques aquecidos é essencial verificar dentro de qual faixa a temperatura varia, uma vez que o aquecimento normalmente ocorre em ciclos.

$$T_{LA} = 0,44T_{AA} + 0,56(T_{AA} + 6\alpha - 1) + 0,0079\alpha I \quad (11)$$

Onde:

T_{AA} = Temperatura média diária (média das temperaturas máxima e mínima diárias)

α = Absorbância solar da cor do tanque [adimensional]

I = Insolação diária solar total em uma superfície horizontal [Btu/pé²dia]

As emissões de trabalho podem ser calculadas em libras por ano a partir da Equação 12:

$$L_W = 0,0010M_V P_{VA} Q K_N K_P \quad (12)$$

M_V = Peso molecular da fase vapor (a 60 °F) [libras/libra-mol]

P_{VA} = Pressão de vapor na temperatura média diária da superfície do líquido [psia]

Q = Movimentação anual de produto [barris/ano]

K_N = Fator de *turnover* para perdas de trabalho [adimensional]

Para *turnover* acima de 36, $K_N = (180+N)/6N$ (Onde N é o número de *turnovers*)

Para *turnover* menor ou igual a 36, $K_N = 1$

K_P = Fator do produto para perdas de trabalho [adimensional]

Para petróleo, $K_P = 0,75$

Para líquidos orgânicos, $K_P = 1$

A equação 12 tem como premissa que toda movimentação de produto tem como consequência uma variação do nível do líquido. No entanto há casos de tanques-pulmão ou de nível constante. Para estes casos a U.S.EPA (2006a) indica que não deve ser utilizada a movimentação real para o cálculo. O número de *turnovers* deve ser calculado a partir da variação no nível do tanque. Esta variação deve ser dividida pela altura total do tanque e o resultado multiplicado pela movimentação real, obtendo assim uma movimentação corrigida. Alternativamente a U.S.EPA sugere o valor de 4 *turnovers* para este tipo de tanques caso não haja detalhes sobre a variação do nível.

2.2.3.1.2 Tanques com cobertura flutuante

O capítulo 7 do AP 42 traz equações para auxiliar na estimativa de emissões de COVs em tanques com cobertura flutuante sob condições normais de operação. Não é possível utilizar tais equações para produtos cuja pressão de vapor não é conhecida ou para tanques cujos selos ou acessórios estejam deteriorados. Todos os coeficientes ou cálculos adotam como premissa o fato de que os acessórios estão em bom estado de conservação.

Durante a operação normal as emissões são correspondentes à soma das perdas pelo selo, perdas de movimentação, perdas pelos acessórios e pelo teto, conforme apresentado na Equação 13.

$$L_T = L_R + L_{WD} + L_F + L_D \quad (13)$$

Onde:

L_T = Perdas totais [libras/ano]

L_R = Perdas pelo selo do aro [libras/ano]

L_{WD} = Perdas de movimentação [libras/ano]

L_F = Perdas pelos acessórios [libras/ano]

L_D = Perdas pelo teto (apenas para tanques de selo flutuante interno) [libras/ano]

As perdas pelo selo do aro podem ser calculadas a partir da Equação 14:

$$L_R = (K_{Ra} + K_{Rb} v^n) DP^* M_V K_C \quad (14)$$

Onde:

K_{Ra} = fator de perda do selo para a velocidade do vento zero [libra-mol/pé ano]

K_{Rb} = fator de perda do selo dependente do vento [libra-mol/(mph)ⁿ pé ano]

v = velocidade média do vento [mph]¹³

n = expoente da velocidade do vento ligada ao tipo de selo [adimensional]

D = Diâmetro do tanque [pés]

M_V = Peso molecular da fase vapor (a 60 °F) [libras/libra-mol]

K_C = Fator do produto

Para petróleo, $K_C = 0,4$

Para líquidos orgânicos, $K_C = 1$

P^* = função de pressão de vapor [adimensional]

¹³ Para tanques com selo flutuante interno ou cobertura em domo a velocidade do vento é zero.

$$P^* = \frac{\frac{P_{VA}}{P_A}}{\left[1 + \left(1 - \frac{P_{VA}}{P_A}\right)^{0,5}\right]^2} \quad (15)$$

Onde:

P_{VA} = Pressão de vapor na temperatura média diária da superfície do líquido
[psia]

P_A = Pressão atmosférica [psia]

Para o cálculo da pressão de vapor na temperatura média recomenda-se a utilização da temperatura do líquido armazenado. Caso esta informação não esteja disponível é possível estimá-la a partir da Tabela 4.

Tabela 4 – Cálculo da temperatura do líquido em função da cor do tanque

Cor do tanque	Temperatura média anual do líquido
Branco	$T_{AA}+0$
Alumínio	$T_{AA}+2,5$
Cinza	$T_{AA}+3,5$
Preto	$T_{AA}+5,0$

Fonte: U.S.EPA, 2006b

As perdas de movimentação podem ser obtidas a partir da Equação 16:

$$L_{WD} = \frac{(0,943)QC_S W_L}{D} \left[1 + \frac{N_C F_C}{D}\right] \quad (16)$$

Onde:

Q = Movimentação anual de produto [barris/ano]

C_S = Fator de aderência do costado [bbl/1.000 pé²]

W_L = massa específica do líquido orgânico [libras/galão]

D = Diâmetro do tanque [pés]

0,943 = Constante [1.000 pé³ galão/bbl²]

N_C = Número de colunas de suporte de teto fixo [adimensional]

F_C = Diâmetro efetivo da coluna [pés]

Naturalmente, para tanques de teto flutuante externo ou tanques de selo flutuante interno com cobertura autoportante o número de colunas N_C é igual a zero. Deve ser utilizado o número de colunas reais de um tanque. Caso esta informação não esteja disponível é possível utilizar a informações-padrão fornecidas na Tabela 3 do item 2.1.3.2.8.

O cálculo das perdas pelos acessórios é regido por uma equação relativamente simples. No entanto a perda total por todos os acessórios de um tanque será a soma das perdas individuais, sendo assim, há diversas variáveis envolvidas, como apresentado na Equação 17.

$$L_F = F_F P^* M_V K_C \quad (17)$$

Onde:

L_F = Total de perdas por acessórios [lb ano⁻¹]

P^* , M_V e K_C como apresentados na equação 14

F_F = Fator resultante de perdas por acessórios [lb-mol ano⁻¹]

$F_F = [(N_{F1} * K_{F1}) + (N_{F2} * K_{F2}) + \dots + (N_{Fnf} * K_{Fnf})]$

Onde:

N_{Fi} = número de acessórios de um determinado tipo ($i=0, 1, 2, \dots, nf$)
[adimensional]

K_{Fi} = fator de perdas para cada acessório ($i=0, 1, 2, \dots, nf$) [lb-mol ano⁻¹]

N_f = número total de tipos de acessórios diferentes [adimensional]

O fator de perdas para cada acessório deve ser calculado individualmente a partir da equação 18:

$$K_{Fi} = K_{Fai} + K_{Fbi} (K_V V)^{m_i} \quad (18)$$

Onde:

K_{Fai} = fator de perda na condição de calmaria de cada acessório [libra-mol por ano]

K_{Fbi} = fator de perda dependente da velocidade do vento de cada acessório [libra-mol/(mph)^m*ano]

m_i = fator de perda para um determinado acessório

$i = 1, 2, \dots, n$ [adimensional]

K_V = Fator de correção da velocidade do vento no acessório [adimensional]

V = velocidade média do vento [milhas por hora (mph)]

Para tanques com tetos flutuantes externos o fator de correção da velocidade do vento no acessório é equivalente a 0,7. Em tanques com selo flutuante interno ou com domo não há incidência direta de vento sobre os acessórios e o valor é zero. Assim, a equação se torna $K_{Fi} = K_{Fai}$.

Os fatores típicos são válidos para condições de acessórios novos e com velocidade média do vento até 15 milhas por hora (6,7 metros por segundo).

As perdas pelo teto L_D , mais especificamente pelas juntas do deque, somente podem ocorrer em tanques de selo flutuante interno com deques rebitados. No caso de deques com construção soldada não são consideradas perdas associadas. As perdas podem ser calculadas a partir da Equação 19:

$$L_D = K_D S_D D^2 P^* M_V K_C \quad (19)$$

Onde:

L_D = Perdas nas juntas do deque [libras por ano]

K_D = Fator de perdas nas juntas por unidade de comprimento [lb-mole/pé*ano]. O valor padrão desta variável é de 0,14 para deques rebitados

S_D = Fator de comprimento das juntas do deque (pe/pé²) = L_{seam}/A_{deck}

Onde:

L_{seam} = comprimento total das juntas

A_{deck} = área do deque [pé²] = $\frac{\pi D^2}{4}$

P^* , M_V e K_C como apresentados na Equação 14.

A partir das equações apresentadas é possível estimar as emissões de compostos orgânicos voláteis de tanques que armazenam líquidos orgânicos.

2.2.3.2 Estimativas de emissões com o TANKS 4.09D

A U.S.EPA disponibiliza em seu sítio da internet o *software* TANKS, um programa para estimar emissões de tanques que armazenam líquidos orgânicos. Este *software* é gratuito e foi desenvolvido com base nas equações do capítulo 7 do AP 42. O TANKS traz consigo dados meteorológicos de diversas cidades dos Estados Unidos mas permite também a inserção de novas informações. Ele conta com produtos pré-cadastrados, mas é possível inserir novos desde que haja informações sobre a curva de pressão de vapor. O programa tem funcionalidade para o cadastro de diversos tanques para que, juntamente com os dados meteorológicos e dos produtos sejam estimadas as emissões de COVs totais ou especiados.

Apesar de ser largamente utilizado em diversos países por ter uma interface simples, a U.S.EPA não recomenda a utilização do TANKS para a estimativa de COVs em tanques de armazenamento, uma vez que o programa não seguiu as atualizações do protocolo original (U.S.EPA, 2012).

2.2.3.3 Estimativa de emissões por fatores de emissão

O órgão ambiental americano prevê uma metodologia de estimativa de emissões de COVs em tanques de armazenamento quando não há detalhamento suficiente dos dados de entrada para a aplicação de modelos complexos como o TANKS e o AP 42. Os fatores de emissão fornecidos são aplicáveis a refinarias e foram desenvolvidos utilizando como base os inventários de emissões entregues ao órgão ambiental. Para elaboração foram considerados modelos típicos de tanques de teto flutuante externo para petróleo e derivados médios e leves. Para derivados pesados foram consideradas estimativas do TANKS. A Tabela 5 apresenta a emissão total de COVs em libras por milhão de barris de produto movimentado/produzido.

Tabela 5 – Fatores de emissão de COVs por produto movimentado para tanques de armazenamento quando não há detalhamento dos dados de entrada

Fatores de emissão de COVs para tanques de petróleo e derivados (lb /10 ⁶ bbbl)					
Produto	Petróleo	Gasolina e derivados leves	Diesel e derivados médios	Asfalto, lubrificantes e derivados pesados	Aromáticos
Emissão	1.350	8.800	5.300	120	15.000

Fonte: RTI INTERNATIONAL, 2015

O documento da U.S.EPA, elaborado pelo RTI INTERNATIONAL (2015) apresenta detalhamento adicional da emissão de diversos COVs especiados. Devem ser utilizados dados de produção reais da unidade para a obtenção de estimativas com acurácia razoável.

Apesar de fornecer orientações para esta estimativa, a U.S.EPA não aceita tal cálculo de emissões para atendimento ao reporte periódico que refinarias dos Estados Unidos devem fazer a este órgão (RTI INTERNATIONAL, 2015).

2.2.4 Análise das ferramentas de estimativa de emissões em comparação com os métodos de monitoramento

Os estudos levantados que comparam técnicas de monitoramento com estimativas não apresentam informações suficientes que permitam avaliar a forma como tais cálculos foram realizados. O monitoramento direto realizado por Lu et al. (2013) avaliou separadamente as emissões estacionárias e de trabalho. Enquanto as perdas estacionárias estimadas foram 36% inferiores à medição, as perdas de trabalho (Lw) calculadas ficaram 20% acima das medidas, sendo o único trabalho que apresenta uma superestimativa dos cálculos em comparação com o monitoramento. Um ponto de atenção é que o experimento apresentava um compressor que succionava os gases dos tanques para encaminhamento ao trem de amostragem. O referido

artigo não aponta elementos detalhados, mas uma análise mais específica dos dados brutos talvez pudesse esclarecer se a superestimativa das emissões de trabalho tem origem na sucção do compressor. O autor afirma que a vazão da linha normalmente é maior que a da saída dos tanques e pode haver uma complementação de ar ambiente. Se as emissões de trabalho foram tão elevadas e pontuais, como afirma o autor, uma hipótese é que em certos momentos de recebimento intenso de produto o compressor poderia estar succionando os gases a uma vazão menor que o necessário, gerando escape destes COVs por algum ponto da linha, como a entrada de ar ambiente.

Quanto às emissões estacionárias terem sido subestimadas no cálculo, é importante ressaltar que os respiros de tanque normalmente são equipados com válvulas de alívio de pressão e quebra de vácuo. Estes equipamentos são desenhados para liberar o fluxo de ar quando este apresenta uma pressão acima ou abaixo do estabelecido (U.S.EPA, 2006a). O acoplamento de um compressor pode reduzir o efeito da válvula de pressão, fazendo com esta libere os gases do tanque a uma pressão menor do que a originalmente estabelecida. Caso esta alteração da pressão da válvula de alívio não tenha sido retratada nos cálculos do AP 42, estes podem acabar por subestimar as emissões. De qualquer forma, ao somar as perdas estacionárias e de trabalho e comparar as emissões totais medidas e estimadas a diferença é reduzida a 10%, que é um valor aceitável para a validação de um método de estimativa de emissões (SHINE, 2007). Provavelmente, boa parte desta assertividade se deveu à longa duração do teste (um ano de informações) e à utilização de dados de movimentação de produto e meteorológicos instantâneos (horários) ao invés de médias anuais.

Com relação aos estudos de monitoramento indireto, o CONCAWE em 1995 aponta uma razoável correlação entre os dados estimados e medidos com o DIAL, sendo os últimos 10% superiores. O cálculo de emissões foi feito através das equações do AP 42 para o período do estudo (90 horas) ao invés de serem anualizados os resultados da medição. Esta forma parece mais adequada pois não assume como padrão anual as condições verificadas no teste e pode explicar porque este trabalho apresenta uma melhor correlação.

O monitoramento realizado por Chambers et al. (2008) também com a técnica DIAL obteve valores de hidrocarbonetos 33 vezes maiores do que os COVs calculados a partir do *software* TANKS. A comparação foi realizada multiplicando o valor obtido no monitoramento de 10 dias pelo tempo para obter valores anuais. Como as características das emissões durante o monitoramento eram específicas para o momento do teste (movimentação, produto, condições meteorológicas) os valores obtidos em um período curto de tempo não podem ser extrapolados.

A propagação de erros é grande pois não há garantia de que aquele curto período foi representativo das condições durante o ano.

Não foram apresentadas no estudo informações sobre o estado de conservação dos tanques monitorados e nem informações se as fontes de emissões a barlavento estavam sendo adequadamente contabilizadas e deduzidas dos valores obtidos pelo equipamento.

Wu et al. (2014) monitoraram as emissões de tanques por 14 dias utilizando FTIR. Os resultados foram comparados a estimativas do AP 42. Cabem algumas considerações similares aos estudos que utilizaram o DIAL. O próprio trabalho aponta como uma limitação não haver equipamento montado a barlavento dos tanques. Outras fontes podem estar contribuindo para valores mais elevados de *background*. Não foram apresentadas informações sobre o estado de conservação dos tanques monitorados. As emissões foram estimadas para todo um trimestre e uma taxa de emissão calculada em gramas por segundo foi comparada com a taxa de emissão média dos 14 dias do teste. Segundo Coburn e Icenhour (2008 apud U.S.EPA, 2015), taxas de emissão horárias estimadas sob certas condições (altas temperaturas e fortes ventos) podem ser de cinco a dez vezes maiores do que taxas calculadas com base em períodos anuais.

Avaliando os resultados da pesquisa foi possível perceber que há poucas publicações científicas sobre a quantificação de emissões de tanques e a comparação de resultados medidos com estimados. Não foram identificados trabalhos que estimam emissões a partir da utilização de fatores de emissão.

A medição direta contínua das emissões, se realizada adequadamente, é o método de quantificação mais adequado. No entanto, ela nem sempre é tecnicamente possível e a complexidade pode levar a custos elevados (CONCAWE, 1995). Sendo assim, é necessária a utilização de métodos alternativos de quantificação.

Métodos indiretos de quantificação como o FTIR e o DIAL foram validados em testes controlados. Entretanto, a medição em condições reais requer um grande controle para a redução de incertezas associadas quando há, por exemplo, grande variação da intensidade e da direção do vento. Além da quantificação das emissões das fontes de interesse é necessário quantificar outros possíveis contribuintes (idealmente com diversos aparelhos similares operando simultaneamente no entorno) para permitir a delimitação da concentração de *background*. Além disso, estes testes normalmente são realizados em campanhas, por períodos curtos, e podem não fornecer informações suficientes para a quantificação das emissões fora das condições de contorno em que o teste foi realizado. Para um conhecimento adequado das emissões de determinado(s) tanque(s) eles deveriam ser repetidos diversas vezes sob diversas condições de operação e meteorológicas.

Os documentos publicados pela U.S.EPA estão de acordo que pode haver fragilidades nos protocolos de cálculo ou certos aspectos que podem não estar sendo idealmente representados. No entanto, no entendimento deste órgão nenhum dos testes levantados apresenta comprovação de que os protocolos do AP 42 subestimam as emissões. Os trabalhos comparativos não apresentam detalhamento suficiente que permita uma confirmação de que as estimativas estavam sendo realizadas de forma adequada.

O monitoramento direto realizado por Lu et al. (2013) e o trabalho realizado pelo CONCAWE (1995) com DIAL encontraram valores 10% acima das estimativas realizadas com o AP 42. Ambos os trabalhos adaptaram os cálculos para intervalos de tempo pequenos (1 hora e 15 minutos, respectivamente), o que permite uma boa caracterização da realidade no modelo e é um provável grande contribuinte para a proximidade dos valores.

O trabalho realizado por Miller Junior (2012) reforça a necessidade de utilização de dados específicos de cada tanque como a pressão de vapor do produto armazenado, a quantidade de acessórios e a temperatura do líquido e aponta grandes diferenças de emissões quando da utilização de dados-padrão do *software* TANKS. Este trabalho aponta também a importância de se obter dados completos de curvas de pressão, uma vez que as do *software* TANKS estão limitadas em 40 °F e 100 °F e emissões podem ser significativamente maiores em temperaturas mais elevadas.

Um relatório elaborado pela empresa RTI INTERNATIONAL para a U.S.EPA (2015) acerca dos protocolos de cálculo para estimativas de emissões em refinarias aponta que o *software* TANKS tem uma fragilidade ao não permitir o cálculo adequado de emissões mensais pois utiliza como base a média anual da temperatura da superfície do líquido.

Apesar de o *software* TANKS ser largamente utilizado, as equações do capítulo 7 do AP 42 se mostram como a ferramenta mais adequada para a estimativa de emissões de hidrocarbonetos em tanques de armazenamento (RTI INTERNATIONAL, 2015).

2.3 Inventários de emissões

Um inventário de emissões é um agrupamento de dados ou previsões de emissões de poluentes atmosféricos que abrangem uma área geográfica específica e um período de tempo (U.S.EPA, 2004).

Os inventários podem ser diferentes a depender do objetivo a que se pretendem. No âmbito empresarial, os inventários de emissões podem subsidiar estratégias de redução de emissões e apontar as fontes mais significativas para atuação. É possível também que eles

forneçam informações para estudos de risco, inclusive à saúde humana e permitam a quantificação do impacto ambiental e a previsão de concentrações ambientais de determinado poluente através da utilização de modelos de dispersão atmosférica. No âmbito governamental e dos órgãos de controle os inventários de emissões também podem ser a base para avaliação da efetividade de políticas de controle ou redução da poluição e também determinar o cumprimento de regulamentos relacionados a emissões ou definir linha de base para o planejamento de políticas governamentais. Os inventários também auxiliam na identificação de fontes e determinação de níveis de emissões médios, padrões e tendências para o desenvolvimento de estratégias de controle e novos regulamentos (U.S.EPA, 2004).

Inventários de emissão completos e precisos são a base fundamental para políticas públicas sólidas e eficazes. Inventários com dados incompletos ou errados podem levar a políticas públicas falhas e o desperdício de dinheiro público e privado, além do potencial impacto ao meio ambiente (U.S.EPA, 2004).

Para a elaboração de um inventário de emissões deve ser definido seu escopo, ou seja, quais poluentes irá contemplar, quais fontes irá conter, bem como o período temporal considerado (U.S.EPA, 2004).

Um inventário completo deve conter, minimamente, informações de *background* que determinam a necessidade de inventário, as estimativas de emissões, a área geográfica abrangida, o período de tempo, os poluentes considerados, detalhamento de como as emissões foram estimadas/calculadas e a identificação das fontes não incluídas (U.S.EPA, 2004).

Os procedimentos de alimentação do inventário e verificação/garantia da qualidade devem ser estabelecidos desde o início de sua elaboração. Como um inventário de emissões envolve uma quantidade grande de informações, é importante garantir o adequado registro, acesso e *backup* dos dados, bem como os procedimentos de alimentação. Devem ser dimensionados os esforços, tempo e recursos humanos, tecnológicos e financeiros para elaboração e manutenção do inventário (U.S.EPA, 2004).

A etapa principal do desenvolvimento de inventários de emissões é a coleta de dados e estimativa de emissões. Para que um inventário contenha emissões confiáveis, é fundamental garantir que as técnicas de cálculo selecionadas sejam adequadas e que a melhor informação disponível seja utilizada. A manutenção de um inventário de emissões deve contar com procedimentos que garantam a rastreabilidade e o controle das informações (U.S.EPA, 2004).

2.3.1 Tipos de inventário

Basicamente há duas abordagens para a elaboração de inventários de emissão: a abordagem *top-down* e a *bottom-up*.

Um inventário *top-down* é aquele que utiliza como base informações agregadas (nacionais, estaduais ou locais). Estas informações são relacionadas com um fator de atividade de forma a possibilitar a estimativa das emissões. Inventários que abrangem áreas muito grandes como um país, por exemplo, tendem a utilizar estas técnicas e os fatores de emissão são relacionados a informações agregadas como número de habitantes, energia gerada ou consumo de combustíveis. Unidades industriais também podem elaborar inventários *top-down* utilizando fatores de emissões que tenham como fator de atividade uma informação agregada como a quantidade utilizada de matéria-prima ou produto gerado. Se por um lado este tipo de inventário requer informações mais simples para a elaboração, por outro tem usos mais limitados, uma vez que não fornece um detalhamento por fonte, e por isso tem um erro associado maior (U.S.EPA, 2004).

Inventários *bottom-up* são aqueles onde as emissões são estimadas por fonte e posteriormente agregadas para compor um inventário de uma indústria ou uma região administrativa como uma cidade, estado ou país. Apesar de gerar informações mais precisas, inventários com esta abordagem exigem um nível de detalhamento muito maior (U.S.EPA, 2004).

2.3.2 Emissões a serem inventariadas

Independente da abordagem selecionada, diferentes critérios podem ser utilizados para estabelecer quais emissões devem ser inventariadas a depender, principalmente, do objetivo do inventário e dos dados disponíveis:

- Emissões reais – Estas emissões devem ser calculadas com dados reais do processo, qualidade e quantidade de combustíveis utilizados (quando aplicável), bem como as horas de operação, no caso de uma unidade industrial (U.S.EPA, 2004).
- Emissões permitidas – Inventários podem também utilizar como base a taxa máxima de emissões permitida para cada fonte. Esta abordagem é útil para a avaliação de impactos na qualidade do ar de novos empreendimentos pois permite avaliar se mesmo com o atendimento de todos os limites de emissão há cumprimento dos padrões de qualidade do ar (U.S.EPA, 2004).

- Emissões potenciais – Um inventário pode considerar também as emissões máximas de cada fonte após aplicação das medidas de controle. Este tipo de inventário é útil como suporte à definição de limites de emissões e em análises de risco (U.S.EPA, 2004).

2.4 Modelagem de dispersão atmosférica

2.4.1 Dispersão atmosférica

O movimento do ar na atmosfera é influenciado por diversas forças e a superfície da Terra exerce um papel fundamental em boa parte delas. A topografia e o tipo de cobertura da superfície criam atrito à passagem do ar, gerando turbulência. Processos como o aquecimento solar e a evapotranspiração criam movimentos convectivos e instabilidade na atmosfera diurna. A influência da superfície terrestre no movimento da massa de ar acima dela decai com a altitude. A camada da atmosfera que está sob a influência da interação com superfície terrestre é denominada camada limite planetária (CLP). É nesta camada onde ocorre a dispersão dos poluentes (U.S.EPA, 2014).

A interação entre as emissões e os fenômenos atmosféricos pode ser parametrizada e prevista através de modelos de dispersão. Os modelos de dispersão atmosférica utilizam dados meteorológicos, topográficos e de cobertura da superfície para estimar a altura da camada limite e outros fenômenos como a estabilidade atmosférica e a turbulência para simular a mistura e a dispersão de poluentes atmosféricos, prevendo a qualidade do ar ambiente (U.S.EPA, 2014).

2.4.2 Modelos de dispersão

Do ponto de vista de mecânica dos fluidos, os modelos de dispersão podem ser eulerianos ou lagrangeanos. Modelos eulerianos avaliam a conservação de massa em um compartimento fixo da atmosfera. Já os lagrangeanos acompanham a trajetória das partículas do fluido (GOMES; BIASUTTI, 2012).

Uma subclasse destes dois tipos de modelos pode ser representada pelo modelo gaussiano (VICENTINI, 2011). Atualmente, os modelos de dispersão mais utilizados adotam o conceito de distribuição gaussiana de pluma. Isto significa que cada seção transversal da pluma tem uma distribuição normal de concentração do poluente. Os coeficientes de dispersão horizontal e vertical equivalem ao desvio padrão da concentração do poluente na curva de distribuição gaussiana (U.S.EPA, 2014).

Modelos gaussianos adotam como premissa plumas contínuas e com taxas de emissão, onde a direção e a velocidade do vento são constantes. Outra premissa deste modelo é a conservação de massa, sendo assim, quando pluma toca uma superfície ela deve ser “rebatida” (U.S.EPA, 2014).

2.4.3 O AERMOD

Por terem uma interface simples e métodos numéricos mais simplificados, modelos de pluma gaussiana são amplamente utilizados na previsão de concentrações ambientais de poluentes, principalmente ao nível do solo (ARYA, 1999 apud VICENTINI, 2011).

O AERMOD (*AMS/EPA Regulatory Model*) é um modelo de dispersão atmosférica desenvolvido a partir de uma parceria entre o AMS (*American Meteorological Service*) e a U.S.EPA. Ele foi lançado em 2005 e desde o fim de 2006 é o modelo regulatório determinado pelo órgão ambiental americano para a avaliação de impactos ambientais a uma distância de até 50 quilômetros (U.S.EPA, 2014).

O AERMOD trouxe diversas melhorias em comparação com o modelo utilizado anteriormente, o ISC (*Industrial Source Complex*), dentre elas: dispersão sob condições de estabilidade e convectivas, levantamento de pluma e empuxo e consideração de perfis verticais de vento, turbulência e temperatura (U.S.EPA, 2014).

De forma a permitir a previsão da qualidade do ar e a interação das emissões com o ambiente, o sistema de modelagem do AERMOD é composto por 3 componentes primários:

- AERMAP – pré-processador de terreno
- AERMET – pré-processador meteorológico
- AERMOD – modelo de dispersão

O AERMET lê, extrai e mescla dados meteorológicos de múltiplas fontes e arquivos de diferentes formatos para calcular os parâmetros da camada limite requeridos pelo AERMOD. O AERMET necessita que sejam inseridos dados representativos da superfície e uso do solo dos locais onde os dados meteorológicos foram coletados (U.S.EPA, 2014).

O AERMAP pré-processa os dados de entrada do terreno para formatos que o AERMOD possa receber a informação, de forma a considerar a elevação do terreno e sua interação com a pluma do poluente (U.S.EPA, 2014).

Em suma, o AERMOD utiliza dados meteorológicos do AERMET, de terreno do AERMAP e dados das fontes de emissão para calcular concentrações horárias em pontos de grade e receptores sensíveis para todo o período de dados informados. O modelo foi desenhado

para permitir a comparação dos resultados com os padrões de qualidade do ar tanto de curto prazo quanto de longo prazo.

O modelo fornece como resposta a concentração mais elevada do poluente no ar dentro do espaço definido e para o período de tempo considerado, formando curvas de isolinhas de concentração.

Diferentes poluentes podem ter sua dispersão modelada através do AERMOD. É possível realizar a modelagem normal ou considerar situações específicas como as deposições seca e úmida do dióxido de enxofre (SO_2) ou o abatimento da concentração de dióxido de nitrogênio (NO_2) devido reação de fotodissociação.

3. METODOLOGIA

3.1 Uso do AP 42 para estimativa de emissões de COVs em tanques de armazenamento

Considerando as equações do capítulo 7 do AP 42 o método mais adequado para a estimativa de emissões de COVs em tanques de armazenamento, deve-se avaliar como utilizar tal ferramenta, uma vez que a grande diversidade de parâmetros de entrada e variáveis associadas possibilita resultados diversos a depender das premissas adotadas.

O primeiro passo para a utilização da ferramenta é a elaboração de planilhas ou programas que contenham as equações. Os cálculos são complexos e utilização manual, além de muito trabalhosa, pode levar a erros. Este trabalho seguiu um conjunto de orientações sobre como utilizar as equações, de forma que os cálculos sejam representativos da realidade:

1. Cada tanque foi simulado individualmente. Tanques somente devem ser modelados em conjunto se tiverem características, produtos e movimentação idênticos, conforme indicador no documento *Emission Estimation Protocols for Petroleum Refineries* (RTI INTERNATIONAL, 2015).
2. Utilização de dados reais de pressão de vapor do produto armazenado e acessórios dos tanques de cobertura flutuante, conforme indicado por Miller Junior (2012).
3. Uso da base mensal para os dados meteorológicos e de movimentação (RTI INTERNATIONAL, 2015).
4. Uso de dados meteorológicos específicos do ano considerado (RTI INTERNATIONAL, 2015).
5. Tanques aquecidos tiveram a temperatura da superfície do líquido considerada no cálculo, conforme indicado por Anker e Ferry (2014).

Como as equações foram desenvolvidas para fornecer estimativas em base de tempo anual (U.S.EPA, 2006a), foram ajustados para a escala de tempo mensal os fatores de perda dos acessórios de tanques de cobertura flutuante (originalmente lb-mol ano^{-1}) e a constante de perdas estacionárias para tanques de teto fixo (originalmente $365 \text{ dias ano}^{-1}$).

3.2 Desenho do experimento

Para o atendimento aos objetivos do estudo e verificação do comportamento das ferramentas foram simuladas emissões assumindo diferentes premissas e comparando os

resultados. Em seguida foram feitas modelagens de dispersão das emissões com o objetivo de avaliar o impacto da variação das estimativas na qualidade do ar.

Foi criado um parque de tancagem hipotético e heterogêneo com características arbitradas de forma a atender aos objetivos do estudo. As emissões deste parque foram estimadas e modeladas para o ano completo de 2015 para permitir a avaliação da variação dos resultados de emissões para três diferentes cenários:

- Cenário-base equações
- Cenário-base TANKS
- Cenário TANKS padrão

No cenário-base equações as emissões foram estimadas a partir dos dados detalhados a seguir e utilizando as equações do capítulo 7 do AP 42. Para a utilização das equações foram construídas planilhas eletrônicas em Microsoft Excel 2013 para cada tipo de tanque.

O cenário-base TANKS foi composto pela aplicação das características a seguir no *software* TANKS. Já no cenário TANKS padrão foram utilizados os dados de entrada detalhados com informações-padrão do TANKS relativas a características do produto armazenado e detalhamento de acessórios.

Para todos os cenários foram realizados os cálculos nas bases mensal e anual, totalizando seis diferentes simulações para cada tanque. Os cálculos mensais foram somados para a comparação dos resultados anuais.

O cenário de referência é o cenário-base equações na base mensal, uma vez que esta foi definida como a estimativa com maior acurácia pela revisão bibliográfica, conforme apresentado no item 2.2.4. As demais simulações foram comparadas com o cenário de referência.

Após a realização e análise das seis simulações, os resultados de emissões foram inseridos no AERMOD *View*[®], um *software* da empresa *Lakes Environmental* que apresenta as equações do AERMOD em uma interface gráfica mais simples, para a realização modelo de dispersão atmosférica. Assim como nas simulações, serão comparadas as saídas de resultados qualidade do ar e plumas de dispersão dos diversos cenários com as do cenário de referência.

No âmbito deste trabalho, a ferramenta de dispersão atmosférica não será utilizada para a avaliação absoluta dos resultados na qualidade do ar ou comparação com a legislação. O objetivo é avaliar as respostas do modelo frente aos diferentes métodos de simulação das emissões. Apesar de os poluentes de interesse serem os compostos orgânicos voláteis, não é necessário um modelo que considere reações fotoquímicas. Sendo assim, para a realização das

modelagens de dispersão atmosférica foi selecionado um modelo comercial amplamente utilizado e adequado à gases, o AERMOD.

Os itens a seguir detalham os dados de entrada da estimativa de emissões e do modelo de dispersão.

3.2.1 Caracterização dos dados de entrada das estimativas

3.2.1.1 Produto armazenado

Foram considerados os quatro produtos mais comumente encontrados em tanques de armazenamento de refinarias: petróleo, diesel, gasolina e óleo combustível. Na Tabela 6 são apresentadas as características destes produtos necessárias ao cálculo de emissões.

Tabela 6 – Dados dos produtos necessários ao cálculo de emissões de COVs

Produto	Petróleo	Diesel	Gasolina	Óleo combustível	
PMV a 60 °F (lb/lb-mol)	38,86	161,11	64,43	492,86	
ME a 60 °F (lb/gal)	7,45	7,04	6,09	7,37	
Curva de pressão de vapor (psi)	40 °F	2,505623765	0,008957197	3,564789234	6,49245x10 ⁻¹⁰
	50 °F	3,005781833	0,012723585	4,341000846	1,06402x10 ⁻⁹
	60 °F	3,605778551	0,018073691	5,286227911	1,74378x10 ⁻⁹
	70 °F	4,325543129	0,025673449	6,437272536	2,85781x10 ⁻⁹
	80 °F	5,188982934	0,036468809	7,838950269	4,68354x10 ⁻⁹
	90 °F	6,22477758	0,051803482	9,545834976	7,67566x10 ⁻⁹
	100 °F	7,467331539	0,073586189	11,62438366	1,25793x10 ⁻⁸

PMV – Peso molecular da fase vapor

ME – Massa específica

As características dos produtos foram obtidas a partir de dados de uma empresa brasileira de petróleo. Foram utilizados os produtos mais representativos dentre os produzidos em diversas refinarias e poços de petróleo. Os dados do diesel são referentes ao diesel metropolitano. O óleo combustível selecionado é o OC-7A. A gasolina é representada pela Gasolina A produzida no Rio de Janeiro e o petróleo é o Espadarte.

3.2.1.2 Movimentação

Foi arbitrada uma movimentação que varia mensalmente para que assim possa ser analisado o impacto desta variável. A Tabela 7 apresenta a movimentação mensal de produto para cada tanque que foi utilizado.

Tabela 7 – Movimentação mensal de produtos nos tanques

Mês	Movimentação mensal (bbl)
Janeiro	150.000
Fevereiro	150.000
Março	120.000
Abril	120.000
Maio	100.000
Junho	100.000
Julho	80.000
Agosto	80.000
Setembro	120.000
Outubro	120.000
Novembro	150.000
Dezembro	150.000
Anual	1.440.000

3.2.1.3 Dados meteorológicos

Dados meteorológicos consistentes são fundamentais para boas estimativas de emissões atmosféricas em tanques de armazenamento. Sendo assim, a escolha do local para o experimento foi feita com base da disponibilidade de dados meteorológicos robustos na cidade do Rio de Janeiro.

Em 22 de setembro de 2016 o Instituto Estadual do Ambiente (INEA) lançou um portal onde disponibiliza dados das estações de qualidade do ar dos últimos 10 anos (<http://200.20.53.7/qualiar/home/index>). São dados meteorológicos e de qualidade do ar validados pelo órgão ambiental.

Para a simulação de emissões em tanques de armazenamento foram utilizados os dados meteorológicos abaixo, como já apresentado no item 2.2.3:

- Temperatura
- Fator de irradiância solar
- Velocidade do vento

- Pressão atmosférica

Em consulta a dados meteorológicos do ano completo mais recente (2015) realizada em 24 de setembro de 2016, a estação que dispunha da maior quantidade de dados foi a Lourenço Jorge, localizada no hospital de mesmo nome, na Barra da Tijuca, bairro da cidade do Rio de Janeiro. Ainda assim, essa estação não contava com dados válidos de pressão atmosférica. Próximo a esta estação de monitoramento da qualidade do ar (EMQAr) está localizado também o Aeroporto Roberto Marinho (antigo Aeroporto de Jacarepaguá). Aeroportos contam com o monitoramento de variáveis meteorológicas essenciais ao funcionamento da malha aérea, sendo uma delas a pressão atmosférica. Sendo assim, foram coletados estes dados referentes ao ano de 2015 para utilização na simulação. Dados meteorológicos de aeroportos estão disponíveis para download no portal do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) mediante cadastro gratuito. A consulta ao banco de dados (<http://bancodedados.cptec.inpe.br/downloadBDM/>) foi realizada em 24 de setembro de 2016. A Figura 23 apresenta a localização da EMQAr Lourenço Jorge (marcador amarelo) e Aeroporto Roberto Marinho (marcador verde), que distam cerca de 1 quilômetro. É apresentada também, em azul, a área de localização dos tanques. O ponto central entre os tanques está localizado a cerca de 1 quilômetro da estação meteorológica do aeroporto e a 1,3 quilômetros da EMQAr Lourenço Jorge.

Tanto a estação meteorológica do aeroporto quanto a estação de monitoramento da qualidade do ar Lourenço Jorge fornecem dados em base horária. Para a simulação das emissões foi realizado o agrupamento temporal para as bases mensal e anual das diferentes variáveis meteorológicas, as quais são apresentadas na Tabela 8. Para a temperatura foram obtidos os valores de máxima e mínima diários necessários às equações e a realização da média destes valores para a temperatura média. O fator de irradiância solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) foi obtido a partir da conversão de unidades dos valores de radiação solar (W m^{-2}) e realizada a média dos valores horários incluindo os zeros noturnos. Para a velocidade média do vento e pressão atmosférica foram realizadas as médias dos valores horários.

Figura 23 – Localização dos seis tanques propostos (dentro da área em azul) e locais de coleta dos dados meteorológicos utilizados (pontos verde e amarelo)



Fonte: Google Maps, 2016

Tabela 8 – Dados meteorológicos compilados para uso nos modelos de simulação das emissões

Período		Dados meteorológicos				
Ano	Mês	Temperatura ambiente - máxima diária (°C)	Temperatura ambiente - mínima diária (°C)	Fator de irradiância solar diária (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	Velocidade média do vento (m s ⁻¹)	Pressão atmosférica (hPa)
2015	jan	33,9	26,8	25,64	1,8	1.012,5
	fev	32,8	26,0	21,51	1,6	1.011,8
	mar	30,4	24,8	16,80	1,4	1.002,0
	abr	29,7	23,6	16,61	1,5	1.012,9
	maio	27,8	21,6	14,22	1,3	1.017,7
	jun	27,9	20,6	12,36	1,4	1.020,4
	jul	28,0	21,2	14,28	1,2	1.018,8
	ago	28,6	20,6	12,93	1,3	1.018,7
	set	28,9	22,1	14,02	1,5	1.014,6
	out	29,7	23,1	17,17	1,7	1.015,3
	nov	29,7	24,1	14,84	1,5	1.011,6
	dez	33,0	25,6	16,87	1,7	1.011,9
	média	30,0	23,3	16,44	1,5	1.014,0

Fonte: Adaptado de INEA, 2016 e INPE, 2016.

3.2.1.4 Características físicas dos tanques

Para compor os cenários de simulação foram arbitradas as características de seis tanques de armazenamento, conforme os dados de entrada necessários, detalhados no item 2.2.3.1 As Tabelas 9, 10, 11 e 12 apresentam o detalhamento das características físicas dos tanques, bem como a quantidade e tipo dos acessórios dos tanques de cobertura flutuante.

Tabela 9 – Características físicas dos tanques de armazenamento

Tanque	Cobertura	Cor	Produto	Altura	Diâmetro	Observação
Tanque 1	Teto fixo	Branco	Diesel	15 m	50 m	Altura média do líquido: 10,5 m
Tanque 2	Teto fixo	Branco	Óleo combustível	15 m	50 m	Altura média do líquido: 10,5 m Aquecido a 80 (±5) °C
Tanque 3	Teto flutuante externo	Branco	Petróleo	15 m	50 m	
Tanque 4	Teto fixo com selo flutuante interno	Branco	Petróleo	15 m	50 m	
Tanque 5	Teto flutuante externo	Branco	Gasolina	15 m	50 m	
Tanque 6	Teto fixo com selo flutuante interno	Branco	Gasolina	15 m	50 m	

Tabela 10 – Detalhes construtivos de tanques de cobertura flutuante

Detalhes construtivos dos tanques de cobertura flutuante	
Condição interna do costado	Levemente áspero (<i>light rust</i>)
Tipo de teto	Pontão
Construção do deque	Soldado
Selo primário	Apoiado sobre o vapor (<i>vapor-mounted</i>)
Selo secundário	Nenhum
Teto autoportante	Não
Diâmetro das colunas	Desconhecido

Tabela 11 – Detalhes dos acessórios dos tanques de teto fixo com selo flutuante interno

Acessório	Teto fixo com selo flutuante interno			
	Tanque real		Padrão AP 42	
	Tipo	N	Tipo	N
Boca de visita (<i>access hatch</i>)	Tampa não aparafusada e sem vedação (<i>Unbolted cover, ungasketed</i>)	1	Tampa não aparafusada e sem vedação (<i>Unbolted cover, ungasketed</i>)	1
Nível de boia (<i>gauge-float</i>)	Tampa não aparafusada e sem vedação (<i>Unbolted cover, ungasketed</i>)	1	Tampa não aparafusada e sem vedação (<i>Unbolted cover, ungasketed</i>)	1
Ponto de amostragem (<i>gauge-hatch/sample ports</i>)	Selo de tecido com 10% de área aberta (<i>Slit fabric seal, 10% open area</i>)	1	Selo de tecido com 10% de área aberta (<i>Slit fabric seal, 10% open area</i>)	1
Pernas do deque (<i>deck legs</i>)	Ajustável (<i>Adjustable</i>)	80	Ajustável (<i>Adjustable</i>)	67

Colunas (<i>columns</i>)	Coluna embutida, cobertura deslizante sem vedação (<i>Built-up column, ungasketed sliding cover</i>)	20	Coluna embutida, cobertura deslizante sem vedação (<i>Built-up column, ungasketed sliding cover</i>)	16
Escadas de acesso (<i>ladder wells</i>)	Cobertura deslizante sem vedação (<i>Sliding cover, ungasketed</i>)	1	Cobertura deslizante sem vedação (<i>Sliding cover, ungasketed</i>)	1
Válvulas de quebra vácuo (<i>vacuum breaker</i>)	Atuação mecânica com vedação (<i>Weighted mechanical actuation, gasketed</i>)	1	Atuação mecânica com vedação (<i>Weighted mechanical actuation, gasketed</i>)	1

Tabela 12 – Detalhes dos acessórios dos tanques de teto flutuante externo

Acessório	Teto flutuante externo			
	Tanque real		Padrão AP 42	
	Tipo	N	Tipo	N
Boca de visita (<i>access hatch</i>)	Tampa não aparafusada e sem vedação (<i>Unbolted cover, ungasketed</i>)	1	Tampa aparafusada e com vedação (<i>Bolted cover, gasketed</i>)	1
Nível de boia (<i>gauge-float</i>)	Tampa não aparafusada e sem vedação (<i>Unbolted cover, ungasketed</i>)	1	Tampa não aparafusada e sem vedação (<i>Unbolted cover, ungasketed</i>)	1
Ponto de amostragem (<i>gauge-hatch/sample ports</i>)	Atuação mecânica sem vedação (<i>Weighted mechanical actuation ungasketed</i>)	1	Atuação mecânica com vedação (<i>Weighted mechanical actuation gasketed</i>)	1
Pernas do deque (<i>deck legs</i>)	Área do pontão: Ajustável sem vedação (<i>Adjustable, ungasketed</i>)	30	Área do pontão: Ajustável sem vedação (<i>Adjustable, ungasketed</i>)	26
	Área do centro: Ajustável sem vedação (<i>Adjustable, ungasketed</i>)	50	Área do centro: Ajustável sem vedação (<i>Adjustable, ungasketed</i>)	42
Guias (<i>unslotted guidepoles</i>)	Cobertura deslizante sem vedação (<i>Ungasketed sliding cover</i>)	1	Cobertura deslizante sem vedação (<i>Ungasketed sliding cover</i>)	1
Válvulas de quebra vácuo (<i>vacuum breaker</i>)	Atuação mecânica com vedação (<i>Weighted mechanical actuation gasketed</i>)	4	Atuação mecânica com vedação (<i>Weighted mechanical actuation gasketed</i>)	2

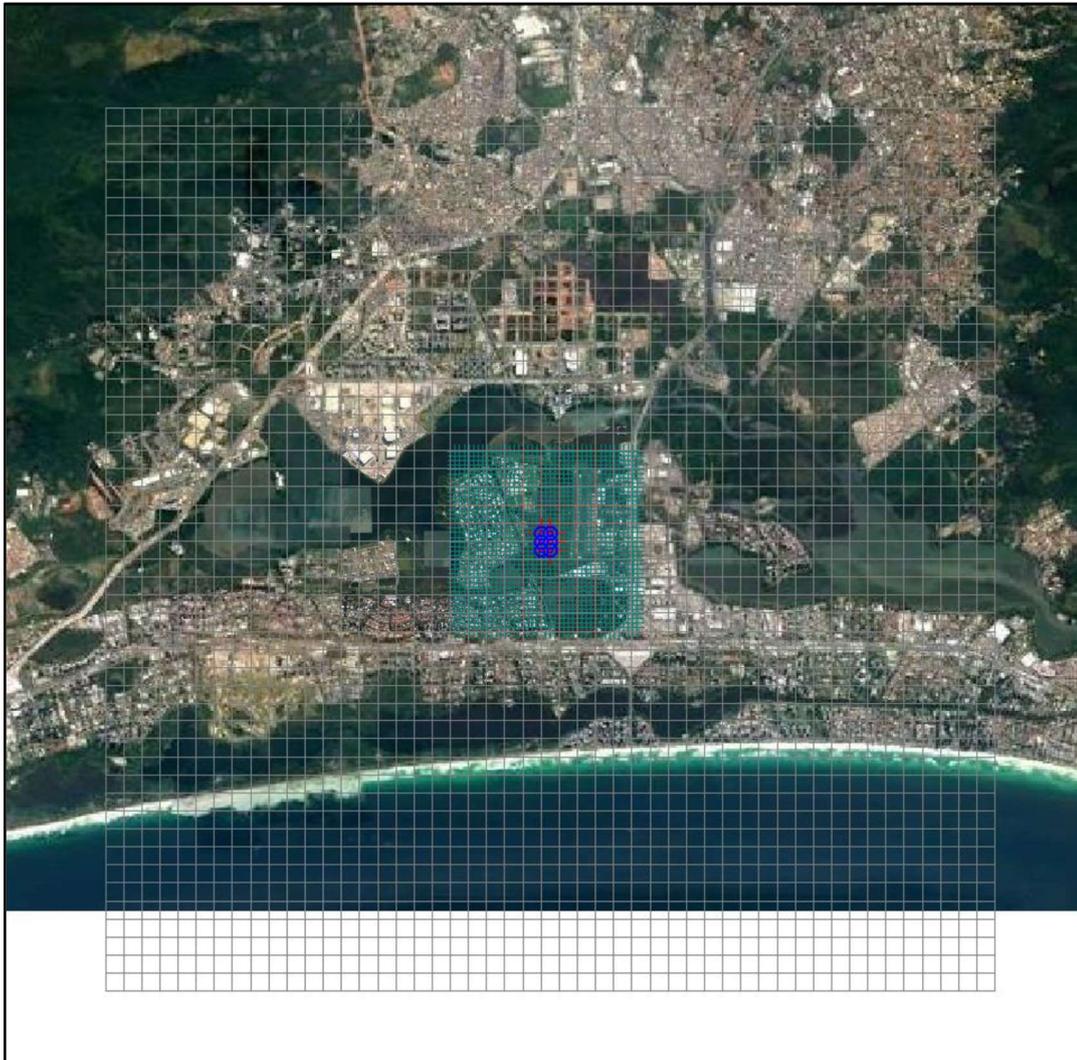
Nas tabelas 11 e 12, as colunas de “tanque real” contém as características e as quantidades arbitradas para os tanques da simulação e utilizadas no “cenário-base equações” e “cenário-base TANKS”. As colunas “padrão AP 42” correspondem às características e quantidades padrão dos acessórios segundo o capítulo 7 do AP 42 e foram utilizadas no “cenário TANKS padrão”.

3.2.2 Caracterização dos dados de entrada da modelagem de dispersão

3.2.2.1 Domínio da modelagem

O domínio (*grid*) escolhido para a modelagem foi uniforme cartesiano, definido como um quadrado centrado no tanque 6, com 50 pontos de lado com espaçamento de 200 metros entre eles, totalizando 9.800 metros. De forma a permitir o refinamento do resultado, no centro do quadrado maior foi criado outro com 1.000 metros de lado e 50 metros de espaçamento. A Figura 24 apresenta as fontes de emissão e o domínio da modelagem com o detalhamento da grade.

Figura 24 – Domínio definido para a realização da modelagem de dispersão atmosférica



Os dados do terreno foram obtidos diretamente a partir do AERMOD *View*[®] através da plataforma WebGIS, que é integrada ao *software*.

Os resultados de máxima horária e anual dos cenários foram comparados com o cenário de referência para a avaliar sua variação.

Para que os resultados fossem apresentados de forma similar, as plumas da simulação das máximas concentrações horárias de todos os cenários foram configuradas igualmente:

- Curva de menor concentração: $100 \mu\text{g m}^{-3}$
- Curva com a segunda menor concentração: $200 \mu\text{g m}^{-3}$
- Curvas seguintes com incremento de $200 \mu\text{g m}^{-3}$

Assim como na criação das plumas das máximas concentrações horárias, para as concentrações anuais também foram definidas algumas configurações para a apresentação similar:

- Curva de menor concentração: $5 \mu\text{g m}^{-3}$
- Curva com a segunda menor concentração: $50 \mu\text{g m}^{-3}$
- Curvas seguintes com incremento de $40 \mu\text{g m}^{-3}$

3.2.2.2 Fontes de emissão

Assim como a quantidade e as características, a localização dos tanques também é hipotética e foi arbitrada. Eles foram localizados próximos às estações meteorológicas utilizadas para obtenção dos dados (Aeroporto Roberto Marinho e Hospital Lourenço Jorge), de forma que seus dados fossem representativos da região, como pode ser observado na Figura 23. A Tabela 13 apresenta as coordenadas do centro dos 6 tanques de armazenamento previstos.

Tabela 13 – Coordenadas dos tanques

Tanque	Zona UTM 23 K	
	Leste (m)	Sul (m)
Tanque 1	666444	7456810
Tanque 2	666536	7456810
Tanque 3	666444	7456718
Tanque 4	666536	7456718
Tanque 5	666444	7456626
Tanque 6	666536	7456626

O AERMOD permite a representação de fontes pontuais, área e volume. Tanques de teto fixo apresentam apenas um ponto para a liberação das emissões, a válvula de alívio de pressão/vácuo. Conforme apresentado na Figura 5, esta válvula normalmente se localiza no centro do teto, permitindo sua caracterização no modelo como uma fonte pontual de altura fixa.

Em tanques de teto flutuante externo as emissões ocorrem por uma área maior. As emissões pelo selo do aro acontecem no perímetro do teto. As perdas de movimentação

acontecem pela parte interna do costado e têm área variável, de acordo com a altura da cobertura. As perdas pelos acessórios se dão por toda a área do teto flutuante. Pela dificuldade de caracterizar tais detalhes no modelo e pouca representatividade destes detalhes perante o domínio da modelagem, o teto flutuante externo foi considerado como uma fonte área, na altura do costado.

As emissões de tanques de teto fixo com selo flutuante interno ocorrem pelas mesmas componentes que no teto flutuante externo, no entanto, para a liberação para a atmosfera foi considerada a liberação por um *vent* central no teto fixo. Desta forma, esta tipologia de tanque foi representada no modelo por um ponto central, assim como o teto fixo.

Fontes do tipo pontuais (tanques de teto fixo e selo flutuante interno) exigem a informação de velocidade de saída dos gases. Este dado é extremamente variável no caso da operação real de um tanque e não há informações que permitem estimá-lo. A Lakes (2010), empresa desenvolvedora do AERMOD *View*, recomenda que para tanques de armazenamento seja utilizado um valor baixo de velocidade de saída dos gases ($0,001 \text{ m s}^{-1}$), de forma a não representar elevação significativa da pluma. Sendo assim, este foi o valor considerado.

As taxas de emissão de compostos orgânicos voláteis inseridas no modelo de dispersão foram os resultados das simulações para os diferentes cenários nas bases mensal e anual. O AERMOD permite a inserção de apenas um valor de taxa de emissão do poluente por fonte no período considerado. Tanques não têm emissões constantes ao longo de um período de tempo uma vez que, estas são dependentes de fatores como a movimentação e variáveis meteorológicas.

Conforme já apresentado, o AERMOD apresenta como resultado o valor mais elevado de concentração para cada ponto do *grid* de domínio da modelagem. Sendo assim, caso o objetivo do trabalho fosse avaliar a condição mais desfavorável da operação do tanque, deveria ser calculada uma taxa de emissão máxima considerando movimentação e dados meteorológicos, como definido pelo documento *Emission Estimation Protocol for Petroleum Refineries* (RTI INTERNATIONAL, 2015). No entanto, como o objetivo desta avaliação é a comparação de diferentes métodos de estimativa de emissões, as diferentes componentes de perdas foram agrupadas e anualizadas, fornecendo um único valor médio de emissão por tanque e por cenário. As taxas de emissões utilizadas no modelo estão apresentadas no item 4.4.

A realização das estimativas gerou seis diferentes cenários, os quais foram os dados de entrada das fontes de emissões.

3.2.2.3 Dados meteorológicos

Como dados de entrada o modelo necessita de dados georreferenciados do terreno, dados das fontes e dados meteorológicos.

Os dados meteorológicos necessários são:

- Cobertura de nuvens
- Temperatura do ar
- Umidade relativa
- Pressão atmosférica
- Direção do vento
- Velocidade do vento
- Altura da base das nuvens

Os dados meteorológicos necessários ao modelo foram obtidos das mesmas fontes que os dados meteorológicos para a simulação das emissões, ou seja, da Estação de qualidade do ar Lourenço Jorge, operada pelo órgão ambiental fluminense e a Estação meteorológica do Aeroporto Roberto Marinho. Foram obtidos destas fontes dados horários do ano de 2015. As estações são complementares e quando havia dados do mesmo parâmetro em ambas foi priorizada a informação da Estação Lourenço Jorge.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Simulação das emissões do cenário-base equações

A inserção das características físicas, movimentação, produto e dados meteorológicos nas planilhas elaboradas permitiu o cálculo das emissões de COV para o ano considerado. Foram realizados cálculos anuais, considerando as médias e totalizações dos dados do ano e emissões mensais, considerando a movimentação e os dados meteorológicos de cada mês. São esperadas diferenças entre os resultados obtidos pelas duas formas de cálculo. Assim como adotado para as equações, foi mantida a unidade de medida dos resultados obtidos, a libra.

4.1.1 Resultados do tanque 1

Conforme apresentado no item 0, o tanque 1 representa o armazenamento de diesel em um tanque de teto fixo de 15 metros de altura com 50 metros de diâmetro. A Tabela 14 mostra os resultados de emissões obtidos com a simulação deste tanque utilizando as equações do AP 42.

Tabela 14 – Emissões do tanque 1 na simulação do cenário-base equações

Emissões anuais (libras)			
Ano	Estacionárias	Trabalho	Totais
	3.731,3	9.073,6	12.805,0
Emissões mensais (libras)			
Meses	Estacionárias	Trabalho	Totais
Janeiro	519,2	1.237,7	1.756,9
Fevereiro	390,7	1.145,7	1.536,4
Março	307,4	802,2	1.109,6
Abril	292,5	754,9	1.047,4
Maio	251,9	550,7	802,6
Junho	246,7	531,1	777,8
Julho	264,9	437,9	702,7
Agosto	281,1	435,4	716,6
Setembro	267,8	694,5	962,3
Outubro	316,3	744,8	1.061,1
Novembro	267,3	951,6	1.218,9
Dezembro	395,0	1.116,8	1.511,8
Total	3.800,9	9.403,2	13.204,1

4.1.1.1 Emissões estacionárias

Conforme já mencionado, as emissões estacionárias representam as emissões decorrentes do armazenamento e dependem dos dados meteorológicos e de características do produto. Sendo assim, as variações entre os meses verificadas na Tabela 14 são referentes

somente às mudanças de temperatura. Como o produto armazenado tem uma pressão de vapor menor que 0,1 psia, a pressão atmosférica não é um parâmetro que influencia no cálculo, conforme apresentado nas equações 4 e 6.

A grande variação mensal reforça a importância deste cálculo detalhado, uma vez que as emissões do junho corresponderam a menos da metade (52% menores) das de janeiro. Enquanto no primeiro mês do ano a temperatura máxima diária média foi de 33,9 °C e a mínima diária média de 26,8 °C, em junho estes valores foram de 27,9 °C e 20,6 °C respectivamente.

Como as equações apresentadas no item 2.2.3.1.1 podem demonstrar, as emissões dependem tanto dos valores absolutos de temperatura quanto da diferença entre as temperaturas máxima e mínima. Considerando isso, o mês de maio poderia ser apontado como o mês de menores emissões. No entanto, como foi considerada uma quantidade real de dias para cada mês baseado em um ano de 365 dias, maio apresenta emissões ligeiramente maiores que junho por ter um dia a mais.

Em comparação com o cálculo anual, o somatório das emissões estacionárias mensais foi 2% maior. É esperado que o cálculo mensal resulte em maiores emissões, uma vez que a realização de médias dos meses para o cálculo anual acaba por atenuar diferenças e valores mais altos ou mais baixos.

4.1.1.2 Emissões de trabalho

As emissões de trabalho são decorrentes tanto das condições meteorológicas quanto da quantidade de produto movimentado. Como o cenário proposto traz movimentações menores nos meses com temperaturas mais amenas, a variação mensal é maior que a das emissões estacionárias, chegando ao ponto de as emissões de agosto serem equivalentes a 35% das emissões de janeiro.

Diferentemente das emissões estacionárias, as emissões de trabalho não dependem da variação entre as temperaturas máxima e mínima, mas sim do valor médio entre elas. Esta componente é diretamente proporcional à movimentação e também é influenciada pelo fator de irradiância solar diária, pois este entra no cálculo da temperatura do líquido armazenado.

Os meses de julho e agosto, por exemplo, têm a mesma quantidade de dias, a mesma movimentação e, coincidentemente, os mesmos valores de temperatura média. Assim sendo, a pequena diferença entre os dois meses (2,5 lb ou 0,6%) se dá somente por diferentes valores de radiação solar.

É possível perceber que somente a temperatura já é uma variável que influencia significativamente as emissões. As Tabela 15 e Tabela 16 apresentam as emissões de trabalho para os meses com movimentação de 120 mil e 150 mil barris, respectivamente.

Tabela 15 – Emissões de trabalho no tanque 1 de meses com movimentação de 120 mil barris por dia

Mês	Temperatura média (°C)	Fator de irradiância solar diária (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	Emissões de trabalho (lb)
Março	27,6	16,80	802,2
Abril	26,7	16,61	754,9
Setembro	25,5	14,02	694,5
Outubro	26,4	17,17	744,8

Tabela 16 – Emissões de trabalho no tanque 1 de meses com movimentação de 150 mil barris por dia

Mês	Temperatura média (°C)	Fator de irradiância solar diária (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	Emissões de trabalho (lb)
Janeiro	30,4	25,64	1.237,7
Fevereiro	29,4	21,51	1.145,7
Novembro	26,9	14,84	951,6
Dezembro	29,3	16,87	1.116,8

Em ambos os casos é possível observar que em meses com a mesma quantidade de produto movimentado a variação das emissões se comporta de forma quase linear com a variação de temperatura, sendo secundária a influência da radiação solar, como mostram os Gráficos 1 e 2. Este resultado é intrigante, uma vez que a pressão de vapor do produto armazenado (variável direta do cálculo), varia de forma exponencial com a temperatura. Possivelmente isto pode ser explicado pelo pequeno intervalo de temperatura considerado e também pela relativa baixa pressão de vapor do diesel, que reduz estas influências.

Gráfico 1 – Relação entre temperatura ambiente e as emissões de trabalho do tanque 1 em meses com movimentação de 120 mil barris por dia

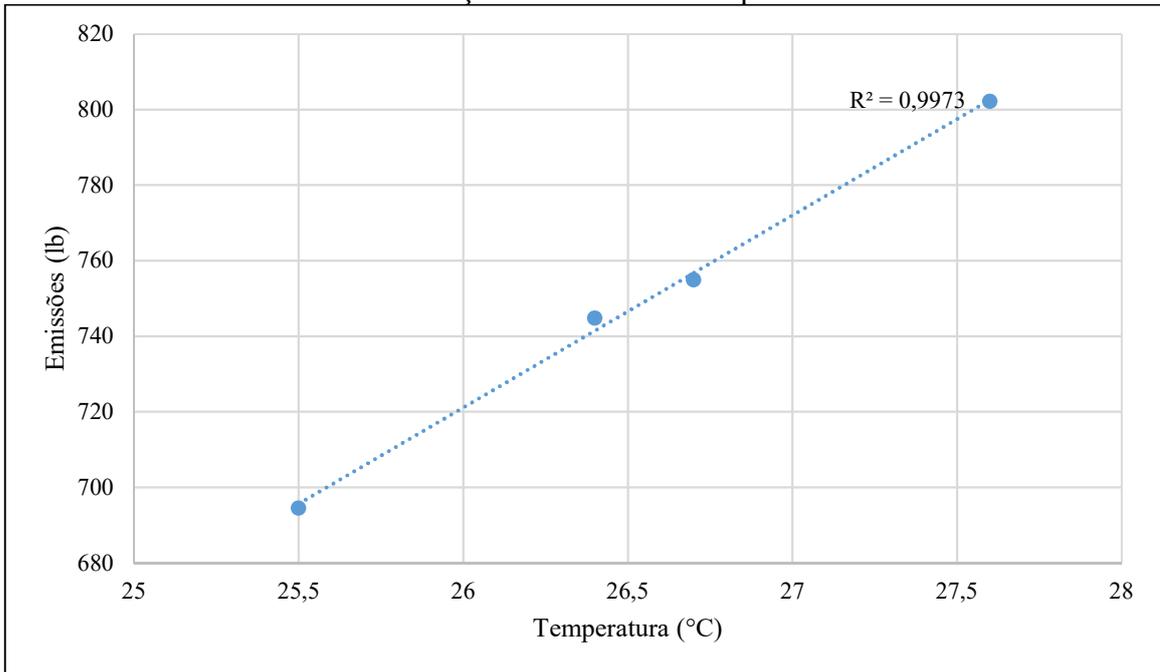
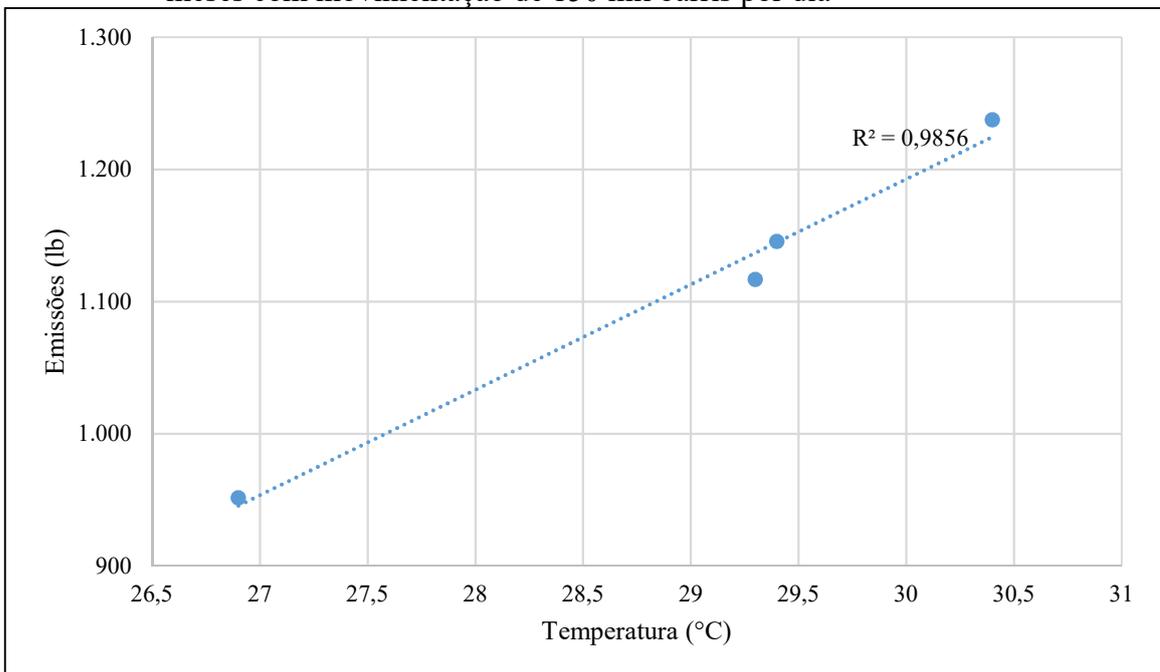


Gráfico 2 – Relação entre temperatura ambiente e as emissões de trabalho do tanque 1 em meses com movimentação de 150 mil barris por dia



Como apresentado na equação 12, as emissões de trabalho são diretamente proporcionais à movimentação, sendo esta a variável que mais influencia no cálculo, uma vez que esta não “tem limites”, enquanto que a temperatura média varia dentro de uma faixa relativamente pequena para um local de clima tropical como o Rio de Janeiro.

Com relação à diferença entre o cálculo anual e mensal, para o primeiro foi obtido um valor 3,5% menor. Seguindo as equações que descrevem o comportamento das emissões é difícil prever a magnitude da diferença de ambos os cálculos. No entanto, ela pode ser explicada pela variação da temperatura. No cálculo mensal a temperatura de cada mês influencia as emissões de trabalho na proporção da movimentação. No cálculo anual, como é feita a média simples, a temperatura de todos os meses tem o mesmo peso na obtenção das emissões.

4.1.1.3 Emissões totais

No total, as emissões obtidas a partir do cálculo mensal de compostos orgânicos voláteis emitidos por um tanque de diesel com as características definidas no cenário base foram equivalentes a 13.204 libras. Realizando o cálculo com os somatórios e médias dos dados anuais foi possível obter 12.805 libras, um valor 3% menor.

4.1.2 Resultados do tanque 2

O tanque 2 corresponde ao armazenamento de óleo combustível em um tanque aquecido com as mesmas dimensões e características do tanque 1. A Tabela 17 apresenta os resultados mensais por componente.

Tabela 17 – Emissões do tanque 2 na simulação do cenário-base equações

Emissões anuais (libras)			
Ano	Estacionárias	Trabalho	Totais
	0,121	0,381	0,502
Emissões mensais (libras)			
Meses	Estacionárias	Trabalho	Totais
Janeiro	0,013	0,040	0,053
Fevereiro	0,011	0,040	0,050
Março	0,009	0,032	0,041
Abril	0,009	0,032	0,041
Maio	0,009	0,026	0,036
Junho	0,009	0,026	0,036
Julho	0,010	0,021	0,031
Agosto	0,010	0,021	0,032
Setembro	0,009	0,032	0,041
Outubro	0,010	0,032	0,042
Novembro	0,009	0,040	0,048
Dezembro	0,011	0,040	0,051
Total	0,121	0,381	0,502

4.1.2.1 Emissões estacionárias

A estimativa de emissões do tanque 2 resultou em valores de emissões muito baixos, o que limita a qualidade da análise. Os valores apresentados estão arredondados para ao menos dois algarismos significativos.

Apesar de o tanque em questão ser aquecido e, teoricamente, manter a mesma temperatura em todos os meses do ano, é possível observar diferenças entre os resultados dos diferentes meses. O capítulo 7 do AP 42 não apresenta muitos detalhes sobre a estimativa de emissões para tanques aquecidos. A simulação em questão foi realizada substituindo o cálculo das temperaturas do líquido (máxima, média e mínima) pelas temperaturas definidas na característica do tanque (75°C, 80°C e 85°C). No entanto, o cálculo do fator de expansão do espaço-vapor (K_e) utiliza em seu cálculo a variação diária da temperatura ambiente.

Anker e Ferry (2014) analisaram em detalhes o cálculo de emissões para tanques aquecidos sob diferentes condições. Para esta situação, definiram que a variação de temperatura do espaço-vapor deve ser igual à do líquido caso o teto do tanque tenha isolamento térmico. Caso contrário, haverá troca de calor com o ambiente. Sendo assim, será considerado que o tanque 2 não apresenta isolamento térmico¹⁴ no teto, uma vez que para o cálculo do fator de expansão do espaço-vapor foram consideradas as variações da temperatura ambiente. O cálculo do fator de expansão do espaço-vapor leva ainda em consideração a pressão atmosférica e a insolação. Por estas razões há diferenças, ainda que pequenas, nos valores mensais das emissões estacionárias, ainda que seja um tanque aquecido.

4.1.2.2 Emissões de trabalho

Conforme apontado nos resultados do tanque 1, as emissões de trabalho de tanques de teto fixo dependem da temperatura média do líquido. Como o tanque 2 é aquecido e isolado, a temperatura média do líquido é constante, o que faz com que o único valor que tenha variação mensal seja a movimentação. Isto pode ser claramente observado nos resultados, uma vez que meses com a mesma movimentação apresentaram as mesmas perdas.

¹⁴ Todo tanque aquecido apresenta isolamento térmico para o costado, de forma a manter a temperatura-alvo.

4.1.2.3 Emissões totais

Devido à pressão de vapor muito baixa do óleo combustível selecionado para a simulação, os resultados de emissão tiveram valores bastante reduzidos, menores que uma libra por ano. Ainda assim, foi possível observar algumas variações, ainda que pequenas, entre os meses. Entretanto, o cálculo das emissões anuais, apresentou o mesmo resultado que o somatório das perdas mensais. Isto pode ser justificado pelas variações e diferenças de dados meteorológicos dos períodos que são atenuadas pela pressão de vapor muito baixa do produto considerado. Além disso, a consideração de tanque aquecido iguala os valores de temperatura do líquido para todos os meses, limitando a influência dos dados meteorológicos ao espaço-vapor.

4.1.3 Resultados do tanque 3

O tanque 3 foi definido como um tanque de teto flutuante externo que contém petróleo. A Tabela 18 apresenta os resultados mensais por componente de emissões.

Tabela 18 – Emissões do tanque 3 na simulação do cenário-base equações

Emissões anuais (libras)				
Ano	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
	3.866	370	1.332	5.568
Emissões mensais (libras)				
Meses	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
Janeiro	517	39	155	711
Fevereiro	411	39	135	584
Março	324	31	114	468
Abril	329	31	113	472
Maio	248	26	91	365
Junho	256	26	92	374
Julho	221	21	83	324
Agosto	239	21	89	348
Setembro	305	31	106	442
Outubro	413	31	127	572
Novembro	323	39	112	474
Dezembro	433	39	138	609
Total	4.019	370	1.355	5.744

4.1.3.1 Emissões pelo selo do aro

As equações apresentadas no capítulo 7 do AP 42 são para estimativas anuais de emissões. Para a realização de cálculos mensais em tanques com cobertura flutuante foi necessário dividir por 12 os fatores de selos e acessórios que tinham a componente temporal

em sua unidade de medida. Da mesma foram considerados os dados meteorológicos e de movimentação com o período de tempo adequado.

As perdas pelo selo do aro estão fortemente relacionadas ao tipo de selo utilizado e se há ou não a utilização de selagem secundária. No cenário base foi escolhido um tanque com o selo do tipo apoiado sobre o vapor (*vapor-mounted*). Assim como em outros tipos de tanque, as emissões são também função dos dados meteorológicos. No entanto, em tanques de teto flutuante externo o vento é uma variável adicional que influencia os cálculos. Como o perímetro do selo varia linearmente com o diâmetro, este também é um componente relevante.

O primeiro mês do ano apresentou as maiores emissões pelo selo, correspondendo a 517 libras, enquanto que julho foi o mês de menores emissões com 221 libras, um valor 58% menor. A variação da pressão atmosférica é muito pouco significativa ao longo dos meses e a radiação solar não é um parâmetro que afeta as emissões em tanques de cobertura flutuante. Logo, a grande variação entre os meses se deve somente pelos diferentes valores médios de temperatura e velocidade do vento, como apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Comparação dos valores mensais de temperatura média e velocidade do vento com as emissões pelo selo do aro do tanque 3

Mês	Temperatura média (°C)	Velocidade do vento (m.s ⁻¹)	Emissões pelo selo do aro (lb)
Janeiro	30,4	1,78	517
Fevereiro	29,4	1,60	411
Março	27,6	1,44	324
Abril	26,7	1,50	329
Mai	24,7	1,31	248
Junho	24,3	1,36	256
Julho	24,6	1,19	221
Agosto	24,6	1,28	239
Setembro	25,5	1,48	305
Outubro	26,4	1,72	413
Novembro	26,9	1,47	323
Dezembro	29,3	1,65	433

Os meses com temperaturas médias menores também são os meses com menor velocidade do vento, o que amplifica as diferenças dos valores mensais de emissões. Os Gráficos 3 e 4 demonstram a correlação entre as variáveis meteorológicas e as emissões.

Na estimativa de perdas pelo selo do aro a temperatura entra de forma indireta, na função da pressão de vapor do produto armazenado, que é exponencial. Como pode ser observado no Gráfico 3, há uma correlação entre temperatura e emissões, mas que não é tão direta quando a observada no tanque 1, de teto fixo. A linha de tendência que resultou no maior valor de R² foi linear.

Já a velocidade do vento, apresentou uma melhor correlação com as emissões do selo do aro através de uma linha de tendência exponencial. De fato, a velocidade do vento entra diretamente no cálculo desta componente e apresentou uma forte correlação ainda que seus valores tenham variado pouco, entre um e dois metros por segundo.

Gráfico 3 – Relação entre a temperatura média mensal e as emissões pelo selo do aro do tanque 3

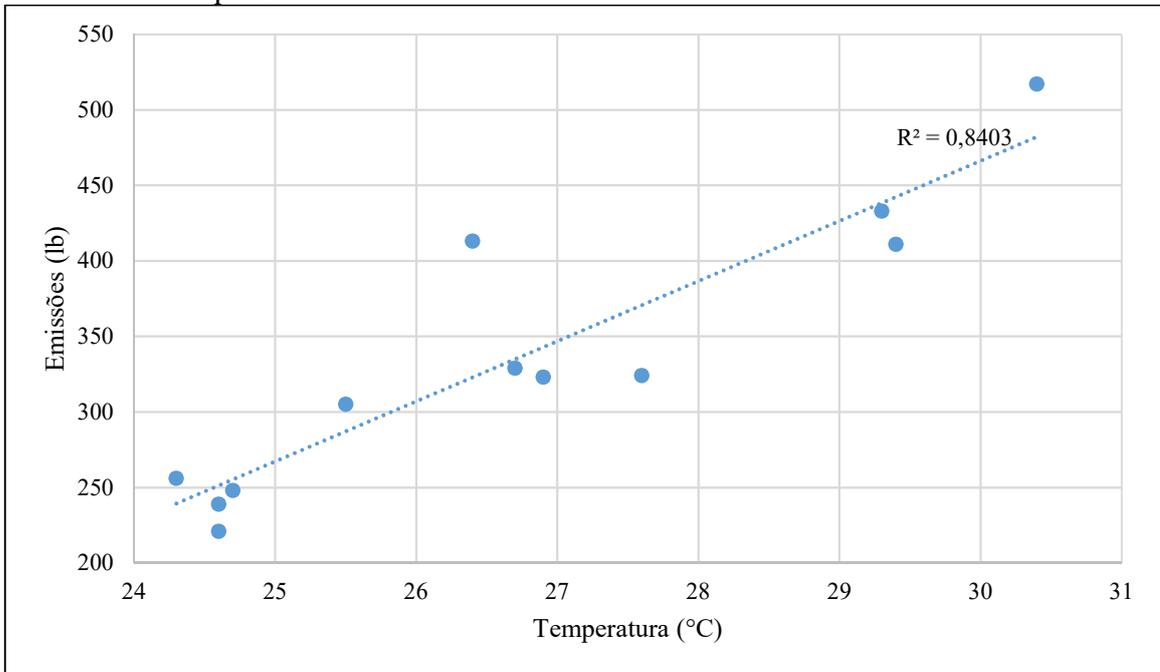
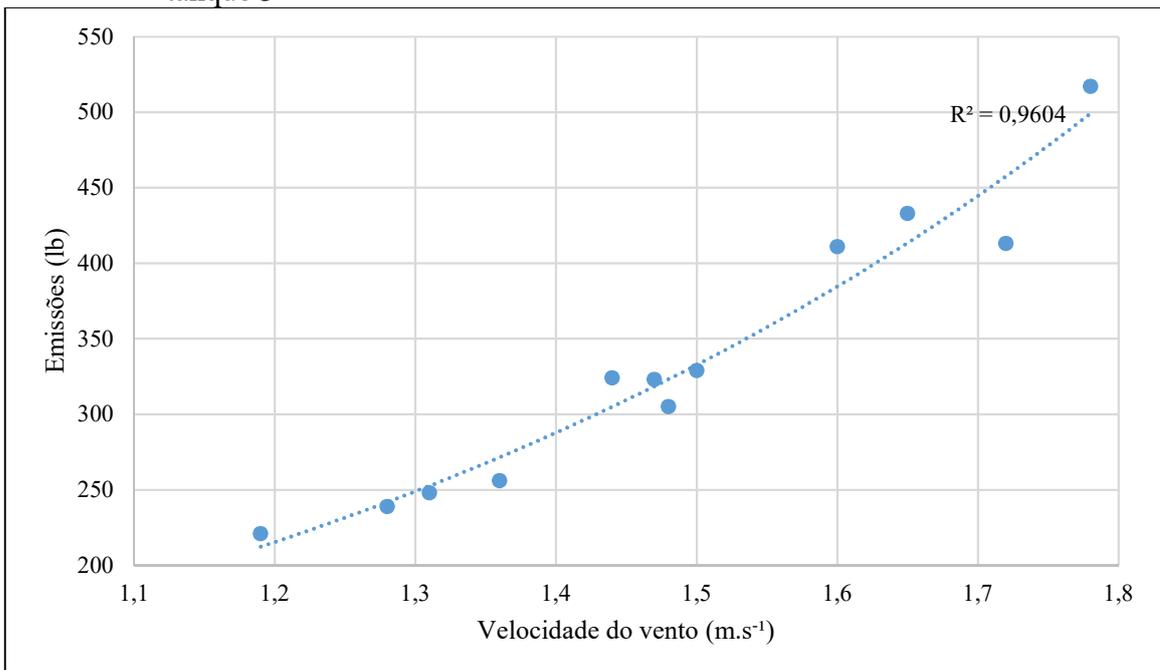


Gráfico 4 – Relação entre a velocidade média do vento e emissões pelo selo do aro do tanque 3



As emissões pelo selo do aro obtidas através do cálculo anual foram equivalentes a 3.866 libras, 4% menores que as obtidas no cálculo mensal. As razões para esta diferença são as mesmas dos tanques de teto fixo: as atenuações das médias anuais reduzem as emissões.

4.1.3.2 Emissões de movimentação

Ao contrário do que ocorre em tanques de teto fixo, as emissões de movimentação de tanques com cobertura flutuante ocorrem quando o nível do tanque baixa. Uma porção do líquido fica aderida à superfície interna do costado e então evapora. A equação que rege as perdas de movimentação varia em função da densidade do produto armazenado e da rugosidade do costado, pois isto influencia na quantidade de líquido que ficará aderido. Assim, a única componente que tem potencial para apresentar alguma variação mensal é a movimentação. Os valores de perdas mensais de movimentação apresentados na Tabela 18 são diretamente proporcionais à quantidade de petróleo movimentado no tanque 3.

Por não haver a consideração de fatores meteorológicos, as estimativas mensais e anuais são exatamente iguais.

4.1.3.3 Emissões pelos acessórios

A perda de compostos orgânicos voláteis em tanques com cobertura flutuante também ocorre pelos acessórios do teto. Da mesma forma como no selo do aro, as emissões também são influenciadas pela temperatura média e pela velocidade do vento.

O fator total da perda por acessórios é composto pelo somatório dos fatores de perda de cada acessório, multiplicado por sua quantidade. Este fator, por sua vez é função do tipo do acessório e da velocidade do vento.

As emissões pelos acessórios resultaram em um total de 1.355 libras, com uma variação mensal de até 47%, sendo janeiro o mês de maior emissão (155 libras) e julho o menor (83 libras), como pode ser observado na Tabela 20.

Gráfico 5 – Relação entre a temperatura média mensal e as emissões pelos acessórios do tanque 3

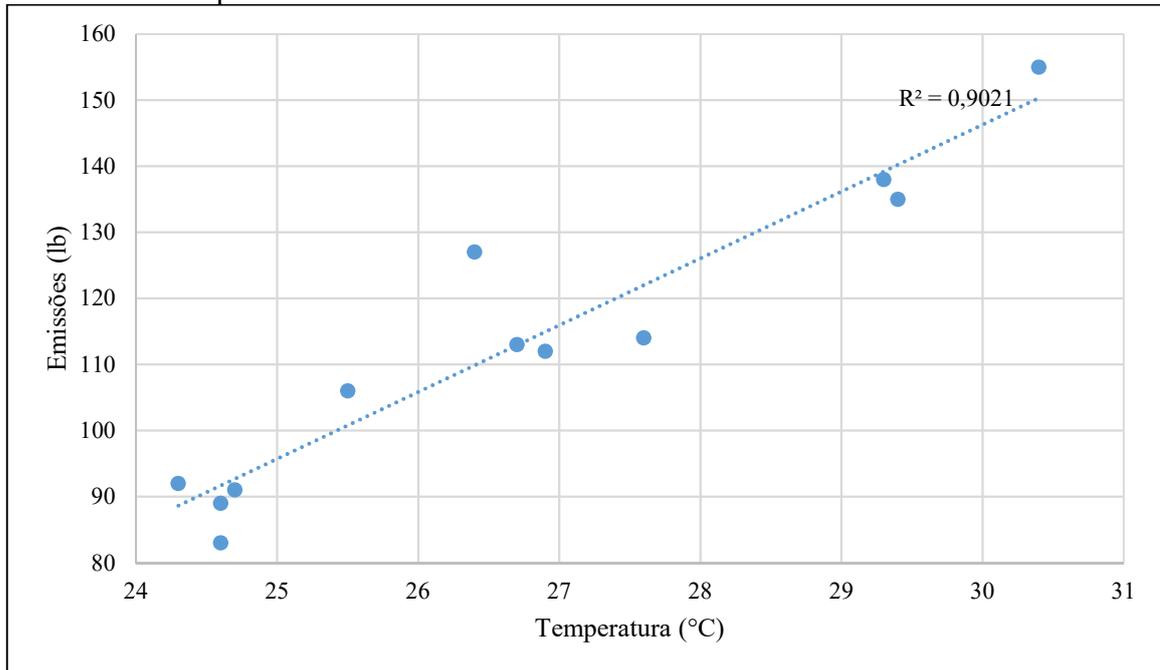


Gráfico 6 – Relação entre a velocidade do vento e as emissões pelos acessórios do tanque 3

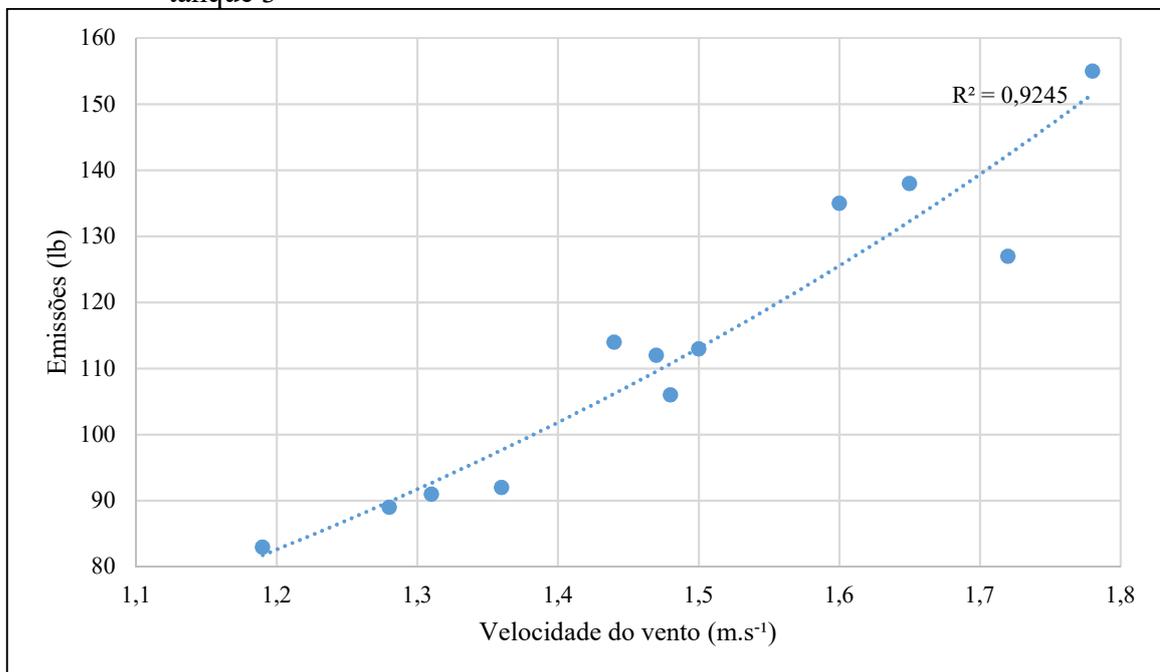


Tabela 20 – Comparação dos valores mensais de temperatura média e velocidade do vento com as emissões pelos acessórios do tanque 3

Mês	Temperatura média (°C)	Velocidade do vento (m.s ⁻¹)	Emissões pelos acessórios (lb)
Janeiro	30,4	1,78	155
Fevereiro	29,4	1,60	135
Março	27,6	1,44	114
Abril	26,7	1,50	113
Maior	24,7	1,31	91
Junho	24,3	1,36	92
Julho	24,6	1,19	83
Agosto	24,6	1,28	89
Setembro	25,5	1,48	106
Outubro	26,4	1,72	127
Novembro	26,9	1,47	112
Dezembro	29,3	1,65	138

De forma similar às emissões pelo selo do aro, as perdas por acessórios se relacionam melhor com a temperatura de forma linear e de forma exponencial com a velocidade do vento, conforme apresentado nos Gráficos 5 e 6.

Ainda que haja acessórios que ocorrem em grande quantidade, como as pernas do deque (80 – 30 da área do pontão e 50 da área do centro, conforme apresentado na Tabela 12), o acessório mais determinante para as perdas foi a guia não perfurada (*unslotted guide-pole*). Conforme apresentado no item 2.1.3.2.6, a guia não perfurada é um dispositivo antirrotacional típico de tanques com cobertura flutuante. Considera-se que, normalmente, a guia tenha 8 polegadas de diâmetro, enquanto que o buraco do teto por onde ela passa tem 21 polegadas. Este espaço é coberto, mas não vedado, o que explica as significativas emissões associadas a este acessório (U.S.EPA, 2006b).

Tabela 21 – Detalhamento das perdas por tipo de acessório

Acessório	Fator de perdas ¹⁵ (lb-mol ano ⁻¹)	Quantidade	Fator anual de perdas (lb-mol ano ⁻¹)
Boca de visita (<i>access hatch</i>)	52,20	1	52,20
Nível de boia (<i>gauge-float</i>)	27,63	1	27,63
Poço de medição (<i>gauge-hatch/sample port</i>)	2,30	1	2,30
Pernas do deque – área do pontão (<i>deck leg</i>)	2,80	30	83,87
Pernas do deque – área do centro (<i>deck leg</i>)	1,42	50	70,81
Guia não perfurada (<i>unslotted guide-pole</i>)	518,24	1	518,24
Válvula de quebra-vácuo (<i>vacuum breaker</i>)	8,85	4	35,39
Total			790,43

¹⁵ Calculado a partir do tipo do acessório, conforme apresentado na Tabela 11, e da velocidade do vento. Considera o cálculo anual, uma vez que no cálculo mensal o fator varia mês a mês.

A Tabela 21 apresenta o fator de perdas por cada acessório (Kfi), bem como a quantidade (Nfi) e o fator anual de perdas por acessórios Ff.

A Tabela 21 mostra que 66% do valor do fator anual de perdas por acessórios é devido à guia antirrotacional. Logo, este único dispositivo é responsável por 873 libras de compostos orgânicos voláteis por ano, 16% das emissões totais.

Para esta componente, as emissões anuais se situaram 2% do total das emissões calculadas mensalmente, devido às variações nos dados meteorológicos já abordadas em itens anteriores.

4.1.4 Resultados do tanque 4

O tanque 4 é um tanque de teto fixo com selo flutuante interno. Suas características e produto armazenado são similares às do tanque 3. A Tabela 22 apresenta os resultados mensais e anuais emissões por componente.

Tabela 22 – Emissões do tanque 4 na simulação do cenário-base equações

Emissões anuais (libras)				
Ano	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
	1.853	415	3.065	5.333
Emissões mensais (libras)				
Meses	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
Janeiro	180	43	298	521
Fevereiro	173	43	286	503
Março	163	35	269	466
Abril	154	35	255	444
Mai	142	29	235	405
Junho	139	29	230	397
Julho	141	23	233	398
Agosto	141	23	233	398
Setembro	147	35	243	425
Outubro	152	35	252	439
Novembro	156	43	258	458
Dezembro	172	43	285	501
Total	1.861	415	3.079	5.356

Assim como nos tanques com teto flutuante externo, para o cálculo das emissões mensais os fatores de selos e acessórios foram divididos por 12 e foram utilizados os dados meteorológicos do período correspondente.

4.1.4.1 Emissões pelo selo do aro

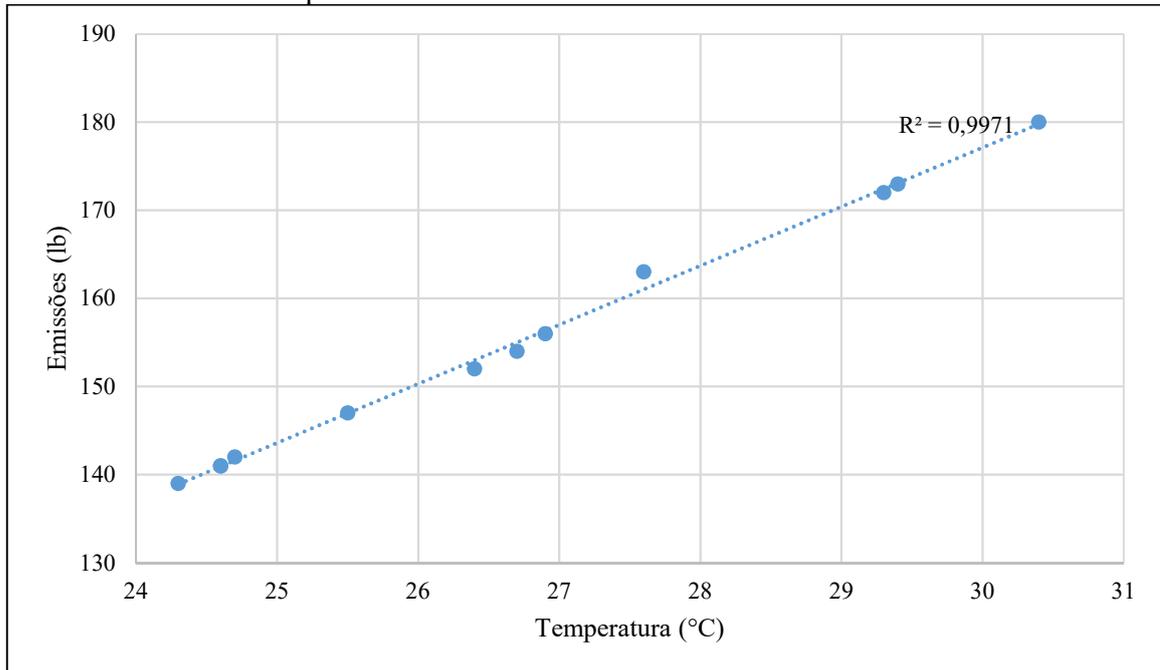
Da mesma forma que no tanque 3, o selo adotado para a simulação do tanque 4 foi o apoiado sobre o vapor (*vapor-mounted*). No entanto, diferentemente do tanque anterior, a velocidade do vento não é um parâmetro que afeta as emissões, assim como ocorre em tanques de teto fixo. O capítulo 7 do AP 42 determina que para tanques de teto fixo com selo flutuante interno a velocidade do vento seja considerada como zero. Assim, todas perdas relacionadas com a velocidade do vento são anuladas.

Ao longo do ano houve variações de 23% entre o mês de emissões mais elevadas (janeiro) e o mês de menores emissões (junho), como apresentado na Tabela 23. Assim como observado no tanque 3, a influência da pressão atmosférica é bastante secundária, tendo a temperatura um papel mais determinante no valor da função de pressão de vapor e, conseqüentemente, nas emissões.

Tabela 23 – Comparação entre as temperaturas médias mensais e as emissões pelo selo do aro do tanque 4

Mês	Temperatura média (°C)	Emissões pelo selo do aro (lb)
Janeiro	30,4	180
Fevereiro	29,4	173
Março	27,6	163
Abril	26,7	154
Mai	24,7	142
Junho	24,3	139
Julho	24,6	141
Agosto	24,6	141
Setembro	25,5	147
Outubro	26,4	152
Novembro	26,9	156
Dezembro	29,3	172

Gráfico 7 – Correlação entre as temperaturas médias mensais e as emissões pelo selo do aro do tanque 4



Por não haver a influência da velocidade do vento pode-se observar no Gráfico 7 uma relação linear muito mais forte entre a temperatura ambiente e as emissões desta componente neste tipo de em comparação a tanques com teto flutuante externo. A não influência do vento também promoveu uma grande redução das emissões em comparação ao tanque 3, que armazena o mesmo produto. A redução desta componente foi de 4.019 para 1.861 libras, um decréscimo de 54%. Como a equação para a estimativa é a mesma para ambos os tipos de tanque, a partir deste resultado é possível classificar a diferença entre os valores como a parcela decorrente da influência do vento sobre as perdas pelo selo do aro.

A diferença entre o cálculo anual e a soma dos cálculos mensais para esta componente foi de apenas 0,4%.

4.1.4.2 Emissões de movimentação

Similarmente à simulação realizada para o tanque 3, as estimativas anuais e mensais são exatamente iguais, uma vez que a única parcela do cálculo que varia mensalmente é a movimentação. No entanto, as emissões de movimentação obtidas para o tanque 4 são maiores do que as do tanque 3.

Tanques com selo flutuante interno cujo teto fixo não é autoportante têm mais uma variável que influencia no cálculo, que é o número e a característica das pernas de sustentação da cobertura fixa. De forma similar ao que ocorre no costado, quando o nível do tanque baixa,

haverá produto aderido à superfície das pernas de sustentação. Sendo assim, tanques de selo flutuante interno sempre terão emissões iguais ou maiores que similares com cobertura flutuante externa. As emissões desta componente para o tanque 4 corresponderam a 415 libras, enquanto que para o tanque 3 o valor foi de 370 libras. Sendo assim, pode-se afirmar que 45 libras ou 11% das emissões do tanque 4 aconteceram através das vinte pernas de sustentação. O restante foi decorrente da aderência de produto ao costado.

4.1.4.3 Emissões pelos acessórios

Assim como ocorre nas emissões do selo do aro, a velocidade do vento não é uma variável que influencia as emissões pelos acessórios, devido à existência da cobertura fixa.

As diferenças mensais alcançaram 22% entre os meses de janeiro e junho. Esta variação é menor do que a observada no tanque 3, o qual sofria influência também do vento. Entretanto, o valor de emissão pelos acessórios do tanque 4 foi mais que o dobro do estimado para o tanque similar com teto flutuante externo (3.079 libras e 1.355 libras). A Tabela 24 apresenta os fatores relacionados a cada tipo de acessório, bem como a quantidade e sua contribuição no fator anual.

Tabela 24 – Detalhamento das perdas por tipo de acessório

Acessório	Fator de perdas ¹⁶ (lb-mol ano ⁻¹)	Quantidade	Fator anual de perdas (lb-mol ano ⁻¹)
Boca de visita (<i>access hatch</i>)	36	1	36
Nível de boia (<i>gauge-float</i>)	14	1	14
Poço de medição (<i>gauge-hatch/sample port</i>)	12	1	12
Pernas no deque (<i>deck leg</i>)	7,9	80	632
Escada de acesso (<i>ladder well</i>)	98	1	98
Colunas (<i>columns</i>)	51	20	1020
Válvula de quebra-vácuo (<i>vacuum breaker</i>)	6,2	1	6,2
Total			1.818

Além de serem responsáveis pelo aumento das emissões de movimentação em comparação com os tanques de teto flutuante externo, pode-se perceber que as colunas de sustentação da cobertura fixa têm um grande potencial para aumentar as emissões pelos acessórios. No caso do tanque 4, foram responsáveis por 56% das emissões. As pernas do deque também representam uma parte significativa, com 35%.

A diferença entre as estimativas mensais e a anual tanto para esta componente quanto para as emissões totais foram pequenas, o equivalente a 0,4%.

¹⁶ Calculado a partir do tipo do acessório, conforme apresentado na Tabela 12, e da velocidade do vento. Considera o cálculo anual, uma vez que no cálculo mensal o fator varia mês a mês.

4.1.5 Resultados do tanque 5

O tanque 5 tem as mesmas características que o tanque 3, com a diferença que armazena gasolina. A Tabela 25 apresenta os resultados de emissões anuais e mensais segregadas por componente.

Tabela 25 – Emissões do tanque 5 na simulação do cenário-base equações

Emissões anuais (libras)				
Ano	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
	27.823	76	9.590	37.488
Emissões mensais (libras)				
Meses	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
Janeiro	3.900	8	1.170	5.078
Fevereiro	3.061	8	1.002	4.071
Março	2.362	6	830	3.198
Abril	2.365	6	810	3.181
Mai	1.750	5	642	2.397
Junho	1.791	5	647	2.444
Julho	1.552	4	586	2.142
Agosto	1.681	4	623	2.308
Setembro	2.170	6	751	2.927
Outubro	2.965	6	914	3.886
Novembro	2.332	8	808	3.148
Dezembro	3.216	8	1.028	4.251
Total	29.144	76	9.811	39.030

4.1.5.1 Emissões pelo selo do aro

Do mesmo modo que as demais simulações, o mês de janeiro foi responsável pelas maiores emissões desta componente, atingindo 3.900 libras. O mês de junho teve uma contribuição 60% menor, com 1.552 libras. Apesar de a emissão absoluta ser bastante diferente, a variação é similar à observada no tanque 3 com o petróleo.

Conforme já apontado anteriormente, a variação da pressão atmosférica é muito pouco significativa ao longo dos meses, a diferença entre os meses se deve à composição da média da temperatura com a velocidade média do vento, apresentados na Tabela 26.

O comportamento das curvas apresentadas nos Gráficos 8 e 9 reforça as observações feitas referentes ao tanque 3. A correlação da temperatura média com as emissões pelo selo do aro se manteve linear, enquanto que a da velocidade do vento se manteve exponencial, apesar de os coeficientes de determinação R^2 serem um pouco diferentes. Isto demonstra que cada fator meteorológico influenciou as emissões de uma forma definida, mas que a amplitude da influência depende do produto armazenado.

Tabela 26 – Comparação dos valores mensais de temperatura média e velocidade do vento com as emissões pelo selo do aro do tanque 5

Mês	Temperatura média (°C)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Emissões pelo selo do aro (lb)
Janeiro	30,4	1,78	3.900
Fevereiro	29,4	1,60	3.061
Março	27,6	1,44	2.362
Abril	26,7	1,50	2.365
Maio	24,7	1,31	1.750
Junho	24,3	1,36	1.791
Julho	24,6	1,19	1.552
Agosto	24,6	1,28	1.681
Setembro	25,5	1,48	2.170
Outubro	26,4	1,72	2.965
Novembro	26,9	1,47	2.332
Dezembro	29,3	1,65	3.216

As emissões obtidas através do cálculo anual desta componente resultaram em 27.823 libras, valor 5% inferior ao somatório do cálculo mensal. Além de ser uma diferença absoluta grande, de 1.321 libras, percentualmente é maior que a observada para os outros produtos nos tanques 1, 2, 3 e 4.

Gráfico 8 – Correlação entre as temperaturas médias mensais e as emissões pelo selo do aro do tanque 5

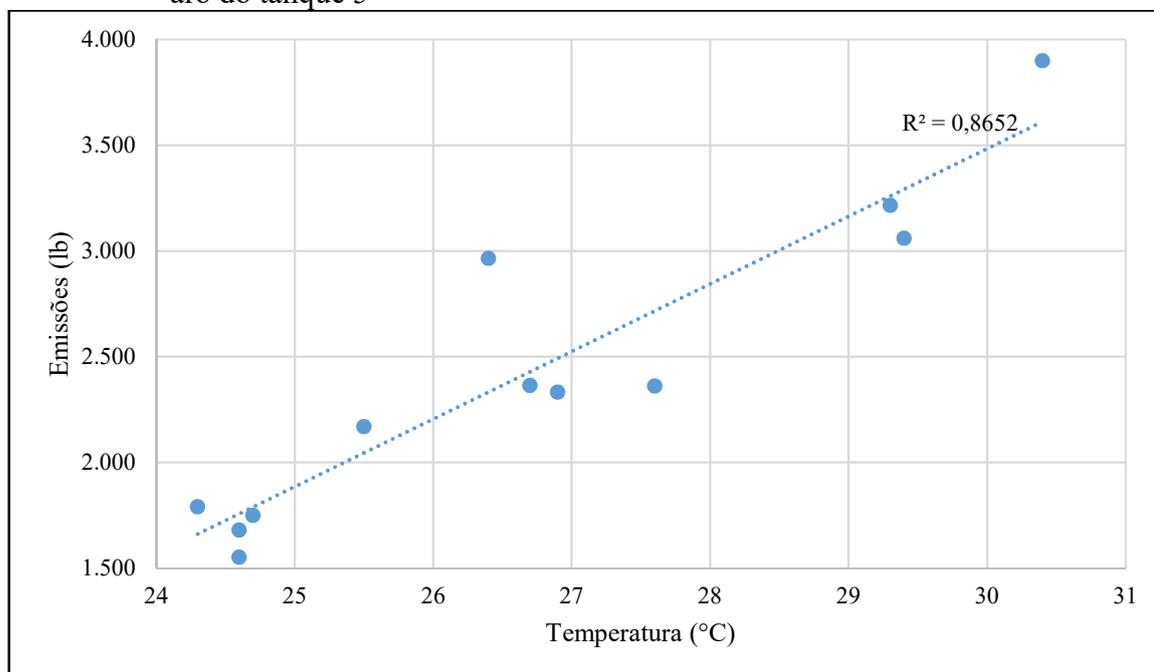
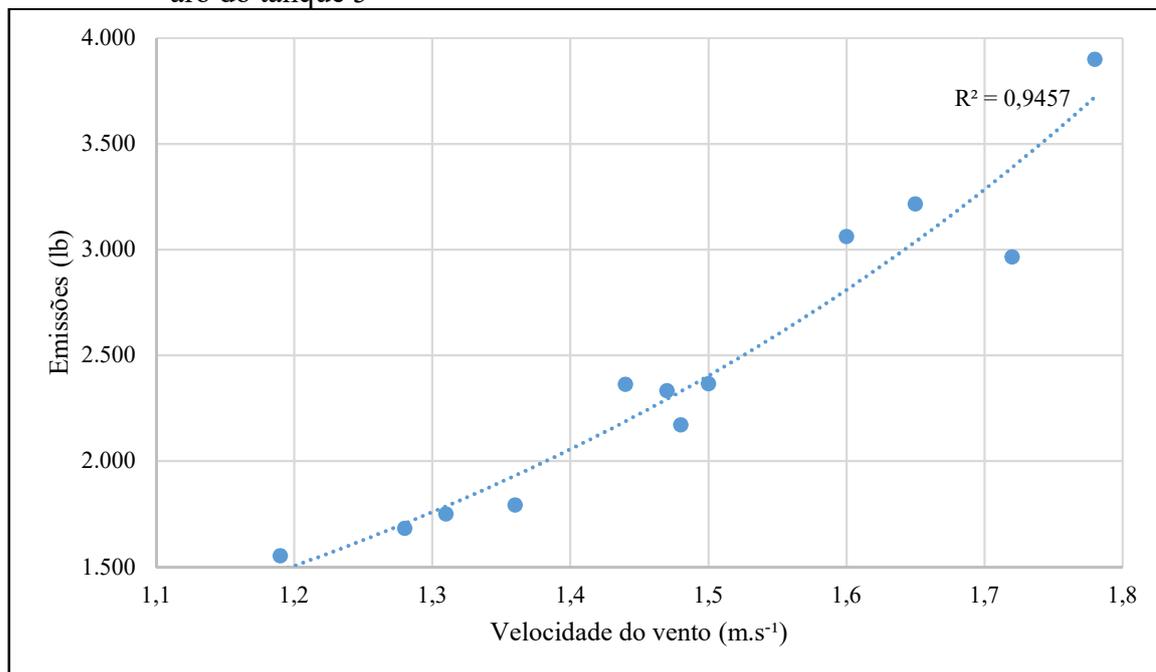


Gráfico 9 – Correlação entre as velocidades médias do vento e as emissões pelo selo do aro do tanque 5



4.1.5.2 Emissões de movimentação

Apesar de a gasolina ter uma pressão de vapor muito mais elevada em comparação com o petróleo, os valores de perdas por movimentação obtidos foram muito menores. Isto ocorre porque a característica do produto que entra no cálculo desta componente é a massa específica, e não a pressão de vapor. Além disto, o fator de aderência do costado interno (C_s) também varia dependendo do produto e sua viscosidade. Este fator, apresentado na equação 16, é quatro vezes maior para o petróleo (0,006) que para a gasolina (0,0015).

Assim como nos demais, a variação mensal é devida somente à movimentação, não apresentando diferenças entre as estimativas mensais e anuais.

4.1.5.3 Emissões pelos acessórios

Para o tanque 5 as emissões pelos acessórios do teto do mês de julho foram a metade das do mês de janeiro, variação também similar à observada para o tanque 3. A Tabela 27 apresenta os valores mensais de temperatura média, velocidade do vento e emissões pelos acessórios.

Tabela 27 – Comparação dos valores mensais de temperatura média e velocidade do vento com as emissões pelos acessórios do tanque 5

Mês	Temperatura média (°C)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Emissões pelos acessórios (lb)
Janeiro	30,4	1,78	1.170
Fevereiro	29,4	1,60	1.002
Março	27,6	1,44	830
Abril	26,7	1,50	810
Mai	24,7	1,31	642
Junho	24,3	1,36	647
Julho	24,6	1,19	586
Agosto	24,6	1,28	623
Setembro	25,5	1,48	751
Outubro	26,4	1,72	914
Novembro	26,9	1,47	808
Dezembro	29,3	1,65	1.028

Apesar de os gráficos 10 e 11 reforçarem os comportamentos das curvas já observados anteriormente, eles apresentam uma característica diferente. O coeficiente de determinação R² da curva de temperatura foi maior do que a da velocidade do vento, mostrando que, de alguma forma, a temperatura tem uma parcela maior de contribuição nas emissões deste tanque. Isto mostra também que a preponderância da influência da variável meteorológica pode mudar em um mesmo tanque. Enquanto que a velocidade do vento apresentava um valor mais elevado de coeficiente de determinação tanto para as emissões do selo do aro quanto para as emissões pelos acessórios no tanque de petróleo, o tanque de gasolina apresenta uma maior influência da velocidade do vento nas emissões pelo selo do aro e da temperatura das emissões pelos acessórios.

A forma como cada acessório contribui para as emissões é a mesma que no tanque 3, uma vez que o cálculo do fator total da perda por acessórios não leva em consideração características do produto armazenado. Assim, a guia antirrotacional (*unslotted guidepole*) é responsável pelas emissões de 6.475 libras, valor significativo que pode ser maior que a soma das emissões de vários tanques de produtos menos voláteis.

As emissões anuais foram de 9.590 libras, valor 2% inferior ao somatório das perdas mensais.

Gráfico 10 – Correlação entre as temperaturas médias mensais e as emissões pelos acessórios do tanque 5

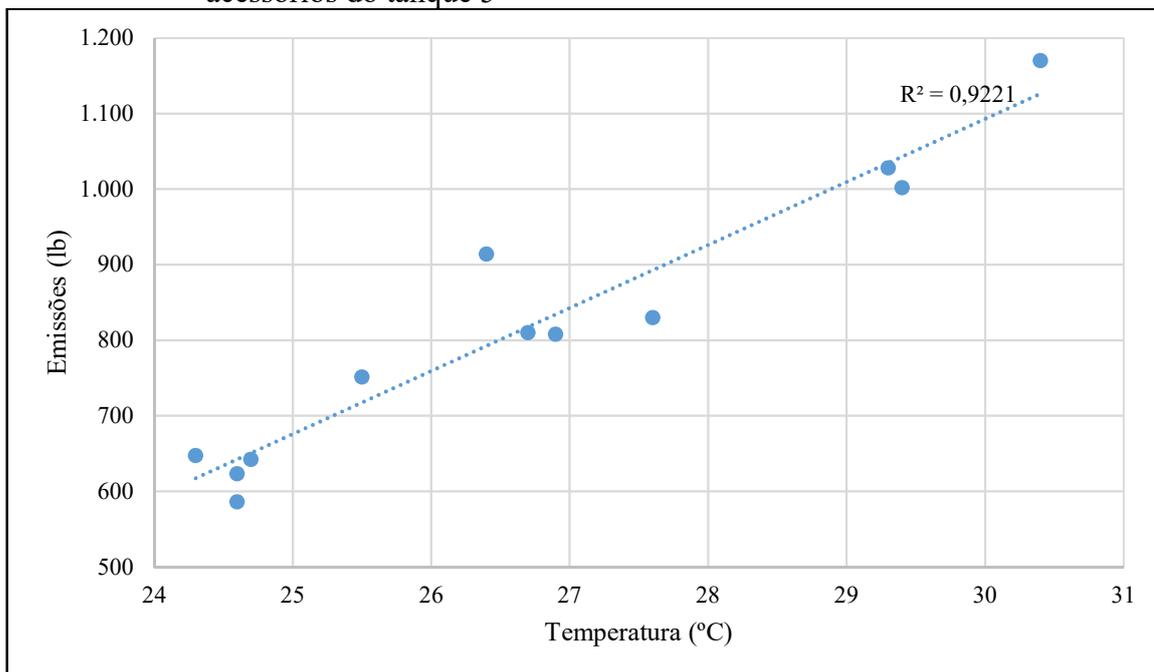
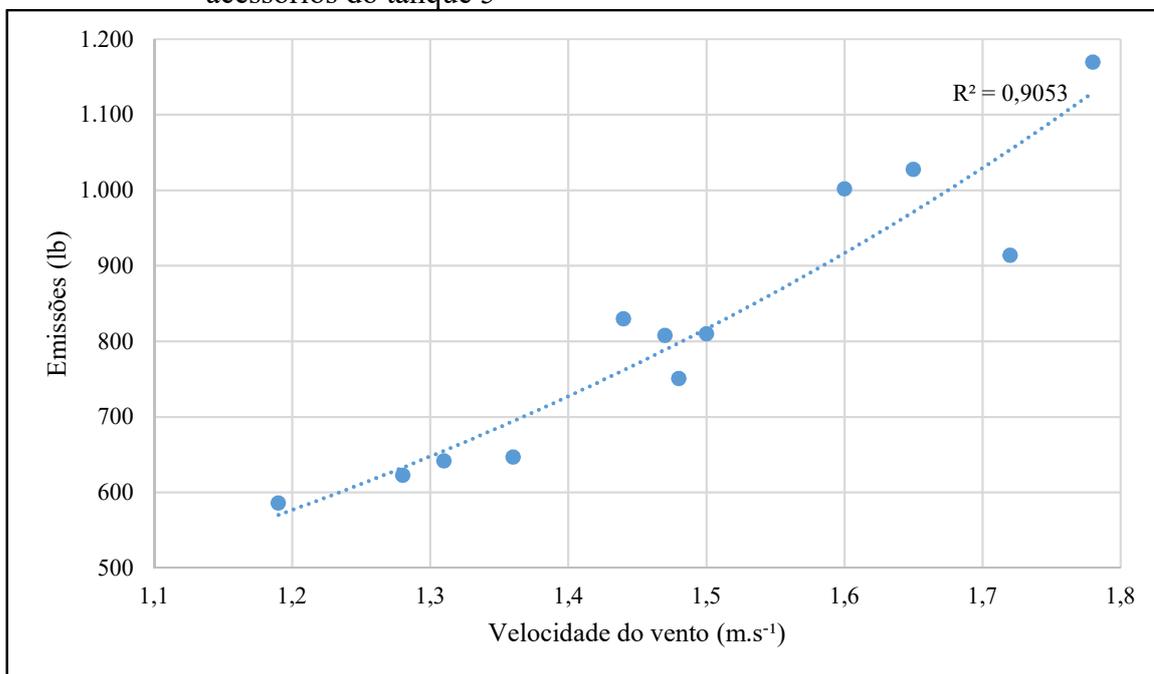


Gráfico 11 – Correlação entre as velocidades médias do vento e as emissões pelos acessórios do tanque 5



4.1.6 Resultados do tanque 6

O tanque 6 é similar ao tanque 4, de teto fixo com selo flutuante interno. No entanto, o produto armazenado é gasolina. A Tabela 28 apresenta os resultados de mensais e anuais emissões por componente.

Tabela 28 – Emissões do tanque 6 na simulação do cenário-base equações

Emissões anuais (libras)				
Ano	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
	13.334	83	22.059	35.478
Emissões mensais (libras)				
Meses	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
Janeiro	1.358	9	2.246	3.613
Fevereiro	1.289	9	2.132	3.430
Março	1.187	7	1.963	3.157
Abril	1.111	7	1.838	2.956
Maio	999	6	1.653	2.658
Junho	973	6	1.610	2.590
Julho	993	5	1.642	2.639
Agosto	993	5	1.642	2.640
Setembro	1.045	7	1.728	2.780
Outubro	1.093	7	1.808	2.908
Novembro	1.128	9	1.865	3.002
Dezembro	1.282	9	2.120	3.411
Total	13.449	83	22.249	35.782

4.1.6.1 Emissões pelo selo do aro

Por ter um teto fixo acima do selo flutuante, a velocidade do vento é um dos parâmetros meteorológicos que não influencia as emissões do tanque 6.

A variação mensal máxima das emissões ficou acima da observada para o tanque 4, chegando a 28% entre os meses de janeiro e junho. A Tabela 29 apresenta a comparação das emissões pelo selo do aro e da temperatura média ao longo dos meses.

Tabela 29 – Comparação entre as temperaturas médias mensais e as emissões pelo selo do aro do tanque 6

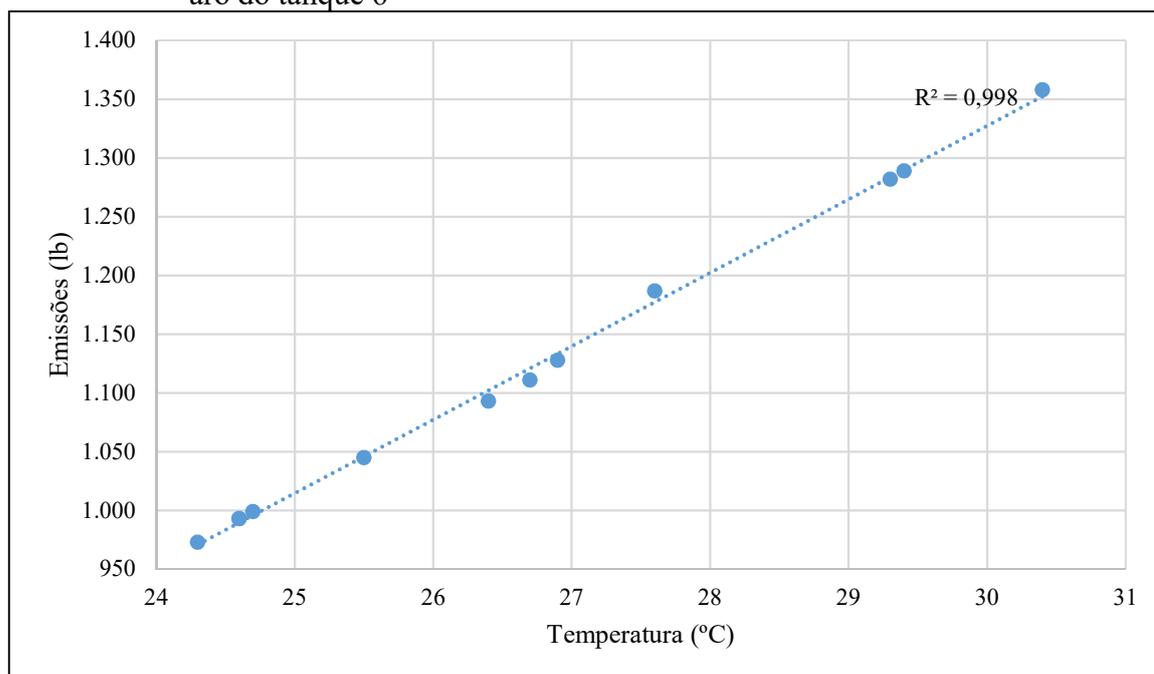
Mês	Temperatura média (°C)	Emissões pelo selo do aro (lb)
Janeiro	30,4	1.358
Fevereiro	29,4	1.289
Março	27,6	1.187
Abril	26,7	1.111
Maio	24,7	999
Junho	24,3	973
Julho	24,6	993
Agosto	24,6	993
Setembro	25,5	1.045
Outubro	26,4	1.093
Novembro	26,9	1.128
Dezembro	29,3	1.282

Assim como observado para o tanque 4, como não há a influência da velocidade do vento é possível observar uma relação linear muito mais forte entre a temperatura ambiente e as emissões desta componente neste tipo (Gráfico 12) em comparação com o tanque de teto flutuante externo que armazena o mesmo produto.

A simulação das emissões pelo selo do aro no tanque 6 corrobora os resultados do tanque 4. Também houve uma redução de 54% em comparação com a mesma componente de emissões no tanque de teto flutuante externo, parcela esta atribuída à influência do vento.

A estimativa com base nas médias e somatórios anuais resultou em valores de emissões 0,9% menores que o cálculo mensal.

Gráfico 12 – Correlação entre as temperaturas médias mensais e as emissões pelo selo do aro do tanque 6



4.1.6.2 Emissões de movimentação

Da mesma forma como foi observado nos demais tanques, as estimativas de emissões de movimentação anuais e mensais são iguais. Entretanto, estas são maiores que as emissões de movimentação do tanque 5.

Enquanto que para o tanque 5 foram estimadas 76 libras de emissões, para o tanque 6 esta foi de 83 lb. Assim como nas simulações realizadas para os tanques de petróleo, esta diferença se dá pela aderência de produto às pernas de sustentação, uma vez que as demais condições do tanque utilizadas foram iguais.

4.1.6.3 Emissões pelos acessórios

Com relação às emissões dos acessórios do teto, houve diferenças de até 28% entre os meses de janeiro e junho. As emissões são decorrentes da temperatura do produto em cada um

dos meses, logo, o mês de junho que é o mais frio apresenta as menores emissões, enquanto que janeiro, o mais quente, resulta nas maiores.

Analisando as equações é possível observar que as perdas que ocorrem pelos acessórios são proporcionais ao fator anual de perdas de cada um. Isto ocorre porque as equações que regem as perdas de cada acessório considera a temperatura do produto da mesma forma, através da pressão de vapor. Assim, a diferença entre as perdas de cada tipo acessório é decorrente da característica e da quantidade de cada um. A comparação para este tanque é a mesma que apresentada para o tanque 4 na Tabela 24.

Como as características do tanque e a quantidade de acessórios são as mesmas nos tanques 4 e 6, a distribuição das emissões pelos acessórios se mantem. Assim, as colunas de sustentação são a categoria de acessório que mais contribui para as perdas de COV, com 56% das emissões, e as pernas do que em segundo com 35%.

A variação entre o cálculo anual e mensal foi pequena e ficou no mesmo patamar que para as emissões do selo do aro, em 0,9%.

4.2 Simulação das emissões do cenário-base TANKS

De forma a permitir a comparação entre ambos os modelos, os tanques desenhados no cenário-base serão simulados utilizando o *software* TANKS. Serão alterados no TANKS todos os dados possíveis de forma que os tanques e os produtos sejam representados da forma mais fidedigna.

Na página de internet da U.S.EPA que disponibiliza o *software* TANKS para download há uma lista de erros associados ao programa (U.S.EPA, 2012). Um deles é referente ao cálculo de emissões mensais. Segundo o órgão ambiental americano, o TANKS realiza o cálculo de uma temperatura média da massa de líquido para todo o ano. Assim, uma alteração de temperatura em um mês altera as emissões de todo o ano e, por isso, a U.S.EPA não recomenda a utilização para o cálculo de emissões mensais. Ainda assim, o modelo fornece a opção de seleção de emissões a anuais e mensais, as quais serão apresentadas nas seções adiante.

4.2.1 Resultados do tanque 1

A Tabela 30 apresenta os resultados da estimativa de emissões para o tanque 1 utilizando o TANKS como ferramenta para a simulação das emissões.

Tabela 30 – Emissões do tanque 1 na simulação do cenário-base TANKS

Emissões anuais (libras)			
Ano	Estacionárias	Trabalho	Totais
	3.416	9.170	12.586
Emissões mensais (libras)			
Meses	Estacionárias	Trabalho	Totais
Janeiro	437	1.103	1.540
Fevereiro	335	1.057	1.392
Março	270	787	1.057
Abril	266	764	1.030
Mai	240	591	831
Junho	241	580	821
Julho	255	472	727
Agosto	274	469	743
Setembro	251	728	979
Outubro	293	760	1.053
Novembro	237	954	1.192
Dezembro	337	1.034	1.371
Total	3.436	9.299	12.735

Apesar de a U.S.EPA afirmar que o TANKS não realiza cálculos mensais de forma adequada, há diferenças entre o total de emissões do cálculo mensal e as emissões do cálculo anual, assim como nas estimativas realizadas diretamente com as equações do AP 42.

Como o *software* calcula somente um valor anual de temperatura da massa de líquido para cálculo da pressão de vapor, a existência de diferença para o cálculo anual mostra que é utilizado o valor mensal de cada variável meteorológica.

4.2.1.1 Emissões estacionárias

Em comparação com os valores obtidos pela simulação com as equações do AP 42¹⁷, tanto a soma das emissões estacionárias mensais quanto as emissões desta componente anuais foram cerca de 10% menores. Houve diferença também na distribuição das emissões ao longo do ano, como pode ser observado no Gráfico 13.

Como a movimentação não altera as emissões estacionárias, a variação entre as emissões mensais de ambas as formas de simulação se deve unicamente pela diferença de temperatura do líquido em cada um dos métodos. As diferenças variam de 16% em janeiro até apenas 2% no mês de junho. Entretanto, as emissões da simulação através do TANKS foram menores em todos os meses do ano.

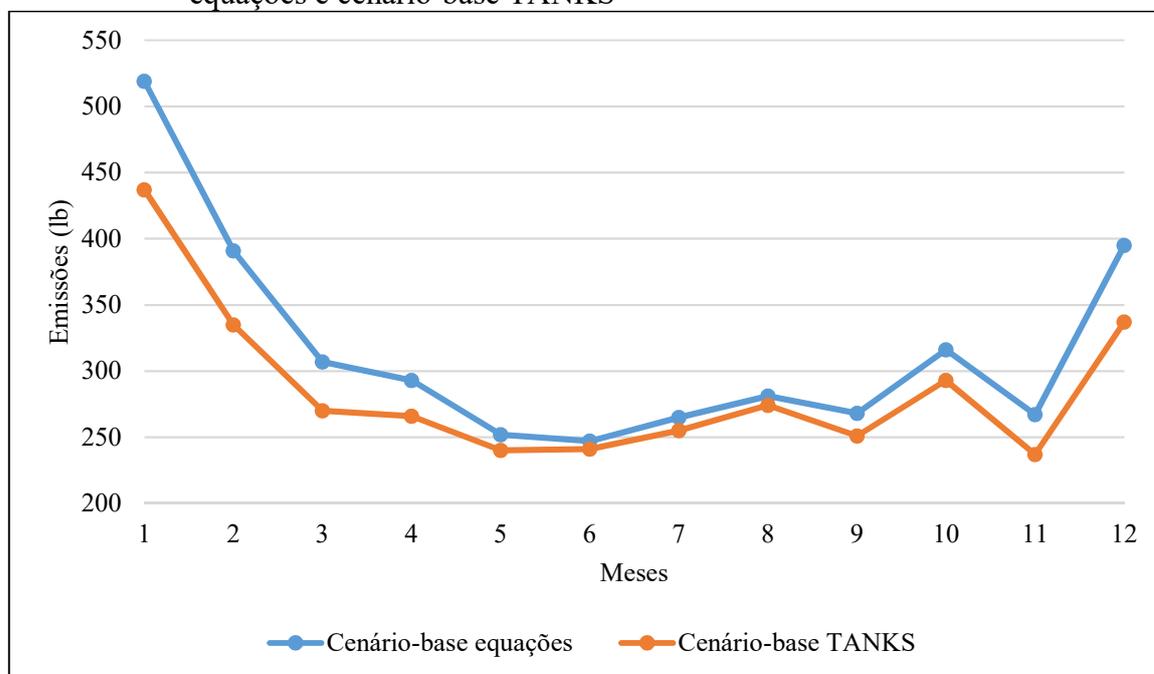
Apesar das simulações apresentarem um perfil de comportamento semelhante, o mês de menor emissão foi diferente, novembro para as emissões calculadas utilizando o TANKS e

¹⁷ Quando não for mencionado, a comparação com simulações do cenário-base realizadas com as equações do AP 42 levará em consideração o somatório das emissões mensais, que será o valor de referência.

junho as emissões calculadas a partir do manual AP 42. A variação entre os meses de emissão máxima e mínima foi menor, chegando a 46% de janeiro a novembro.

Em comparação com o somatório do cálculo mensal, a estimativa anual foi 1% menor.

Gráfico 13 – Comparação das emissões estacionárias mensais do tanque 1 no cenário-base equações e cenário-base TANKS

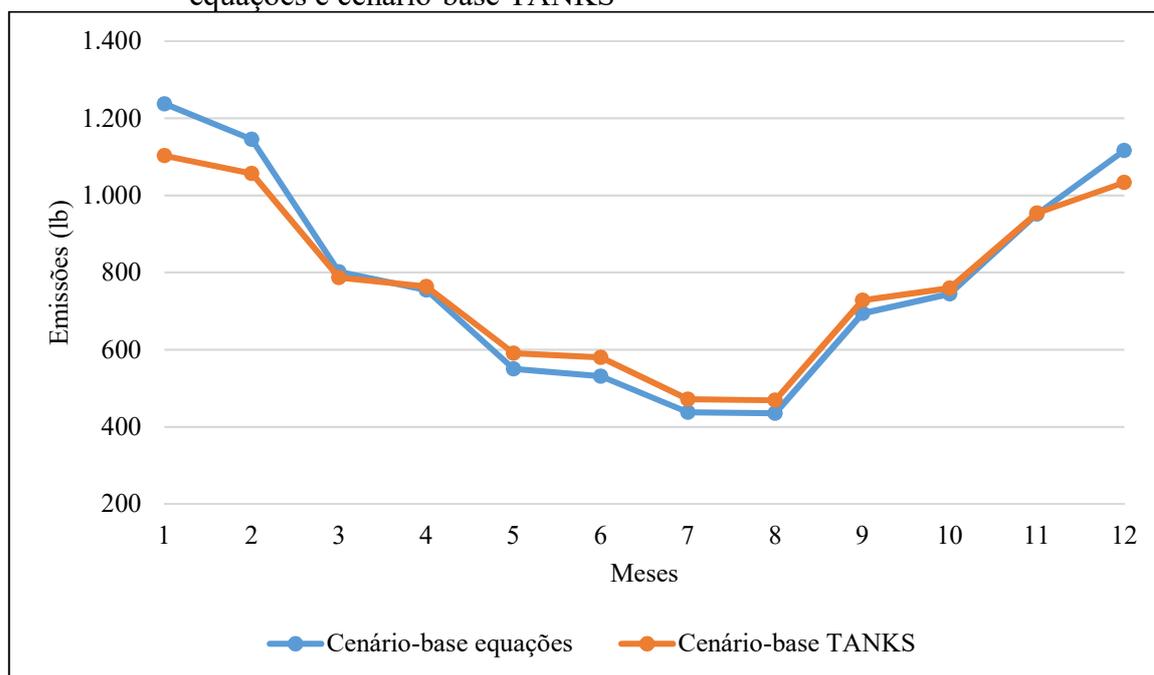


4.2.1.2 Emissões de trabalho

Conforme já abordado, as emissões de trabalho são decorrentes tanto das condições meteorológicas quanto da quantidade de produto movimentado. As condições meteorológicas entram na equação através do cálculo da pressão de vapor do produto armazenado. Como a U.S.EPA afirma que o TANKS somente calcula um valor de temperatura da massa de líquido para todo o ano, a variação mensal no cálculo da temperatura da superfície do líquido somente pode se dar pela variação da radiação solar. Isto faz com que a diferença entre os valores mensais e anuais sejam pequenas, da ordem de 1% (9.299 libras no cálculo mensal e 9.170 no anual).

Ambas as simulações apresentam comportamento similar, uma vez que a variável que mais influencia esta componente é a movimentação. No entanto, a utilização de um único valor médio de temperatura e pressão de vapor no TANKS faz com que a emissão seja subestimada nos meses mais quentes e superestimada nos meses mais frios, atenuando as variações de temperatura, como pode ser observado no Gráfico 14.

Gráfico 14 – Comparação das emissões de trabalho mensais do tanque 1 no cenário-base equações e cenário-base TANKS



Na estimativa realizada com as equações a diferença de emissões entre meses com a mesma movimentação ocorre pelas variações mensais da temperatura média e da radiação solar. No entanto, no TANKS, a diferença mensal é menor por se dever somente pela variação do fator de irradiância solar.

4.2.1.3 Emissões totais

As emissões anuais e mensais apresentaram uma variação pequena, sendo as últimas 1% maiores, corroborando que o cálculo anual atenua as variações, reduzindo as emissões. Apesar de a U.S.EPA afirmar que as emissões mensais não são estimadas adequadamente no TANKS, observa-se que o somatório delas é mais próximo ao valor simulado com as equações do AP 42 (diferença de 4%) do que o as emissões anuais (diferença de 5%).

4.2.2 Resultados do tanque 2

Assim como observado na simulação de emissões com as equações do AP 42, o TANKS gerou emissões muito baixas para o tanque 2. Como o programa arredonda as emissões para 2 casas decimais nas simulações mensais, todas aparecem zeradas. Somente é possível utilizar o resultado do cálculo anual, apresentado na Tabela 31.

Tabela 31 – Emissões do tanque 2 na simulação do cenário-base
TANKS

Emissões anuais (libras)		
Estacionárias	Trabalho	Totais
0,0033	0,0089	0,0122

4.2.2.1 Emissões estacionárias

Os resultados de emissões muito baixos limitam a qualidade da análise e de comparações que podem ser feitas. As emissões estacionárias ficaram 97% abaixo dos valores obtidos com a aplicação das equações do AP 42. Esta grande variação se deve pelo fato de o TANKS não extrapolar dados da curva de pressão de vapor. Como apresentado na Tabela 6, os dados primários de pressão de vapor dos produtos foram na faixa de 40 °F (4,5 °C) a 100 °F (37,8 °C). A planilha elaborada para realizar os cálculos do AP 42 considera uma extrapolação para a obtenção de pressão de vapor em temperaturas fora deste intervalo. Já o TANKS, somente faz interpolação. Assim, caso a temperatura de um produto seja maior que 100 °F, o *software* considerará este como o valor para os cálculos.

4.2.2.2 Emissões de trabalho

As emissões de trabalho foram estimadas no TANKS em 0,0089 libras anuais, enquanto que a simulação com as equações do AP 42 obteve 0,381, resultado 43 vezes maior. Esta diferença também se deve à pressão de vapor considerada para a temperatura média do líquido – 176 °F (80 °C) nas equações do AP 42 e 100 °F (37,8 °C) no TANKS. Como a curva é exponencial, a diferença entre os valores de pressão de vapor destas temperaturas é significativa.

4.2.2.3 Emissões totais

Tanto as emissões estacionárias quanto as de trabalho tiveram uma variação muito grande em comparação com a emissão de referência calculada pelas equações do AP 42. No geral os resultados do TANKS foram 98% menores devido ao *software* não realizar extrapolações nas curvas de pressão de vapor cadastradas no sistema.

4.2.3 Resultados do tanque 3

A estimativa de emissões de COVs do tanque 3 no TANKS resultou em 5.952 libras na soma das simulações mensais e em 5.813 libras na simulação anual. Setenta por cento das emissões totais ocorreram pelo selo do aro, seis por cento foram devidas à movimentação e vinte e quatro por cento aconteceram pelos acessórios. A Tabela 32 apresenta os resultados.

Tabela 32 – Emissões do tanque 3 na simulação do cenário-base TANKS

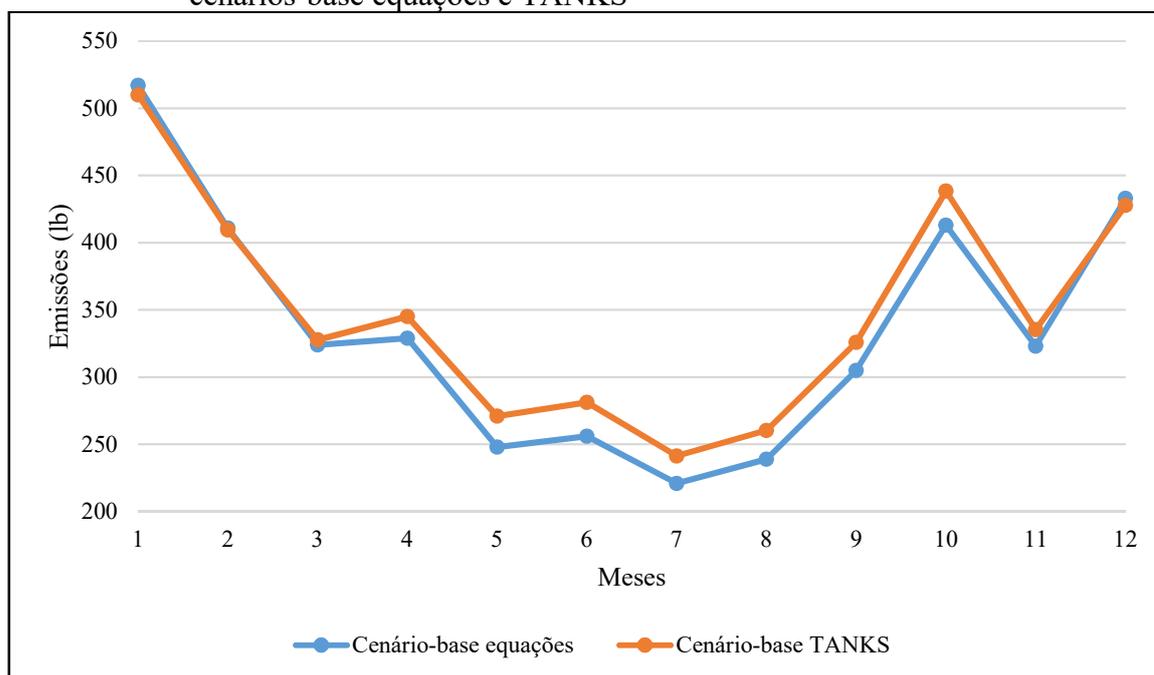
Emissões anuais (libras)				
Ano	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
	4.047	370	1.396	5.813
Emissões mensais (libras)				
Meses	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
Janeiro	510	39	153	701
Fevereiro	410	39	134	582
Março	328	31	115	474
Abril	345	31	118	494
Maiο	271	26	99	396
Junho	281	26	101	408
Julho	241	21	91	353
Agosto	260	21	96	377
Setembro	326	31	113	469
Outubro	438	31	135	604
Novembro	335	39	116	490
Dezembro	428	39	136	603
Total	4.174	370	1.408	5.952

Diferentemente do observado na comparação do tanque 1, de teto fixo, as emissões anuais do TANKS foram mais próximas ao cenário de referência, sendo 1% maiores.

4.2.3.1 Emissões pelo selo do aro

As emissões anuais estimadas com o TANKS se mostraram 3% menores do que a soma das emissões mensais, ficando mais próximas (apenas 1% de diferença) aos valores da simulação com as equações do AP 42. O Gráfico 15 apresenta a variação ao longo do ano de ambos os métodos de cálculo.

Gráfico 15 – Comparação das emissões mensais pelo selo do aro do tanque 3 nos cenários-base equações e TANKS



Ao contrário do observado para o tanque 1 (de teto fixo com diesel), as emissões do tanque 3 calculadas com o TANKS foram, em geral, maiores do que o caso-base e esta diferença foi ainda maior nos meses mais frios. A maior diferença foi de 10% no mês de junho e praticamente não houve diferença no mês de fevereiro.

Há dois fatores principais que explicam a diferença de valores entre os dois métodos. Conforme já falado, apesar de estimar emissões mensais o TANKS calcula somente um valor anual de temperatura do líquido para o cálculo da pressão de vapor. Logo, a variação mensal da temperatura ambiente não afeta, no TANKS, a variação das emissões mensais, uma vez que no cálculo desta componente de perdas ela entra através do valor de pressão de vapor do produto.

Outra diferença observada é que o TANKS utiliza a temperatura da superfície do líquido (T_{LA} – equação 11) no cálculo da pressão de vapor. No entanto, a U.S.EPA recomenda, no capítulo 7 do AP 42, a utilização da temperatura da massa do líquido, calculado conforme apresentado na Tabela 4.

Como o TANKS considera a variação mensal dos dados meteorológicos, a velocidade do vento, que é um fator determinante nestas emissões, é representada adequadamente e as emissões apresentam perfis similares, como apresentado no Gráfico 15.

4.2.3.2 Emissões de movimentação

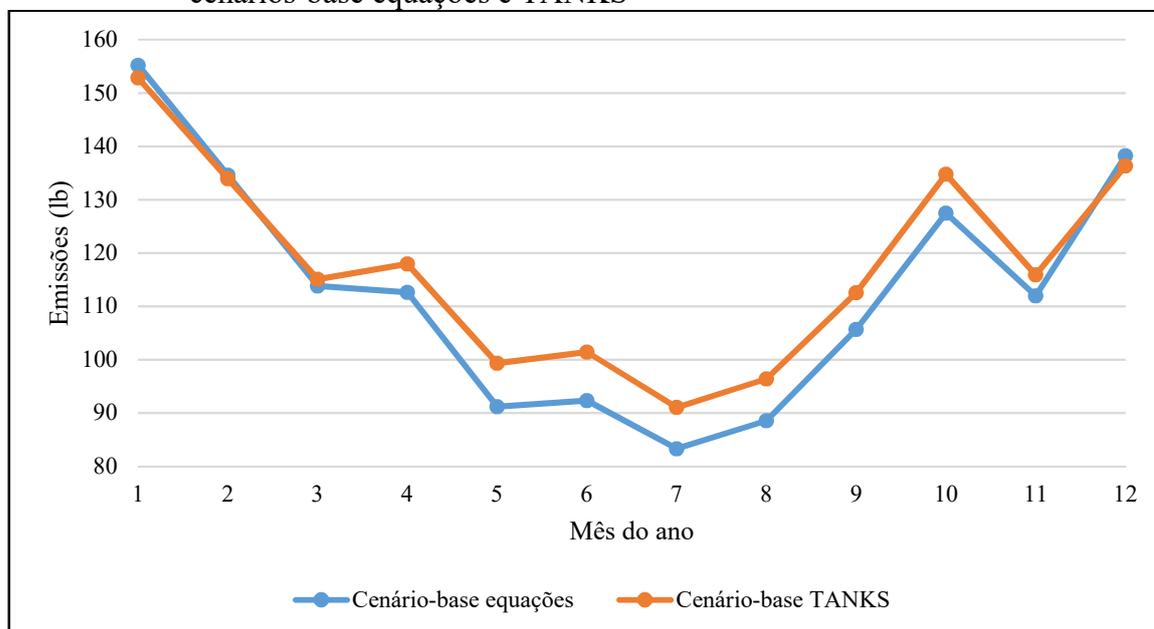
As características do produto armazenado apresentadas na Tabela 6 foram inseridas no TANKS para a realização destas estimativas. Como esta componente de perdas considera a densidade do produto e a movimentação, os valores obtidos foram iguais aos do cenário de referência e não houve diferenças entre as estimativas anuais e mensais.

Como as emissões de movimentação dependem apenas da quantidade de produto movimentado e as características do produto foram cadastradas no TANKS

4.2.3.3 Emissões pelos acessórios

Os acessórios do tanque 3, apresentados na Tabela 12, também foram inseridos manualmente no TANKS, uma vez que algumas tipologias e valores eram diferentes do padrão considerado pelo *software*. O cálculo anual resultou em emissões 3% acima do valor de referência, enquanto que a soma dos valores mensais foi 4% maior do que a referência, não apresentando uma diferença significativa entre os valores anuais e mensais.

Gráfico 16 – Comparação das emissões mensais pelos acessórios do tanque 3 nos cenários-base equações e TANKS



O comportamento mensal das emissões pelos acessórios foi similar às perdas pelo selo do aro, conforme pode ser observado no Gráfico 16.

As emissões estimadas pelo TANKS apresentam variações mensais mais atenuadas. Nos meses de maiores emissões, janeiro, fevereiro e dezembro, as emissões calculadas no *software*

são menores do que a referência. No entanto, nos demais meses, as emissões são maiores, chegam a ser 10% superiores em junho.

A variação mensal que alcança 46% no cenário de referência fica em 41% na estimativa obtida pelo programa disponibilizado pela U.S.EPA.

4.2.4 Resultados do tanque 4

Para o tanque 4 a estimativa de compostos orgânicos voláteis com o TANKS resultou em 5.396 libras como soma das emissões mensais e 5.393 libras nas emissões anuais, uma diferença menor que 1%. A Tabela 33 apresenta os resultados por mês e por componente.

Tabela 33 – Emissões do tanque 4 na simulação do cenário-base TANKS

Emissões anuais (libras)				
Ano	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
	1.943	415	3.034	5.393
Emissões mensais (libras)				
Meses	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
Janeiro	178	43	278	499
Fevereiro	173	43	270	486
Março	165	35	258	457
Abril	162	35	253	449
Maio	155	29	242	425
Junho	153	29	239	420
Julho	155	23	241	419
Agosto	154	23	240	418
Setembro	157	35	245	437
Outubro	161	35	252	448
Novembro	162	43	253	458
Dezembro	170	43	266	479
Total	1.945	415	3.036	5.396

As emissões estimadas pelo *software* foram 1% menores que as calculadas pelas equações, demonstrando que o cenário foi adequadamente representado, pelo menos no que se refere ao total anual.

Em comparação com o cenário de referência, as emissões mensais deste tanque foram similares, com variações negativas e positivas a depender do mês avaliado.

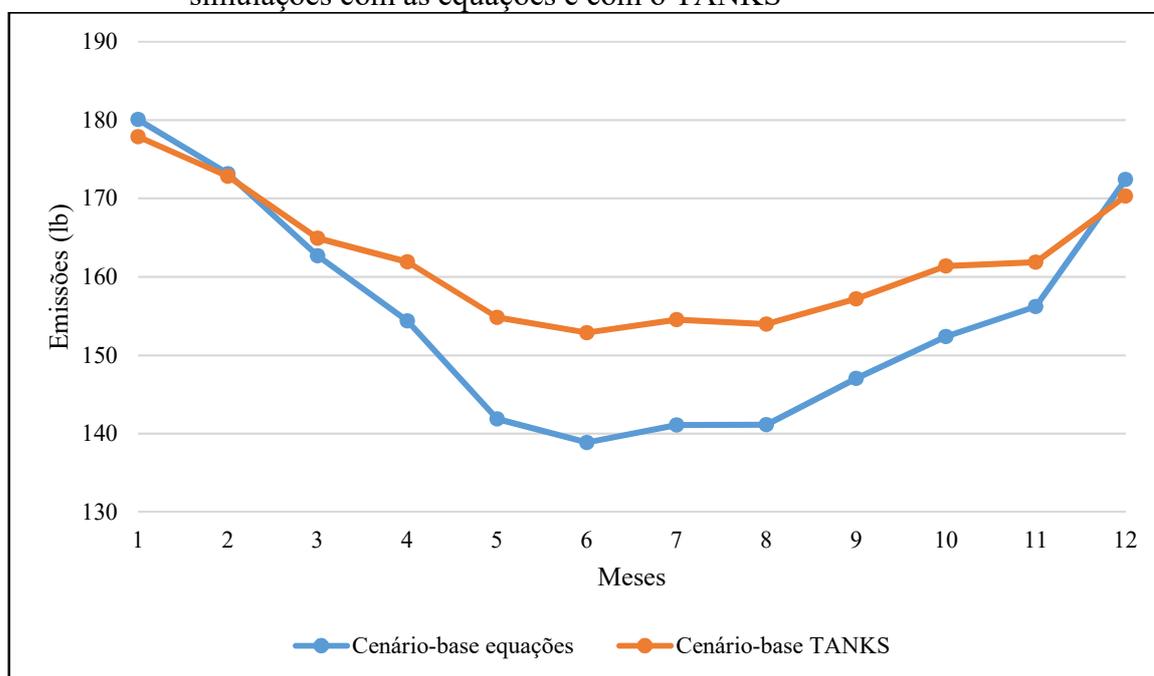
4.2.4.1 Emissões pelo selo do aro

As emissões anuais pelo selo do aro foram 4% acima do cenário de referência. Assim como ocorreu para o tanque 3 de teto flutuante externo, o perfil mensal do cálculo-base e com o *software* foram similares (Gráfico 17), no entanto, houve atenuação das variações pelo TANKS. As emissões dos meses de janeiro, fevereiro e dezembro foram menores que as do

cenário de referência, enquanto que nos demais meses a emissão foi maior. A velocidade do vento não influencia as emissões desta tipologia de tanque, logo, é corroborado o que se observou para o tanque 3, que este fenômeno é causado pela utilização de uma média anual para o cálculo da pressão de vapor e também pela substituição da temperatura da massa do líquido pela temperatura da superfície do líquido para obtenção da pressão de vapor.

Apesar de as emissões anuais pelo selo do aro do cenário-base equações e cenário-base TANKS apresentarem uma variação de 4%, esta diferença chega a 10% nos meses de junho e julho, gerada pela atenuação da variação mensal nas emissões calculadas pelo TANKS.

Gráfico 17 – Comparação das emissões mensais pelo selo do aro do tanque 4 nas simulações com as equações e com o TANKS



A variação mensal chegou a 14% de diferença entre os meses de junho e janeiro. Percentual menor que os 23% de variação entre estes meses no cálculo com as equações.

4.2.4.2 Emissões de movimentação

Assim como com os demais tipos de tanques, não houve variação entre as estimativas mensal e anual das emissões de movimentação. Também não houve diferença entre a estimativa com as equações e a do TANKS.

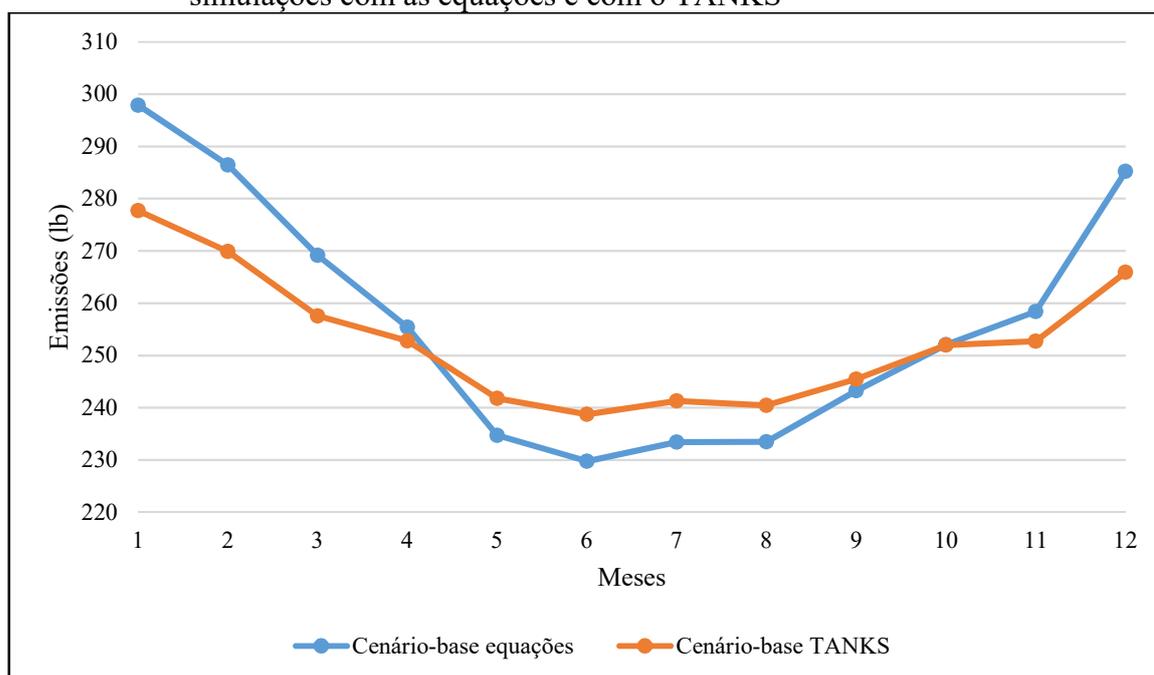
4.2.4.3 Emissões pelos acessórios

As emissões de COVs através dos acessórios do teto flutuante totalizaram 3.036 libras. Este valor foi bastante próximo do obtido a partir da aplicação das equações do AP 42, 3.079 libras (1% de diferença). Apesar disso, como pode ser observado no Gráfico 18, a variação mensal das emissões obtidas pelo TANKS foi menor, em comparação com os valores de referência.

Ao contrário do que pôde ser observado na componente de perdas pelo selo do aro, as maiores diferenças estão nos meses de maior movimentação e temperatura ambiente, janeiro e dezembro. A diferença praticamente inexistente nos meses de abril e outubro e a tendência é inversa de maio a setembro.

Como esta componente de perdas é a mais significativa do total (56%), este comportamento se estende para as emissões totais.

Gráfico 18 – Comparação das emissões mensais pelos acessórios do tanque 4 nas simulações com as equações e com o TANKS



Assim como nas emissões pelo selo do aro, a variação mensal de 23% do cenário de referência foi atenuada para 14% na simulação com o TANKS.

4.2.5 Resultados do tanque 5

Houve 3% de diferença entre as emissões anuais e mensais na estimativa do tanque 5 através do TANKS, sendo as anuais menores, como já observado nas demais simulações. A

maior parte das perdas (75%) ocorreu pelo selo do aro. O detalhamento é apresentado na Tabela 34.

Tabela 34 – Emissões do tanque 5 na simulação do cenário-base TANKS

Emissões anuais (libras)				
Ano	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
	29.534	76	10.187	39.796
Emissões mensais (libras)				
Meses	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
Janeiro	3.834	8	1.149	4.990
Fevereiro	3.049	8	997	4.055
Março	2.405	6	845	3.256
Abril	2.519	6	861	3.386
Mai	1.953	5	715	2.673
Junho	2.018	5	728	2.751
Julho	1.738	4	655	2.397
Agosto	1.873	4	693	2.570
Setembro	2.357	6	814	3.177
Outubro	3.196	6	983	4.185
Novembro	2.448	8	846	3.302
Dezembro	3.171	8	1.010	4.189
Total	30.561	76	10.297	40.933

Tanto as emissões anuais quanto as mensais foram maiores que as do cenário de referência, assim como observado no tanque 4. O total anual do TANKS ficou mais próximo das emissões de referência (2% acima), enquanto o total mensal foi 5% maior.

4.2.5.1 Emissões pelo selo do aro

Assim como nas emissões totais, houve 3% de diferença entre o valor anual e o mensal. As anuais apresentaram apenas 1% de diferença em comparação com o cenário de referência. O Gráfico 19 apresenta a variação ao longo do ano de ambos os métodos de cálculo. O comportamento das variações é bem similar ao observado para o tanque 3, também de teto flutuante externo. O Gráfico 20 apresenta a comparação entre a temperatura da massa do líquido considerada no cálculo das emissões em cada mês pelas equações do AP 42 e a da temperatura da superfície do líquido considerada no cálculo do TANKS que, como é média, é igual ao longo de todo o ano. Observa-se que quanto maior a diferença entre as duas temperaturas, maior é a diferença das emissões, chegando a 15% no mês de junho.

Gráfico 19 – Variação mensal das emissões pelo selo do aro do tanque 5 em dois métodos de cálculo

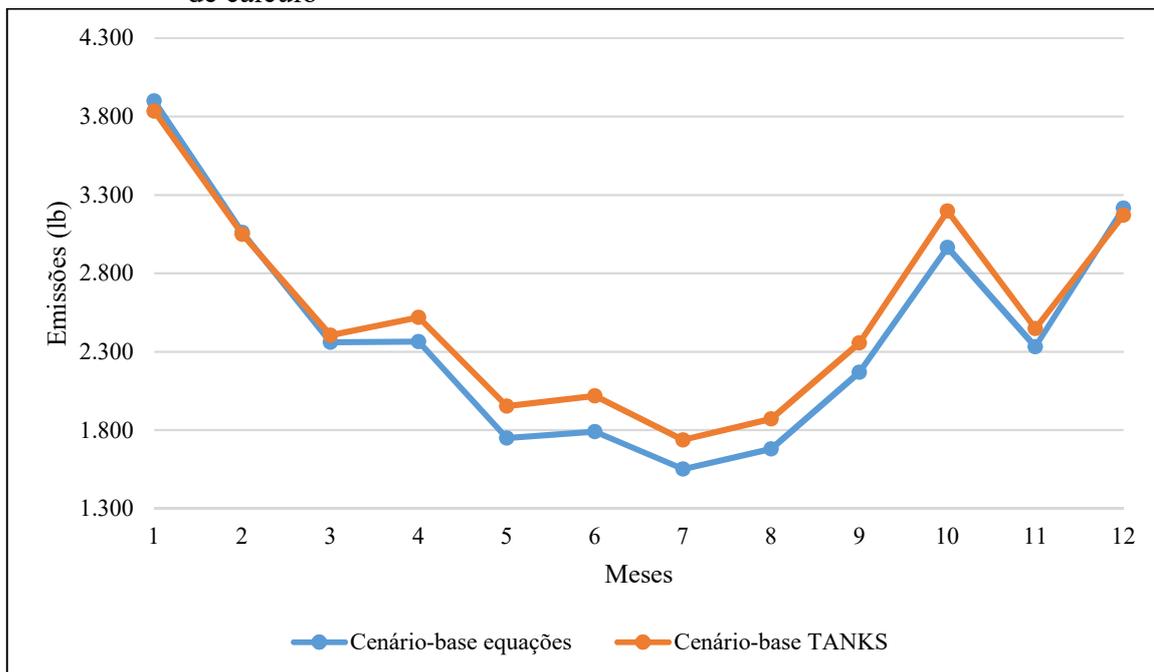
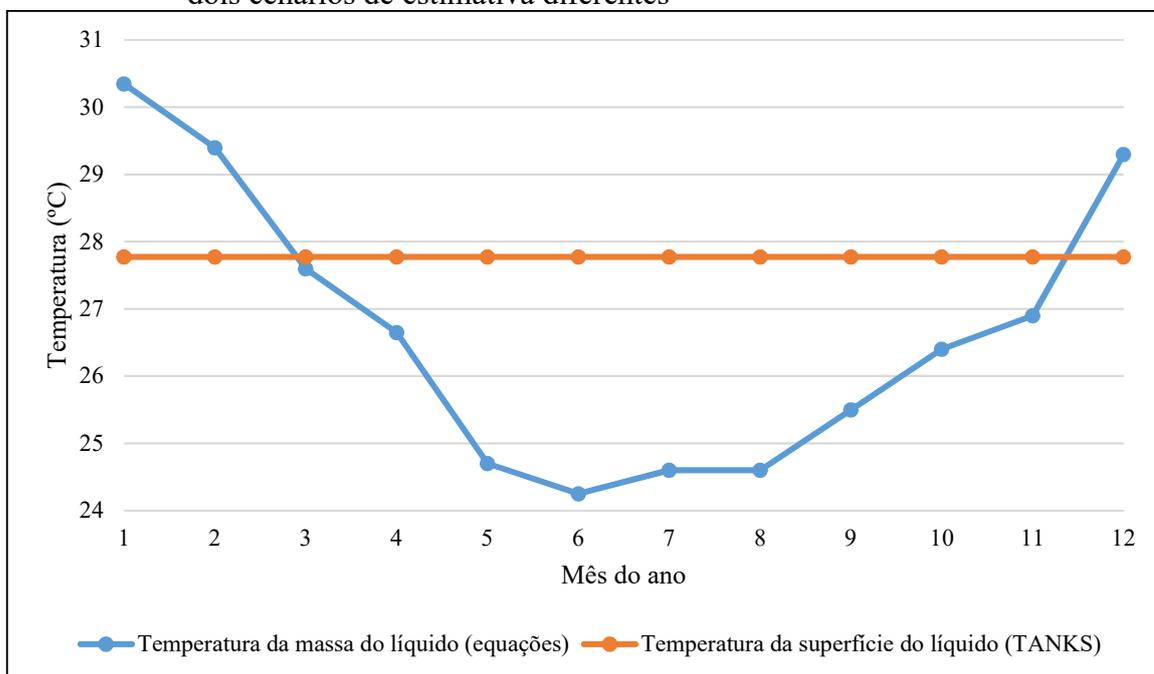


Gráfico 20 – Comparação entre as temperaturas da massa do líquido do tanque 5 em dois cenários de estimativa diferentes



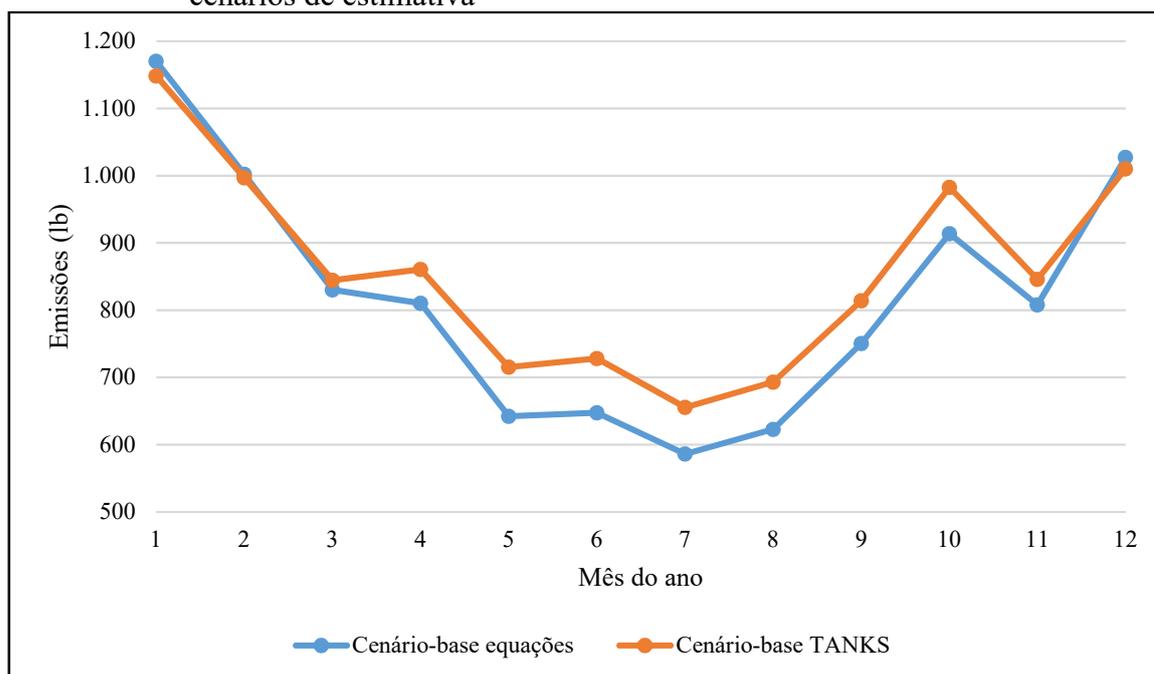
4.2.5.2 Emissões de movimentação

Como já reforçado, não há diferenças entre as emissões de movimentação nos métodos apresentados, uma vez que as características do produto armazenado foram cadastradas no TANKS.

4.2.5.3 Emissões pelos acessórios

O comportamento mensal da variação das emissões observado no tanque 3 e nas perdas pelo selo do aro se repete das emissões pelos acessórios. A diferença chegou a 13% no mês de junho, mês de maior diferença entre as temperaturas consideradas nos dois métodos de cálculo, como apresentado no Gráfico 21.

Gráfico 21 – Comparação entre as emissões mensais pelos acessórios do tanque 5 em dois cenários de estimativa



O uso da temperatura única faz com que as emissões apresentem uma variação menor, como já observado nos outros casos. A maior diferença foi, novamente, de 13% no mês de junho.

4.2.6 Resultados do tanque 6

Da mesma forma como a simulação do tanque 4, também de teto fixo com selo flutuante externo, houve muito pouca variação entre o valor anual e o somatório dos mensais, como pode ser observado na Tabela 35. Ambos os valores ficaram 2% acima das emissões de referência, apesar da diferença mês a mês variar entre menos 5% e mais 9%.

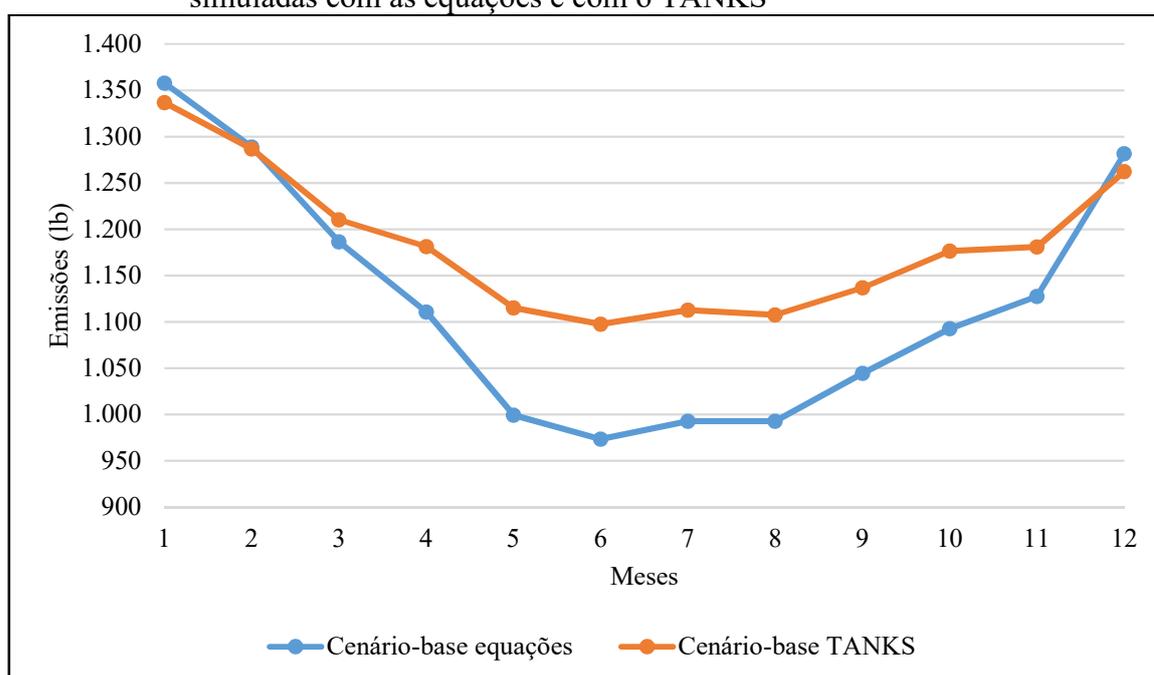
Tabela 35 – Emissões do tanque 6 na simulação do cenário-base TANKS

Emissões anuais (libras)				
Ano	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
	14.182	85	22.144	36.411
Emissões mensais (libras)				
Meses	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
Janeiro	1.337	9	2.087	3.433
Fevereiro	1.287	9	2.009	3.305
Março	1.210	7	1.890	3.107
Abril	1.181	7	1.845	3.033
Mai	1.115	6	1.741	2.863
Junho	1.098	6	1.714	2.817
Julho	1.113	5	1.737	2.855
Agosto	1.108	5	1.729	2.842
Setembro	1.137	7	1.775	2.920
Outubro	1.177	7	1.837	3.021
Novembro	1.181	9	1.844	3.034
Dezembro	1.262	9	1.971	3.242
Total	14.205	85	22.181	36.471

4.2.6.1 Emissões pelo selo do aro

As perdas pelo selo do aro calculadas com o TANKS foram até 6% superiores a esta componente calculada a partir das equações do AP 42. Apesar disto a diferença mensal foi variável, como mostra o Gráfico 22. A temperatura do líquido considerada pelo TANKS para os cálculos é a mesma apresentada no Gráfico 20 para o tanque de teto flutuante externo (27,8 °C), o que justifica a variação em comparação com as emissões mensais obtidas pela aplicação das equações disponíveis no capítulo 7 do AP 42.

Gráfico 22 – Comparação entre as emissões mensais pelo selo do aro do tanque 6 simuladas com as equações e com o TANKS



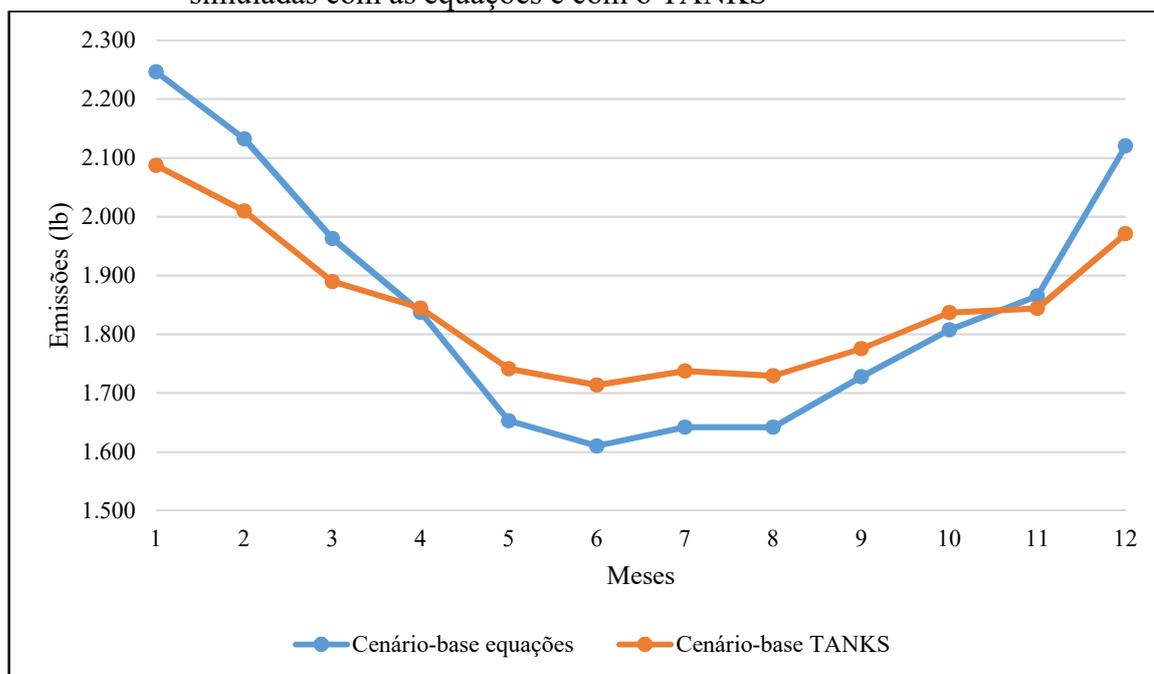
4.2.6.2 Emissões de movimentação

Conforme já apresentado, a variação das emissões de movimentação nos diferentes métodos apresentados até o momento é nula.

4.2.6.3 Emissões pelos acessórios

A variação entre as somas das emissões mensais pelos acessórios estimadas pelo TANKS e pelas equações do AP 42 foi praticamente nula (menor que 1%). Entretanto, pelos motivos já apontados, houve variação de menos 7% (159 libras em janeiro) a mais 6% (104 libras em junho). A comparação dos resultados é apresentada no Gráfico 23.

Gráfico 23 – Comparação entre as emissões mensais pelos acessórios do tanque 6 simuladas com as equações e com o TANKS



4.3 Simulação das emissões do cenário TANKS padrão

As duas formas de simulação apresentadas permitiram a avaliação de como cada ferramenta retrata os dados de entrada na estimativa de emissões de COVs. Além de oferecer diversas possibilidades de personalização das características dos produtos e dos tanques, o *software* TANKS da U.S.EPA contém em seu código diversas referências a condições e produtos padrão de forma a facilitar a estimativa de emissões.

Apesar de a U.S.EPA ser enfática em afirmar que todos os dados de entrada do TANKS devem ser personalizados, certamente muitos que realizam as simulações não têm detalhes sobre a quantidade de acessórios dos tanques ou informações detalhadas sobre a pressão de vapor dos produtos. Para empreendimentos complexos, como refinarias, é mais difícil garantir que haja um padrão nas categorias dos tanques, uma vez que podem ter sido instalados em tempos bastante diferentes e muitas vezes informações de *as-built*¹⁸ não estão disponíveis.

Sendo assim, o objetivo desta simulação é avaliar o resultado de emissões quando são utilizadas informações-padrão para o produto armazenado e para os acessórios dos tanques. Certamente a discrepância dos resultados não pode ser extrapolada e vai variar caso a caso pois dependerá da diferença entre as características do produto real e do padrão utilizado, bem como da diferença entre os acessórios considerados e os reais. No entanto, a análise da variação de cada componente de perdas pode trazer detalhes sobre quais informações são mais relevantes para a priorização durante o levantamento.

Como pode haver grandes diferenças devido às características do produto, nestas simulações não será avaliado e comparado o comportamento mês a mês, mas sim o valor total de emissões no ano. A Tabela 36 apresenta as características dos produtos-padrão do TANKS para simulação em substituição aos dados reais.

Tabela 36 – Dados dos produtos-padrão do TANKS considerados para simulações

Produto	Crude oil RVP 5 (Petróleo)	Distillate fuel oil No. 2 (Diesel)	Gasoline RVP 10 (Gasolina)	Residual oil No. 6 (Óleo combustível)	
PMV a 60 °F (lb/lb-mol)	50	130	66	190	
ME a 60 °F (lb/gal)	7,1	7,1	5,6	7,9	
Curva de pressão de vapor (psi)	40 °F	1,8	0,0031	3,4	0,00002
	50 °F	2,3	0,0045	4,2	0,00003
	60 °F	2,8	0,0065	5,2	0,00004
	70 °F	3,4	0,009	6,2	0,00006
	80 °F	4	0,012	7,4	0,00009
	90 °F	4,8	0,016	8,8	0,00013
	100 °F	5,7	0,022	10,5	0,00019

Fonte: U.S.EPA, 2006b

¹⁸ Expressão em inglês que significa “como construído”. Durante a implantação de um empreendimento pode haver alterações no projeto. Sendo assim, após a finalização é elaborada uma documentação que realmente representa o que foi construído. Este conjunto de documentos é denominado *as-built*.

4.3.1 Resultados do tanque 1

A Tabela 37 apresenta os resultados da estimativa de emissões para o tanque 1 utilizando o TANKS como ferramenta para a simulação e o *Distillate Fuel oil No. 2* como o produto armazenado, representando o diesel.

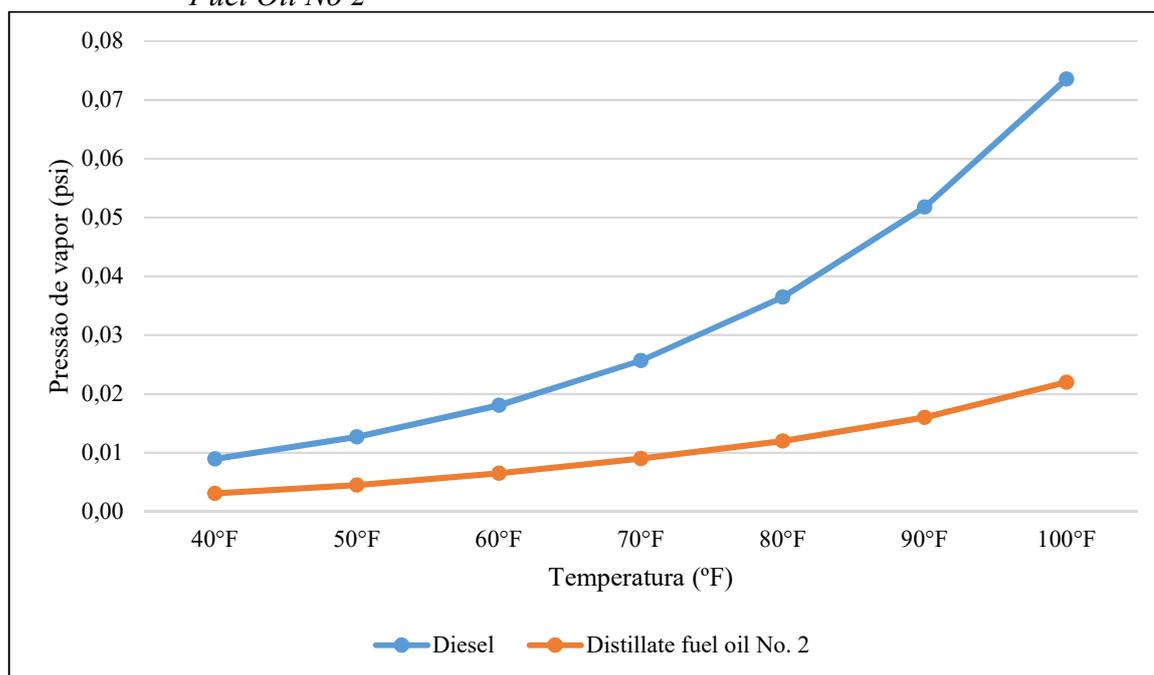
Tabela 37 – Resultados de emissões do tanque 1 utilizando o produto-padrão do TANKS

Emissões anuais (libras)			
Ano	Estacionárias	Trabalho	Totais
	893	2.396	3.289
Emissões mensais (libras)			
Meses	Estacionárias	Trabalho	Totais
Janeiro	112	281	392
Fevereiro	86	271	357
Março	70	204	275
Abril	70	200	269
Mai	64	157	220
Junho	64	154	218
Julho	68	125	193
Agosto	73	125	197
Setembro	66	192	258
Outubro	77	199	275
Novembro	62	249	311
Dezembro	87	266	353
Total	897	2.423	3.320

Em comparação com as demais, o único dado de entrada diferente desta simulação foi o produto armazenado. Ao invés de considerar o diesel com seus dados fornecidos de pressão de vapor e massa específica apresentados na Tabela 6, foram utilizados os valores apresentados na Tabela 36.

Tanto as emissões totais quanto suas componentes foram 75% menores do que as obtidas no cálculo do cenário de referência. O Gráfico 24 ilustra e compara os valores de pressão de vapor de ambos os produtos.

Gráfico 24 – Comparação entre as curvas de pressão de vapor do diesel e do *Distillate Fuel Oil No 2*



Devido à grande diferença observada, pode-se concluir que para a situação apresentada, as características do produto-padrão do TANKS (*Distillate fuel oil No. 2*) não representam adequadamente o produto diesel definido no cenário-base. Há potencial grande de erro na estimativa caso a curva de pressão de vapor do produto seja muito diferente da curva padrão. A diferença da pressão de vapor se traduziu em uma variação em torno de 9.900 libras ou 4,5 toneladas de emissões em um ano.

4.3.2 Resultados do tanque 2

Para a simulação do tanque 2 foi utilizado o produto *Residual oil No. 6* em substituição ao óleo combustível. A Tabela 38 mostra o detalhamento das emissões obtidas por componente. Tanto as emissões anuais como a soma das emissões mensais foram iguais, uma vez que este tanque foi considerado como aquecido e não há variação mensal de temperatura que justifique diferença como nos demais casos. As emissões totais obtidas nesta simulação foram em torno de 140 vezes maiores que as do cenário-base. A variação foi grande tanto para as emissões estacionárias quanto para as de trabalho. Essa grande

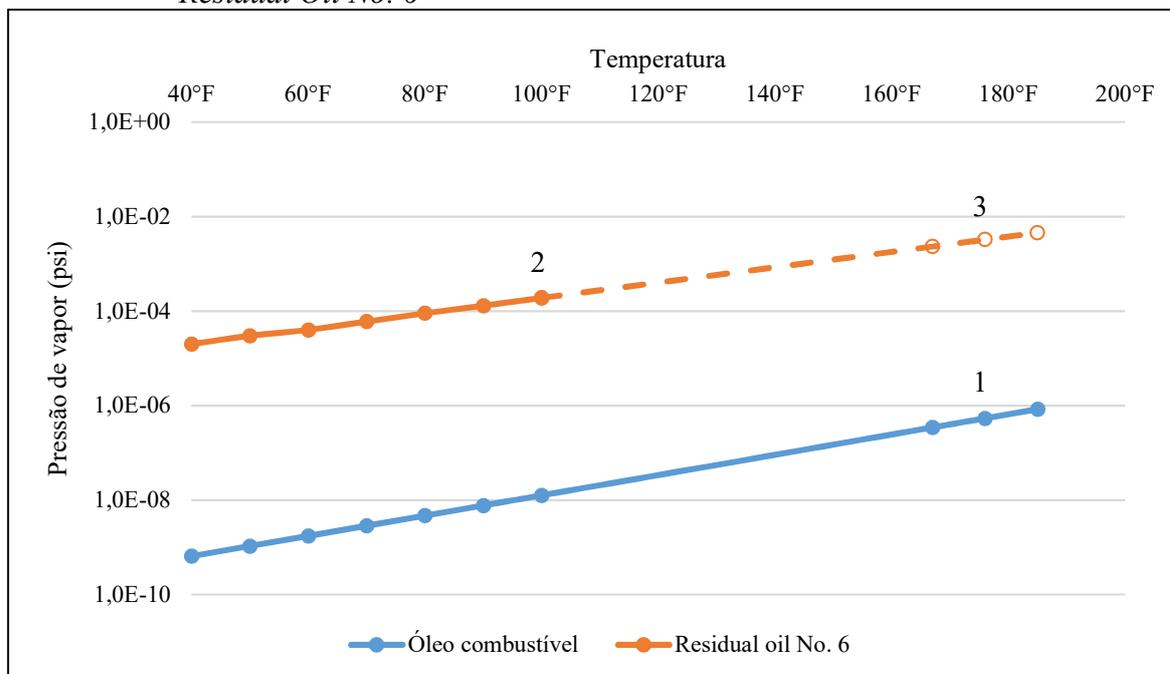
diferença poderia ter sido ainda maior se o TANKS considerasse temperaturas de aquecimento acima de 100 °F (37,8 °C), como mostrado no

Gráfico 25.

Tabela 38 – Resultados de emissões do tanque 2 utilizando o produto-padrão do TANKS

Emissões anuais (libras)			
Ano	Estacionárias	Trabalho	Totais
	19,0	52,0	71,0
Emissões mensais (libras)			
Meses	Estacionárias	Trabalho	Totais
Janeiro	1,62	5,42	7,04
Fevereiro	1,46	5,42	6,88
Março	1,62	4,33	5,95
Abril	1,56	4,33	5,89
Mai	1,62	3,61	5,23
Junho	1,56	3,61	5,17
Julho	1,62	2,89	4,51
Agosto	1,62	2,89	4,51
Setembro	1,56	4,33	5,89
Outubro	1,62	4,33	5,95
Novembro	1,56	5,42	6,98
Dezembro	1,62	5,42	7,04
Total	19,0	52,0	71,0

Gráfico 25 – Comparação entre as curvas de pressão de vapor do óleo combustível e do *Residual Oil No. 6*



O

Gráfico 25 apresenta escala logarítmica na base 10 para permitir a visualização de ambas as curvas. O ponto 1 representa a temperatura e a pressão de vapor considerados na simulação do tanque 2 no cenário-base. O ponto 2 representa a temperatura e a pressão de vapor considerados na simulação com os parâmetros *default* do TANKS. Apesar de o TANKS apresentar a limitação de 100 °F na temperatura do produto armazenado, os valores obtidos com ele foram muito superiores devido à diferença muito grande nas curvas de pressão de vapor dos produtos. Caso o TANKS considerasse a extrapolação da curva, o valor de pressão de vapor obtido (ponto 3) resultaria em uma diferença de emissões ainda maior.

Apesar da elevada variação relativa das emissões, a variação absoluta é pequena devido à ordem de grandeza dos valores de pressão de vapor considerados. Assim, a diferença entre a simulação com as características-padrão do TANKS e a simulação do cenário-base com as equações resultou em uma diferença de 70 libras ou 32 quilos de emissões anuais.

4.3.3 Resultados do tanque 3

O tanque 3 considera o armazenamento de petróleo com cobertura de um teto flutuante externo. A simulação realizada com todos os valores *default* possíveis do TANKS obteve resultados que são apresentados na Tabela 39.

Tabela 39 – Resultados de emissões do tanque 3 utilizando o produto-padrão do TANKS

Emissões anuais (libras)				
Ano	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
	4.008	353	1.220	5.581
Emissões mensais (libras)				
Meses	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
Janeiro	501	37	135	673
Fevereiro	403	37	117	557
Março	324	29	100	454
Abril	342	29	103	475
Maio	270	24	86	381
Junho	280	24	89	393
Julho	240	20	78	338
Agosto	259	20	84	363
Setembro	324	29	99	452
Outubro	434	29	119	583
Novembro	332	37	101	470
Dezembro	422	37	120	578
Total	4.132	353	1.231	5.716

As emissões referentes à soma dos valores mensais resultantes da simulação com as características *default* do TANKS foram muito similares às obtidas no cenário de referência

(0,5% de diferença). No entanto, ao observar o detalhamento por componente é possível perceber que há uma compensação. As emissões pelo selo do aro desta forma de cálculo ficaram um pouco acima da referência, enquanto que as emissões dos acessórios ficaram abaixo. O detalhamento é apresentado no Gráfico 26.

Gráfico 26 – Emissões do tanque 3 por componente com diferentes métodos de estimativa

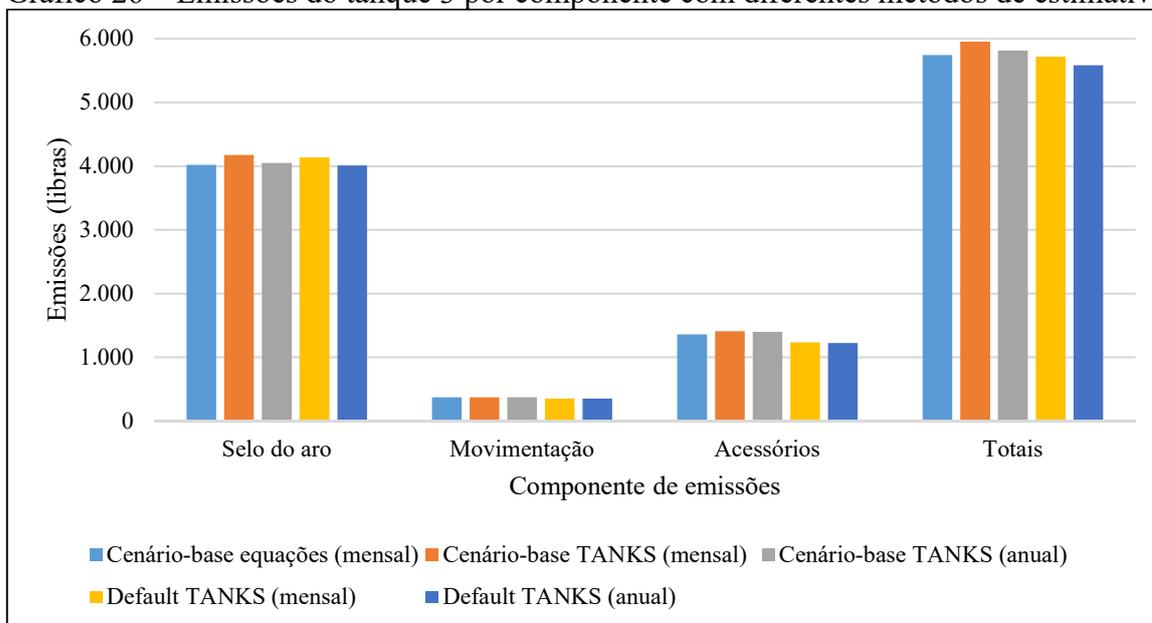
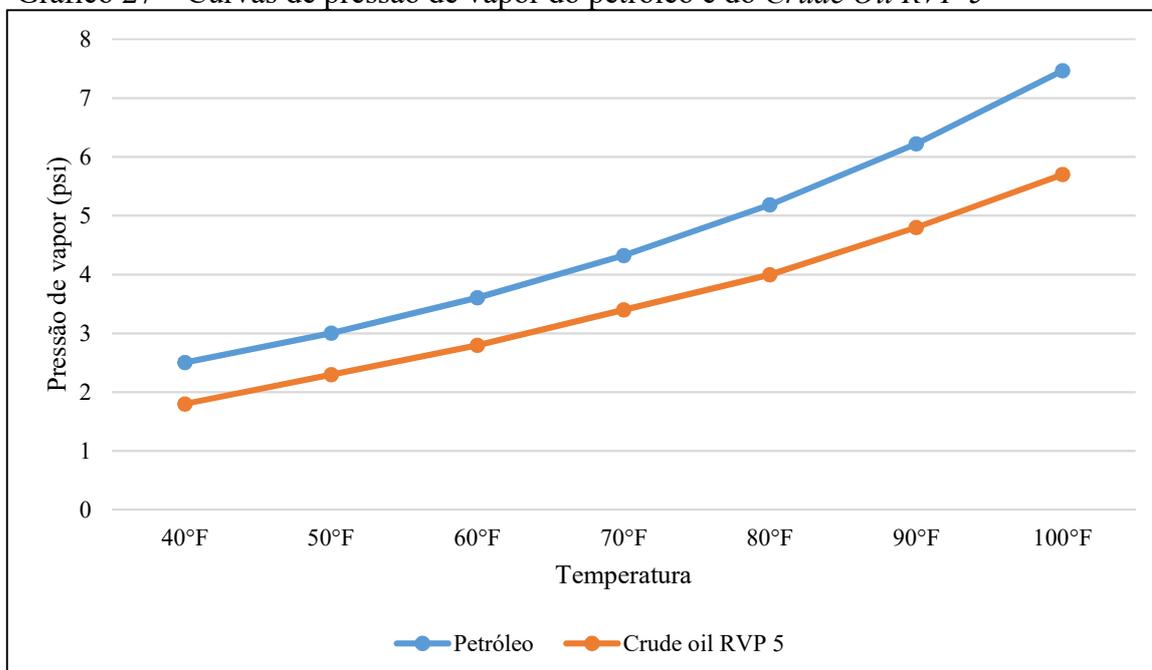


Gráfico 27 – Curvas de pressão de vapor do petróleo e do *Crude Oil RVP 5*



A diferença observada nas emissões pelo selo do aro é decorrente tanto da forma de cálculo do TANKS que, como já comentado, calcula a pressão de vapor com base na temperatura da superfície do líquido e não na temperatura da massa de líquido, como da curva de pressão de vapor utilizada. Apesar de a curva do petróleo apresentar valores de pressão de

vapor mais elevados que o *Crude Oil RVP 5* (Gráfico 27), este último resultou em emissões mais elevadas pois seu peso molecular da fase vapor (ou massa molar aparente) é mais alto (50 lb/lb-mol) que o do Petróleo (38,9 lb/lb-mol).

As emissões pelos acessórios foram cerca de 10% menores do que os valores do cenário-base com as equações devido, principalmente, à variação na quantidade e tipo de acessórios, conforme apresentado na Tabela 12.

4.3.4 Resultados do tanque 4

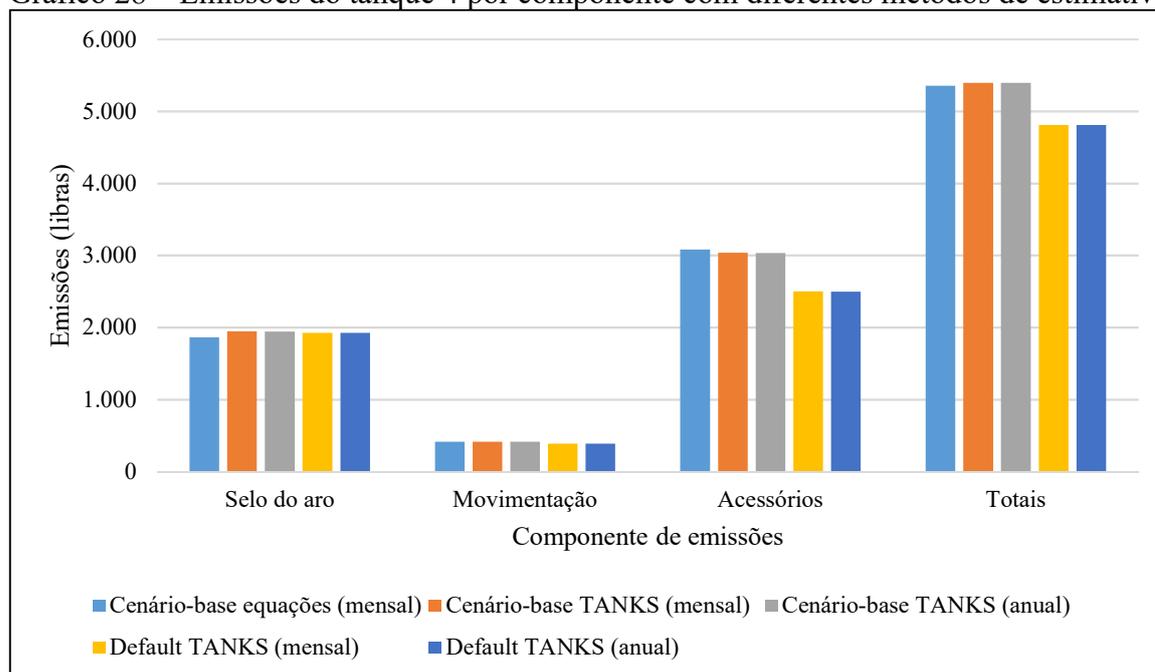
Assim como o tanque 3, o tanque 4 armazena petróleo, mas com a cobertura de um teto fixo não autoportante e um selo flutuante interno. A Tabela 40 apresenta os resultados por componente da simulação do tanque 4 com as características-padrão do TANKS.

Tabela 40 – Resultados de emissões do tanque 4 utilizando o produto-padrão do TANKS

Emissões anuais (libras)				
Ano	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
	1.925	387	2.496	4.808
Emissões mensais (libras)				
Meses	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
Janeiro	175	40	227	442
Fevereiro	170	40	221	431
Março	163	32	211	407
Abril	160	32	208	401
Maio	154	27	200	381
Junho	152	27	197	377
Julho	154	22	200	375
Agosto	153	22	199	374
Setembro	156	32	203	391
Outubro	160	32	207	400
Novembro	160	40	208	409
Dezembro	168	40	218	426
Total	1.926	387	2.498	4.812

As emissões do tanque 4 apresentaram variação menor que 0,1% entre o total anual e o mensal. As emissões totais foram 10% menores que as do cenário de referência, principalmente devido à variação no tipo e quantidade de acessórios. Somente nas perdas pelos acessórios as diferenças alcançaram 19%. Esta variação ocorreu porque os valores de pressão de vapor do produto *default* do TANKS que representa o petróleo são menores (Gráfico 27), porque a quantidade de acessórios do padrão do TANKS é menor que a do cenário-base e porque os tipos de alguns são menos emissões. O Gráfico 28 ilustra a diferença das emissões por componente em cada método de simulação.

Gráfico 28 – Emissões do tanque 4 por componente com diferentes métodos de estimativa



Comparando as diferenças para o tanque 3 e o tanque 4, pode-se concluir que o tanque de teto fixo com selo flutuante interno se mostrou mais sensível à variação na forma de estimativa, apresentando diferenças significativas para a componente relacionada aos acessórios.

4.3.5 Resultados do tanque 5

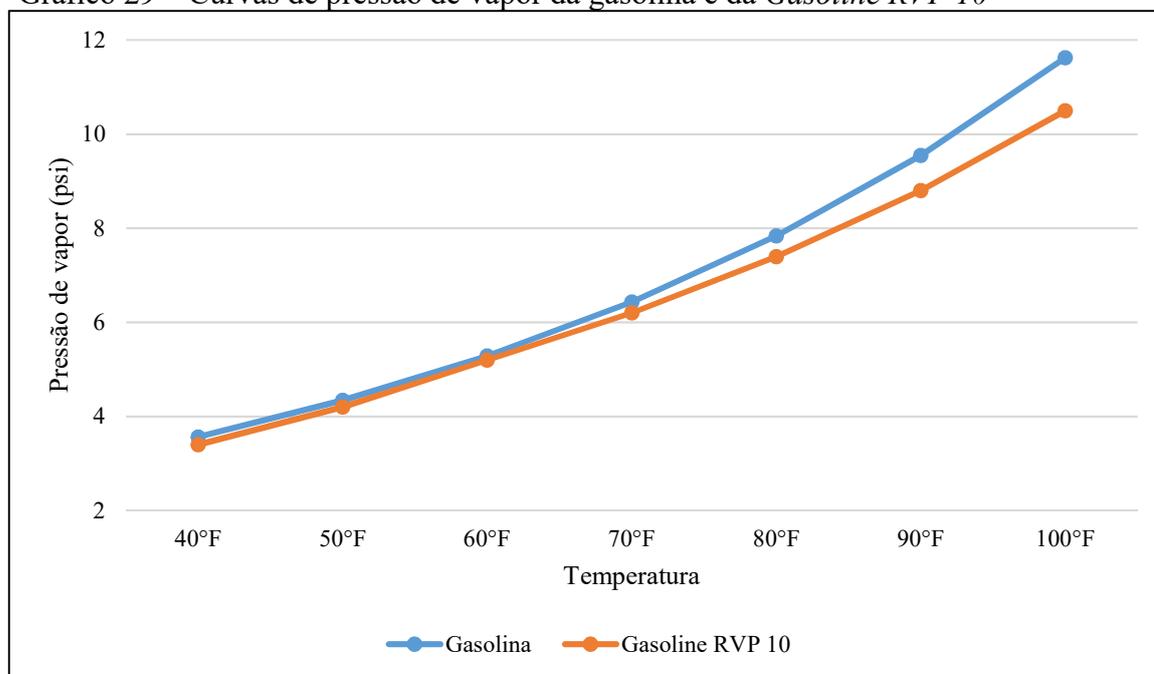
O tanque 5 armazena gasolina com a cobertura de um teto flutuante externo. O TANKS apresenta em seu código diversas gasolinas com variadas curvas de pressão de vapor. Foi escolhida para representar a gasolina do cenário-base aquela que tinha os valores mais próximos, a *Gasoline RVP 10*. A estimativa a partir de características-padrão do TANKS resultou nas emissões apresentadas na Tabela 41.

As emissões referentes à soma dos valores mensais resultantes da simulação com as características default do TANKS foram 3% menores do que o total de emissões do cenário de referência.

Tabela 41 – Resultados de emissões do tanque 5 utilizando o produto-padrão do TANKS

Emissões anuais (libras)				
Ano	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
	28.242	70	8.600	36.911
Emissões mensais (libras)				
Meses	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
Janeiro	3.601	7	967	4.575
Fevereiro	2.879	7	837	3.722
Março	2.291	6	708	3.005
Abril	2.409	6	728	3.143
Maio	1.887	5	604	2.495
Junho	1.952	5	617	2.574
Julho	1.680	4	548	2.232
Agosto	1.811	4	584	2.399
Setembro	2.269	6	692	2.967
Outubro	3.059	6	841	3.906
Novembro	2.341	7	714	3.062
Dezembro	3.001	7	852	3.861
Total	29.180	70	8.691	37.941

Na componente do selo do aro a diferença entre as emissões obtidas na simulação padrão do TANKS e o cenário de referência foi de 0,1% para as emissões mensais e 3% para as emissões anuais. Como o TANKS fornece diversas gasolinas com variadas curvas de pressão de vapor, conhecendo o produto armazenado é possível escolher uma mais similar e reduzir bastante as diferenças. O Gráfico 29 apresenta a comparação entre as curvas dos dois produtos.

Gráfico 29 – Curvas de pressão de vapor da gasolina e da *Gasoline RVP 10*

Praticamente toda a diferença se concentrou na componente dos acessórios, na qual a variação foi de 11%, devido a variações no tipo e na quantidade de acessórios, como pode ser observado na Tabela 12. As perdas de movimentação foram 8% menores, mas o valor absoluto

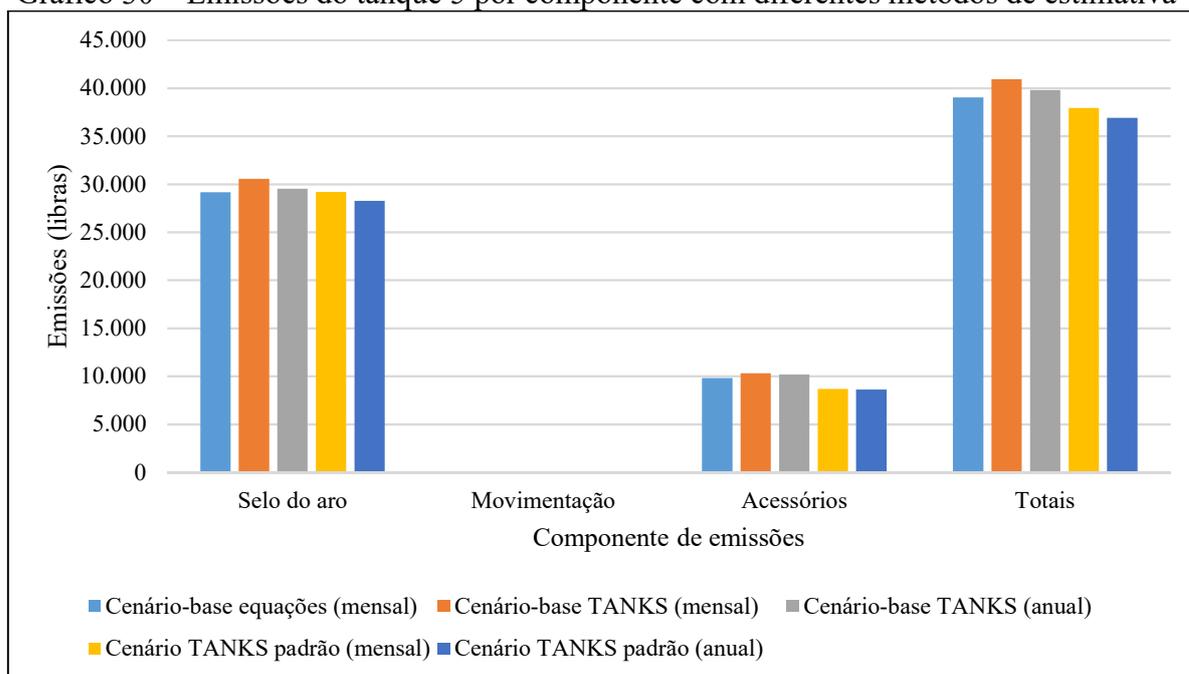
é pequeno. O Gráfico 30 apresenta os resultados por componente nos diferentes métodos de estimativa.

Com relação às emissões totais, as obtidas a partir do somatório do cálculo mensal ficaram em torno de 3% abaixo em comparação com o cenário de referência e com o cálculo anual 5% abaixo.

Apesar das curvas de pressão de vapor das gasolinas (Gráfico 29), graficamente, se apresentarem mais próximas que as curvas dos petróleos (Gráfico 27), houve uma maior diferença na simulação do tanque 5 em comparação com o tanque 3. Isto ocorreu devido à diferença dos acessórios, que se torna mais evidente quanto o tanque armazena um produto mais volátil.

Apesar da pequena diferença relativa das diferentes formas de cálculo, a variação de 3% das emissões totais equivale a cerca de mil libras.

Gráfico 30 – Emissões do tanque 5 por componente com diferentes métodos de estimativa



4.3.6 Resultados do tanque 6

O tanque 6 é similar ao 4, com um teto fixo não autoportante e um selo flutuante interno, mas armazenando gasolina. Assim como para o tanque 5, foi selecionada a *Gasoline RVP 10* para representar o produto armazenado no cenário de características-padrão do TANKS. Os resultados por componente são apresentados na Tabela 42.

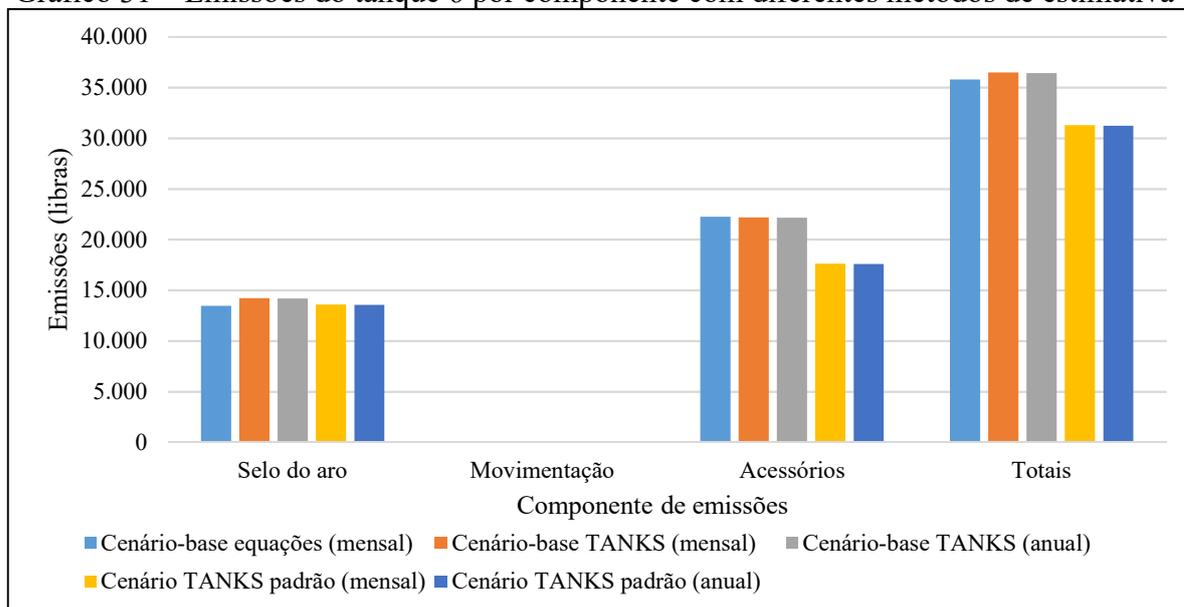
Tabela 42 – Resultados de emissões do tanque 6 utilizando o produto-padrão do TANKS

Emissões anuais (libras)				
Ano	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
	13.561	76	17.589	31.227
Emissões mensais (libras)				
Meses	Selo do aro	Movimentação	Acessórios	Totais
Janeiro	1.256	8	1.629	2.892
Fevereiro	1.215	8	1.576	2.798
Março	1.153	6	1.495	2.655
Abril	1.130	6	1.465	2.602
Maio	1.078	5	1.398	2.481
Junho	1.062	5	1.377	2.444
Julho	1.076	4	1.395	2.475
Agosto	1.071	4	1.389	2.465
Setembro	1.095	6	1.420	2.521
Outubro	1.126	6	1.460	2.593
Novembro	1.129	8	1.465	2.602
Dezembro	1.195	8	1.550	2.752
Total	13.584	76	17.618	31.279

Assim como no tanque 4, as emissões do tanque 6 apresentaram variação muito pequena entre o total anual e o mensal (0,2%). Foi equivalente a 13% a diferença entre as emissões totais e as do cenário de referência. Da mesma forma como no tanque 5, as emissões de movimentação apresentaram diferença relativa de 10%, apesar de representarem pouco perante as emissões totais.

As perdas pelos acessórios foram as mais representativas e também as com maior diferença (21%), como pode ser observado no Gráfico 31. Isso se deve à quantidade e tipo de acessórios considerados como padrão pelo TANKS em comparação com o cenário-base, principalmente no que se refere às pernas de sustentação do teto fixo.

Gráfico 31 – Emissões do tanque 6 por componente com diferentes métodos de estimativa



Assim como observado na comparação entre os resultados dos tanques 3 e 4, o tanque 6 de teto fixo com selo flutuante interno se mostrou mais sensível à variação na forma de estimativa do que o tanque similar de teto flutuante externo, apresentando diferenças mais significativas para a componente relacionada aos acessórios.

4.4 Modelagem de dispersão

Com base nos resultados obtidos nos itens 4.1, 4.2 e 4.3, foram definidas as taxas de emissão de compostos orgânicos voláteis para cada tanque e cada cenário. A Tabela 43 apresenta os resultados anuais das estimativas convertidos em gramas por segundo (unidade de entrada no modelo de dispersão) e arredondados para três casas decimais.

Tabela 43 – Taxas de emissão em gramas por segundo para alimentação do modelo de dispersão

	Cenário-base equações		Cenário-base TANKS		Cenário TANKS padrão	
	Mensal	Anual	Mensal	Anual	Mensal	Anual
Tanque 1	0,190	0,184	0,183	0,181	0,048	0,047
Tanque 2 ¹⁹	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001
Tanque 3	0,083	0,080	0,086	0,084	0,082	0,080
Tanque 4	0,077	0,077	0,078	0,078	0,069	0,069
Tanque 5	0,561	0,539	0,589	0,572	0,546	0,531
Tanque 6	0,515	0,510	0,525	0,524	0,450	0,449
Total	1,426	1,390	1,460	1,438	1,196	1,178

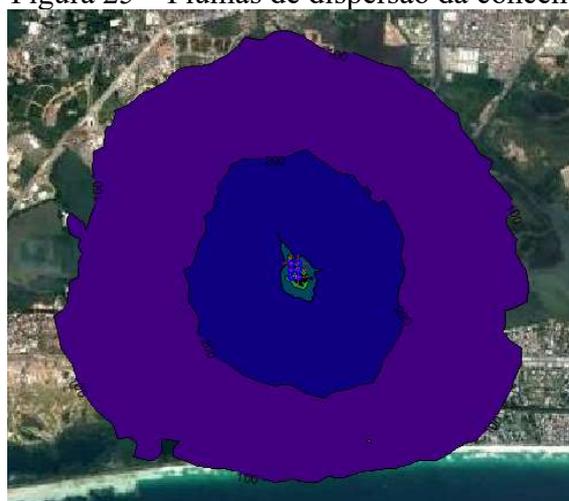
Como resultados da modelagem foram obtidos, para cada cenário, obtida as concentrações máximas horárias e concentrações anuais para cada ponto do domínio definido.

4.4.1 Resultado das concentrações máximas horárias

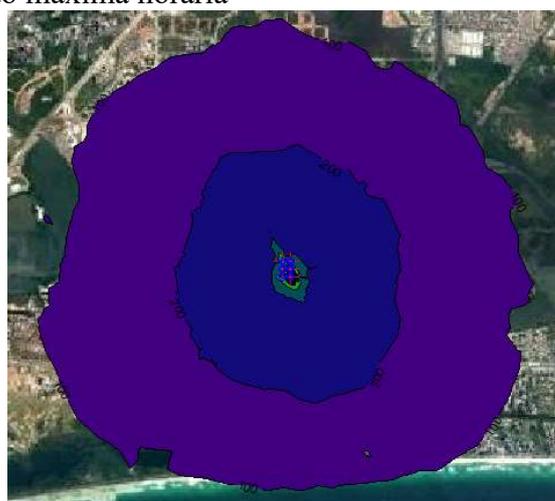
A Figura 25 apresenta as plumas de concentrações máximas decorrentes da dispersão das emissões nos seis diferentes cenários.

¹⁹ O tanque 2 apresentou emissões muito pequenas no cenário-base equações e cenário-base TANKS e no arredondamento para 3 casas decimais foram consideradas como zeradas.

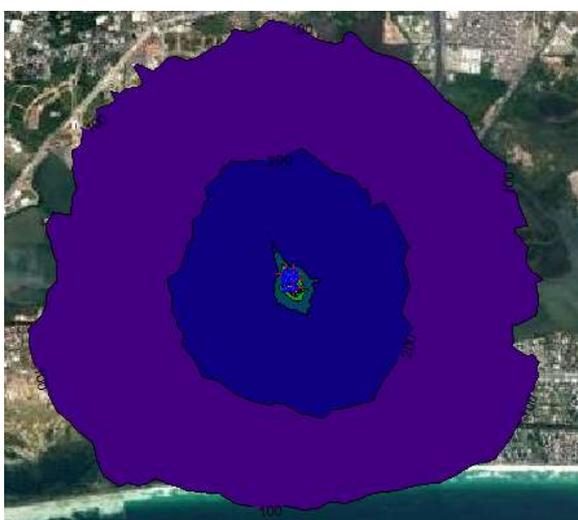
Figura 25 – Plumas de dispersão da concentração máxima horária



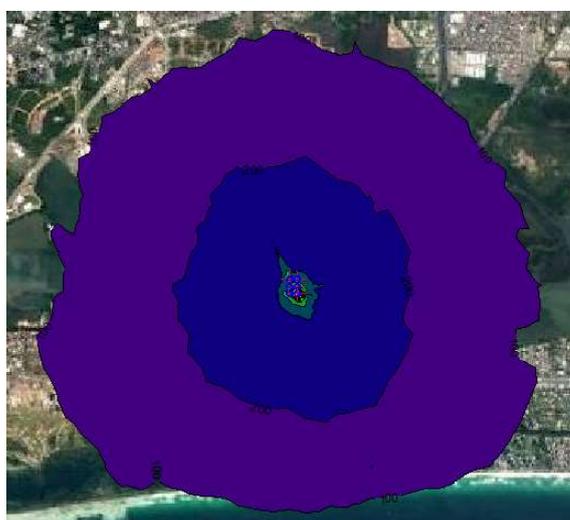
(a)



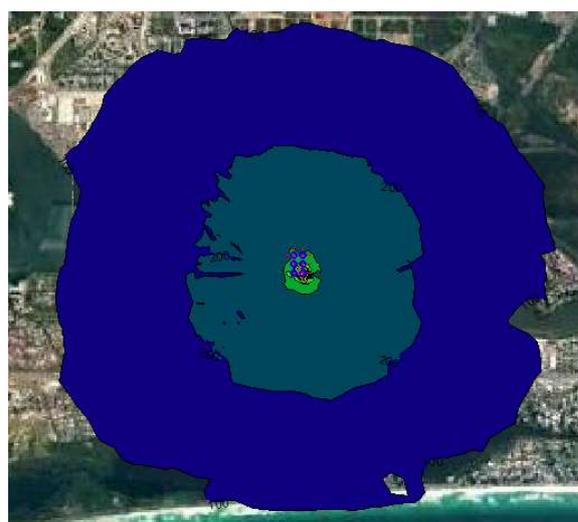
(b)



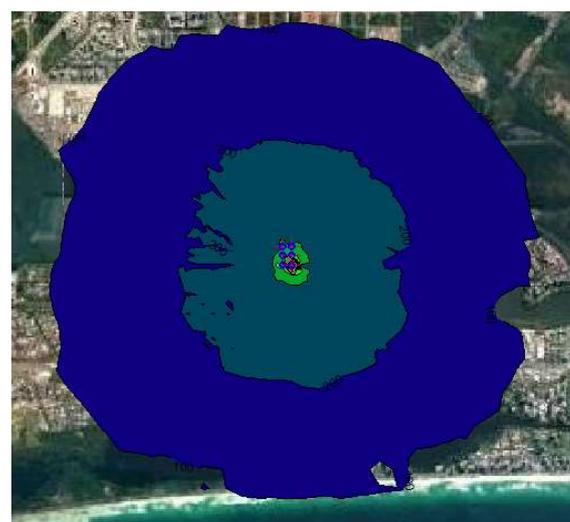
(c)



(d)



(e)



(f)

Legenda: (a) – Cenário-base equações mensal; (b) – Cenário-base equações anual; (c) – Cenário-base TANKS mensal; (d) – Cenário-base TANKS anual; (e) – Cenário TANKS padrão mensal; (f) – Cenário TANKS padrão anual

Conforme detalhado no item 3.2.2.1, todas as plumas apresentam como menor concentração o valor de $100 \mu\text{g m}^{-3}$. Apesar disto, as Figuras 25 a, b, c, d apresentam a faixa entre as concentrações de 100 e $200 \mu\text{g m}^{-3}$ na cor roxa, enquanto que as Figuras e, f apresentam a faixa com a mesma concentração na cor azul. Da mesma forma, a curva seguinte (de 200 a $400 \mu\text{g m}^{-3}$) é apresentada na cor azul nas Figuras 25 a, b, c, d e na cor verde nas Figuras e, f. Isto ocorre porque os cenários apresentados nas Figuras 25 e, f apresentaram valores máximos menores que os demais logo, as concentrações estão distribuídas em uma quantidade menor de curvas, alterando a distribuição de cores.

As plumas de dispersão resultante de todos os cenários apresentaram uma distribuição similar circular e concêntrica. A pluma de dispersão resultante da simulação das concentrações máximas horárias não é uma pluma “real”. Logo, a característica circular e concêntrica das plumas não significa que não houve influência do relevo ou da direção do vento na dispersão. Cada ponto do *grid* representa a concentração do poluente no ambiente em um determinado horário de um dia do ano. Como pode ser observado na Tabela 44, os valores máximos de concentração ocorreram em diferentes dias e meses.

O valor único da concentração máxima pode ser alterado de acordo com o tamanho e a definição do domínio selecionado. Sendo assim, para uma comparação entre os resultados foram avaliados os valores das 10 maiores concentrações ambientais para cada um dos cenários, bem como o dia e hora em que elas ocorreram (Tabela 44).

Tabela 44 – Data, hora e as maiores concentrações ambientais de cada cenário

Máximas	Cenário-base equações				Cenário-base TANKS				Cenário TANKS padrão			
	Mensal		Anual		Mensal		Anual		Mensal		Anual	
	Conc. ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Data Hora	Conc. ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Data Hora	Conc. ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Data Hora	Conc. ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Data Hora	Conc. ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Data Hora	Conc. ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Data Hora
1ª máxima	1.811	23/03 08 h	1.793	23/03 08 h	1.846	23/03 08 h	1.842	23/03 08 h	1.581	23/03 08 h	1.578	23/03 08 h
2ª máxima	1.778	27/09 07 h	1.760	04/03 07 h	1.815	27/09 07 h	1.809	27/09 07 h	1.561	27/09 07 h	1.556	27/09 07 h
3ª máxima	1.777	04/03 07 h	1.759	27/09 07 h	1.812	04/03 07 h	1.808	04/03 07 h	1.552	04/03 07 h	1.549	04/03 07 h
4ª máxima	1.528	07/03 04 h	1.512	07/03 04 h	1.554	07/03 04 h	1.550	07/03 04 h	1.312	04/01 07 h	1.309	04/01 07 h
5ª máxima	1.377	21/06 08 h	1.363	21/06 08 h	1.402	21/06 08 h	1.399	21/06 08 h	1.213	08/03 07 h	1.205	08/03 07 h
6ª máxima	1.209	29/09 07 h	1.198	29/09 07 h	1.233	29/09 07 h	1.230	29/09 07 h	1.056	29/09 07 h	1.053	29/09 07 h
7ª máxima	960	05/03 07 h	948	05/03 07 h	981	05/03 07 h	977	05/03 07 h	847	05/03 07 h	843	05/03 07 h
8ª máxima	851	05/07 08 h	839	05/07 08 h	869	05/07 08 h	865	05/07 08 h	746	05/07 08 h	741	05/07 08 h
9ª máxima	843	13/02 06 h	827	13/02 06 h	837	13/02 06 h	832	13/02 06 h	708	04/03 07 h	693	04/03 07 h
10ª máxima	769	15/12 02 h	754	15/12 02 h	780	04/03 07 h	770	19/04 01 h	661	19/04 01 h	660	19/04 01 h

Todos os cenários apresentaram a maior concentração no mesmo momento, o dia 23 de março às 8 horas da manhã. Em comparação com o cenário de referência, a maior parte dos momentos de concentração elevada foi similar.

A modelagem de dispersão atmosférica mostrou-se razoavelmente sensível à variação nos dados de entrada. A diferença de 17% entre a taxa de emissão do cenário-base TANKS mensal e a do cenário TANKS padrão anual se traduziu em uma variação de 13% na concentração máxima de ambos os cenários. Esta diferença se mantém, pelo menos até a 10ª máxima. Para permitir uma melhor avaliação do comportamento da dispersão nos diferentes cenários, a Tabela 45 compara a variação das taxas de emissão e das concentrações ambientais entre o cenário de referência e os demais

Tabela 45 – Variação percentual entre a taxa de emissão e maiores concentrações do cenário de referência e dos demais cenários

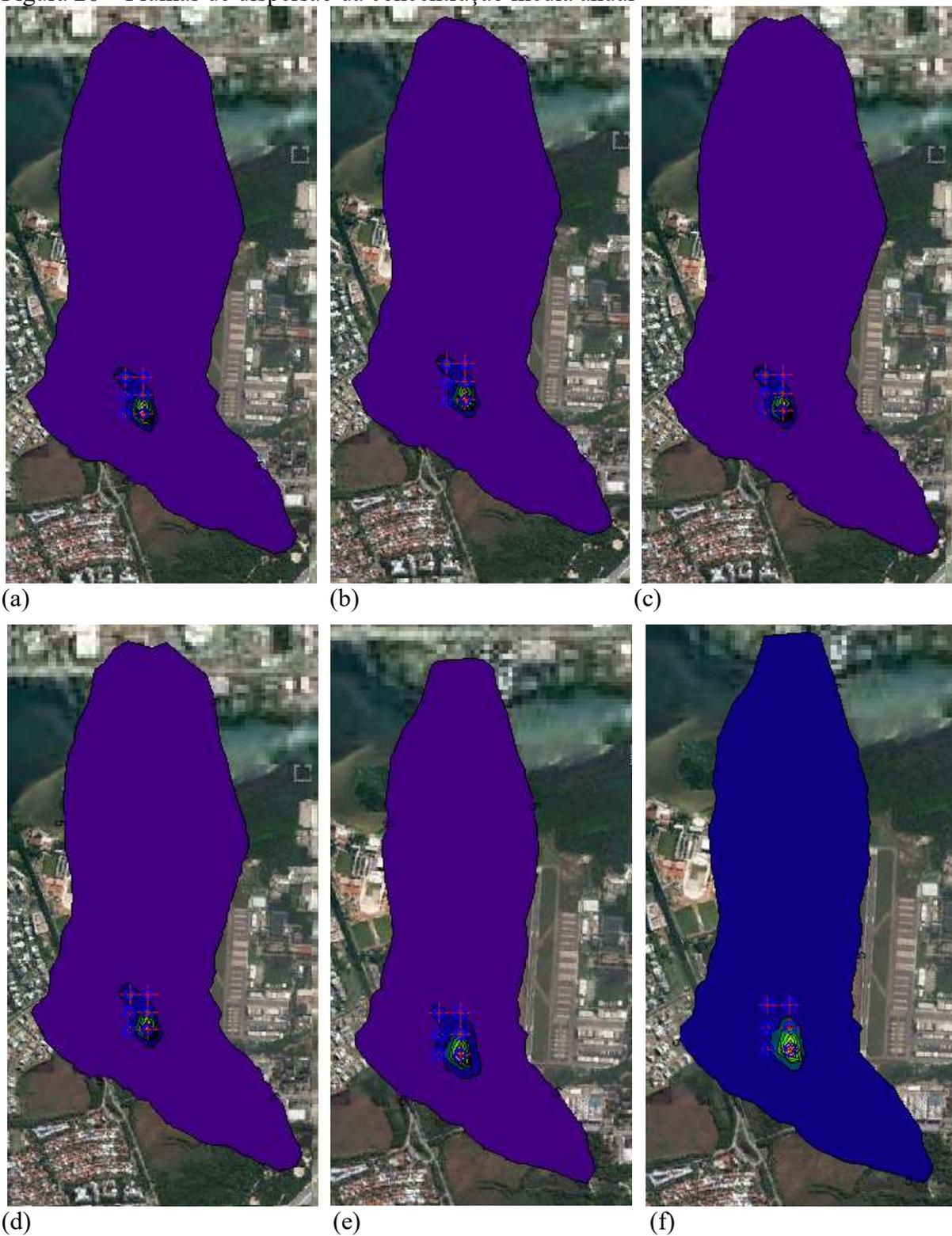
Cenários	Cenário-base equações		Cenário-base TANKS		Cenário TANKS padrão	
	Mensal	Anual	Mensal	Anual	Mensal	Anual
Taxa de emissão (g s ⁻¹)	1,426	1,390 -2%	1,460 2%	1,438 1%	1,196 -16%	1,178 -17%
1ª máxima (µg m ⁻³)	1.811	1.793 -1%	1.846 2%	1.842 2%	1.581 -13%	1.578 -13%
2ª máxima (µg m ⁻³)	1.778	1.760 -1%	1.815 2%	1.809 2%	1.561 -12%	1.556 -13%
3ª máxima (µg m ⁻³)	1.777	1.759 -1%	1.812 2%	1.808 2%	1.552 -13%	1.549 -13%
4ª máxima (µg m ⁻³)	1.528	1.512 -1%	1.554 2%	1.550 1%	1.312 -14%	1.309 -14%
5ª máxima (µg m ⁻³)	1.377	1.363 -1%	1.402 2%	1.399 2%	1.213 -12%	1.205 -12%
6ª máxima (µg m ⁻³)	1.209	1.198 -1%	1.233 2%	1.230 2%	1.056 -13%	1.053 -13%
7ª máxima (µg m ⁻³)	960	948 -1%	981 2%	977 2%	847 -12%	843 -12%
8ª máxima (µg m ⁻³)	851	839 -1%	869 2%	865 2%	746 -12%	741 -13%
9ª máxima (µg m ⁻³)	843	827 -2%	837 -1%	832 -1%	708 -16%	693 -18%
10ª máxima (µg m ⁻³)	769	754 -2%	780 1%	770 0%	661 -14%	660 -14%

A análise dos dados apresentados na Tabela 45 demonstra que as variações entre as taxas de emissão obtidas nas simulações dos diferentes cenários se propagaram para os resultados de máximas concentrações ambientais horárias na ferramenta de modelagem de dispersão utilizada.

4.4.2 Resultados das concentrações anuais

A Figura 26 apresenta as plumas de dispersão das concentrações médias anuais obtidas pela modelagem de dispersão dos seis cenários de emissões.

Figura 26 – Plumam de dispersão da concentração média anual



Legenda: (a) – Cenário-base equações mensal; (b) – Cenário-base equações anual; (c) – Cenário-base TANKS mensal; (d) – Cenário-base TANKS anual; (e) – Cenário TANKS padrão mensal; (f) – Cenário TANKS padrão anual

Assim como nos resultados das concentrações horárias, o formato das plumas de concentrações anuais de todos os cenários foi visualmente similar. As Figura 26 e, f apresentam um tamanho de pluma um pouco menor em comparação com as demais, devido às menores taxas de emissão. Assim como ocorreu na elaboração das plumas das máximas concentrações horárias, a Figura 26 f apresenta uma cor diferenciada das demais por ter uma concentração máxima menor. Conforme definido no item 3.2.2.1, a curva de menor concentração representa $5 \mu\text{g m}^{-3}$ e a curva da segunda menor concentração $50 \mu\text{g m}^{-3}$. Na Figura 25 f a faixa entre 5 e $50 \mu\text{g m}^{-3}$ é apresentada na cor azul, enquanto que nas demais esta mesma faixa de valores é apresentada na cor roxa.

Na avaliação das máximas horárias a pluma de dispersão representa o maior valor de concentração para cada ponto do domínio dentro do período considerado (o ano de 2015), ainda que cada valor máximo ocorra em uma hora e dia diferentes. As plumas de dispersão da concentração anual representam as médias anuais dos valores horários de concentração ambiental em cada ponto do domínio.

A Tabela 46 apresenta os valores das 10 maiores concentrações médias anuais, bem como a variação percentual em comparação com o cenário de referência.

Tabela 46 – Variação percentual entre a taxa de emissão e maiores concentrações do cenário de referência e dos demais cenários

Cenários	Cenário-base equações		Cenário-base TANKS		Cenário TANKS padrão	
	Mensal	Anual	Mensal	Anual	Mensal	Anual
Taxa de emissão (g s^{-1})	1,426	1,390	1,460	1,438	1,196	1,178
		-2%	2%	1%	-16%	-17%
1ª máxima ($\mu\text{g m}^{-3}$)	373	369	380	379	324	323
		-1%	2%	2%	-13%	-13%
2ª máxima ($\mu\text{g m}^{-3}$)	242	240	246	246	209	209
		-1%	2%	2%	-14%	-14%
3ª máxima ($\mu\text{g m}^{-3}$)	138	134	134	132	102	102
		-3%	-3%	-4%	-26%	-26%
4ª máxima ($\mu\text{g m}^{-3}$)	118	117	121	120	94	94
		-1%	2%	2%	-21%	-21%
5ª máxima ($\mu\text{g m}^{-3}$)	112	111	113	113	83	83
		-1%	1%	1%	-26%	-26%
6ª máxima ($\mu\text{g m}^{-3}$)	98	96	99	99	81	81
		-1%	2%	1%	-17%	-17%
7ª máxima ($\mu\text{g m}^{-3}$)	94	92	96	95	56	55
		-1%	2%	2%	-41%	-41%
8ª máxima ($\mu\text{g m}^{-3}$)	66	65	66	66	50	50
		-2%	1%	1%	-24%	-24%
9ª máxima ($\mu\text{g m}^{-3}$)	65	64	65	65	45	45

		-1%	0%	-1%	-30%	-32%
10ª máxima ($\mu\text{g m}^{-3}$)	64	62	64	64	44	44
		-2%	0%	0%	-31%	-32%

A dispersão atmosférica das emissões do cenário-base equações anual e cenários-base TANKS mensal e anual se comportou de forma similar à taxa de emissão, em comparação com o cenário de referência. Diferentemente do observado na avaliação das máximas horárias, os cenários TANKS padrão mensal e anual apresentaram na dispersão uma variação maior que a da taxa de emissão. Para ambos os cenários o valor da 7ª máxima foi 41% menor que o do cenário de referência, enquanto a diferença da taxa de emissão era 16% e 17%. A partir da 3ª máxima as variações de concentração são maiores que as variações da taxa de emissão, demonstrando que elas decaem mais rapidamente no ambiente em comparação tanto com o cenário de referência quanto com os demais cenários.

4.5 Discussão

De forma a facilitar a comparação dos resultados que serão discutidos a seguir, as Tabelas 47, 48, 49, 50, 51 e 52 apresentam um resumo comparativo das emissões obtidas em cada um dos tanques com a aplicação dos diferentes métodos de cálculo. Os valores de emissões do cenário de referência aparecem em negrito. É apresentada também a diferença percentual de cada emissão calculada com relação ao cenário de referência.

Tabela 47 – Resumo das emissões em cada cenário – tanque 1

Base	Cenário-base equações (lb)			Cenário-base TANKS (lb)			Cenário TANKS padrão (lb)		
	Estacionárias	Trabalho	Totais	Estacionárias	Trabalho	Totais	Estacionárias	Trabalho	Totais
Anual	3.731	9.074	12.805	3.416	9.170	12.586	893	2.396	3.289
Mensal	3.801	9.403	13.204	3.436	9.299	12.735	897	2.423	3.320
Base	Estacionárias	Trabalho	Totais	Estacionárias	Trabalho	Totais	Estacionárias	Trabalho	Totais
Anual	-2%	-4%	-3%	-10%	-2%	-5%	-76%	-75%	-75%
Mensal	-	-	-	-10%	-1%	-4%	-76%	-74%	-75%

Tabela 48 – Resumo das emissões em cada cenário – tanque 2

Base	Cenário-base equações (lb)			Cenário-base TANKS (lb)			Cenário TANKS padrão (lb)		
	Estacionárias	Trabalho	Totais	Estacionárias	Trabalho	Totais	Estacionárias	Trabalho	Totais
Anual	0,121	0,381	0,502	0,0033	0,0089	0,0122	19,0	52,0	71,0
Mensal	0,121	0,381	0,502	0,0033	0,0089	0,0122	19,0	52,0	71,0
Base	Estacionárias	Trabalho	Totais	Estacionárias	Trabalho	Totais	Estacionárias	Trabalho	Totais

Anual	-	-	-	-97%	-98%	-98%	>15.000%	>13.000 %	>14.000 %
Mensal	-	-	-	-97%	-98%	-98%	>15.000%	>13.000 %	>14.000 %

Tabela 49 – Resumo das emissões em cada cenário – tanque 3

Cenário-base equações (lb)					Cenário-base TANKS (lb)				Cenário TANKS padrão (lb)			
Base	Selo ²⁰	Mov. ²¹	Aces. ²²	Totais	Selo	Mov.	Aces.	Totais	Selo	Mov.	Aces.	Totais
Anual	3.866	370	1.332	5.568	4.047	370	1.396	5.813	4.008	353	1.220	5.581
Mensal	4.019	370	1.355	5.744	4.174	370	1.408	5.952	4.132	353	1.231	5.716
Base	Selo	Mov.	Aces.	Totais	Selo	Mov.	Aces.	Totais	Selo	Mov.	Aces.	Totais
Anual	-4%	-	-2%	-3%	1%	-	3%	1%	0%	-5%	-10%	-3%
Mensal	-	-	-	-	4%	-	4%	4%	3%	-5%	-9%	0%

Tabela 50 – Resumo das emissões em cada cenário – tanque 4

Cenário-base equações (lb)					Cenário-base TANKS (lb)				Cenário TANKS padrão (lb)			
Base	Selo	Mov.	Aces.	Totais	Selo	Mov.	Aces.	Totais	Selo	Mov.	Aces.	Totais
Anual	1.853	415	3.065	5.333	1.943	415	3.034	5.393	1.925	387	2.496	4.808
Mensal	1.861	415	3.079	5.356	1.945	415	3.036	5.396	1.926	387	2.498	4.812
Base	Selo	Mov.	Aces.	Totais	Selo	Mov.	Aces.	Totais	Selo	Mov.	Aces.	Totais
Anual	0%	-	0%	0%	4%	-	-1%	1%	3%	-7%	-19%	-10%
Mensal	-	-	-	-	4%	-	-1%	1%	3%	-7%	-19%	-10%

Tabela 51 – Resumo das emissões em cada cenário – tanque 5

Cenário-base equações (lb)					Cenário-base TANKS (lb)				Cenário TANKS padrão (lb)			
Base	Selo	Mov.	Aces.	Totais	Selo	Mov.	Aces.	Totais	Selo	Mov.	Aces.	Totais
Anual	27.823	76	9.590	37.488	29.534	76	10.187	39.796	28.242	70	8.600	36.911
Mensal	29.144	76	9.811	39.030	30.561	76	10.297	40.933	29.180	70	8.691	37.941
Base	Selo	Mov.	Aces.	Totais	Selo	Mov.	Aces.	Totais	Selo	Mov.	Aces.	Totais
Anual	-5%	-	-2%	-4%	1%	-	4%	2%	-3%	-8%	-12%	-5%
Mensal	-	-	-	-	5%	-	5%	5%	0%	-8%	-11%	-3%

²⁰ Selo do aro²¹ Movimentação²² Acessórios

Tabela 52 – Resumo das emissões em cada cenário – tanque 6

Cenário-base equações (lb)					Cenário-base TANKS (lb)				Cenário TANKS padrão (lb)			
Base	Selo	Mov.	Aces.	Totais	Selo	Mov.	Aces.	Totais	Selo	Mov.	Aces.	Totais
Anual	13.334	85	22.059	35.478	14.182	85	22.144	36.411	13.561	76	17.589	31.227
Mensal	13.449	85	22.249	35.782	14.205	85	22.181	36.471	13.584	76	17.618	31.279
Base	Selo	Mov.	Aces.	Totais	Selo	Mov.	Aces.	Totais	Selo	Mov.	Aces.	Totais
Anual	-1%	-	-1%	-1%	5%	-	0%	2%	1%	-10%	-21%	-13%
Mensal	-	-	-	-	6%	-	0%	2%	1%	-10%	-21%	-13%

4.5.1 Variação entre as estimativas nas bases mensal e anual

Todos os seis tanques nos três cenários simulados apresentaram a soma das emissões mensais maior ou igual às emissões anuais. Somente não houve variação no caso de tanques aquecidos, cuja temperatura da superfície do líquido é um dado de entrada do cálculo e não varia ou varia dentro de uma faixa pré-estabelecida. No entanto, quando são utilizados dados meteorológicos, os cálculos sempre resultam em emissões anuais inferiores à soma das emissões mensais. Isto ocorre pois algumas variáveis meteorológicas afetam as emissões de forma exponencial e a realização de uma média anual atenua as emissões. Os Gráficos 32, 33 e 34 resumem as diferenças encontradas em cada cenário. A maior delas foi de 4% no tanque 5 (teto flutuante externo com gasolina) no cenário-base equações.

Miller Junior (2012) e U.S.EPA (2015) já haviam reportado diferenças nos resultados decorrentes da utilização de dados de entrada nas bases mensal e anual. Este trabalho, no entanto, concluiu que para as condições delimitadas os resultados na base anual foram sempre subestimados. A diferença foi maior em tanques de teto fixo e de teto flutuante externo e menor em tanques com selo flutuante interno por sofrerem menos influência das variáveis meteorológicas.

As estimativas realizadas neste trabalho utilizaram dados meteorológicos do Rio de Janeiro, que por ter clima tropical apresenta baixa amplitude térmica entre as estações do ano, o que limita a diferença entre as estimativas mensais e anuais. Estas conclusões não podem ser extrapoladas para locais de clima temperado, que apresentam estações bem definidas e inclusive podem demandar aquecimento dos tanques somente em certos períodos do ano, o que reforça a necessidade da estimativa com base mensal.

Gráfico 32 – Diferenças entre emissões mensais e anuais no cenário-base equações

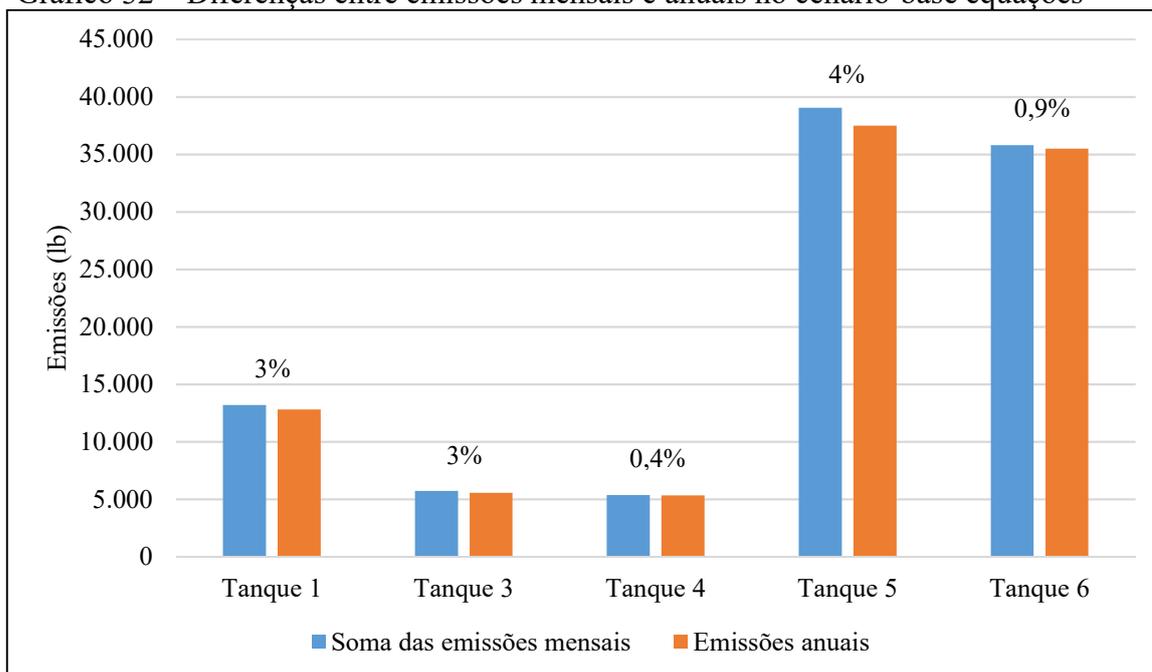


Gráfico 33 – Diferenças entre emissões mensais e anuais no cenário-base TANKS

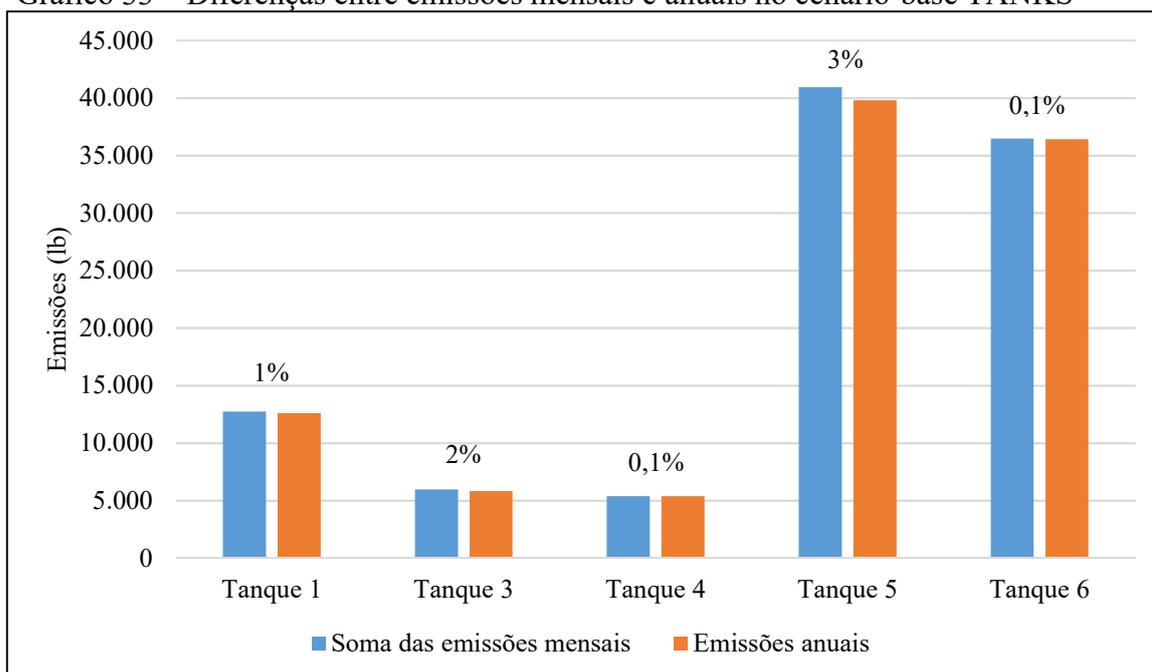
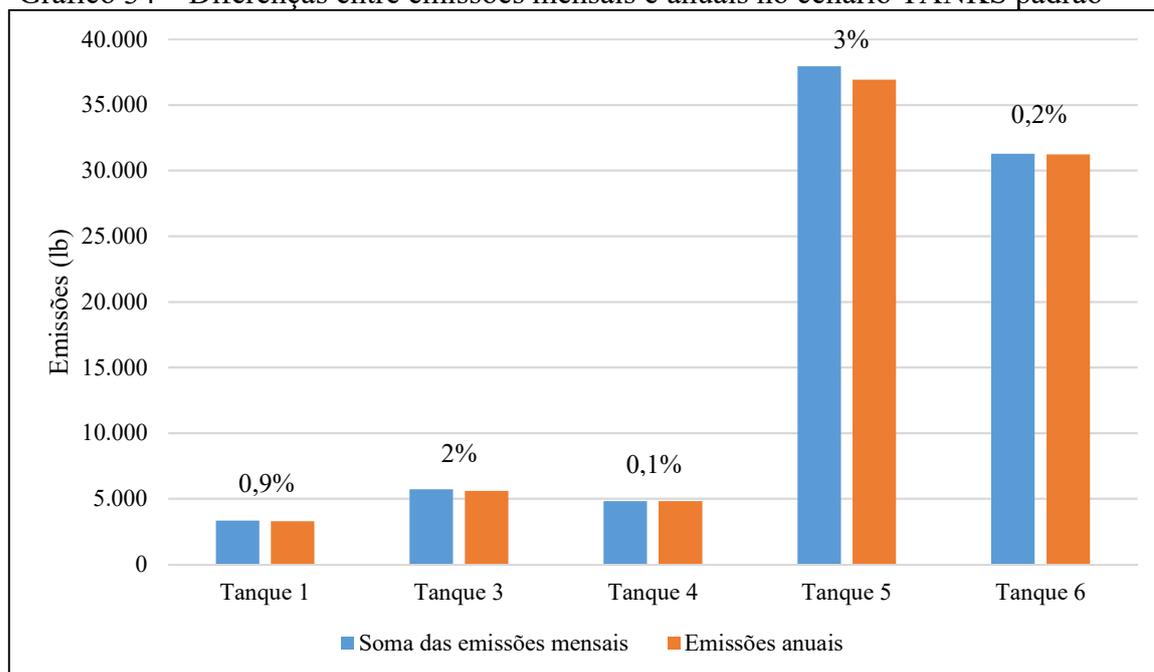


Gráfico 34 – Diferenças entre emissões mensais e anuais no cenário TANKS padrão



4.5.2 Variação entre as ferramentas de estimativa

Com base na revisão bibliográfica foi definido como o método de referência a utilização das equações do capítulo 7 do AP 42 na base mensal. A partir deste foram avaliadas as diferenças com os demais cenários nas bases mensal e anual. A Tabela 53 resume as variações percentuais encontradas nas diferentes simulações de cada tanque.

Tabela 53 – Variações dos resultados das simulações em comparação com o cenário de referência

Cenários	Tanque 1	Tanque 2	Tanque 3	Tanque 4	Tanque 5	Tanque 6
Cenário-base equações mensal	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Cenário-base equações anual	-3,0%	0%	-3,1%	-0,4%	-4,0%	-0,9%
Cenário-base TANKS mensal	-3,5%	-98%	3,6%	0,8%	4,9%	1,9%
Cenário-base TANKS anual	-4,7%	-98%	1,2%	0,7%	2,0%	1,8%
Cenário TANKS padrão mensal	-75%	14051%	-0,5%	-10,2%	-2,8%	-12,6%
Cenário TANKS padrão anual	-75%	14051%	-2,8%	-10,2%	-5,4%	-12,7%

Conforme apresentado no item anterior, a utilização da base anual no cenário-base com as equações do AP 42 subestimou as emissões em até 4%. A diferença foi maior em tanque de teto fixo (tanque 1) e teto flutuante externo (tanques 3 e 5). Em tanques de teto fixo com selo flutuante interno as diferenças foram menores (máximo de 0,9%), já que nesta tipologia de tanques há uma influência menor das variáveis meteorológicas.

Foram realizadas simulações utilizando o *software* TANKS como ferramenta de estimativa com todas as adaptações possíveis para a melhor representação do cenário-base. Estes resultados foram subestimados para os tanques de teto fixo e superestimados para os

tanques de cobertura flutuante. Como as simulações anuais são sempre menores em comparação com as mensais, as melhores correspondências foram obtidas com a utilização da base mensal para tanques de teto fixo e a utilização da base anual para tanques de cobertura flutuante.

As variações do tanque aquecido (tanque 2) foram muito maiores que as dos demais devido à limitação do programa na representação de temperaturas acima de 100 °F (37,8 °C).

Apesar de as emissões totais neste cenário se apresentarem próximas à referência (diferença máxima de 4,7%, à exceção do tanque aquecido), houve grandes variações na distribuição mensal das emissões. Houve emissões 12% menores (janeiro no tanque 1) e emissões 13% maiores (junho no tanque 5). Isto corrobora a recomendação da U.S.EPA de não utilização do valor mensal das simulações do TANKS apesar de no caso de tanques de teto fixo, o somatório destas emissões ser mais próximo das emissões de referência do que o valor de emissões anuais calculado diretamente.

As variações mensais significativas podem trazer impactos não previstos em uma análise com base anual, uma vez que podem causar odor ou afetar a formação de ozônio de forma diferenciada, porque a maior emissão de COV ocorre em meses de maior incidência solar.

As simulações utilizando as características-padrão do TANKS resultaram, majoritariamente, em emissões menores. A exceção foi o tanque 2, cuja curva de pressão de vapor do “*Residual Oil N° 6*” era muito superior à do óleo combustível escolhido para o cenário-base. Foram observadas diferenças significativas no Tanque 1, também devido à grande diferença entre a pressão de vapor do diesel e a do “*Distillate Fuel Oil N° 2*”. Nos tanques de cobertura flutuante as maiores diferenças foram observadas nos tanques de teto fixo com selo flutuante interno (tanques 4 e 6 com 10,2% e 12,7%, respectivamente). Estas variações foram não só devido às diferenças nas características dos produtos, mas principalmente no número de acessórios, principalmente as pernas de sustentação do teto fixo.

4.5.3 Sensibilidade da variação dos dados de entrada nos resultados

A realização das simulações e a comparação entre diferentes métodos de estimativa permitiu avaliar a sensibilidade de alguns dados de entrada nos resultados de emissões. Isto é relevante pois a estimativa de emissões de tanques é complexa e exige a obtenção de uma série de informações. Sendo assim, pode-se direcionar esforços para a obtenção de mais detalhes de dados que têm maior correlação com as emissões.

Dados meteorológicos são essenciais para um cálculo adequado. Foi possível observar que para um mesmo tipo de tanque os parâmetros meteorológicos influenciam de forma similar produtos diferentes. Em tanques de teto fixo a temperatura ambiente é um dado que apresenta uma correlação muito grande com as emissões. Já em tanques de teto flutuante externo, a velocidade do vento é um parâmetro que muito interfere nas emissões, sendo importante garantir a confiabilidade desta informação. Sendo assim, devem ser utilizados os dados meteorológicos do ano em questão. Simulações utilizando dados meteorológicos médios de vários anos podem ser válidas para a quantificação de ações para a redução de emissões como a pintura ou troca de teto de tanque, mas não devem ser utilizadas para a realização de inventários de emissões.

Os dados do produto armazenado (principalmente a curva de pressão de vapor) são essenciais para uma estimativa adequada. A ausência desta informação dificulta a comparação com os produtos-padrão do TANKS e não permite avaliar o possível erro da simplificação. Apesar de derivados de petróleo terem características definidas que os qualificam, isto não limitou a amplitude dos erros. Houve grandes diferenças nos tanques de teto fixo ao utilizar os produtos-padrão do TANKS no lugar do diesel e do óleo combustível. Em tanques de cobertura flutuante as diferenças foram menores. O TANKS fornece oito tipos diferentes de gasolina, permitindo uma melhor representação do produto desde que a referência seja conhecida. Apesar de a diferença neste trabalho ter se limitado a 10%, há um potencial grande para erros nas estimativas de emissões do armazenamento de petróleo, pois é um produto que pode ter características bastante diferentes a depender da região onde foi extraído e o *software* fornece apenas uma opção de curva de pressão de vapor.

Dados como cor do tanque e tipo do selo do aro são básicos para a estimativa e podem ser obtidos visualmente sem grandes esforços. Grandes diferenças se concentram nas perdas pelos acessórios pois as perdas de movimentação são muito pouco significativas para produtos pouco viscosos e as pelo selo do aro apresentam cálculo similar nas diferentes metodologias. Por incrível que pareça, é mais importante saber os acessórios que a movimentação do tanque.

Foi identificado que a guia antirrotacional é uma emissão pontual muito relevante, em conjunto com o selo, em tanques de teto flutuante externo, sendo importante garantir o seu detalhamento adequado para que os valores sejam representativos da realidade.

Por haver uma cobertura adicional, seria intuitivo pensar que tanques de teto fixo com selo flutuante interno são menos emissores que tanques de teto flutuante externo com características similares. No entanto, isto somente é verdade se o teto fixo for autoportante. Do contrário, se o teto for suportado por um número grande de colunas que interceptam o selo

flutuante, as perdas podem ser grandes, sendo iguais ou maiores que as de um tanque de teto flutuante externo similar. Por este motivo, é fundamental para uma estimativa adequada ter detalhes (quantidade e características) das pernas de sustentação.

Em tanques que armazenam produtos mais voláteis, como gasolina, é importante garantir o detalhamento dos acessórios, uma vez que a elevada pressão de vapor pode ampliar os erros no caso de acessórios inadequadamente caracterizados.

Apesar de representarem valores pequenos em termos absolutos, as simulações de tanques de óleo combustível apresentaram erros elevadíssimos de até 14.000%. Este erro da estimativa inadequada é muito maior que o erro de não calcular as emissões (100%). Na elaboração do inventário de um parque de tancagem heterogêneo, é possível que a supressão de um tanque de óleo combustível forneça emissões totais mais aderentes à realidade que a utilização de informações indevidas.

4.5.4 Modelagem de dispersão atmosférica

Na avaliação das concentrações máximas horárias foi possível observar que as diferenças nas taxas de emissão dos seis cenários se mantiveram na dispersão, reforçando a importância da utilização da ferramenta de estimativa adequada também para este fim.

Considerando as concentrações anuais obtidas na modelagem de dispersão mostrou-se ainda mais relevante a utilização do método de referência para a estimativa, uma vez que cenários que utilizaram as características padrão do TANKS tiveram suas diferenças ampliadas em comparação com o cenário de referência.

Na modelagem, a comparação dos cenários agrupou as taxas de emissão de vários tanques. Os cenários-base equações e TANKS apresentaram diferenças pequenas na taxa de emissão total em comparação com o cenário de referência. No entanto, há variações particulares de cada tipo de tanque que não devem ser ignoradas.

Os resultados demonstram que o método de estimativa é importante tanto para a elaboração de inventários de emissões como para avaliações de impacto ambiental e modelagens de dispersão, uma vez que as diferenças nas taxas de emissão se propagam para as concentrações ambientais e inclusive podem ser maiores, como ocorrido nas concentrações médias anuais dos cenários TANKS padrão mensal e anual.

CONCLUSÃO

O levantamento bibliográfico permitiu a compreensão de como são geradas as emissões atmosféricas em tanque de armazenamento. Foram identificados os pontos de emissão em cada tipologia de tanque, o que possibilitou o entendimento dos métodos para a estimativa as emissões.

A revisão da literatura permitiu também, dentre as diferentes possibilidades, a determinação da melhor ferramenta para a estimativa de emissões de COV em tanques de armazenamento: as equações do capítulo 7 do AP 42 aplicadas na base mensal. Estas equações foram desenvolvidas pelo API (*American Petroleum Institute*) e o órgão ambiental americano tem permissão para a distribuição não exclusiva e não comercial.

O experimento desenhado permitiu a avaliação da influência de diversos dados de entrada nas estimativas de emissões, bem como a comparação entre os diferentes métodos de estimativa, a partir da criação de seis tanques e a aplicação do cálculo em 3 cenários: Cenário-base equações, cenário-base TANKS e cenário TANKS padrão.

Com relação às variações entre os métodos de estimativa, as adaptações do TANKS apresentaram resultados subestimados para tanques de teto fixo e superestimados para tanques com cobertura flutuante. Com relação ao cenário TANKS padrão, este subestimou as emissões, em tanques de teto fixo principalmente devido à pressão de vapor do produto e em tanques de teto fixo com selo flutuante interno devido à diferença na contagem de pernas de sustentação do tanque.

Foi possível identificar que os dados de entrada influenciam de forma diferenciada as emissões de cada tipologia de tanque. Com relação aos dados meteorológicos, a temperatura é o parâmetro mais determinante em tanques de teto fixo, enquanto que velocidade do vento influencia significativamente emissões de tanques de teto flutuante externo, daí a grande relevância da utilização de dados do período efetivamente simulado. Em tanques de cobertura flutuante, detalhes sobre os acessórios são informações mais relevantes para a garantia da qualidade das estimativas do que a movimentação de produto. A presença de guia antirrotacional em tanques de teto flutuante externo e de pernas de sustentação em tanques de teto fixo com selo flutuante interno são as informações pontuais de acessórios que mais impactam no cálculo das emissões.

A grande variação de emissões em tanques com aquecimento nos diferentes cenários (acima de 100%), permite a conclusão que quando há dúvidas sobre os dados de entrada (pressão de vapor, temperatura de aquecimento, isolamento do tanque) é possível que a

supressão destas emissões de um inventário acarrete em um erro menor do que a mensuração equivocada.

A inserção dos resultados das estimativas de emissões em um modelo de dispersão atmosférica teve como objetivo avaliar se as diferenças entre os cenários eram suficientemente significativas a ponto de influenciar os valores obtidos de concentrações ambientais. O modelo de dispersão utilizado, AERMOD, em conjunto com os dados de entrada definidos permitiu esta avaliação de maneira adequada.

O modelo de dispersão se mostrou sensível à variação das estimativas de emissões. A diferença das concentrações ambientais foi igual ou maior que a das emissões calculadas em cada cenário, reafirmando a importância da ferramenta de estimativa adequada tanto para inventários quanto para avaliações de impacto ambiental.

Futuros trabalhos de pesquisa podem realizar estimativas em outras regiões, com dados meteorológicos de locais de clima subtropical ou temperado. Esta avaliação permite verificar se as variações entre as estimativas mensais e anuais são similares, maiores ou menores que as apresentadas para o clima tropical. É possível também a realizar uma avaliação com outros derivados de petróleo e produtos orgânicos.

A realização de estimativas de emissões de forma adequada permite a sua utilização na tomada de decisão e em avaliações econômicas. Sugere-se a elaboração de avaliações de custo-efetividade de diferentes medidas de redução de emissões atmosféricas como alteração de tipo de teto, pintura do costado, mudança de acessórios, troca do selo etc. Recomenda-se a elaboração de custos unitários de abatimento em R\$/kg_{COV} de cada uma das alternativas estudadas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage*. Estados Unidos da América, 2007.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Manual of Petroleum Measurement Standards*, cap. 19.3, parte H. Estados Unidos da América: API, 1998.

ANKER, M. F.; FERRY, R. *Unaccounted Breathing Losses from Heated Tanks*. Air & Waste Management Association, 2014.

ARYA, S. P. *Air Pollution Meteorology and Dispersion*. Oxford: Oxford University Press, 1999. 310 p. apud VICENTINI, P. C. *Uso de modelos de qualidade do ar para avaliação do efeito do PROCONVE entre 2008 e 2020 na Região Metropolitana do Rio de Janeiro*. 2011. 242 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7821: Tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados*. Rio de Janeiro, 1983.

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

ATSDR. *Toxicological Profile for Benzene*. Atlanta: U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, 2007. Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp3.pdf>. Acesso em 15 set. 2016

BAIRD, C; CANN, M. *Química Ambiental*. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. 844 p.

BENEDITO, L. *Tanque de água oleosa da Estação Vandemir Ferreira*. 2013. Banco de Imagens Petrobras.

CHAMBERS, A. et al. *Direct Measurement of Fugitive Emissions of Hydrocarbons from a Refinery*. Journal of the Air & Waste Management Association, 2008; 58: 1047–1056 p.

COBURN, J.; ICENHOUR, M. *Preliminary Analysis of Short-term Variability in Storage Vessel Emissions*. Memorando de Jeff Coburn e Melissa Icenhour para Brenda Shine. [S.l.]: U.S.EPA, 2008 apud U.S.EPA. *EPA Review of Available Documents and Rationale in Support of Final Emissions Factors and Negative Determinations for Flares, Tanks, and Wastewater Treatment Systems*. Carolina do Norte: U.S.EPA, 2015.

CONCAWE. *VOC emissions from external floating roof tanks: comparison of remote measurements by laser with calculation methods*. Bruxelas: CONCAWE, 1995. (Report nº 95/52).

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução nº 03, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em 10 jun. 2016.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução nº 382, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br>>. Acesso em 10 jun. 2016.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. *Code of Federal Regulations, Title 40, Chapter I, Subchapter C, Part 51, Subpart F, § 51.100 (s)*. Disponível em: < <http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?rgn=div8&node=40:2.0.1.1.2.3.8.1>>. Acesso em 10 jun. 2016.

GOMES, E. L. M; BIASUTTI, S. *Avaliação do desempenho dos modelos de qualidade do ar AERMOD e CALPUFF na região de Anchieta-ES*. 2012. 146 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

HOWARI, F. M. *Evaporation losses and dispersion of volatile organic compounds from tank farms*. Environmental Monitoring and Assessment. Springer, 2015; 187: 273.

INEA. Dados do Monitoramento da Qualidade do Ar e Meteorologia. Disponível em: < <http://200.20.53.7/qualiar/home/index>>. Acesso em 24 set. 2016

INPE. Banco de dados meteorológicos. Disponível em: < <http://bancodedados.cptec.inpe.br/downloadBDM>>. Acesso em 24 set. 2016

INSTITUTO ENERGIA E MEIO AMBIENTE. *1º Diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil*. São Paulo: IEMA, 2014. 277 p. Relatório técnico.

LAKES. TANKS in AERMOD. Disponível em: < <https://www.weblakes.com/Newsletter/2010/August2010.html>>. Acesso em 13 set. 2016

LU, C. et al. *Emission characteristics of VOCs from three fixed-roof p-xylene liquid storage tanks*. Environmental Monitoring and Assessment. Springer, 2013; 185: 6819–6830 p.

MET OFFICE. Centro meteorológico do Reino Unido. Disponível em: < <http://www.metoffice.gov.uk/learning/learn-about-the-weather/weather-phenomena/case-studies/great-smog>>. Acesso em 25 abr. 2016.

MILLER JUNIOR, J. V. *Accuracy in Organic Liquid Storage Tank Emissions Calculations: Universal Lessons Learned from the 2011 Refinery ICR*. Air & Waste Management Association, 2012. (Paper 2012-A-491-AWMA).

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Compromisso pela qualidade do ar e saúde ambiental*. Brasília: MMA, 2009. 20 p. Relatório técnico.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Técnicas analíticas de medição e métodos de cálculo e estimação, segundo a literatura, para a lista dos poluentes propostos para o RETP Brasil*. [S.l.: s.n., 20--]. 87 p. Disponível em: < http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_prorisc_upml/_arquivos/metodologias_retp_82.pdf> Acesso em: 5 maio 2015.

PETROBRAS. *Tanque armazenando combustível para aeronave*. 2007. Banco de Imagens Petrobras.

PEYNEAU, T. *Tanques da Refinaria Abreu e Lima*. 2014. Banco de Imagens Petrobras.

RTI INTERNATIONAL. *Emission Estimation Protocol for Petroleum Refineries*. Carolina do Norte: U.S.EPA, 2015. Versão 3.

SANTANA, E. et al. *Padrões de qualidade do ar: experiência comparada Brasil, EUA e União Europeia*. São Paulo: INSTITUTO ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2012. 81 p. Relatório técnico.

SANTOS, A.R. *Metodologia Científica: a construção do conhecimento*. 5. ed. Rio de Janeiro: DP&A, 2002. 168 p.

SCHMITT, R.E. et al. *Amoco got involved: at Yorktown Joint Amoco/USEPA Pollution Prevention Project*. Washington: National Petroleum Refiners Association, 1993. Report AM-93-32.

SHINE, B. *Potential Low Bias of Reported VOC Emissions from the Petroleum Refining Industry*. [S.l.]: U.S.EPA, 2007. 7 p. Memorando Técnico. (EPA Docket No. EPA-HQ-OAR-2003-0146)

SOUZA, A.M. *Tanques no Terminal de Carmópolis*. 2013. Banco de Imagens Petrobras.

UNIÃO EUROPEIA. Directiva 2004/42/CE, 21 de abril de 2004. Relativa à limitação das emissões de compostos orgânicos voláteis resultantes da utilização de solventes orgânicos em determinadas tintas e vernizes e em produtos de retoque de veículos e que altera a Directiva 1999/13/CE. *Jornal Oficial da União Europeia*, Portugal, 30 abr. 2004. L 143/87.

U.S.EPA. *APTI 423 Air Pollution Dispersion Models: Applications with the AERMOD Modeling System*. Carolina do Norte: U.S.EPA, 2014.

U.S.EPA. *APTI SI-419A: Introduction to Emission Inventories*. Carolina do Norte: U.S.EPA, 2004.

U.S.EPA. *Introduction to AP 42*. Estados Unidos da América: U.S.EPA, 1995. (AP 42, Volume I. 5th ed).

U.S.EPA. *Emission Factor Documentation for AP 42 Section 7.1: Organic Liquid Storage Tanks*. Estados Unidos da América: U.S.EPA, 2006a. (AP 42, Volume I, Capítulo 7: Liquid Storage Tanks. Final Report).

U.S.EPA. *Organic Liquid Storage Tanks*. Estados Unidos da América: U.S.EPA, 2006b. (AP 42, Volume I, Capítulo 7: Liquid Storage Tanks. 5th ed).

U.S.EPA. *OTM-10: Optical Remote Sensing for Emission Characterization from Non-point Sources*. Estados Unidos da América, 2006c.

U.S.EPA. *TANKS Software Frequent Questions*. [S.l.: s.n., 2012]. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/ttn/chief/faq/tanksfaq.html>>. Acesso em: 16 abr. 2015.

U.S.EPA. *User's guide to TANKS: Storage Tank Emissions Calculation Software Version 4.0*. Estados Unidos da América, 1999.

VICENTINI, P. C. *Uso de modelos de qualidade do ar para avaliação do efeito do PROCONVE entre 2008 e 2020 na Região Metropolitana do Rio de Janeiro*. 2011. 242 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

WEI, W. et al. *Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from a petroleum refinery in Beijing, China*. Atmospheric Environment. Elsevier, 2014; 89: 358-366 p.

WU, C. et al. *Measurement of fugitive volatile organic compound emissions from a petrochemical tank farm using open-path Fourier transform infrared spectrometry*. Atmospheric Environment. Elsevier, 2014; 82: 335-342 p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Air quality deteriorating in many of the world's cities*. Genebra: 7 maio 2014. Disponível em: <<http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-quality/en/>>. Acesso em 18 fev. 2016

WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Air Quality Guidelines: Global Update 2005*. Alemanha: WHO, 2006.