



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIENCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE EMISSÕES DE FONTES DE POLUENTES
ATMOSÉRICOS SOBRE A QUALIDADE DO AR: ESTUDO DE CASO NO
PORTO DE SUAPE-PE

LIDIANE SILVA DO ESPÍRITO SANTO NUNES

Recife
2017

LIDIANE SILVA DO ESPÍRITO SANTO NUNES

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE EMISSÕES DE FONTES DE POLUENTES
ATMOSÉRICOS SOBRE A QUALIDADE DO AR: ESTUDO DE CASO NO
PORTO DE SUAPE-PE**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processos Químicos e Bioquímicos

ORIENTADORES: Prof. Dr. César Augusto Moraes de Abreu

Prof. Dr^a. Sandra Maria Sarmento

Recife
2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

N972a	Nunes, Lidianne Silva do Espírito Santo. Avaliação do impacto de emissões poluentes atmosféricos sobre a qualidade do ar: estudo de caso no porto de Suape – PE/ Lidianne Silva do Espírito Santo Nunes – 2017. 180 folhas, il., tabs. Orientador: Profa. Dra Sandra Maria Samento Prof. Dr. César Augusto Moraes de Abreu Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2017. Inclui Referências e Apêndices. 1. Poluentes atmosféricos. 2. Qualidade do ar. 3. Porto de Suape. 4. AERMOD. 5. TANKS 4.09d I. Samento, Sandra Maria. (Orientadora). II. Abreu, César Augusto Moraes de (Orientador). III. Título. 660.2 CDD (22. ed.)	UFPE BCTG/2018-21
-------	--	---------------------------------

LIDIANE SILVA DO ESPÍRITO SANTO NUNES

***Avaliação do impacto de emissões de poluentes atmosféricos sobre a
qualidade do ar: estudo de caso no porto de Suape –PE***

Área de Concentração: Processos Químicos e Bioquímicos

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, defendida e aprovada em 09 de agosto de 2017 pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

Profa. Dra. Sandra Maria Sarmiento/ DEQ-UFPE
(Orientadora)

Prof. Dr. César Augusto Moraes de Abreu/ DEQ-UFPE

Prof. Dr. Jorge Vinícius Fernandes Lima Cavalcanti/DEQ-UFPE
(Examinador Externo)

Professor Dr. Mohand Benachour – DEQ-UFPE
(Examinador Interno)

Prof. Dr. Nelson Medeiros de Lima Filho/ DEQ-UFPE
(Examinador Interno)

Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos/DEQ-UNICAP
(Examinador Externo)

Prof. Dra. Eliane Bezerra de Moraes Medeiros/ DEQ-UFPE
(Examinador Externo)

Aos meus pais Ivan Inácio do Espírito Santo e
Geane Silva do Espírito Santo, meu marido
João Alberto de Souza Nunes e minha filha
Letícia Nunes do Espírito Santo pelo
incondicional apoio e incentivo em todos os
momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais esta oportunidade de crescer profissionalmente e me fornecer uma estrutura familiar para conseguir chegar tão longe.

Aos meus pais Geane Silva do Espírito Santo e Ivan Inácio do Espírito Santo Nunes, além de toda a minha família pelo apoio, carinho e compreensão em todos os momentos da minha vida.

Ao meu marido João Alberto de Souza Nunes e a minha filha Letícia Nunes do Espírito Santo por estar sempre ao meu lado em todos os dias de minha vida.

Aos meus orientadores Professor Dr. Sandra Maria Sarmento e Professor Dr. Cesar Augusto Moraes de Abreu pela orientação, pela paciência e estímulo demonstrados em todos os momentos.

Ao meu amigo Silvio de Oliveira, meteorologista, que auxiliou o desenvolvimento desta pesquisa quanto análise meteorologista e suporte na modelagem de dispersão atmosférica.

Ao meu amigo Lulu de Sá por está ao meu lado nos momentos mais difíceis desta jornada.

A Waldecy Farias pelos conselhos e apoio necessário a realização deste trabalho.

A Priscila Macêdo, Departamento de Engenharia Química, por sua prestimosa atenção sempre quando solicitada.

A Agência Estadual do Meio Ambiente e a Coordenação de Meio Ambiente do Complexo Industrial Portuário, principalmente, Danielle Cássia, Matheus Aragão, Gustavo Guerra e João Alexandre, por ter tornado possível a concretização dessa pesquisa.

As empresas gestoras de parques de tancagem do Porto de Suape pela cessão dos dados para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao professor Zhongchao Tan do Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica da *University de Waterloo* e a *Lakes Environmental Ltda* pelo apoio científico e técnico para desenvolvimento deste trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação de Engenharia Química da UFPE e a CAPES pelo apoio no desenvolvimento da minha tese.

*“ No que diz respeito ao empenho, ao compromisso,
ao esforço e à dedicação, não existe meio termo. Ou você
faz uma coisa bem feita ou não faz “.*

Ayrton Senna

RESUMO

Nos portos marítimos existem atividades antropogênicas que são importantes fontes de emissão de gases e partículas e, portanto, contribuem para poluição ar. Desse modo, o objetivo do presente trabalho foi utilizar o sistema de modelagem AERMOD para estimar as concentrações de dióxido de nitrogênio (NO_2), dióxido de enxofre (SO_2), partículas com diâmetro menor que $10\text{ }\mu\text{m}$ (MP_{10}), monóxido de carbono (CO) geradas a partir das emissões de fontes pontuais (chaminés) das industriais, além de compostos orgânicos voláteis (COV), provenientes de fontes evaporativas (tanques de armazenamento), cujas emissões foram calculadas, por meio do programa *TANKS 4.0.9 D*. A região de estudo foi a Zona Industrial Portuária – Porto de Suape-PE. Os resultados mostraram que as concentrações máximas estimadas pelo AERMOD para NO_2 ($19,60\text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$, média de 1 hora), NO_2 ($1,08\text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$, média de anual), SO_2 ($1,50\text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$, média de 24 horas), SO_2 ($0,10\text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$, média de anual), CO ($3,68\text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$, média de 1 hora), CO ($1,68\text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$, média de 8 horas), MP_{10} ($1,74\text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$, média de 24 horas), MP_{10} ($0,28\text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$, média de anual) foram muito baixas e não ultrapassaram os padrões primários da qualidade do ar, estabelecidos pela Resolução CONAMA N°03/1990. As reduzidas taxas de emissão desses poluentes, associadas ao uso de gás natural e gás liquefeito de petróleo no processo de combustão explicaram as baixas concentrações obtidas. Além disso, os resultados do processamento meteorológico para o Porto de Suape, indicaram que a região está propensa a condição de ventilação favorável a dispersão de poluentes. Os ventos mais intensos ($3,6$ a $5,7\text{ m.s}^{-1}$) foram de sudeste, associados a ocorrência da brisa marítima. Em relação aos COV, a concentração máxima obtida pelo modelo AERMOD foi de $83.775\text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$ média de 1 hora por estar próximo as fontes de emissão. Nas áreas destinadas a residências, escritórios e estabelecimentos comerciais e de serviços, localizadas próximas a Zona Industrial Portuária, a concentração máxima de COV, média de 1 hora, foi de $450\text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$ que ocorreu como consequência da ação dos ventos que transportam e diluem as concentrações dos poluentes atmosféricos a partir das fontes. Devido à escassez de publicações relativa a inclusão de COV como um indicador da qualidade do ar, não foi possível avaliar o impacto das fontes de emissão desses poluentes sobre a qualidade do ar no Porto de Suape.

PALAVRAS-CHAVE: Poluentes atmosféricos. Qualidade do ar. Porto de Suape. AERMOD. *TANKS 4.09d*

ABSTRACT

In seaports there are anthropogenic activities that are important sources of gas and particulate emissions and therefore contribute to air pollution. Thus, the objective of the present study was to use the AERMOD modeling system to estimate the concentrations of nitrogen dioxide (NO₂), sulfur dioxide (SO₂), inhalable particles with diameter less than 10 µm (PM₁₀), carbon monoxide (CO) emissions from industrial sources (stack) and from volatile organic compounds (VOCs) from evaporative sources (storage tanks), that emissions were calculated by TANKS 4.0.9 D program. The study area was Port Industrial Zone - Port of Suape-PE. Results showed that maximum concentration estimated by AERMOD NO₂ (19,60 µg.m⁻³, average 1 hour), NO₂ (1,08 µg.m⁻³, annual average), SO₂ (1,50 µg.m⁻³, average of 24 hour), SO₂ (0,10 µg.m⁻³, annual average), CO (3,68 µg.m⁻³ average of 1 hour), CO (1,68 µg.m⁻³, average of 8 hour), PM₁₀ (1,74 µg.m⁻³ average of 24 horas), PM₁₀ (0,28 µg.m⁻³, annual average), were very low and did not exceed primary air quality standards established by CONAMA Resolution N° 03/1990. The low emission rates of these pollutants associated with the use of natural gas and liquefied petroleum gas in the combustion process explained the low concentrations obtained. In addition, the results of the meteorological processing for the Port of Suape, indicated that the region is prone to the condition of ventilation favorable to the dispersion of pollutants. The most intense winds were from southeast (3,6 a 5,7 m.s⁻¹) associated with occurrence of the sea breeze. In relation to VOCs, maximum concentration of volatile organic compounds obtained by the AERMOD model was 83.775 µg.m⁻³ an average of 1 hour because the emission sources were close. In the areas destined to residential, office and commercial establishments, close to the Port Industrial Zone, the maximum concentration of VOCs, an average of 1 hour, was 450 µg.m⁻³ due to the action of the winds that transport and dilute the concentrations of atmospheric pollutants to from sources. Due to the lack of publications regarding the inclusion of VOCs as an indicator of air quality, it was not possible to assess the impact of emission sources of these pollutants on air quality in the Port of Suape.

KEYWORDS: Atmospheric pollutants. Air quality. Port of Suape. AERMOD. TANKS 4.09d.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 -	Tanque vertical de teto fixo.....	37
FIGURA 2 -	Tanque de teto flutuante externo.....	38
FIGURA 3 -	Tanque de teto flutuante interno.....	40
FIGURA 4 -	Balanço energético da Terra com base nas parcelas que formam os 1.340 Wm^{-2} que compõe o fluxo solar.....	43
FIGURA 5 -	Camada da atmosfera.....	46
FIGURA 6 -	Camada limite planetária.....	48
FIGURA 7 -	Evolução diária da camada limite planetária.....	49
FIGURA 8 -	Sistema de baixa pressão.....	54
FIGURA 9 -	Sistema de alta pressão.....	54
FIGURA 10 -	Esquema diagramático de uma frente fria.....	56
FIGURA 11 -	Esquema diagramático de uma frente quente.....	56
FIGURA 12 -	Esquema diagramático da brisa marinha.....	57
FIGURA 13 -	Esquema diagramático da brisa terrestre.....	58
FIGURA 14 -	Esquema diagramático do processo de resfriamento por expansão adiabática.....	59
FIGURA 15-	Esquema diagramático dos gradientes de temperatura..	60
FIGURA 16-	Esquema diagramático de uma inversão térmica.....	63
FIGURA 17-	Tipos de inversões de temperaturas.....	63
FIGURA 18-	Tipos de pluma.....	65
FIGURA 19-	Esquema para a distribuição dos poluentes em corrente de propagação dos ventos.....	69
FIGURA 20-	Porção superior e inferior da pluma.....	73
FIGURA 21-	Representação da pluma direta, pluma indireta e pluma penetrada.....	74
FIGURA 22-	Sequência de operações do pré-processador AERMET e AERMAP.....	77
FIGURA 23-	Localização do Complexo Industrial Portuário Eraldo Gueiros.....	81
FIGURA 24-	Localização do Porto de Suape em relação as principais rotas marítimas.....	82

FIGURA 25-	Zoneamento do Porto de Suape.....	85
FIGURA 26 -	Zona Industrial de Portuária – Porto de Suape.....	86
FIGURA 27 -	Grade da área de domínio da modelagem sobre o Porto de Suape.....	101
FIGURA 28 -	Localização da estação meteorológica de superfície no aeroporto Internacional de Recife.....	108
FIGURA 29 -	Frequência de ocorrência de produtos armazenados nos tanques da Zona Industrial Portuária e considerados para o cálculo das emissões de COV – ano base de 2013.....	115
FIGURA 30 -	Rosa dos ventos, período de 01/01/2013 a 31/12/2013, obtida a partir dos dados da estação meteorológica do Aeroporto Internacional do Recife.....	119
FIGURA 31 -	Mapa das isoconcentrações de NO ₂ , média de 1 hora, concentração máxima obtida de 19,60 µg.m ⁻³ . Padrão primário da qualidade do ar para NO ₂ , média de 1 hora, igual a 320 µg.m ⁻³ - Resolução CONAMA N°03/1990....	121
FIGURA 32 -	Mapa das isoconcentrações de NO ₂ , média de anual, concentração máxima obtida de 1,08 µg.m ⁻³ . Padrão primário da qualidade do ar para NO ₂ , média anual, igual a 100 µg.m ⁻³ - Resolução CONAMA N°03/1990.....	122
FIGURA 33 -	Mapa das isoconcentrações de SO ₂ , média de 24 horas, concentração máxima obtida de 1,50 µg.m ⁻³ . Padrão primário da qualidade do ar para SO ₂ , média de 24 horas igual a 365 µg.m ⁻³ - Resolução CONAMA N°03/1990.....	123
FIGURA 34 -	Mapa das isoconcentrações de SO ₂ , média anual, concentração máxima obtida de 0,10 µg.m ⁻³ . Padrão primário da qualidade do ar para SO ₂ , média anual, igual a 80 µg.m ⁻³ - Resolução CONAMA N°03/1990.....	124

FIGURA 35 -	Mapa das isoconcentrações de MP_{10} , média de 24 horas, concentração máxima obtida de $1,74 \mu g.m^{-3}$. Padrão primário da qualidade do ar para MP_{10} , média de 24 horas, igual a $80 \mu g.m^{-3}$ - Resolução CONAMA N°03/1990.....	125
FIGURA 36 -	Mapa das isoconcentrações de MP_{10} , média anual, concentração máxima obtida de $0,28 \mu g.m^{-3}$. Padrão primário da qualidade do ar para MP_{10} , média anual, igual a $150 \mu g.m^{-3}$ - Resolução CONAMA N° 03/1990.....	126
FIGURA 37 -	Mapa das isoconcentrações de CO, média de 1 hora, concentração máxima obtida de $3,76 \mu g.m^{-3}$. Padrão primário da qualidade do ar para CO, média de 1 hora, igual a $40.000 \mu g.m^{-3}$ - Resolução CONAMA N° 03/1990.....	127
FIGURA 38 -	Mapa das isoconcentrações de CO, média de 8 horas, concentração máxima obtida de $1,73 \mu g.m^{-3}$. Padrão primário da qualidade do ar para CO, média de 8 horas, igual a $10.000 \mu g.m^{-3}$ - Resolução CONAMA N° 03/1990.....	128
FIGURA 39 -	Mapa das isoconcentrações de COV, média de 1 hora, concentração máxima obtida de $83.774 \mu m^{-3}$	135

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	Padrões da qualidade do ar.....	30
TABELA 2 -	Tipologia e número de empresas localizadas na Zona Industrial Portuária.....	91
TABELA 3 -	Características das principais Fontes pontuais de poluentes atmosféricos localizadas na Zona Industrial Portuária.....	92
TABELA 4 -	Tipo de combustível por fonte pontual.....	92
TABELA 5 -	Principais tipologias de empresas que armazenam líquidos orgânicos voláteis.....	93
TABELA 6 -	Dados meteorológicos médios mensais medidos na estação Recife (Curado).....	95
TABELA 7 -	Informações simplificadas do diesel S10, diesel S500, etanol anidro combustível, etanol hidratado combustível, gasolina A e gasolina C.....	96
TABELA 8 -	Informações simplificadas do n-Hexano, p-xileno e querosene de aviação.....	97
TABELA 9 -	Propriedades físicas do álcool etílico e n-Hexano.....	97
TABELA 10 -	Propriedades físicas do p-Xileno e constantes da Equação de Antoine.....	98
TABELA 11 -	Propriedades físicas de líquidos de petróleo.....	98
TABELA 12 -	Pontos receptores localizados na Zona de Comércio e Serviço.....	102
TABELA 13 -	Pontos receptores localizados em Massangana I.....	103
TABELA 14 -	Pontos receptores localizados em Massangan II – Vila dois irmãos.....	103
TABELA 15 -	Pontos receptores localizados – Estações de monitoramento da qualidade do ar	104
TABELA 16 -	Quantidade de chaminés, tipo de combustível e taxa de emissão de poluentes atmosféricos.....	111
TABELA 17 -	Tipo e quantidade de tanques de armazenamento para o ano base de 2013.....	114

TABELA 18 -	Emissões anuais totais de COV (t.ano ⁻¹), obtidas pelo programa TANKS versão 4.09 D para os tanques de teto fixo, ano base de 2013.....	116
TABELA 19 -	Emissões anuais totais de COV (t.ano ⁻¹), obtidas pelo programa TANKS versão 4.09 D para os tanques de teto flutuante interno, ano base de 2013.....	116
TABELA 20 -	Distribuição das frequências combinadas da direção do vento anual, média do período de 2013 a 2015, da estação meteorológica do Aeroporto Internacional do Recife.	118
TABELA 21 -	Concentração máxima de NO ₂ , média de 1 hora, localizada nos pontos receptores.....	129
TABELA 22 -	Concentração máxima de SO ₂ , média de 24 horas, localizada nos pontos receptores.....	130
TABELA 23 -	Concentração máxima de MP ₁₀ , média de 24 horas, localizada nos pontos receptores.....	130
TABELA 24 -	Concentração máxima de CO, média de 1 hora, localizada nos pontos receptores.....	131
TABELA 25 -	Concentrações máximas de poluentes obtidas pelo Modelo AERMOD para a região do Porto de Suape.....	131
TABELA 26 -	Comparação das concentrações máximas obtidas pelo modelo AERMOD na área de estudo com os padrões primários da qualidade do ar.....	134

TABELA 27 -	Comparação entre as concentrações de poluentes calculadas com as medidas na Estação de monitoramento GAIBU – Coordenadas UTM (X (mE) = 284553,9; Y (mN) = 9078798).....	139
--------------------	---	-----

TABELA 28 -	Comparação entre as concentrações de poluentes calculadas com as medidas na Estação de monitoramento IPOJUCA – Coordenadas UTM (X (mE) = 278410,3; Y (mN) = 9066696,5).....	139
--------------------	--	-----

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

c	Concentração média do poluente	$[g.m^{-3}]$
g	Constante da gravidade	$[m.s^{-1}]$
h	Altura da chaminé	$[m]$
k	Constante de Karman ($k= 4$)	[adimensional]
u	Velocidade média do vento na direção x	$[m.s^{-1}]$
u^*	Velocidade de fricção	$[m.s^{-1}]$
$\tilde{u}$	Velocidade efetiva do vento	$[m.s^{-1}]$
v	Velocidade média do vento na direção y	$[m.s^{-1}]$
w	Velocidade média do vento na direção z	$[m.s^{-1}]$
x	Distância a sotavento da fonte	$[m]$
y	Distância horizontal do eixo central da pluma	$[m]$
z	Altura do receptor	$[m]$
G	Fluxo de calor no solo	$[W.m^{-2}]$
H	Altura efetiva de lançamento do poluente	$[m]$
L	Comprimento de Monin-Obukhov	$[m]$
Q	Quantidade do poluente lançado pela chaminé	$[g.s^{-1}]$
S	Termo FONTE/sumidouro	[adimensional]
T	Temperatura da Superfície	$[K]$
z	Distância acima do solo	$[m]$
C_p	Calor específico a pressão constante	$[J.Kg^{-1}K^{-1}]$
h_{es}	Altura efetiva de lançamento do poluente	$[m]$
$C(x,y,z)$	Concentração do poluente em qualquer ponto de coordenadas (x, y, z)	$[g.m^{-3}]$
$C_d(x_r, y_r, z_r)$	Concentração do poluente devido a camada a contribuição da pluma direta	$[g.m^{-3}]$
$C_i(x_r, y_r, z_r)$	Concentração do poluente devido a camada a contribuição da pluma indireta	$[g.m^{-3}]$
$C_p(x_r, y_r, z_r)$	Concentração do poluente devido a camada a contribuição da pluma penetrada	$[g.m^{-3}]$
$C_s(x_r, y_r, z_r)$	Concentração do poluente na camada limite estável	$[g.m^{-3}]$
H_s	Fluxo de calor sensível	$[W.m^{-2}]$
f_p	Fração da massa da pluma contida na camada limite convectiva ($f_p = 1$) se ocorre a penetração total da pluma	[adimensional]
F_y	Função distribuição da pluma	$[m^{-1}]$
K_x	Coeficiente de difusão turbulenta na direção x	$[m^2.s^{-1}]$
K_y	Coeficiente de difusão turbulenta na direção y	$[m^2.s^{-1}]$
K_z	Coeficiente de difusão turbulenta na direção y	$[m^2.s^{-1}]$

L_D	Perda pelas junções (costura) das placas do teto flutuante	kg.ano ⁻¹
L_R	Perda pelo selo de vedação de extremidade	kg.ano ⁻¹
L_R	Perda pelo selo de vedação de extremidade	kg.ano ⁻¹
L_S	Perda por respiração	kg.ano ⁻¹
L_T	Perdas evaporativas totais	kg.ano ⁻¹
L_W	Perda por trabalho	kg.ano ⁻¹
L_{WD}	Perda por retirada do líquido	kg.ano ⁻¹
Q_S	Quantidade do poluente lançado pela FONTE	[g.s ⁻¹]
R_a	Fluxo de radiação de onda longa incidente	[W.m ⁻²]
R_g	Fluxo de radiação de onda curta incidente	[W.m ⁻²]
R_n	Fluxo de radiação líquida	[W.m ⁻²]
R_r	Fluxo de radiação de onda curta refletida	[W.m ⁻²]
R_s	Fluxo de radiação de onda longa emitida	[W.m ⁻²]
T_d	Gradiente adiabático seco	[°C.km ⁻¹]
T_a	Gradiente ambiental	[°C.Km ⁻¹]
Z_i	Altura de mistura	[m]
Z_{ieff}	Altura da camada limite estável acima da camada limite convectiva	[m]
Δh	Altura de elevação da pluma	[m]
ρ	Massa específica do ar	[kg.m ⁻³]
ε	Emissividade de um corpo negro	[adimensional]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[W.m ⁻² K ⁻⁴]
σ_x	Coeficiente de dispersão horizontal	[m]
σ_y	Coeficiente de dispersão vertical	[m]
σ_{zj}	Coeficiente de dispersão total	[m]
σ_{zp}	Coeficiente de dispersão total para a pluma penetrada	[m]
σ_{zs}	Coeficiente de dispersão total na camada limite estável	[m]
λ_j	Coeficiente de distribuição da pluma com j=1 devido as correntes de ar ascendente e j=2 devido as correntes de ar descendentes	[adimensional]
Ψ_{dj}	Altura entre a base da FONTE e a linha central da pluma	[m]
Ψ_{rj}	Altura entre a base da FONTE e a linha central da pluma indireta	[m]
$-(dt/dz)_{adiabática}$	Gradiente adiabático seco	[°C.km ⁻¹]
$-(dt/dz)_{ambiental}$	Gradiente ambiental	[°C.km ⁻¹]

COMPOSTOS QUÍMICOS

CO – Monóxido de carbono

COV – Compostos orgânicos voláteis

MP - Material Particulado

MP₁ - Partículas com diâmetro menor que 1 µm

MP_{2,5} - Partículas com diâmetro menor que 2,5 µm

MP₁₀ - Partículas com diâmetro menor que 10 µm

NO₂- Dióxido de nitrogênio

NO_x – Óxidos de nitrogênio

O₃ – Ozônio

PTS – Partículas Totais em Suspensão

SO₂ - Dióxido de enxofre

SO_x – Óxidos de enxofre

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1	POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E A SAÚDE PÚBLICA.....	26
2.2	PROTEÇÃO DA QUALIDADE DO AR NO BRASIL.....	27
2.3	PRINCIPAIS POLUENTES ATMOSFÉRICOS QUE DEFINEM A QUALIDADE DO AR.....	29
2.3.1	Descrição geral dos principais poluentes atmosféricos.....	31
2.3.1.1	Partículas Totais em Suspensão.....	31
2.3.1.2	Partículas inaláveis.....	31
2.3.1.3	Monóxido de carbono.....	32
2.3.1.4	Dióxido de nitrogênio.....	33
2.3.1.5	Dióxido de enxofre.....	34
2.3.1.6	Ozônio.....	34
2.4	COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS.....	34
2.4.1	Emissões evaporativas de COV provenientes de tanques de armazenamento.....	36
2.4.1.1	Tanque vertical de teto fixo.....	37
2.4.1.2	Tanque de teto flutuante externo.....	38
2.4.1.3	Tanque de teto flutuante interno.....	39
2.4.2	Estimativa de emissões de compostos orgânicos voláteis.....	41
2.5	SISTEMA ATMOSFERA-TERRA E FATORES RELACIONADOS A DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS.....	41
2.5.1	Radiação solar.....	41
2.5.2	Atmosfera terrestre.....	46
2.5.3	Camada limite planetária.....	47
2.5.4	Movimento da atmosfera.....	51
2.5.4.1	Dinâmica da circulação atmosférica.....	51
2.5.4.2	Escalas de movimento atmosféricos.....	52
2.5.4.3	Fenômenos associados à circulação atmosférica.....	53
2.5.5	Gradiente verticais da temperatura do ar.....	58
2.5.6	Estabilidade atmosférica.....	61

2.6	MODELO MATEMÁTICO PARA A DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS.....	67
2.6.1	Modelo de pluma Gaussiana clássica.....	68
2.6.2	Modelo AERMOD.....	71
2.6.2.1	Descrição geral do sistema de modelagem AERMOD.....	72
2.6.3	Pesquisas desenvolvidas utilizando o modelo AERMOD.....	79
2.7	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	80
2.7.1	Localização do Complexo Industrial Portuário Governador Eraldo Gueiros.....	81
2.7.2	Zoneamento do Complexo Industrial Portuário Governador Eraldo Gueiros.....	83
2.7.2.1	Zona de Preservação Ecológica – ZPEC.....	83
2.7.2.2	Zona Central de Serviços – ZCS.....	83
2.7.2.3	Zona Industrial – ZI.....	83
2.7.2.4	Zona Industrial Portuária– ZIP.....	83
2.7.2.5	Zona de Preservação Cultural – ZPC.....	84
2.7.2.6	Setor de Preservação Cultural – SPC.....	84
2.7.2.7	Setor Especial Ambiental – SEA.....	84
2.7.2.8	Setor Especial de Habitação de Interesse Social – SEHIS.....	84
2.7.3	Delimitação da área de estudo e das fontes de emissão.....	86
2.7.3.1	Clima e condições meteorológicas da região de estudo.....	87
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	89
3.1	IDENTIFICAÇÃO, QUANTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES DE EMISSÃO PONTUAIS E EVAPORATIVAS DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS.....	90
3.1.1	FONTES de emissão pontuais.....	90
3.1.2	FONTES de emissão evaporativas.....	93
3.1.2.1	Tipo de construção e parâmetros físicos dos tanques de armazenamento.....	93
3.1.2.2	Dados meteorológicos.....	95
3.1.2.3	Dados das propriedades físicas dos líquidos armazenados nos tanques.....	95
3.1.3	Equações para o cálculo de estimativas de emissões de compostos orgânicos voláteis.....	99

3.2	DEFINIÇÃO DA GRADE DE DOMÍNIO DA MODELAGEM E PONTOS RECEPTORES.....	101
3.3	LEVANTAMENTO DE DADOS DE ENTRADA PARA O SISTEMA DE MODELAGEM ERMOD.....	104
3.3.1	Dados específicos das chaminés.....	104
3.3.2	Dados específicos dos tanques de armazenamento de líquidos orgânicos voláteis.....	105
3.3.3	Dados topográficos da região de estudo.....	107
3.3.4	Dados meteorológicos da região de estudo.....	107
3.3.4.1	Dados de superfície.....	107
3.3.4.2	Dados de uso de solo.....	109
3.3.4.3	Dados de altitude.....	109
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	111
4.1	AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS.....	111
4.1.1	Fontes pontuais.....	111
4.1.2	Fontes evaporativas.....	113
4.2	RESULTADO DO PROCESSAMENTO DADOS METEOROLÓGICO PARA A MODELAGEM DE DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS.....	117
4.3	CONCENTRAÇÕES DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS OBTIDOS PELO SISTEMA DE MODELAGEM AERMOD.....	120
4.3.1	Fontes pontuais.....	120
4.3.2	Fontes evaporativas.....	134
4.3.3	Comparação entre as concentrações calculadas e medidas....	139
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	141
5.1	CONCLUSÕES.....	141
5.2	PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	143
	REFERÊNCIAS.....	145
	APÊNDICE A - Cálculo para estimativa de COV.....	159
	APÊNDICE B - Parâmetros de cálculo para os tanques.....	176

1 INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial que teve início no Reino Unido, por volta de 1750 e depois propagada pelo mundo, é um dos eventos mais importantes na história da humanidade. Reconhecida como uma época na qual a capacidade de liberar grande quantidade de energia, a partir da queima de combustíveis fósseis, e o subsequente desenvolvimento de motores de combustão interna, geração de energia elétrica, ferrovias entre outros, proporcionaram benefícios econômicos e sociais, tornou-se também o marco de alguns dos principais problemas ambientais e, entre esses, a poluição do ar (UNGER, 2012).

A poluição do ar está associada a efeitos adversos à saúde humana, tais como: aumento do risco de morbidade (taxa de doença) e mortalidade (taxa de morte) devido a infecções do sistema respiratório inferior, doenças respiratórias crônicas, cardiovasculares e câncer. Globalmente, a poluição do ar é um dos vinte maiores fatores de risco relacionado a diminuição da expectativa de vida (CASTNER; GITTERE; SEO, 2015). Além disso, possui inter-relação com diversas problemas ambientais e alguns poluentes podem, ao mesmo tempo, interferir na qualidade do ar, mudanças do estado do clima e ser um gás de efeito estufa (LOUGHLIN; BENJEY; NOLTE, 2011).

O nível da poluição atmosférica é medido pela quantificação de um grupo restrito de gases e partículas que são considerados padrões da qualidade do ar. Um padrão da qualidade do ar define legalmente um limite máximo para a concentração de uma substância poluente, que garanta a proteção da saúde e do bem-estar das pessoas (DERÍSIO, 2012). No Brasil, a Resolução CONAMA N° 03 de 28 de junho de 1990 são estabelecidos os seguintes poluentes como indicadores da qualidade do ar: dióxido de nitrogênio (NO_2), dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO), ozônio (O_3), partículas inaláveis ou partículas com diâmetro menor que $10 \mu\text{m}$ (MP10), fumaça e Partículas Totais em Suspensão (PTS), cujos os padrões são fixados na mesma resolução.

A Resolução CONAMA N° 03/1990 não regulamenta os compostos orgânicos voláteis (COV) com um parâmetro indicador da qualidade do ar. Apesar disso, os COV são precursores de ozônio troposférico e podem causar prejuízos a saúde pública como aumento de risco de asma, afetar o sistema

imunológico e efeitos mutagênicos, entre outros. Logo, ter um banco de dados concernente as emissões de compostos orgânicos voláteis, pode contribuir para formulação de políticas ambientais futuras, no território brasileiro, relativa a esses poluentes.

As fontes de emissão de poluentes atmosféricos é outro aspecto relevante a ser destacado. De acordo Thambiran e Diab (2011), globalmente o setor industrial é o principal contribuinte para a emissão de poluentes atmosféricos e um significativo usuário de energia, principalmente a base de combustíveis fósseis. Mas, conforme Hiranandani (2014) existem diversas Fontes que também são importantes do ponto de vista da poluição do ar e que encontrar-se, conjuntamente, alocadas em setores chaves da economia como os portos marítimos e, por isso, merecem atenção especial das autoridades portuárias. Nesses espaços, as Fontes de emissão que podem interferir na qualidade do ar, incluem as emissões de navios, as de estocagem de grãos líquidos e as da exaustão de veículos automotores que transportam mercadorias até o porto.

No Estado de Pernambuco, o Complexo Industrial Portuário Governador Eraldo Gueiros, conhecido como Porto de Suape, é um porto marítimo de uso público que está localizado entre os municípios de Cabo de Santo Agostinho e Ipojuca, Nordeste do Brasil. O projeto do Porto de Suape foi baseado na integração porto-indústria, ou seja, possui uma infraestrutura de apoio a serviços portuários e a instalação de empreendimentos industriais (PLANO METRE DE SUAPE, 2012). O Porto de Suape está organizado em zonas e setores, de acordo com o instrumento normativo que define o zoneamento ambiental, industrial e portuário, bem como as condições de uso, ocupação e parcelamento do solo desse território. A Zona Industrial Portuária, por exemplo, abrange as instalações portuárias terrestres, cuja área é delimitada e definida como “Porto Organizado”, conforme Decreto Federal de 25 de maio de 2011, e abriga empreendimentos industriais de alta dependência e correlação direta com os terminais portuários.

Na Zona Industrial Portuária, encontram-se em operação vinte e três empresas, principalmente estocagem de grãos líquidos, indústrias de produtos alimentares, indústria química e geração de energia elétrica, as quais são Fontes para emissões de NO₂, SO₂, MP₁₀, CO e COV. Contudo, mais de

setenta empresas estão operando ou estão em fase de instalação ao longo do espaço territorial do Porto de Suape. Portanto, diferentes atividades que precisam ser monitoradas sob vários aspectos ambientais, sendo um dos mais importantes a poluição atmosférica.

No Brasil, vários órgãos ambientais utilizam equipamentos que analisam gases e partículas na atmosfera, sobretudo aqueles definidos pela Resolução CONAMA N° 03 de 28 de junho de 1990, para avaliar a qualidade do ar. Porém, de acordo com Franco (2014) como nem sempre tais recursos são suficientes, devido à limitação temporal, espacial e de custo, o uso de modelos de dispersão de poluentes atmosféricos podem ser utilizados para estimar as concentrações de poluentes do ar e como isso produzir informações complementares às medidas convencionais realizadas em campo. Esse cálculo é realizado, principalmente, por meio de dados de parâmetros físicos e de exaustão das chaminés, meteorologia e topografia. Além disso, os modelos de dispersão de poluentes atmosféricos podem avaliar o impacto gerado por uma FONTE ou um grupo de Fontes de emissão de gases e partículas na qualidade do para uma determinada região.

Atualmente, existe uma diversidade modelos de dispersão atmosférica, contudo o AERMIC Model (AERMOD) desenvolvido pelo *American Meteorological Society /United States Environmental Protection Agency Regulatory Model Improvement Committee* – AERMIC é um dos mais utilizados no mundo para prever as concentrações de poluentes atmosféricos e avaliar a qualidade do ar, sendo aplicado principalmente para fins de licenciamento ambiental (PAINE; WARREN; MOORE, 2016). O AERMOD, de fato, foi concebido como um sistema de modelagem constituído de um programa principal AERMOD, o qual faz uso de um modelo estacionário de dispersão de pluma gaussiana, além de um processador de dados meteorológicos denominado AERMET e um pré-processador de terreno conhecido como AERMAP, uma vez que a meteorologia e a topografia da região são parâmetros importantes que irão influenciar no processo de dispersão dos poluentes (MA *et al.*, 2013).

Conforme o Guia de Dispersão de Modelagem da Província de Ontário – Canadá (2009), com o sistema de modelagem AERMOD é possível prever as concentrações de poluentes originados de múltiplas Fontes, inclusive as de

COV provenientes dos tanques de armazenamento de produtos orgânicos voláteis. Além disso, pode-se utilizar o programa *TANKS* versão 4.0.9D para estimar as concentrações ambientais desses poluentes. Esse programa foi desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency* - USEPA e incorpora as equações do *American Petroleum Institute* para estimar as emissões de COV, provenientes de diferentes tipos de tanques de armazenamento de líquidos orgânicos voláteis, uma vez que esses representam uma importante fonte de emissão desses compostos (MIHAJLOVIC *et al.*, 2013). Esse programa, portanto, pode servir de ferramenta auxiliar dos órgãos ambientais a obterem dados de emissões de compostos orgânicos voláteis sem custos adicionais relativos as ações de controle ambiental, uma vez que se encontra disponível gratuitamente no site da USEPA.

Nas áreas portuárias, portanto, concentram-se várias Fontes de emissão de gases e partículas de origem antropogênica, tornando-se áreas relevantes no estudo da poluição atmosférica. Dessa forma, ciente da crescente importância atribuída, nos últimos anos, aos problemas relacionados ao meio ambiente, especificamente da poluição do ar, o objetivo geral desse trabalho é avaliar o impacto de Fontes de emissão de NO₂, SO₂, MP₁₀, CO e COV, existentes na Zona Industrial Portuária, sobre a qualidade do ar no Porto de Suape, utilizando o sistema de modelagem AERMOD e o software TANKS.

A presente trabalho tem como objetivos específicos:

- Avaliar as emissões dos poluentes NO₂, SO₂, MP₁₀, CO a partir do tipo de combustíveis utilizados no processo de combustão;
- Estimar as emissões anuais totais de COV, provenientes dos tanques de armazenamento de líquidos orgânicos voláteis, utilizando o programa *TANKS* 4.09 D;
- Avaliar as emissões anuais totais de COV por tipo de tanque;
- Utilizar o sistema de modelagem AERMOD para estimar as concentrações médias NO₂, SO₂, MP₁₀, CO e COV a partir dos dados obtidos;
- Avaliar a qualidade do Porto de Suape comparando os resultados das

concentrações médias de NO_2 , SO_2 , MP_{10} , CO , calculadas pelo modelo AERMOD com os Padrões da Qualidade do Ar estabelecidos pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente N°. 03/90;

- Avaliar as concentrações médias COV calculadas pelo modelo AERMOD tendo base a literatura internacional;
- Comparar os resultados das concentrações de NO_2 , SO_2 , MP_{10} , CO calculadas pelo modelo AERMOD com aquelas medidas nas estações de monitoramento da qualidade do ar

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E A SAÚDE PÚBLICA

Na reunião da Colisão do Clima e do Ar Limpo do Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas (PNUMA), a Diretoria de Saúde Pública e Meio Ambiente da Organização Mundial de Saúde – OMS –, classificou a poluição atmosférica como um dos maiores problemas de saúde pública do planeta. A declaração da OMS foi devida, principalmente, à ocorrência de milhões de mortes anuais causadas pela queima da madeira ou outros combustíveis nos interiores das residências e a poluição urbano-industrial. O primeiro tipo poluição sendo mais preocupante na África, e o segundo na Ásia e na América Latina (ENVOLVERDE, 2013).

O Ministério do Meio Ambiente (MMA) do Brasil, por meio do Plano Nacional da Qualidade do Ar, já havia divulgado que vários estudos epidemiológicos, realizados em diversos países do mundo, inclusive no Brasil, vinham demonstrando a existência da associação entre a exposição a poluentes atmosféricos e efeitos deletérios sobre a saúde, mesmo quando os níveis médios destes poluentes não sejam tão altos. Esses efeitos têm sido observados tanto na mortalidade geral, quanto por causas específicas como doenças cardiovasculares e doenças respiratórias (MMA, 2009).

De Moraes *et al.* (2010), avaliaram a associação entre a ocorrência de sibilância (chiado no peito) em crianças e adolescentes e localização de suas residências quanto a direção favorável a dispersão de poluentes atmosféricos, emitidos por uma planta petroquímica de Guamaré, Rio Grande do Norte. O estudo considerou as concentrações diárias de poluentes como MP_{10} , $MP_{2,5}$, SO_2 , NO_2 , benzeno, xilenos entre outros, medidos em uma estação de monitoramento da qualidade do ar existente na região. As comunidades foram categorizadas em dois grupos, de acordo com a sua posição em relação à direção do vento da seguinte forma: comunidades expostas e comunidades de referência. Os pesquisadores concluíram que, mesmo em baixos níveis dos poluentes atmosféricos estudados, os sintomas sibilância em crianças e adolescentes estavam associados a aqueles grupos de comunidades expostas, ou seja, as que residiam na direção do vento favorável a dispersão dos poluentes

da planta petroquímica, mostrando-se mais vulnerável o grupo de pré-escolares do gênero masculino.

Bueno *et al.* (2010) avaliaram a associação entre o número de internações hospitalares de crianças por problemas respiratórios e a concentração de material particulado em suspensão no ar no município de Divinópolis, Estado de Minas Gerais, no período de 2000 a 2006. Observaram que, durante o período estudado, os distúrbios respiratórios ocuparam uma posição de destaque dentre as hospitalizações na rede pública, correspondendo à principal causa de internação com um terço do número total de internações durante o período. Conforme os autores, os dados mostraram ainda uma relação direta entre a concentração de particulados na atmosfera, a qualidade do ar e o quadro epidemiológico, este último diagnóstico pelo número de internações hospitalares de crianças por problemas respiratórios.

Perez *et al.* (2015), verificaram se a política de redução da poluição atmosférica, estabelecida na Suíça, atenuou o número de internações hospitalares e mortalidade de pessoas expostas, a níveis diários, das concentrações ambientais de MP_{10} e NO_2 , em treze regiões do país. O estudo considerou, dentre outros, dados diários das concentrações de MP_{10} , compreendidos entre 2001 a 2010, e de 1995 a 2010 para do NO_2 . Eles concluíram que, apesar de ter ocorrido consideráveis reduções nos níveis de MP_{10} , isto não foi observado para NO_2 , pois esses praticamente, continuaram estáveis. Além disso, os efeitos do MP_{10} e NO_2 sobre as internações hospitalares e mortalidade, quase não mudaram ao longo do período abrangido pelo estudo. Os pesquisadores ressaltaram a importância de se estabelecer estritamente os padrões da qualidade do ar e estratégias de redução da poluição atmosférica, baseados em estudos científicos, e que estratégias mais ambiciosas a essa questão, na Suíça, poderiam ter levado a benefícios na saúde pública.

2.2 PROTEÇÃO DA QUALIDADE DO AR NO BRASIL

A proteção da qualidade do ar tem respaldo legal na Constituição da República Federativa do Brasil de 1988 (CF/88), em art. 23º, Inciso VI que estabelece que a proteção ao meio ambiente e o combate à poluição em

qualquer de suas formas é de competência comum da União, dos Estados do Distrito Federal e dos Municípios. Mas adiante, o *caput* do art. 225 prevê que “todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações”.

A Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), instituída pela Lei Federal Nº 6.938 de agosto de 1981, nove anos antes de ser promulgada a CF/88, inclusive já tinha estabelecido instrumentos associados à gestão da qualidade do ar, tais como: estabelecimento dos padrões de qualidade ambiental, acompanhamento do estado da qualidade ambiental, a avaliação de impactos ambientais, o licenciamento e a revisão de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras.

O Sistema Nacional de Meio Ambiente surge também a partir PNMA, originando a estrutura institucional sob a qual se dá o ordenamento da atuação dos órgãos ambientais da União, dos Estados e dos Municípios, além do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA, atribuindo-lhe competências consultivas e normativas.

As disposições da PNMA vêm sendo normatizadas por meio de Resoluções do CONAMA, sendo as mais importantes a Resolução Nº 05/1989, que institui o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar (PRONAR); a Resolução Nº 03/1990, que define os padrões de qualidade do ar; a Resolução Nº 436/2011, que estabelece os limites de emissão de poluentes atmosféricos para determinadas fontes fixas e um conjunto de resoluções disciplinadoras do Programa Nacional de Controle da Poluição do ar por Veículos Automotores (PROCONVE).

Cabe ressaltar que à União, por meio da competência concorrente, define normas federais básicas e gerais, podendo os estados complementarem-nas conforme suas especificidades, e, em inexistindo norma geral federal, os estados tem competência legislativa plena para regular o uso e a proteção de determinado recurso ambiental.

2.3 PRINCIPAIS POLUENTES ATMOSFÉRICOS QUE DEFINEM A QUALIDADE DO AR

A legislação brasileira regulamenta as concentrações máximas permissíveis de exposição a um grupo de sete poluentes, os quais são denominados de padrões da qualidade do ar:

- Partículas Totais em Suspensão - PTS
- Partículas Inaláveis – MP_{10}
- Fumaça
- Dióxido de Enxofre - SO_2
- Monóxido de Carbono - CO
- Ozônio - O_3
- Dióxido de Nitrogênio - NO_2

A Resolução CONAMA Nº 03/90 estabelece as seguintes definições:

a) Poluente atmosférico:

Qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar:

I - impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;

II - inconveniente ao bem-estar público;

III - danoso aos materiais, à fauna e flora.

IV - prejudicial à segurança ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

b) Padrões de qualidade do ar:

As concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

c) Padrões Primários de Qualidade do ar

São as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população.

d) Padrões Secundários de Qualidade do ar

São as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

A aplicação diferenciada de padrões primários e secundários, conforme prevê a Resolução CONAMA Nº 03/90, requer a divisão do território nacional em classes, conforme o uso pretendido. Contudo, enquanto não for estabelecida a

TABELA 1 - Padrões da qualidade do ar

Poluente	Tempo de amostragem	Padrão Primário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Padrão Secundário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Partículas Totais em Suspensão	24 horas ¹	240	150
	MGA ²	80	60
SO ₂	24 horas ¹	365	100
	MMA ³	80	40
CO	1 hora ¹	40.000	40.000
	8 hora	10.000	10.000
O ₃	1 hora ¹	160	160
Fumaça	24 horas ¹	150	100
	MMA ³	60	40
Partículas inaláveis	24 horas ¹	150	150
	MMA ³	50	50
NO ₂	1 hora ¹	320	190
	MMA ³	100	100

¹ Não deve ser excedido mais de uma vez por ano

² MGA – Média Geométrica Anual;

³ MMA - Média Aritmética Anual

FONTE: Resolução CONAMA nº 03/1990.

classificação das áreas, os padrões primários deverão ser contemplados.

Na **TABELA 1** são apresentados respectivamente os valores das concentrações máximas permissíveis para padrões primários e secundários da qualidade do ar. Pode-se observar na TABELA 1 que os compostos orgânicos não fazem parte do grupo que define a qualidade do ar.

2.3.1 Descrição geral dos principais poluentes atmosféricos

2.3.1.1 Partículas Totais em Suspensão

As partículas totais em suspensão, abreviadas como PTS, são partículas de sólidos ou líquidos suspensos no ar, cujo diâmetro é menor que 100 μm (PÉREZ-VIDAL; LUNAGÓMEZ-ROCHA; ACOSTA-PÉREZ, 2010). As fontes de emissão de PTS podem ser de origem antropogênica: trituração de rochas em pedreiras, exaustão provenientes de veículos, especialmente os de motores a diesel, enquanto as fontes naturais incluem aquelas de origem erupções vulcânicas e pólen liberado pelas plantas (BAIRD, 2000). Em relação aos efeitos na saúde humana, esses poluentes podem causar doenças cardiovasculares e respiratórias, em particular na população idosa (MIGLIARETTI; BERCHIALLA, 2013).

2.3.1.2 Partículas inaláveis

As partículas sólidas ou líquidas em suspensão no ar, cujo diâmetro é menor que 10 μm , são denominadas de partícula inaláveis, abreviadas como MP_{10} (PÉREZ-VIDAL; LUNAGÓMEZ-ROCHA; ACOSTA-PÉREZ, 2010). Do ponto de vista da poluição do ar, o material particulado fino compreende, além das MP_{10} , aquelas cujos diâmetros são menores que 2,5 μm ($\text{MP}_{2,5}$) e 1 μm (MP_1) e cujas as concentrações ambientais devem ser monitoradas devido a uma maior interação negativa com o ambiente e saúde humana (SCHNEIDEMESSER, 2015).

As partículas com diâmetro menor que 10 μm , podem provocar impactos negativos a saúde humana, tais como: risco de câncer, mutagenicidade, defeito cardíaco congênito, doenças respiratórias, risco de parto prematuro e desenvolvimento de processos inflamatórios. Além disso, causam redução da

visibilidade atmosférica, diminuição da fotossíntese nas plantas e alteração das propriedades físico-químicas do solo. Algumas fontes antropogênicas de emissão dessas partículas são as queimas de combustíveis fósseis e tráfego de veículos, enquanto que, as fontes naturais incluem grãos de pólen, incêndios florestais naturais, entre outros (MUKHERJEE; AGRAWAL, 2017).

Adicionalmente, partículas de aerossóis, contendo sulfato e nitrato são dois dos principais contribuintes para a formação de material particulado fino na atmosfera. Essas partículas podem impulsionar as mudanças climáticas globais, pois interagem com o balanço radiativo da Terra, podendo causar um resfriamento da superfície terrestre (UNGER, 2012).

Um fato importante descrito por Ramanathan e Feng (2008), nesse aspecto, é que ao reduzir a concentração de aerossóis, constituídos de sulfatos, pode-se contribuir para acelerar o aquecimento global causado pelos gases de efeito estufa e, portanto, interferir no clima. Porém, isto não implicaria em manter a poluição do ar causada por esses poluentes, devido aos impactos negativos destes compostos no meio ambiente e na saúde humana. Mas, advertiu que, os tomadores de decisão de políticas ambientais deveriam comprometer-se em reduzir a poluição do ar com medidas concomitantes para diminuir também a concentração dos gases de efeito estufa, se quisermos limitar o aquecimento global e, deste modo, as consequências sobre o clima.

Neste cenário, tem-se o caso da China que está concentrando esforços para reduzir as emissões de dióxido de enxofre, precursor de material particulado contendo sulfato, com o objetivo de melhorar a qualidade do ar nas áreas urbanas. Contudo, existe uma preocupação de que medidas extremas relacionadas a diminuição do dióxido de enxofre na atmosfera possa resultar em contribuições para aumentar o aquecimento global (TIBBETTS, 2015).

2.3.1.3 Monóxido de carbono

O monóxido de carbono é um gás incolor, inodoro, insípido, não irritante e é pouco solúvel em água. Em concentrações superiores a 12.800 ppm, o gás pode ser letal aos seres humanos, em poucos minutos. As emissões globais anuais de CO na atmosfera foram estimadas em 2.600 milhões de toneladas, das quais cerca de 60% são provenientes de emissões antropogênicas, principalmente da

combustão incompleta de material contendo carbono e cerca de 40% de processos naturais (NIGAM *et al.*, 2010). Na atmosfera, contribui para a formação do ozônio troposférico (SCHNEIDEMESSER, 2015).

2.3.1.4 Dióxido de nitrogênio

O dióxido de nitrogênio é produzido a partir do monóxido de nitrogênio (NO), um gás poluente incolor (MIDDLECAMP, 2016). Mas, o NO₂ absorve a luz solar, o que lhe dá a coloração marrom característica do *smog* fotoquímico (HINRICHS; KLEINBACH; DOS REIS, 2010). Esses dois compostos estão presentes nos gases de combustão devido a reações químicas entre o nitrogênio e o oxigênio. A abreviatura NO_x refere-se à soma das concentrações do monóxido de nitrogênio e do dióxido de nitrogênio, pois cerca de 95% dos NO_x emitidos pelo processo de combustão são de NO e 5% de NO₂. Como a maior parte do NO reagem na atmosfera para formar o NO₂, os efeitos ambientais são praticamente os mesmos para os dois componentes do NO_x e, desse modo, os limites de emissão para o NO_x são tipicamente os mesmos estabelecidos para o NO₂ (KORPELA, *et al.*, 2017).

No Brasil, por exemplo, a Resolução CONAMA nº 436, de 22 de dezembro de 2011 que estabelece o limite máximo de poluentes atmosféricos para certas fontes fixas de emissão, define que os NO_x sejam expressos como NO₂. As fontes fixas são qualquer equipamento, instalação ou processo, situado em local fixo que libere matéria para atmosfera por emissão pontual (ex: chaminé) ou fonte fugitiva (ex: pilha de estocagem de matéria-prima).

As principais fontes antropogênicas de dióxido de nitrogênio é a queima de combustíveis fósseis em veículos motorizados, usinas termoeletricas e indústrias. O NO₂ presentes na atmosfera pode irritar e prejudicar os pulmões, agravar a asma e a bronquite crônica, aumentar a suscetibilidade a infecções respiratórias, tais como gripes e resfriados comuns, principalmente em crianças pequenas e idosos. Além disso, reduz a visibilidade, causam deposição ácida do ácido nítrico, podendo danificar árvores, solo e vida aquática em lagos (MILLER, 2007).

2.3.1.5 Dióxido de enxofre

O dióxido de enxofre é um gás incolor, odor pungente e solúvel em água (LENZI; FAVERO, 2011). De acordo com Don Lee *et al.* (2014), concentrações elevadas de SO₂, podem ser emitidos através de planta de geração de energia elétrica, processos industriais, e durante a queima de combustíveis fósseis, e desse modo, agravar doenças respiratórias, contribuir para a formação da chuva ácida e causar danos a vegetação na forma de necrose foliar. Esse poluente também são originados de fontes naturais, tais como: emissões de vulcões, decomposição da matéria orgânica e aerossóis marinhos (CALIJURI; CUNHA, 2013).

O termo SO_x designa a soma de SO₂ e trióxido de enxofre (SO₃). Eles aparecem sobretudo como consequência da queima de combustíveis fósseis e da oxidação do enxofre. O dióxido de enxofre corresponde cerca de 98% das emissões de SO_x para a atmosfera (HINRICHS; KLEINBACH; DOS REIS, 2010). A Resolução CONAMA nº 436/2011 também define que SO_x seja expresso como SO₂.

2.3.1.6 Ozônio

O ozônio é um poluente secundário, ou seja, não é emitido diretamente à atmosfera, sendo formado a partir da reação entre os óxidos de nitrogênio, compostos orgânicos voláteis, monóxido de carbono e metano na presença de luz solar. Podem causar uma série de efeitos adversos à saúde humana, tais como: diminuição da função pulmonar, agravos de doenças pré-existentes como asma, aumento de internações hospitalares, especialmente devido a doenças respiratórias, e causam mortalidade prematura (SCHNEIDEMESSER, 2015).

2.4 COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS

Os compostos orgânicos voláteis constituem em um conjunto diversificado de compostos químicos que contém carbono e passam facilmente para a fase vapor (MIDDLECAMP, 2016). Alguns compostos orgânicos que estão na categoria de COV incluem os seguintes: reativos na atmosfera (ex.: propileno), inertes (ex.:

metano) (COPPER; ALLEY, 2011), hidrocarbonetos aromáticos (ex.: benzeno), hidrocarbonetos halogenados (tetracloroeteno), compostos oxigenados (ex.: acetona), entre outros (RODRIGUEZ *et al.*, 2012).

De acordo com Zhang *et al.* (2016), não existe uma definição universalmente uniforme para os compostos orgânicos voláteis. Os referidos autores, adotam a seguinte definição: os COV, em geral, referem-se a todos os compostos orgânicos cujas temperaturas de ebulição são menores que a faixa de temperatura compreendida entre 50-260°C à pressão atmosférica padrão e tem ponto de fusão abaixo da temperatura ambiente.

Nos Estados Unidos, a *United States Environmental Protection Agency* define COV, conforme o estabelecido no *Code of Federal Regulations*, 40: *Chapter 1, Subchapter C, Part 51, Subpart F*, 51100 (2009): “Composto orgânico volátil significa qualquer composto de carbono, excluindo monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido carbônico, carbeto metálicos ou carbonatos e carbonato de amônia, os que participam de reações fotoquímicas na atmosfera. A regulamentação supracitada, exclui da definição de COV, compostos que possuem reatividade fotoquímica desprezível, tais como metano, etano, cloreto de metileno, muitos clorofluorcarbonetos e certas classes de perfluocarbonos, entre outros.

Na União Europeia entende-se como compostos voláteis:

“Composto orgânico volátil são compostos orgânicos cujo ponto de ebulição inicial, à pressão normal de 101,3 kPa, seja inferior ou igual a 250°C.”

Esta redação foi aplicada na Diretiva EC/42/2004, relativa à limitação das emissões de compostos orgânicos voláteis resultantes de solventes orgânicos em determinadas tintas e vernizes e em produtos de retoque de veículos e que altera a Diretiva CE/13/1999. A Diretiva EC/42/2004 tem como objetivo previr ou reduzir a poluição atmosférica resultante da contribuição das emissões de COV para a formação de ozônio troposférico.

Os compostos orgânicos voláteis exercem uma influência considerável no sistema terrestre, uma vez que participam, em conjunto com moléculas de oxigênio, radical hidroxila e óxidos de nitrogênio, na presença de radiação solar, de uma série de reações fotoquímica complexas para a formação do *smog*

fotoquímico, fenômeno do qual resultam poluentes secundários tais como: ozônio, aldeídos, nitratos e outros. Alguns desses compostos podem absorver uma quantidade significativa de radiação infravermelha emitida da Terra, participando assim do chamado “Efeito Estufa” (SUIB, 2013). Existem também compostos orgânicos voláteis halogenados de vida longa na atmosfera que podem causar a depleção do ozônio estratosférico. Portanto, informações sobre as fontes e as concentrações atmosféricas de COV é fundamental para a compreensão das questões relativa à química da atmosfera, qualidade do ar regional e mudanças climáticas (XUE, *et al.*, 2011).

Os compostos orgânicos voláteis podem causar prejuízos à saúde humana. Sabe-se que uma curta exposição a determinados COV pode induzir irritações das membranas das mucosas, náuseas, aumentar o risco de asma e afetar o sistema nervoso, imunológico e reprodutivo, enquanto, uma exposição prolongada aos referidos poluentes, podem levar a efeitos mutagênicos e carcinogênicos (WRONG; NG.; WEBSTER, 2013).

As indústrias de produção e refino de petróleo, petroquímicas (WU *et al.*, 2014) e os parques de armazenamento de combustíveis dos terminais portuários (PAULAUSKIENE; VAITIEKUNAS.; ZABUKAS, 2009), constituem em fontes importantes de emissão de antropogênica de COV devido às perdas evaporativas de líquidos orgânicos voláteis armazenados nos tanques. Contudo, cabe ressaltar que, de acordo com Park *et al.* (2013), cerca de 90% dos compostos orgânicos voláteis são emitidos a partir de fontes biogênicas.

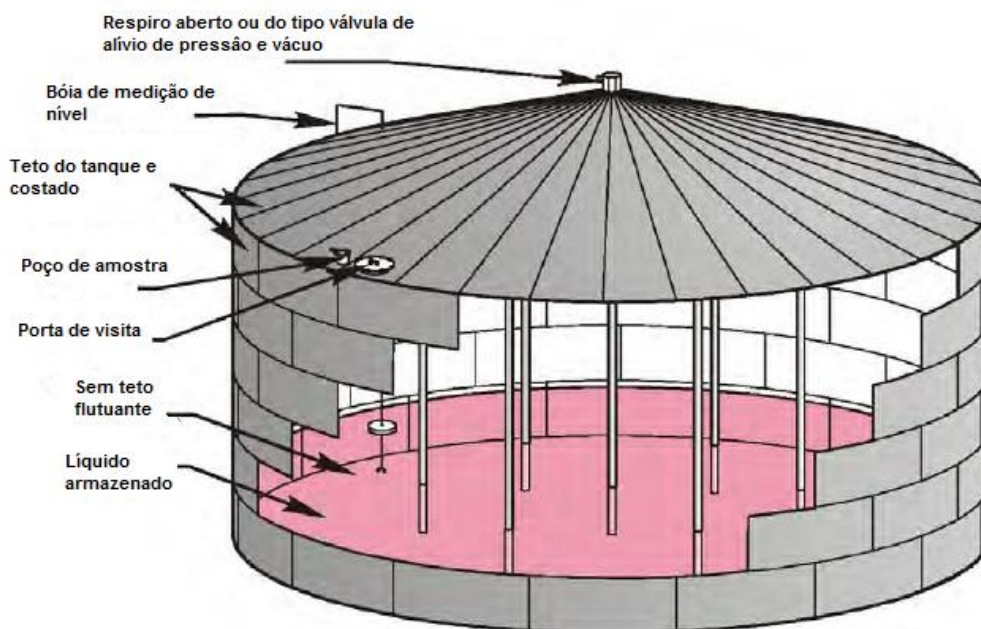
2.4.1 Emissões evaporativas de COV provenientes de tanques de armazenamento

Nesta seção será apresentada uma breve descrição dos principais tipos de tanques, considerados no programa *TANKS* versão 4.0.9.D para estimativa das emissões de compostos orgânicos voláteis: tanque vertical de teto fixo, tanque vertical de teto flutuante externo e tanque vertical de teto flutuante interno.

2.4.1.1 Tanque vertical de teto fixo

O tanque vertical de teto fixo consiste de um costado cilíndrico sobre o qual existe um teto fixado de forma permanente (FIGURA 1). O tipo de teto (cônico, domo, plano) varia de acordo com as definições do projeto, produto armazenado e características locais. O tanque vertical de teto fixo é livremente ventilado ou equipado com válvulas de alívio de pressão e vácuo, as quais permitem que o tanque opere a uma ligeira pressão interna ou a vácuo para evitar a liberação de vapores durante pequenas mudanças na temperatura, pressão ou nível de líquido (CHEREMISINOFF; ROSENFELD, 2009).

FIGURA 1 – Tanque vertical de teto fixo



FONTE – Adaptada pelo autor da USEPA (1995).

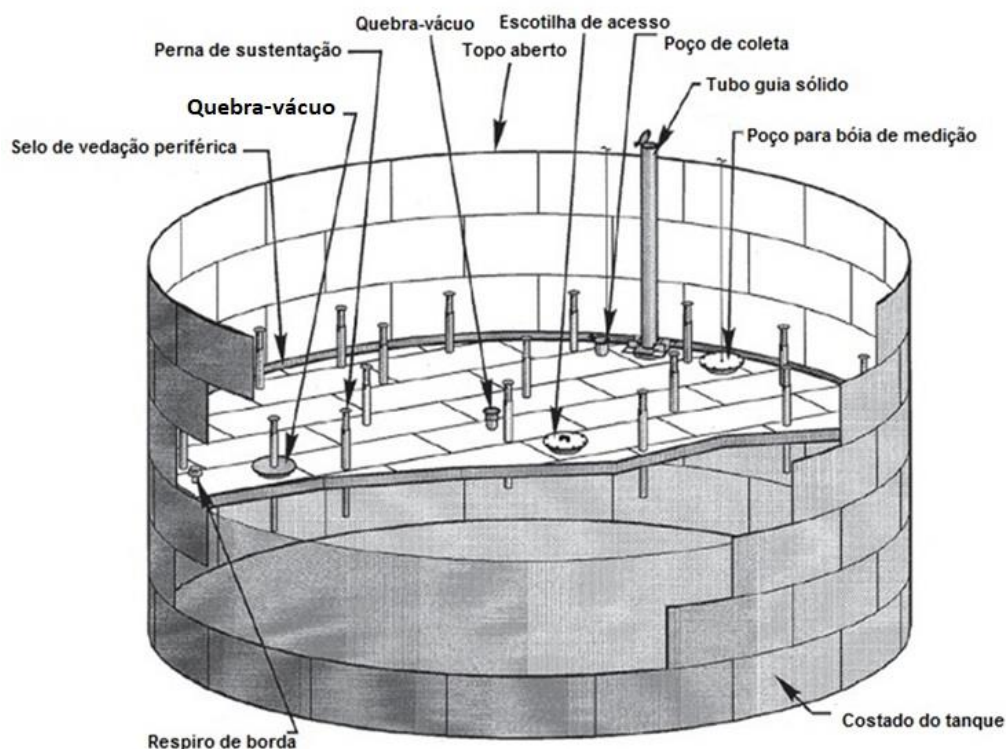
As perdas evaporativas totais, provenientes do tanque vertical de teto fixo, são devidas a dois processos: perda por respiração e perda por trabalho. A perda por respiração é causada pela expulsão de vapor do tanque devido à expansão e a contração do vapor provocadas pela mudança de temperatura ambiental e pressão barométrica, enquanto que a perda por trabalho é devida às operações de enchimento e esvaziamento do líquido no tanque. A evaporação durante o

processo de enchimento é resultado de um aumento no nível do líquido no tanque, ou seja, como o nível do líquido aumenta, a pressão no interior do tanque excede à pressão de alívio e os vapores são expelidos do tanque. A perda evaporativa durante o processo de esvaziamento ocorre quando o ar é “aspirado” para dentro do tanque, no momento em que o líquido é removido, tornando-se saturado com vapor orgânico e expande-se, desta maneira excedendo a capacidade do espaço vapor (USEPA, 1995).

2.4.1.2 Tanque de teto flutuante externo

O tanque vertical de teto flutuante externo consiste de um casco cilíndrico de topo aberto e um teto que repousa sobre a superfície do líquido (FIGURA 2).

FIGURA 2 – Tanque vertical de teto flutuante externo



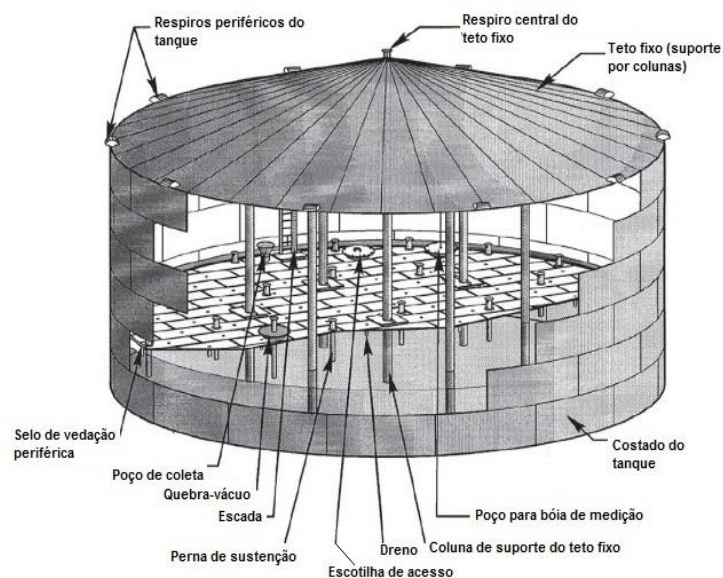
FONTE – Adaptada pelo autor da USEPA (1995).

No caso da FIGURA 2, o teto irá subir ou descer de acordo com o a mudança no nível do líquido armazenado. O selo de vedação de periférica ou de extremidade, colocado entre a borda do teto flutuante e a parede interna do costado, minimiza as perdas evaporativas com a redução do espaço vapor. No entanto, ainda existirá perdas evaporativas pelo selo. A existência, diversos acessórios que passam através ou são ligados ao teto flutuante para acomodar componentes de suporte estruturais ou permitir funções operacionais, também constituem em fontes de perdas evaporativas, tais como: perna de suspensão do teto, escotilha de acesso, poço de coleta, boia de medição. O somatório das perdas pelo selo de vedação de extremidade e pelos acessórios do tanque teto flutuante externo são denominadas de perdas permanentes de estocagem. Adicionalmente, também ocorrerá perdas evaporativas pela retirada do produto armazenado no tanque, ou seja, na medida em que o nível do líquido no tanque diminui, haverá evaporação do líquido aderido à superfície da parede interna do costado que ficará exposto ao ambiente (EPA, 1995).

2.4.1.3 Tanque de teto flutuante interno

O tanque vertical de teto flutuante interno consiste de um casco cilíndrico com teto fixo no topo do costado e um teto flutuante que repousa sobre a superfície do líquido. A função do teto fixo não é atuar como uma barreira ao vapor, mas bloquear a ação do vento. Esses tanques são livremente ventilados pela instalação de respiros no topo do tanque (CHEREMISINOFF & ROSENFELD, 2009), conforme mostrado na FIGURA 3.

Existem, basicamente, dois tipos de tanques de teto flutuante interno: os tanques no qual o teto fixo é suportado por colunas verticais dentro do tanque, e os tanques cujo teto fixo é autoportante, sem coluna interna de sustentação. Os tanques de teto fixos que foram convertidos em tanques de teto flutuante interno são típicos do primeiro tipo, enquanto, os tanques de teto flutuante externo convertidos em tanques de teto flutuante interno, normalmente tem o teto autoportante (CHEREMISINOFF; ROSENFELD, 2009).

FIGURA 3 – Tanque de teto flutuante interno

FONTE – Adaptada pelo autor da USEPA (1995).

Em geral, os acessórios do tanque de teto flutuante interno são idênticos aos existentes no tanque de teto flutuante externo, exceto por exemplo, pelas presenças da escada e das colunas de sustentação do teto fixo, as quais são acessórios típicos de um tanque vertical de teto flutuante interno. No tanque de teto flutuante interno, cujo teto fixo é suportado por colunas verticais dentro do tanque, as colunas necessitam atravessar uma abertura no teto flutuante e passar pelos poços verticais periféricos, instalados no topo do teto flutuante. Geralmente, um dispositivo de fechamento existe entre o topo do poço e a coluna, o qual deve acomodar os movimentos do teto flutuante interno em relação à coluna, à medida em que o nível do líquido armazenado no tanque muda. Por conseguintes, as vedações constituem fontes de perdas evaporativas, em conjunto as junções (costura) das placas do teto flutuante (CHEREMISINOFF; ROSENFELD, 2009).

A maioria dos tanques de armazenamento são projetados e construídos, conforme especificações do *American Petroleum Institute API-650* (CHEREMISINOFF; ROSENFELD, 2009), ou normas brasileiras equivalentes. De acordo com o projeto do tanque, ter-se-á diferentes tipos de tipos de teto para um determinado produto nele contido. Cabe ressaltar as características do local onde o tanque será instalado, assim como a eficiência de armazenamento do

tanque, durante a vida útil desse equipamento, devem-se também ser levados em consideração.

2.4.2 Estimativa de emissões de compostos orgânicos voláteis

O programa *TANKS* versão 4.09 D, desenvolvido pela *UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY* é um dos meios utilizados pela comunidade científica para o cálculo das emissões de compostos orgânicos voláteis. Este programa incorpora as equações formuladas pelo *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE - API*, que leva em consideração fatores de emissão relacionados a diversos tipos de acessórios e selos de vedação existentes nos tanques de armazenamento para diferentes produtos orgânicos voláteis. Além de dados de propriedades físicas dos produtos orgânicos voláteis, dados meteorológicos da cidade onde os tanques estão instalados, ou na ausência desses, da cidade mais próxima, detalhes construtivos e operacionais dos tanques. As equações da API estão disponibilizadas no capítulo 7 da *Compilation of Air Pollution Emission Factors, Fifth Edition, Volume 1 - United States Environmental Protection Agency*, 1997 (MIHAJLOVIC *et al.*, 2013).

2.5 SISTEMA ATMOSFERA-TERRA E FATORES RELACIONADOS A DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

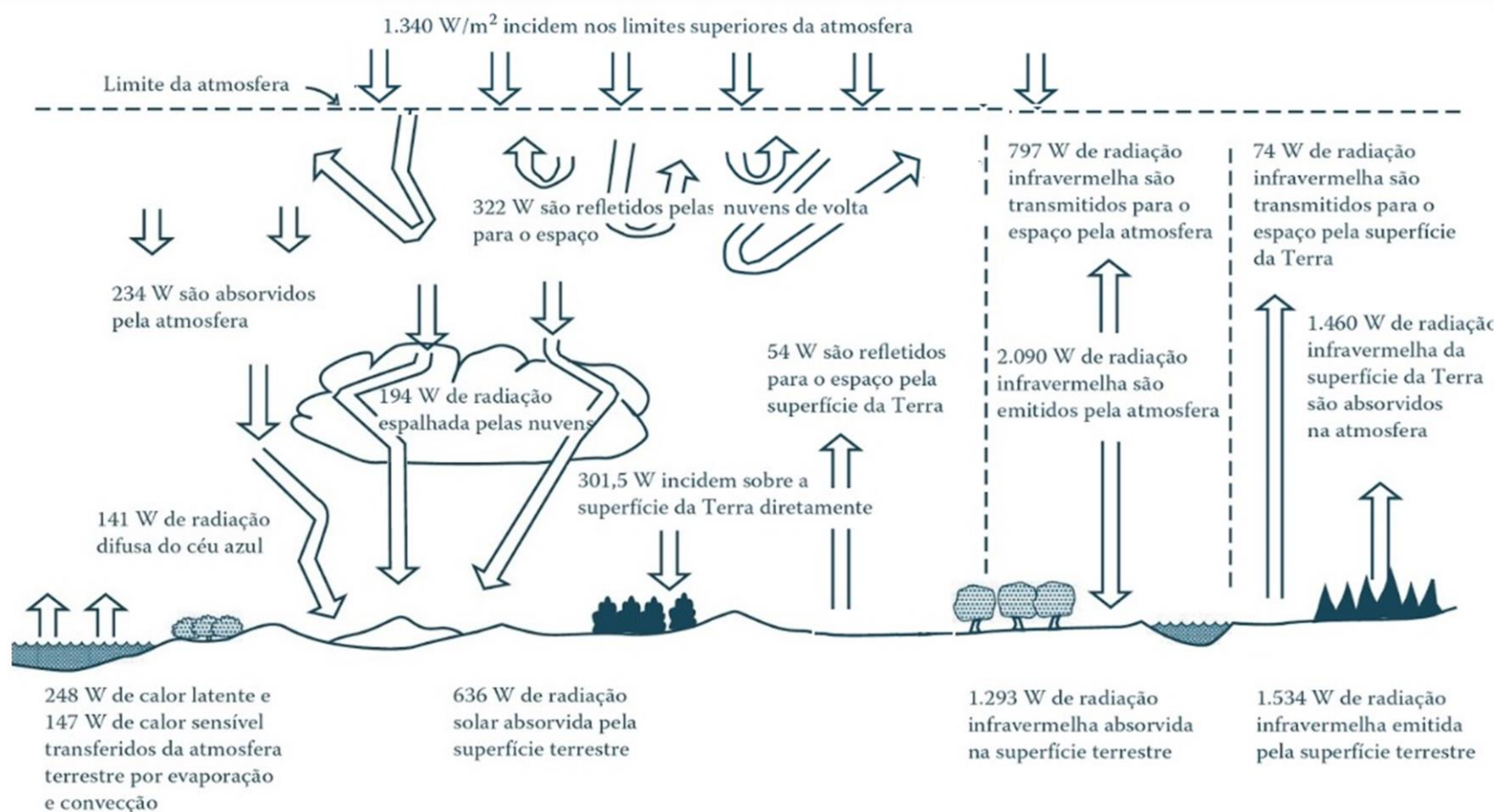
Na atmosfera, os processos de dispersão de poluentes desempenham papel fundamental, pois permitem a “renovação” do ar no ambiente, fazendo com que os poluentes decorrentes das fontes naturais ou antropogênicas assumam concentrações cujos valores sejam aceitáveis para a vida humana (BARBON; GOMES, 2010). Desse modo, é fundamental abordar alguns tópicos relacionados ao sistema atmosfera-terra e os fatores relacionados à dispersão dos poluentes no meio ar.

2.5.1 Radiação Solar

A radiação solar é a principal fonte de energia do sistema atmosfera-terra, a qual é responsável pelo aquecimento do ar e pela dinâmica dos ecossistemas.

O sol emite energia sob a forma de ondas eletromagnéticas (faixa do ultravioleta ao infravermelho próximo), ou seja, preferencialmente ondas curtas (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). A radiação solar, ao atravessar a atmosfera terrestre, interage com seus componentes (nuvens, gases e partículas), sendo atenuada pelos processos de reflexão e absorção, bem como pelo processo de espalhamento (FIGURA 4) (STEINKE, 2012).

FIGURA 4 – Balanço energético da Terra com base nas parcelas que formam os 1.340 W/m^2 de energia que compõe o fluxo solar



FONTE: Manahan, 2016.

A radiação solar ao ser absorvidas pela superfície da terra é transformada em energia térmica, aquecendo-a e tornando-se uma fonte de radiação de ondas longas (na faixa do infravermelho distante), ou seja, calor (STEINKE, 2012).

O balanço da energia radiante, em uma determinada superfície, é dado pela soma algébrica de ondas curtas e de longas, dado pela Equação 1, considerando-se positivos, os fluxos verticais na direção da superfície e negativos quando na direção do espaço.

$$R_n = (R_g - R_r) + (R_a - R_s) \quad (1)$$

Em que,

R_n = fluxo de radiação líquida (W.m^{-2});

R_g = fluxo de radiação de onda curta incidente (radiação global) (W.m^{-2});

R_r = fluxo de radiação de onda curta refletida pela superfície (W.m^{-2});

R_a = fluxo de radiação de onda longa incidente, ou seja, emitida pela superfície (W.m^{-2});

R_s = fluxo de radiação de onda longa emitida pela superfície (W.m^{-2})

A fração do fluxo de radiação solar global que atinge uma superfície qualquer e é refletida por ela é conhecida como albedo, ou seja, coeficiente de reflexão da superfície para a radiação de ondas curtas (ROSENBERG *et al.*, 1983). O albedo varia de acordo com as características da superfície e do ângulo de incidência do raio solar, que varia ao longo do dia (STEINKE, 2012).

A Terra, ao receber a radiação terá sua temperatura aumentada, emitindo conseqüentemente, radiação de ondas longas, obedecendo a Equação de Stefan-Boltzmann (Equação 2): “o fluxo de radiação emitida por um corpo é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta em que o mesmo se encontra”

$$R_s = \epsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

Em que,

T = temperatura absoluta (K);

R_s = radiação emitida por um corpo negro (W.m^{-2});

ε = emissividade de um corpo negro ($\varepsilon = 1$);

σ = constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$).

O balanço de energia, em uma superfície ideal, não tendo capacidade de armazenar massa ou calor, os fluxos de energia fluem de dentro para fora da superfície, sem perda ou ganho provocado pela superfície. Nessas condições, partindo do princípio da conservação de energia, pode-se ser utilizar uma equação simplificada (Equação 3), para calcular a radiação líquida na superfície (ARYA, 2001):

$$R_n = H_s + L_s + G \quad (3)$$

Em que,

R_n = fluxo líquido de radiação (W.m^{-2});

H_s = fluxo de calor sensível (W.m^{-2});

L_E = fluxo de calor latente (W.m^{-2});

G = fluxo de calor no solo (W.m^{-2});

Nesses termos, da energia que chega à superfície da terra, parte é utilizada para aquecer o ambiente na forma de calor sensível (H), parte para evaporar a água na forma de calor latente (L_E) e parte para aquecer a terra, fluxo de calor no solo (G). A Equação 2.3 descreve como o fluxo líquido de radiação na superfície deve ser equilibrado por uma combinação dos fluxos de calor sensível e latente e o fluxo de calor no solo (ROSENBERG *et al.*, 1983).

Durante o dia, a superfície recebe energia radiativa ($R_n > 0$), que é dividido em fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente para a atmosfera e fluxo de calor para o solo. Enquanto que, durante a noite, a superfície perde energia por radiação invertidas, especialmente em condições claras ou parcialmente

nubladas. Essa perda é compensada por ganhos de calor do ar e do solo, e, às vezes, do calor latente de condensação liberado durante o processo de formação de orvalho (ROSENBERG *et al.*, 1983).

Todos os termos da Equação 3, por convenção, serão positivos durante o dia e negativos durante a noite. As magnitudes do fluxo de calor para o solo G não diferem muito entre dia e noite, embora a direção ou sinal obviamente inverta durante os períodos de transição entre manhã e noite, quando os fluxos de L_E e H_s também mudam de sinal (ARYA, 2001).

A radiação líquida representada pelo saldo de radiação é o resultado das trocas de energia que se estabelecem na atmosfera. Desta forma, a equação de balanço de energia se reduz à Equação 4.

$$R_n = H_s + L_s + G = 0 \quad (4)$$

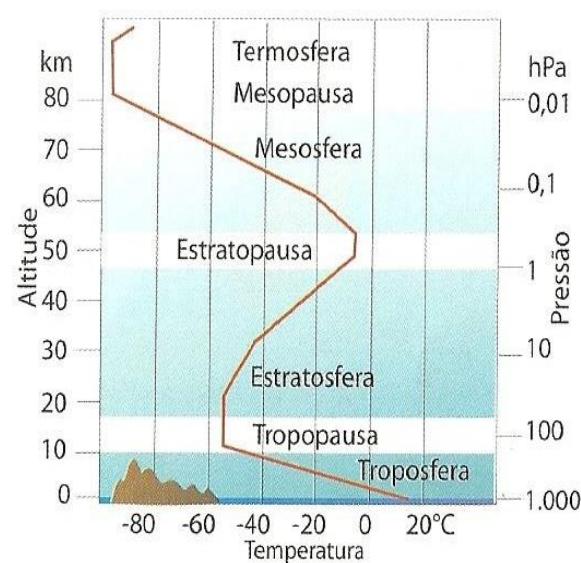
A radiação solar que chega à Terra provoca turbulência e contribui para a dispersão dos poluentes.

2.5.2 Atmosfera terrestre

A atmosfera é dividida em camadas determinada pela temperatura média nela encontrada como resultado de diferenças na absorção da energia solar (LENZI; FAVERO, 2011). A variação da temperatura é que define a estratificação da atmosfera terrestre (FIGURA 5).

Troposfera: é a camada da atmosfera mais baixa da superfície terrestre, estendendo-se desde do nível do mar, 0 km, a 16-20 km de altitude (LENZI; FAVERO, 2011). Cerca de 75 a 80% da massa de ar da Terra são encontradas na troposfera

FIGURA 5 – Camadas da atmosfera



FONTE: Ferreira, 2006.

(MILLER, 2008). Praticamente todos os poluentes emitidos próximos à superfície terrestre são transportados, transformados e removidos dentro desta camada. A temperatura na troposfera decresce, em média com altitude a uma taxa de $6,5^{\circ}\text{C.km}^{-1}$. O topo desta camada, onde a temperatura começa a assumir um perfil constante é chamado de tropopausa. Esse abaixamento da temperatura é importante, pois dificulta a perda de água, na forma de gás, para o espaço (LENZI; FAVERO, 2011).

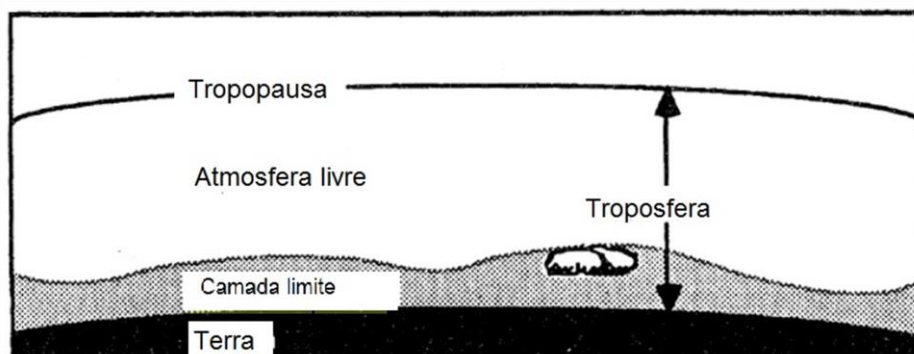
Estratosfera: nessa camada, a temperatura aumenta com a altitude devido a presença de ozônio. As reações de fotólise do O_2 , formação química do O_3 e sua fotólise e absorção nos comprimentos de onda 230 a 330 nm, resultando em um aquecimento desta camada (LENZI; FAVERO, 2011). As ausências de nuvens e de precipitação fazem com que poluentes eventualmente lançados nessa altura dificilmente sejam removidos (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Mesosfera: começa a partir da estratopausa (cerca de 50 km) e estende-se até a mesopausa (85 km). Esse abaixamento de temperatura deve-se a um dos fatos a seguir: a) ausência da absorção da radiação eletromagnética nessa região; b) falta de espécies químicas que absorvem radiação; c) por que a radiação eletromagnética foi absorvida antes, ou seja, na camada anterior que é a termosfera (LENZI; FAVERO, 2011)

Termosfera: começa na mesopausa (85 km) e estende-se para a exosfera, onde a 500 km apresenta a termopausa com uma temperatura maior que 1200°C . Essa temperatura elevada explica-se pela interação da radiação eletromagnética mais energética, isto é, a comprimentos de onda mais curtos ($\lambda = 100 \text{ nm}$) com espécies químicas presentes na camada (LENZI; FAVERO, 2011).

2.5.3 Camada limite planetária

A troposfera pode ser dividida em duas partes: a camada limite planetária, região mais próxima da superfície da Terra, e a atmosfera livre, acima desta (FIGURA 6) (STULL, 2012).

FIGURA 6 - Camada limite planetária

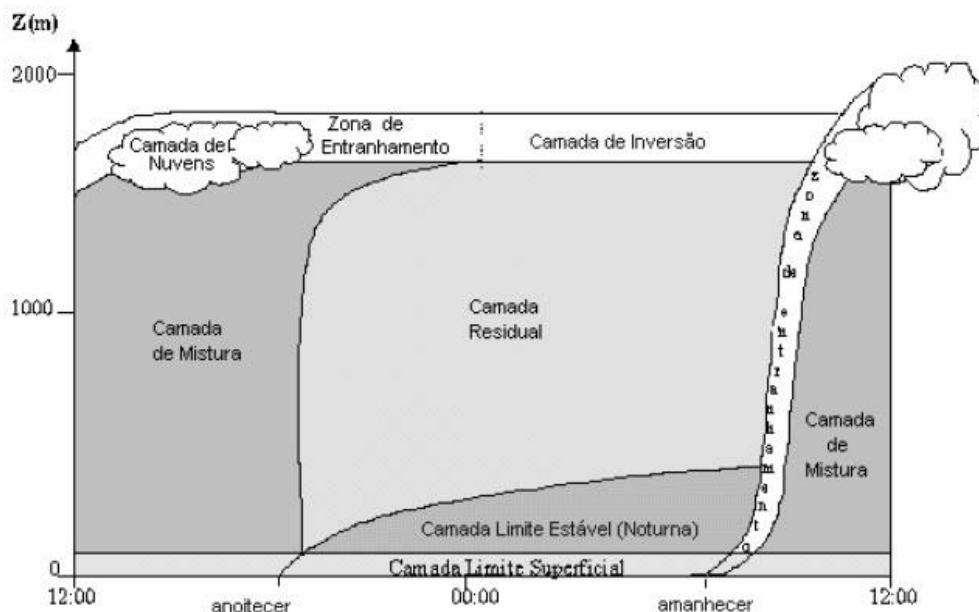
FONTE: Adaptada pelo autor de Stull, 2012.

A camada limite planetária (CLP) representa a região onde a maioria das atividades humanas são desenvolvidas e, conseqüentemente, onde são lançados os poluentes atmosféricos (QUAN *et al.*, 2013). A CLP sofre a influência direta do solo (fricção, aquecimento e resfriamento), gerando turbulência até uma certa altura, onde há uma inversão térmica que limita a troca de ar. Essa camada de inversão térmica resulta do movimento descenso do ar em larga escala, chamada de subsidência que separa a camada limite planetária da atmosfera livre, onde a turbulência deixa de ser significativa (STULL, 2012). A turbulência dominante na camada limite planetária é a turbulência térmica que é gerada pelo aquecimento solar durante o período diurno, sendo associada com efeitos de flutuabilidade ou empuxo do ar. O cisalhamento do vento causado pela fricção do ar, assim como o escoamento do ar sobre obstáculos, também gera turbulência, conhecida como turbulência mecânica ou forçada (NEDEL, 2003).

A espessura e a estrutura da camada limite planetária sobre a superfície terrestre variam com o tempo e espaço, podendo chegar na faixa de centenas de metro a vários quilômetros. Em superfícies continentais, tal camada está condicionada aos processos de trocas de energia, velocidade do vento, topografia, tipo de cobertura vegetal e umidade do solo, dentre outros fatores (STULL, 2012). Geralmente, durante o dia esta camada pode atingir de 1 a 2 km de altura e a noite sua espessura pode ser inferior a 100 m (PANOFSKY; DUTTON, 1984). A evolução diária da camada limite planetária sobre a superfície terrestre, num dia quente e sem muitas nuvens é dada, classicamente, de acordo

com a FIGURA 7.

FIGURA 7 - Evolução diária da camada limite planetária



FONTE – Nunes e Mariano, 2015.

A superfície do solo, que ao ser aquecida, pela radiação solar, irá transferir no calor por condução à camada de ar imediatamente adjacente e essa, por convecção aquece as camadas de ar superiores. Nessas condições, a camada limite planetária, com o crescimento gradativo da convecção, ao longo do ciclo diurno, começa a apresentar uma estrutura padrão, sendo dividida em camada limite superficial, camada limite convectiva ou camada de mistura e zona de entranhamento (NEDEL, 2003). À noite com o resfriamento da superfície, ocorre a camada limite estável e a camada limite residual (STULL, 2012).

A camada limite superficial é a parte da camada limite atmosférica mais próxima da superfície terrestre, compreendendo, aproximadamente, 10% de sua altura total. Nessa camada ocorre a geração da turbulência térmica e mecânica. Uma das características importantes da camada limite planetária é a existência da camada limite convectiva ou camada de mistura onde as turbulências mecânica e térmica são intensificadas. As principais fontes convectivas responsáveis pela mistura são as correntes ascendentes de ar quente (térmicas), que deslocam a partir da superfície, e as de ar frio que descem das nuvens convectivas (STULL, 2012).

Dentro da camada de mistura os poluentes e outras substâncias em suspensão podem ser facilmente misturados. No topo da camada de mistura, localiza-se a zona de entranhamento, onde ocorre uma inversão térmica do perfil de temperatura, que funciona como uma barreira para as térmicas ascendentes, encerrando o domínio da turbulência e trapeando os poluentes quando presentes na camada de mistura. O termo zona de estranhamento refere-se à camada de inversão térmica que se forma durante o período diurno (NEDEL, 2003).

Cerca de meia hora antes do pôr do sol, quando o fluxo de calor começa a cair, devido a declinação do ângulo de inclinação solar ocorre a inibição da formação das térmicas que provoca a redução da turbulência na camada de mistura. Uma porção dessa camada, denominada de camada residual, é mantida presa entre a atmosfera livre a uma camada limite estável que cresce próxima a superfície do solo. A camada residual recebe este nome, pelo fato de ainda conservar as mesmas características da camada de mistura desenvolvida durante o dia, a qual continua até o início da manhã, quando ocorre a formação de uma nova camada de mistura (STULL, 2012).

A camada limite estável é formada quando a parte mais baixa da camada residual é resfriada devido ao resfriamento radiativo da superfície durante o período noturno. Nessa condição, o solo começa a ficar rapidamente mais frio do que a camada de ar adjacente, estabelecendo a presença de ar estável e uma camada de inversão térmica.

Próximo a superfície do solo, durante à noite, os ventos são calmos, mas em altura um pouco maiores de 200 m são encontrados ventos mais intensos (10 a 30 m.s^{-1}) chamados de jatos noturno. A estabilidade tende a suprimir a turbulência, porém o desenvolvimento do jato noturno tende a gerá-la, resultando em pequenas manifestações de turbulência. Poluentes nessa camada tem pouca dispersão vertical, eles tendem a dissipar na horizontal (STULL, 2012).

Os poluentes atmosféricos lançados durante o período convectivo (ciclo diurno) tendem a permanecer dentro da camada residual, pelo menos durante a noite, podendo influenciar nos índices da concentração da poluição do ar próximo à superfície, quando a inversão térmica da camada limite estável for rompida pelas primeiras térmicas convectivas. O crescimento da convecção

começa cerca de meia-hora depois do amanhecer. Com o nascer do sol, o mesmo ciclo reinicia-se (STULL, 2012).

2.5.4 Movimento da atmosfera

2.5.4.1 Dinâmica da circulação atmosférica

De acordo como Ferreira (2006), o modelo dinâmico da circulação da atmosfera, é descrito, de forma simplificada, como segue:

“Os movimentos dos ventos provocados pelas diferenças de aquecimento que ocorrem na superfície terrestre, ocasiona as diferenças de pressões. O ar sobre regiões aquecidas sobe, e sobre as regiões resfriadas, desce. Com isso, a pressão tende a ser mais baixa nas regiões onde o ar se eleva, e mais alta onde o ar desce. Por isso, essas diferenças horizontais de pressão são chamadas de gradientes de pressão.”

No equador, como o ar é aquecido, torna-se menos denso e sobe, movendo-se em direção aos polos, criando uma zona de baixa pressão ao redor do equador, conhecida como baixa equatorial. O ar resfria-se à medida que se move em direção aos pólos, uma grande área de subsidência ocorre próximo a 30° C latitude, em ambos os lados do equador, criando uma área de alta pressão, conhecida como área subtropical. Ao lado da baixa tropical, estão as regiões com pouca ou nenhuma nebulosidade, onde o ar desce. O ar subsidente associado à alta subtropical move-se pela superfície como vento de superfície. No lado equatorial das altas subtropicais, os ventos divergem para o equador; os ventos de superfície deslocam-se para o norte e o nordeste, sendo desviados para o leste pela força de Coriolis.

Os ventos são conhecidos como ventos alísios e caracterizam-se por estarem nos baixos níveis da atmosfera. No hemisfério Sul, sopram, preferencialmente, do Sudeste. No hemisfério Norte, preferencialmente, sopram na direção oeste. Nos polos, o ar frio desce em direção à superfície, criando uma área de alta pressão, a alta polar. Os ventos de superfície sopram para longe dessa área,

tendendo a moverem-se em direção ao Equador, encontrando-se com os ventos de latitudes médias. Nesse ponto de encontro, o ar sobe, criando uma baixa pressão, a baixa subpolar, que se forma por volta das latitudes de 60° C, em ambos os hemisférios. ” Próximo a superfície terrestre, o ar que se descola sofre efeito do atrito com a superfície. A força de atrito age sempre na mesma direção e no sentido contrário ao deslocamento.

Outros fatores influenciam bastante a circulação na atmosfera, tais como aquecimento desigual da superfície, orografia, as costas marítimas, as correntes oceânicas, as correntes marítimas entre os fatores que podem modificar o comportamento dos ventos em escala global. Portanto, o vento é a movimentação do ar relativo à superfície da terra, sendo resultado de balanço de forças que atuam na atmosfera, tais como: o gradiente horizontal de pressão, Coriolis e atrito.

2.5.4.2 Escalas de movimento atmosféricos

A escala de um determinado fenômeno meteorológico refere-se à sua dimensão espacial e temporal e podem ser classificadas em:

- a) Escala planetária: referente aos fenômenos associados à circulação geral da atmosfera. A extensão horizontal dessa escala é da ordem de 1000 a 40.000 km (PIMENTEL, 2015);
- b) Escala sinótica: A essa escala estão associados os movimentos do ar resultante da circulação geral da atmosfera, interagindo como os sistemas frontais, os anticiclones (altas pressões) e os ciclones (baixas pressões). Possui uma escala horizontal que varia de 100 a 5.000 km e tempos de vida de dias a semana. (PIMENTEL, 2015). Na escala vertical se estende da superfície até 12 km (OLIVEIRA,2010).
- c) Mesoescala: os fenômenos nessa escala têm extensão horizontal da ordem de 1 km até cerca de 100 km e tempos de vida de minutos a dias (PIMENTEL, 2015). A essa escala estão associados os movimentos que

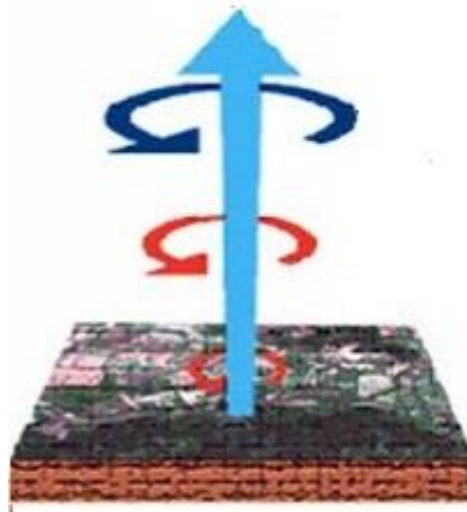
incluem a brisa marítima e a brisa terrestre, circulação dentro de vales e os fenômenos de ilhas de calor (OLIVEIRA, 2010).

- d) **Microescala:** Incluem os movimentos resultantes dos efeitos aerodinâmicos das edificações das cidades e dos parques industriais, da rugosidade das superfícies e da cobertura vegetal de diversos tipos de solo. A escala horizontal atinge uma área que se estende de 1 km a 10 km e na horizontal entre 100 m a 500 m (OLIVEIRA, 2010).

2.5.4.3 Fenômenos associados à circulação atmosférica

- a) **Sistema de baixa e alta pressão**

O sistema de baixa pressão refere-se a uma extensa porção da atmosfera, delimitada por uma série de planos de mesma pressão de formato elíptico que envolve uma área da atmosfera onde pressões decrescem da periferia para o centro. Esse sistema é conhecido como ciclone ou ciclone extratropical. No hemisfério sul o sistema gira no sentido horário, convergindo o ar para o seu centro, provocando um movimento ascendente vertical, o que forma uma área de nebulosidade com ventos fortes e precipitação. Esse sistema caracteriza-se por ser favorável a dispersão dos poluentes atmosféricos. Os ciclones apresentam diâmetro que variam de 300 a 600 km, com extensão horizontal que varia entre 300 a 600 km e vertical que pode atingir 6 km (FIGURA 8) (OLIVEIRA, 2010).

FIGURA 8 - Sistema de baixa pressão**FONTE** – Cláudia, 2017.

Um sistema de alta pressão (anticlone) é uma porção horizontal da atmosfera formado por pressões altas, as pressões atmosféricas aumentam da periferia do centro para o centro. No hemisfério norte, o sistema gira no sentido contrário aos ponteiros do relógio, e os ventos divergem do centro para a periferia do sistema. Na vertical, os ventos são extremamente fracos, com predominância da componente da componente vertical de subsidência (ar descente) (FIGURA 9) (OLIVEIRA, 2010).

FIGURA 9 - Sistema de alta pressão**FONTE** – Cláudia, 2017.

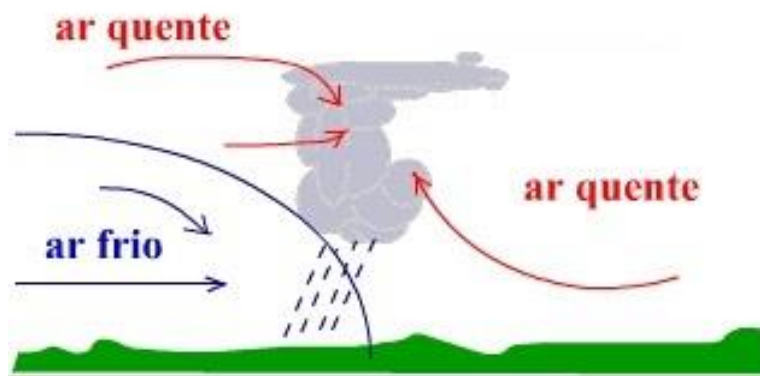
A presença de um anticiclone, resulta em céu claro (tempo bom), sendo a velocidade do vento durante as noite e manhã fraca, no inverno há a formação de inversão térmica e nevoeiros. Não há possibilidade de ocorrência de precipitação. O deslocamento do sistema é lento, uma vez que o ar é mais denso e pesado. Esse sistema quando estagnado, representa condições altamente desfavoráveis à dispersão dos poluentes atmosféricos do Brasil durante os meses de outono e inverno, principalmente sobre as regiões sul e sudeste. Os anticiclones possuem diâmetro horizontal que varia entre 800 a 2000 km e a extensão vertical pode atingir 5 km (OLIVEIRA, 2010).

b) Frentes fria e frente quente

À medida que as massas de ar se deslocam, acabam encontrando-se umas com as outras. O resultado do encontro de massas de ar de características termodinâmicas diferentes dá origem aos sistemas frontais, também conhecidas como frentes. As frentes podem ser definidas como fronteiras entre duas massas de ar de características diferentes em termos de densidade, temperatura, umidade e pressão. Exemplos de frentes são as frentes quentes e frentes frias (STEINKE, 2012). As frentes representam condições favoráveis à dispersão dos poluentes atmosféricos (OLIVEIRA, 2010). As características dessas frentes são:

Frente fria: ocorre quando o ar frio, mais denso, de origem polar, empurra o ar quente para cima e para frente, fazendo-o deslocar verticalmente. Ao subir, o ar quente resfria-se, satura-se, condensa, e as nuvens começam a se formar para gerar a chuva (STEINKE, 2012). Neste processo, formam-se nuvens que podem gerar numerosos temporais (FIGURA 10) (OLIVEIRA, 2010).

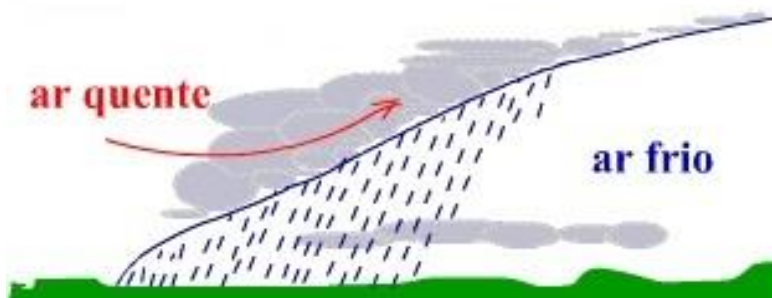
FIGURA 10 - Esquema diagramático de uma frente fria



FONTE: Planetaclix, 2013.

Frente quente: A massa de ar quente sobe suavemente sobre uma massa de ar frio, formando nuvens extensas (FIGURA 11). Em geral, as frentes quentes são mais fracas que as frentes frias, portanto, movem-se mais lentamente. As chuvas que caracterizam a passagem de frentes quentes são contínuas e de pequena intensidade (STEINKE, 2012).

FIGURA 11 - Esquema diagramático de uma frente quente



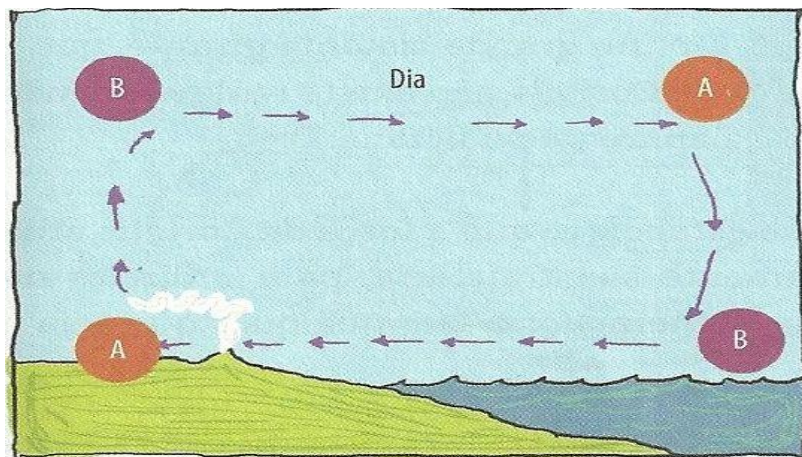
FONTE: Planetaclix, 2013.

c) Brisa marinha e brisa terrestre

As brisas marinha e terrestre são fenômenos meteorológicos de mesoescala próprio de zonas costeiras (OLIVEIRA, 2010). Durante o dia, ao longo dos litorais, a superfície da terra se aquece mais do que superfície de água adjacente, estabelecendo um campo de alta pressão (A), acima do oceano e um campo de baixa pressão (B) acima da superfície da terra. Como o vento sempre

sopra da zona de alta pressão para a de baixa pressão, durante o dia o vento sopra do mar para a terra, definindo a brisa marinha (FIGURA 12) (STEINKE, 2012).

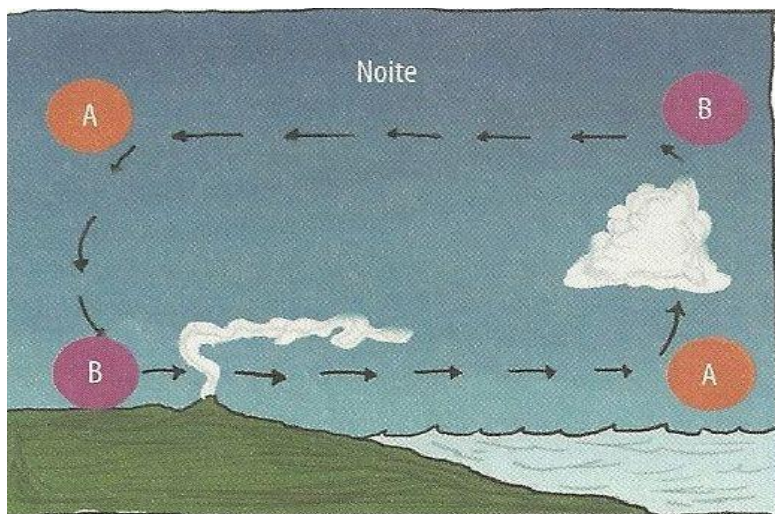
FIGURA12 - Esquema diagramático da brisa marinha



FONTE: Steinke, 2012.

A brisa marinha é um fenômeno favorável à dispersão dos poluentes atmosféricos uma vez que o aquecimento da superfície terrestre instabiliza o ar, aumentando a turbulência atmosférica. Por conseguinte, enfraquecendo a presença da inversão térmica, melhorando a capacidade de dispersão, reduzindo os níveis de poluição dentro da camada limite atmosférica. A brisa pode penetrar continente à dentro até 100 km, dependendo da topografia, altitude e da época do ano. A extensão vertical da brisa pode atingir até 2 km, principalmente, nos meses de verão (OLVEIRA, 2010).

A brisa terrestre é um fenômeno inverso a brisa marinha. Durante a noite, a superfície da terra resfria-se mais rapidamente do que a água do mar, estabelecendo um campo de pressão alta (A) acima da superfície da terra e um campo de pressão baixa acima (B) do oceano. O vento, nesse caso, sopra da terra para o mar, definindo a brisa terrestre (FIGURA 13) (STEINKE, 2012).

FIGURA 13 - Esquema diagramático da brisa terrestre

FONTE: Steinke, 2012.

A velocidade do vento associada à brisa terrestre é mais fraca, enquanto que a associada à brisa marítima é mais forte. A brisa terrestre é um fenômeno desfavorável à dispersão de poluentes atmosféricos porque ocorre durante à noite. Esse fenômeno estabiliza o ar, enfraquece a velocidade do vento, principalmente de madrugada, e intensifica a presença da inversão térmica. A brisa terrestre pode penetrar no oceano à dentro até 20 km, possui pouca profundidade vertical, cuja altura vai depender das características da zona costeira, da época do ano e da latitude (OLVEIRA, 2010).

2.5.5 Gradiente verticais da temperatura do ar

O estudo dos gradientes verticais da temperatura do ar com altitude é importante porque condicionam a possibilidade de ocorrência e o sentido dos movimentos verticais dos poluentes na atmosfera (SEINFELD; PANDIS, 2006). Considere uma parcela ascendente de ar seco, a qual é representada por uma bolha de ar (FIGURA 14).

A bolha ao ascender, encontra níveis cuja pressão atmosférica é menor, ocasionando o aumento de seu volume, desde que partindo do pressuposto que essa bolha esteja termicamente isolada da vizinhança. Não havendo troca de calor entre a fronteira do sistema, a bolha de ar e sua vizinhança podem estar

em temperaturas diferentes na mesma pressão (BARRY; CHORLEY, 2013). Esse processo é conhecido como resfriamento por expansão adiabática, pois a temperatura do ar da bolha decresceu sem trocar calor com a vizinhança. Ao contrário, quando o ar desce, aquece-se por compressão adiabática (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). A variação da temperatura com a altitude para uma parcela de ar seco que se resfria adiabaticamente é utilizada como um perfil padrão para comparação com situações reais (STEINKE, 2012).

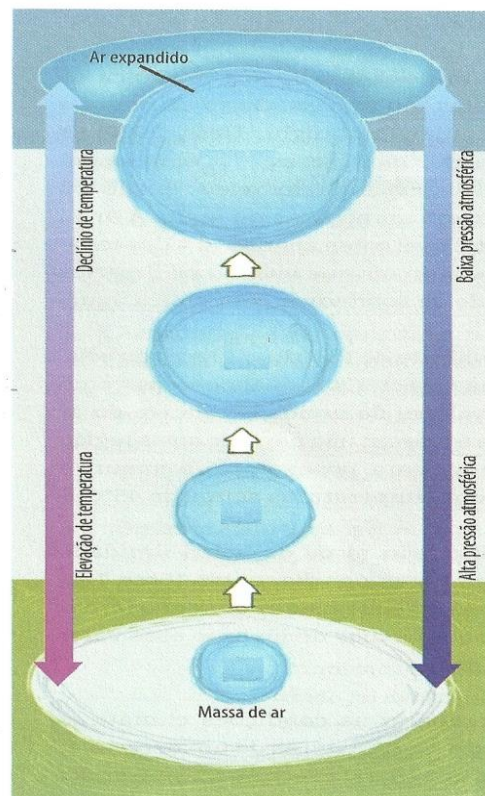
O modelo adiabático considera a atmosfera terrestre como um gás ideal e deriva-se de modo simples com a primeira lei da termodinâmica. Nessas condições, a taxa de variação vertical da temperatura para uma parcela de ar seca que se expande adiabaticamente na atmosfera, denominada de taxa adiabática seca (*Adibatic Lapse Rate*), definida pela Equação 5.

$$T_d = \left(-\frac{dT}{dz} \right)_{adiabática} = -10 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1} \quad (5)$$

À medida que a temperatura de volume do ar em ascensão vai sendo rebaixada adiabaticamente, há a liberação de calor latente para o meio, o que diminuirá taxa de resfriamento do ar para $6 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$, ou seja, o ar passa a se resfriar mais lentamente, o que define o gradiente adiabático úmido ou saturado.

A temperatura do ar na troposfera varia com a altitude a uma taxa média de $6,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ por quilômetro (média mundial). Esse gradiente é denominado de gradiente ambiental ou gradiente térmico vertical. Consiste no decréscimo da temperatura

Figura 14 - Esquema diagramático do processo de resfriamento por expansão adiabática



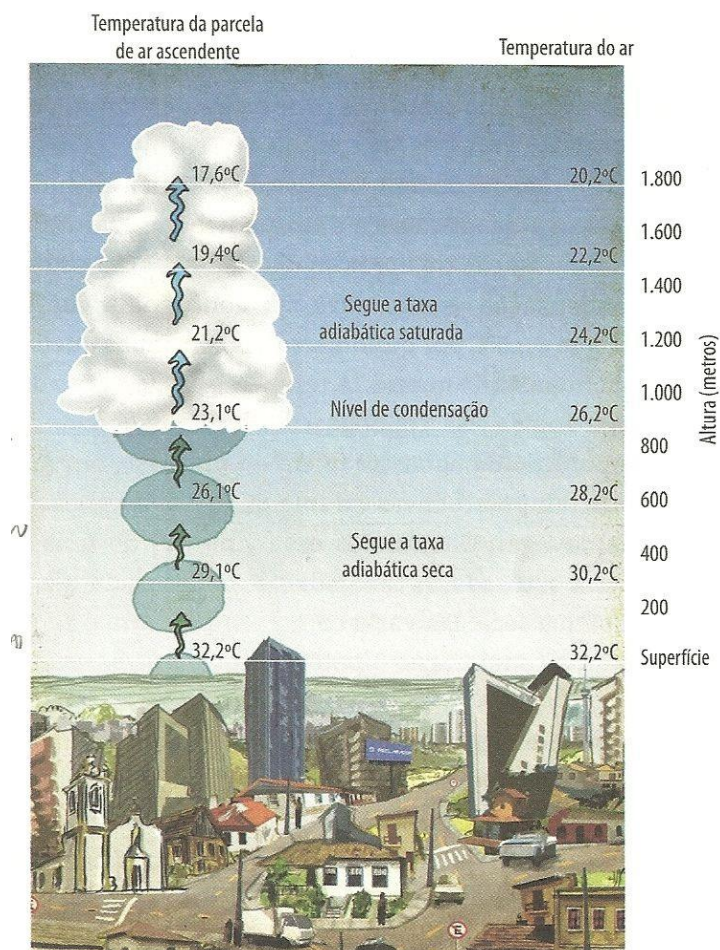
FONTE: Steinke, 2012.

com altitude de uma atmosfera em repouso, ou estável, sendo determinado, normalmente por radiosondagens, podendo ser representada, conforme a equação 6.

$$T_a = \left(-\frac{dT}{dz} \right)_{\text{ambiental}} = 6,5 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1} \quad (6)$$

A FIGURA 15 apresenta uma comparação hipotética entre os três gradientes

FIGURA 15 - Esquema diagramático dos gradientes de temperatura



FONTE: Steinke, 2012.

No lado direito da ilustração encontra-se a diminuição normal da temperatura do ar com a altitude dentro da troposfera, o gradiente ambiental, que é de 6,5 °C.km⁻¹. No lado esquerdo, o ar ascendente resfria-se, primeiro a uma taxa de

10 °C.km⁻¹, o que representa a taxa adiabática seca. Acima do nível de condensação, o ar continua a subir e se resfriar, mas a taxa de resfriamento é reduzida a um valor inferior a 6°C.km⁻¹, o que corresponde à taxa adiabática saturada (STEINKE, 2012).

2.5.6 Estabilidade atmosférica

De acordo com Velloso; Cataldi; Guerrero (2002), a capacidade de a atmosfera dispersar os poluentes emitidos no ar depende do grau de sua estabilidade. O conceito de estabilidade está ligado ao grau de equilíbrio de uma parcela de ar durante sua trajetória na vertical, que tende a se elevar ou desce no meio ar. A comparação do gradiente adiabático seco (T_d) com o gradiente vertical térmico, ou ambiental (T) indica a tendência da estabilidade atmosférica por meio da seguinte relação:

- a) $T = T_d$: a parcela de ar terá as mesmas pressão, temperatura e a densidade do ar que existe na sua vizinhança e a massa de ar deslocada não tenderá a voltar à sua posição original ou a continuar o seu deslocamento, implicando na inexistência da massa de ar ganhar ou perder flutuação. Nessa condição, a atmosfera é denominada de *Neutra*.
- b) $T > T_d$: uma parcela de ascendente, resfriada a uma taxa menor do que a do ar do ambiente circundante, será mais quente e menos densa. Como resultado, torna-se mais flutuante e tende a continuar subindo, a partir de sua posição original. Nessas condições, tem-se um gradiente vertical da temperatura denominado *superadiabático*. A atmosfera será considerada instável.

A instabilidade da atmosfera é desejada do ponto de vista da prevenção da poluição do ar, pois favorece a dispersão dos poluentes atmosféricos, uma vez que favorece as correntes de convecção e a turbulência térmica, consequentemente, a mistura e ao transporte dos poluentes na atmosfera.

- c) $T < T_d$: uma parcela de ar torna-se mais fria e mais densa do que o ar do ambiente circundante e tenderá a descer até sua posição original. Nesse caso, tem-se um gradiente vertical da temperatura denominado *subadiabático*. A atmosfera, nesse caso é denominada estável. Nessas condições, há pouca mistura vertical e os poluentes dispersam muito lentamente na atmosfera.

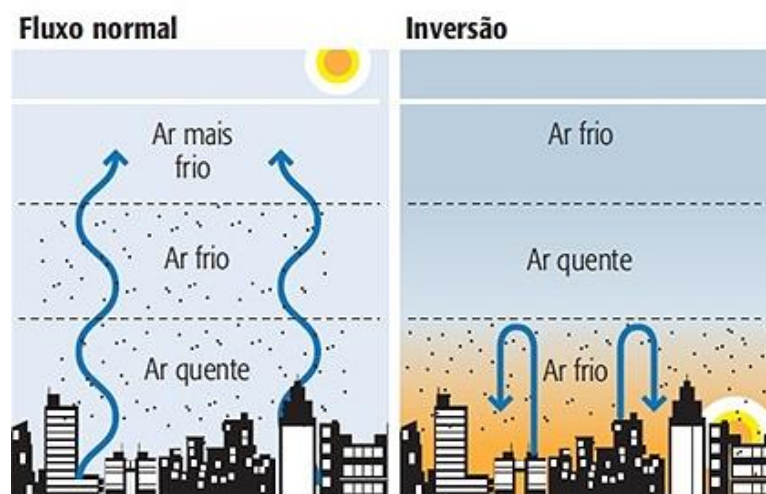
Um raciocínio semelhante pode ser aplicado para o caso da atmosfera saturada, onde T_s representa o gradiente adiabático úmido ou saturado:

$T = T_s$, atmosfera neutra

$T > T_s$, atmosfera instável

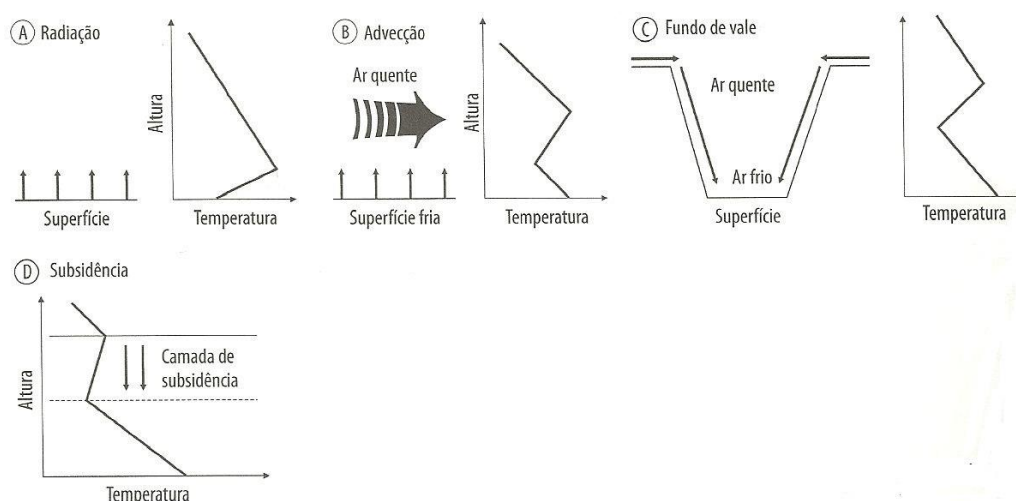
$T < T_d$, atmosfera estável

O caso extremo de atmosfera estável, chamado de inversão, ocorre quando a temperatura aumenta com altitude. Uma inversão térmica ocorre sempre que, em vez do decréscimo da temperatura com a superfície, verifica-se um aumento da temperatura com a distância do solo. Uma das características das inversões de temperatura é que elas dificultam a mistura vertical do ar, uma vez que o ar frio, mais denso, encontra-se abaixo do ar quente, menos denso. Portanto, são prejudiciais quando ocorrem em áreas urbanas industriais, porque tendem a dificultar a dispersão de poluentes gerados pelas atividades que nelas se desenvolvam (FIGURA 16) (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

FIGURA 16 - Esquema diagramático de uma inversão térmica

FONTE: TODAMATERIA, 2017.

De acordo com Mendonça e Danni-Oliveira (2007), as inversões podem de altitude, quando ocorrem em níveis mais afastados do solo, ou de superfície, quando são produzidas próximas ao solo. Os tipos de inversão estão relacionados às situações que as originam, conforme mostra a FIGURA 17.

FIGURA 17 - Tipos de inversões de temperaturas

FONTE: Mendonça e Danni-Oliveira, 2007.

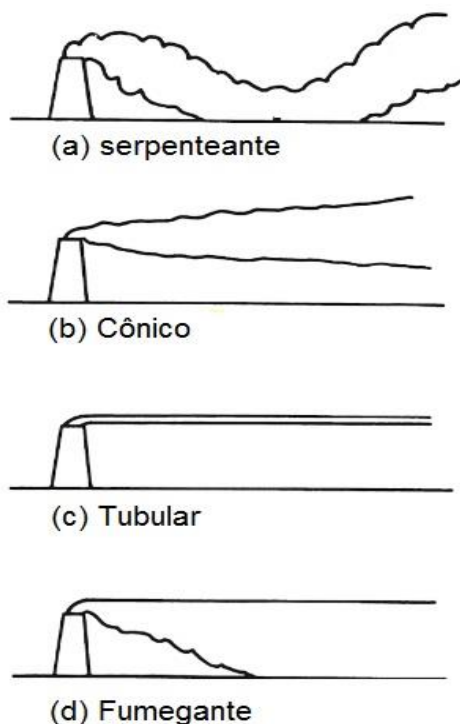
- a) Inversão de superfície por radiação: caracteriza-se pela perda de calor da superfície para o espaço exterior, principalmente durante o inverno, em noites de ventos fracos e sem presença de nuvens. Como resultado há o

rápido resfriamento radiativo da superfície terrestre. A superfície perde energia por emissão de radiação infravermelha, resfriando o ar próximo à superfície, enquanto o ar acima mantém-se mais aquecido (FIGURA 2.17 A) . Neste processo, o ar adjacente se resfria adquire estabilidade. Caso a superfície contenha umidade suficiente por haver nevoeiro de radiação (STEINKE, 2012).

- b) Inversão de superfície por advecção (movimento horizontal): ocorre em noites claras de inverno quando, há a advecção do ar quente sobre uma superfície fria que, por contato, passa a resfriá-lo pela base (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007), originando um nevoeiro de advecção (FIGURA 2.17 B) (STEINKE, 2012).
- c) Inversão de fundo de vale: ocorre por drenagem do ar frio do topo de morros e montanhas que, por ser mais denso, escoam pelas vertentes em direção aos fundos de vales, mantendo-se abaixo do ar quente (FIGURA 2.17 C) (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). As cidades que estão localizadas em fundos de vales podem ser afetadas pela inversão de fundo de vales (STEINKE, 2012).
- d) Inversão de subsidência: ocorre quando em níveis mais elevados da troposfera, produzindo um movimento descendente do ar em larga escala chamado de subsidência (FIGURA 2.17 D) (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). O ar subsidente aquece-se ao sofrer compressão adiabática e, em uma dada altura, sua temperatura torna-se superior à do ar subjacente, formando uma camada estratificada em que a temperatura de sua base é inferior à de seu topo. A inversão de subsidência está presente sobre os oceanos subtropicais e é conhecida por “inversão dos alísios”. Uma característica da inversão dos alísios é a baixa umidade relativa no topo da inversão, inferior a 20%, quando comparada com a da base, que pode ser superior a 90%. Desta forma, as nuvens não se formarão por causa da baixa umidade relativa do ar acima da inversão térmica.

A FIGURA 18 ilustra o comportamento da pluma para as diferentes condições de estabilidade atmosférica. Uma pluma mostra o movimento horizontal e espacial dos poluentes no ambiente. De acordo com Weiner e Matthews (2003), tem-se os seguintes comportamento para uma pluma.

FIGURA 18 – Tipos de pluma



FONTE: Weiner e Mattheus, 2003.

Na FIGURA 18a tem-se o tipo da pluma denominada de serpenteante. Nesse tipo de pluma há forte turbulência térmica, sendo a atmosfera instável. Ocorre em dias ensolarados com ventos fracos. A pluma do tipo serpenteante é caracterizada por rápida dispersão e diluição dos poluentes na atmosfera. Contudo, pode resultar, de forma intermitente, em altas concentrações de poluentes, próximo a chaminé, devido a uma pluma mal diluída.

Na FIGURA 18b tem-se o tipo da pluma denominada de cônica. A pluma é dispersa equitativamente nos planos horizontal e vertical. Têm-se condições atmosféricas semelhantes a da pluma serpenteante, entretanto, sendo aquelas mais moderadas. Ocorre em dias ensolarados, nublados e com ventos de intensidade média. Essa pluma é mais visível ao cair da tarde quando a

atmosfera é quase neutra.

Na FIGURA 18c tem-se o tipo da pluma denominada de tubular. Esse tipo de pluma é caracterizado pela quase ausência de espalhamento vertical, portanto, os poluentes são transportados à longa distância sem muita diluição. Ocorre durante condições de grande estabilidade atmosférica (inversão térmica), predominantemente durante à noite.

Na FIGURA 18d tem-se o tipo da pluma denominada de Fumegante. Nesse caso, a pluma encontra uma camada instável abaixo da altura a chaminé e uma camada estável acima dela. Portanto, haverá uma maior dispersão descendente e a pluma alcançar o solo rapidamente. Tais condições são geralmente encontradas pela manhã.

Os critérios de estabilidade atmosférica também podem ser definidos pela temperatura potencial e pelo comprimento de Monin-Obukhov (SEINFELD; PANDIS, 2006), definidos como:

Temperatura potencial (θ): É definida como a temperatura que uma parcela de ar seco a uma pressão p e a temperatura T teria se fosse expandida ou comprimida adiabaticamente para uma pressão padrão p_0 , normalmente como sendo 100 kPa, sendo dada pela Equação 2.7.

$$\theta = T(p_0/p)^{R/C_p} \quad (7)$$

No qual os critérios de estabilidade são definidos pelo gradiente da temperatura potencial ($d\theta/dz$)

$$d\theta/dz > 0 \text{ estável} \quad (8)$$

$$d\theta/dz = 0 \text{ neutra} \quad (9)$$

$$d\theta/dz < 0 \text{ instável} \quad (10)$$

Comprimento de Monin-Obukhov: uma outra análise alternativa às condições de estabilidade é desenvolvida pelo comprimento de Monin-Obukhov utilizando a expressão definida na Equação 11.

$$L = -\frac{\rho c_p T u_*^3}{\kappa g H} \quad (11)$$

Em que L é o comprimento de Monin-Obukhov, que é utilizado como um parâmetro de estabilidade e é definido a partir da densidade do ar (ρ), o calor específico a pressão constante (c_p), Temperatura do ar numa altura de referencia (T), a velocidade de fricção (u_*), a constante de Von Karman ($k=0,4$), a constante da gravidade (g) e o calor sensível (H), em que foi convencionado os seguintes:

$L > 0$ estável

$1/L < 0$ instável

$L = 0$ neutras

2.6 MODELO MATEMÁTICO PARA A DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Os poluentes atmosféricos são misturados pelo movimento advectivo e pela turbulência gerada por grandes turbilhões de diversos tamanhos. Devido ao movimento dos turbilhões, os poluentes são espalhados em todas as direções. A Equação 12 da Difusão-Advecção é usada para descrever a dispersão dos poluentes na baixa atmosfera (YOSHIMURA; NISHINO, 1983).

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) + \bar{S} \quad (12)$$

A barra superior indica que as variáveis na Equação 2.12 são valores médio no tempo, em que:

$\bar{c}$: concentração média do poluente;

$\bar{u}$, $\bar{v}$, $\bar{w}$: velocidades médias do vento nas direções x, y e z, respectivamente;

K_x , K_y e K_z : coeficientes de difusão turbulenta nas direções x, y e z, respectivamente;

s: termo fonte/sumidouro.

Cabe ressaltar que, a concentração dos poluentes na atmosfera depende das características das fontes emissoras, das variáveis meteorológicas que definem a intensidade da dispersão atmosférica e dos parâmetros de remoção e transformação (SOARES, 2010). Para um sistema de coordenadas cartesianas na qual a direção de x coincide com a direção do vento médio ($w = 0$, $v = 0$), não havendo geração/extinção de determinada espécie na atmosfera ($S=0$) e considerando regime estacionário, a Equação 13, torna-se:

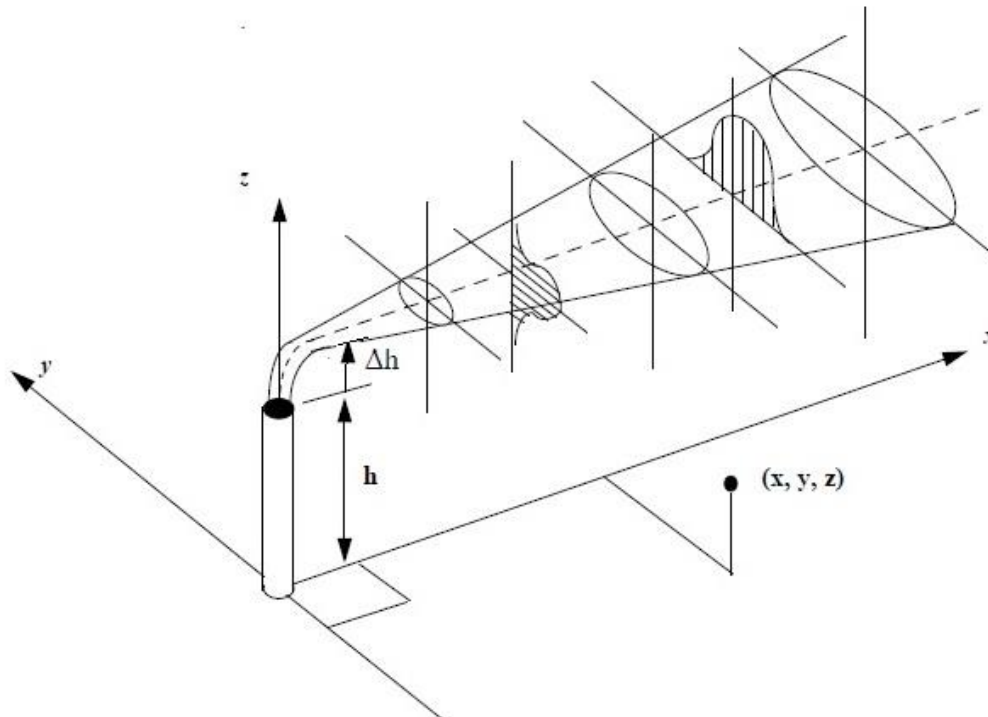
$$\bar{u}(z) \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) \quad (13)$$

O lado esquerdo de Equação 13 representa o transporte do poluente por advecção, enquanto que o primeiro termo lado direito descreve o fluxo turbulento da concentração do poluente nas direções x, y, z . Entre as soluções numéricas para Equação 13, tem-se: a) método de diferenças finitas, b) método de volumes finitos e c) método de elementos finitos. Sob uma série hipóteses simplificadoras, encontra-se a solução analítica da Equação 13, como é o caso do modelo gaussiano para a dispersão de plumas descrito a seguir.

2.6.1 Modelo de pluma Gaussiana clássica

Para situações idealizadas a concentração média de poluentes emitidos na atmosfera a partir de uma fonte pontual contínua, operando em regime permanente, apresenta uma distribuição Gaussiana. Nessa teoria, a coordenada cartesiana x coincide com a direção de propagação do vento predominante e a pluma sofre dispersão nos planos horizontal (y) e no vertical (z) tomando a forma de uma curva de Gauss (GOMES, 2010). O ponto de origem está centrado em um sistema de coordenadas cartesianas, conforme é mostrado na FIGURA 19.

FIGURA 19 - Esquema para a distribuição dos poluentes em corrente de propagação dos ventos



FONTE: Adaptada de GOMES, 2010.

A hipótese da elevação da pluma em estado estacionário do tipo gaussiana, são válidas as seguintes hipóteses (GOMES, 2010):

- O poluente é emitido continuamente, sendo sua taxa (Q) independente do tempo.
- Os coeficientes de dispersão são constantes ao longo das direções horizontal e vertical.
- A dispersão ocorre em terreno plano, sem obstáculos à jusante da fonte;
- A velocidade e a direção do vento são constantes durante o período de tempo considerado, sendo os poluentes transportados na direção predominante dos ventos e em condições homogêneas e estacionárias de turbulência atmosférica;
- Para qualquer distância a concentração máxima do poluente sempre ocorre no centro da pluma;

- Durante o transporte do poluente, da fonte ao receptor, a massa emitida pela fonte permanece na atmosfera;
- Os poluentes são aerossóis ou gases não-reativos e permanecem no ar seguindo o movimento turbilhonar da atmosfera.
- Não ocorre deposição seca ou úmida dos poluentes na atmosfera ou remoção desses para o topo da camada limite planetária;
- A equação gaussiana traduz situações atmosféricas estacionárias, isto é, a emissão dos poluentes é constante assim como todos os parâmetros meteorológicos.
- As hipóteses apresentadas são razoáveis para cálculo de concentração sobre períodos de dez minutos a uma hora.

Tomando como base, as hipóteses do modelo gaussiano para a dispersão da pluma, considerando desprezível a difusão turbulenta na direção do vento, a Equação 14 foi simplificada, reduzindo se a:

$$C(x, y, z) = \frac{Q_s}{2\pi x (K_y K_z)^{1/2}} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{4K_y(x/u)}\right) \cdot \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{4K_z(x/u)}\right) \quad (14)$$

Em que,

$C(x,y,z)$ = concentração do poluente em qualquer ponto de coordenadas (x, y, z) , g.m^{-3} ;

Q_s = é a quantidade do poluente lançada pela fonte, g.s^{-1} ;

x = distância a sotavento da fonte, m

y = distância horizontal do eixo central da pluma, m

z = distância acima do solo

u = velocidade média do vento, m.s^{-1}

K_y = coeficiente de difusão turbulenta na direção de y

K_z = coeficiente de difusão turbulenta na direção de z ;

h : altura da chaminé, m;

Δh = altura de elevação da pluma, m;

H = altura efetiva de lançamento do poluente, m;

$H = h + \Delta h$

Para calcular a concentração no nível do solo, $z=0$, a Equação 15, torna-se:

$$C(x, y, 0, H) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right) \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right) \quad (15)$$

A Equação 15 leva a concentração média de um poluente, na direção de propagação dos ventos a partir da chaminé, que tem uma altura efetiva H. Os σ_y e σ_z respectivamente, são função das distâncias da fonte e estabilidade atmosférica.

2.6.2 Modelo AERMOD

A dispersão de poluentes é completamente governada pelos parâmetros meteorológicos locais e, portanto, esta informação é fundamental para a modelagem de dispersão. A mistura vertical de poluentes atmosféricos depende da profundidade da estratificação camada limite planetária, que por sua vez, é governada pelo fluxo de calor sensível, movimentos verticais, advecção horizontal e entrada da pluma no topo da camada limite. Desta forma, modelos da qualidade do ar que incorporam parametrização da camada limite planetária, turbulência, dispersão na camada limite convectiva e interações do terreno com a pluma são os mais adequados para a estimativa de dispersão espacial dos poluentes (KESARKAR, 2007).

Neste contexto, o modelo AERMOD, um modelo estacionário de dispersão de pluma gaussiana, desenvolvido a partir de um projeto de um projeto de cooperação científica entre a Sociedade de Meteorologia dos Estados Unidos (*American Meteorological Society*, AMS) e a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency*, USEPA), constitui em um dos modelos mais utilizados pelas agências ambientais, no mundo, uma vez que o AERMOD incorpora melhorias para caracterização de parâmetros da camada limite planetária e perfis verticais da atmosfera,

representação da flutuabilidade da pluma, camada limite estável. Além disso, pode ser aplicado tanto em áreas rurais como urbana. O AERMOD é usado em aplicações regulatórias, nas situações onde a análise de dispersão de poluentes está concentrada nas proximidades das fontes de emissão, ou seja, onde os receptores estão localizados num raio de até de 50 km das fontes de emissão (PAINE *et al.*, 2016).

2.6.2.1 Descrição geral do sistema de modelagem AERMOD

A *American Meteorological Society*/USEPA desenvolveu o sistema de modelagem AERMOD constituído de um programa principal AERMOD, um processador de dados meteorológicos denominado AERMET e um pré-processador de terreno conhecido como AERMAP. Nesta seção, será realizada uma breve descrição deste sistema devido à complexidade que envolve a formulação do sistema.

O AERMOD é um modelo estacionário de dispersão de pluma gaussiana, cuja formulação é baseada nos princípios teóricos da camada limite planetária. Considerado estacionário, na medida que assume as concentrações, em todas as distâncias, durante cada hora modelada, sendo governadas pelas condições meteorológicas médias. Mais detalhes da formulação matemática e as características técnicas deste modelo são descritas por CIMORELLI *et al.*, (2004). A concentração dos poluentes atmosféricos na camada limite estável é dada pela Equação 16. A dispersão da pluma nos planos horizontal e vertical, é gaussiana, sendo similar a muitos modelos de pluma em estado estacionário.

$$C_s(x_r, y_r, z_r) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \tilde{u} \sigma_{zs}} \cdot F_y \cdot \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[\exp\left(\frac{-(z-h_{es}-2mZ_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z+h_{es}+2mZ_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2}\right) \right] \quad (16)$$

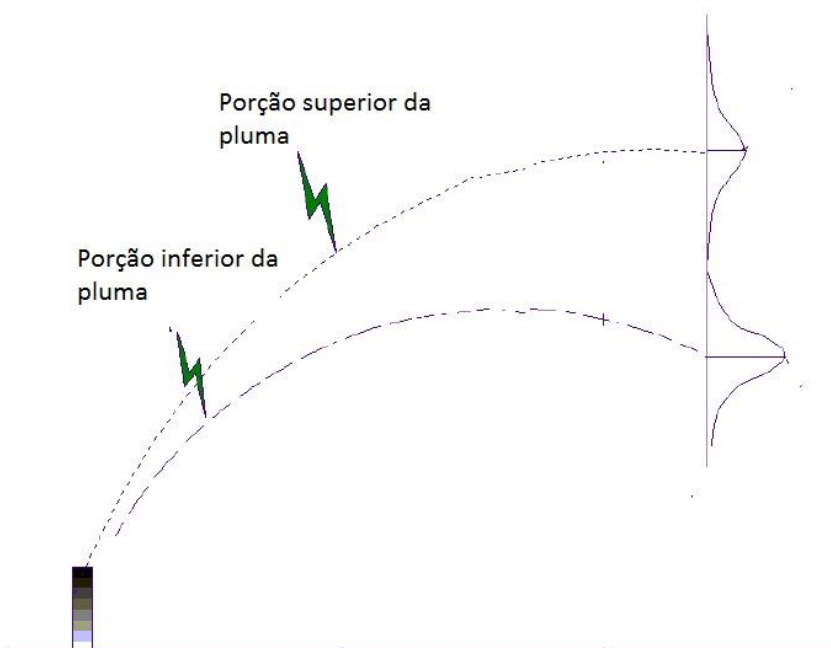
Em que,

- $C_s(x_r, y_r, z_r)$ = concentração do poluente na camada limite estável, g.m⁻³ ;
- (x_r, y_r, z_r) = localização do receptor nas coordenadas x, y e z;
- Q = quantidade do poluente lançada pela fonte, g.s⁻¹;

$\tilde{u}$	= velocidade efetiva do vento, m.s ⁻¹ ;
σ_{zs}	= coeficiente de dispersão total na camada limite estável, m;
F_y	= função de distribuição da pluma, m ⁻¹ ;
h_{es}	= altura efetiva de lançamento do poluente, m;
Z_{ieff}	= altura da camada limite estável acima da camada limite convectiva, m;
Z	= altura do receptor, m.

Na camada limite convectiva, a distribuição da pluma é gaussiana no plano horizontal, sendo similar a muitos modelos de pluma em estado estacionário. Mas, na vertical a pluma é bi-gaussiana, pois representa a pluma considerando a mesma sendo transportada em porções definidas, uma porção superior e uma porção inferior como mostrado na FIGURA 20.

FIGURA 20 – Porção superior e inferior da pluma

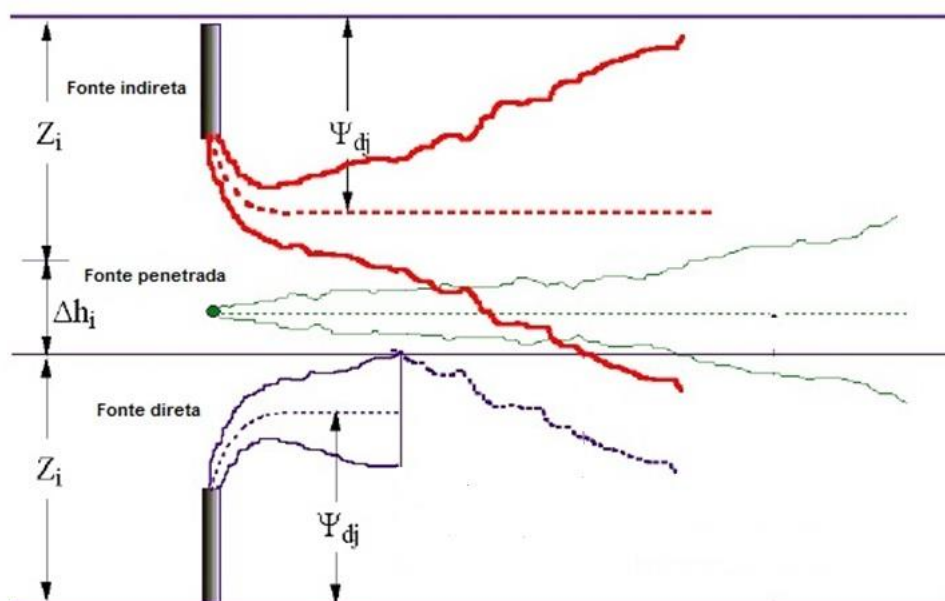


FONTE: Adaptada pelo autor de Cimorelli *et al.*, (2004).

A distribuição da pluma na vertical foi modificada para levar em consideração a turbulência térmica, gerada pelo aquecimento e resfriamento de correntes de ar ascendentes e descendentes. Desta forma, o AERMOD calcula a distribuição a

concentração dos poluentes na camada limite convectiva, tratando esses efeitos, por meio da representação de dois tipos de plumas, a saber: “pluma direta”, “pluma indireta” e “pluma penetrada”, conforme esquema da FIGURA 21.

FIGURA 21 - Representação da pluma direta, pluma indireta e penetrada



FONTE: Adaptada pelo autor de Cimorelli *et al.* (2004).

A concentração do poluente a partir da “pluma direta” é dada pela Equação 17.

$$C_d(x_r, y_r, z_r) = \frac{Q f_P}{\sqrt{2\pi} u} \cdot F_y \cdot \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda_j}{\sigma_{zj}} \left[\exp\left(\frac{-(z - \Psi_{dj} - 2mZ_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z + \Psi_{dj} + 2mZ_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) \right] \quad (17)$$

Em que,

$C_d(x_r, y_r, z_r)$ = concentração do poluente devido a contribuição da “pluma direta”,
g.m⁻³

(x_r, y_r, z_r) = localização do receptor nas coordenadas x, y e z;

Q = quantidade do poluente lançada pela fonte, g.s⁻¹;

f_p	= fração da massa da pluma contida na camada limite convectiva ($f_p=1$) se ocorre a penetração total da pluma
$\tilde{u}$	= velocidade efetiva do vento, m.s ⁻¹ ;
λ_j	= coeficiente de distribuição da pluma com $j=1$ devido as correntes de ar ascendentes e $j=2$ devido as correntes de ar descendentes.
Ψ_{dj}	= altura entre a base da fonte e a linha central da pluma, m;
σ_{zj}	= coeficiente de dispersão total, m;
Z_i	= altura de mistura, m;
F_y	= função de distribuição da pluma, m ⁻¹ ;
h_{es}	= altura efetiva de lançamento do poluente, m;
Z_{ieff}	= altura da camada de limite estável acima da camada limite convectiva, m;
z	= altura do receptor, m.

A concentração do poluente a partir da “pluma indireta” é dada pela Equação 18.

$$C_i(x_r, y_r, z_r) = \frac{Q f_p}{\sqrt{2\pi} \tilde{u}} \cdot F_y \cdot \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda_j}{\sigma_{zj}} \left[\exp\left(\frac{-(z + \Psi_{rj} - 2mZ_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z - \Psi_{rj} + 2mZ_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) \right] \quad (18)$$

Em que,

$C_i(x_r, y_r, z_r)$	= concentração do poluente devido a contribuição da “pluma indireta”, g.m ⁻³
(x_r, y_r, z_r)	= localização do receptor nas coordenadas x, y e z;
Q	= quantidade do poluente lançada pela fonte, g.s ⁻¹ ;
f_p	= fração da massa da pluma contida na camada limite convectiva ($f_p=1$) se ocorre a penetração total da pluma;
$\tilde{u}$	= velocidade efetiva do vento, m.s ⁻¹ ;

λ_j	= coeficiente de distribuição da pluma com $j=1$ devido as correntes de ar ascendentes e $j=2$ devido as correntes de ar descendentes;
Ψ_{ij}	= altura entre a base da fonte e a linha central da pluma indireta, m; ($\Psi_{ij} = \Psi_{dj} - \Delta h_i$, em que Δh_i representa a parcela da pluma que elevar-se a partir da fonte indireta, m;
σ_{zj}	= coeficiente de dispersão total, m;
Z_i	= altura de mistura, m;
F_y	= função de distribuição da pluma, m^{-1} ;
h_{es}	= altura efetiva de lançamento do poluente, m ;
Z_{ieff}	= altura da camada de limite estável acima da camada limite convectiva, m;
z	= altura do receptor, m.

A concentração do poluente a partir da “pluma penetrada” é dada pela Equação 19

$$C_p(x_r, y_r, z_r) = \frac{Q(1-f_p)}{\sqrt{2\pi} \tilde{u} \sigma_{zp}} \cdot F_y \cdot \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[\exp\left(\frac{-(z-h_{ep}+2mZ_{ieff})^2}{2\sigma_{zp}^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z+h_{ep}+2mZ_{ieff})^2}{2\sigma_{zp}^2}\right) \right] \quad (19)$$

Em que,

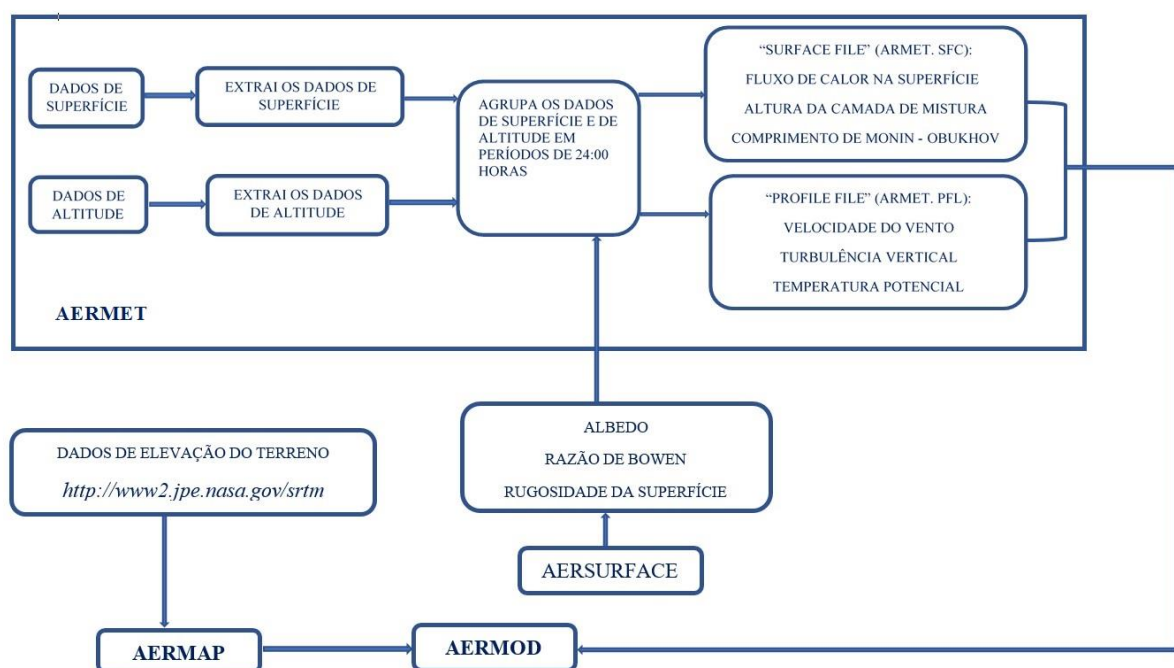
$C_p(x_r, y_r, z_r)$	= concentração do poluente devido a contribuição da “pluma penetrada”, $g.m^{-3}$
Q	= quantidade do poluente lançada pela fonte, $g.s^{-1}$;
f_p	= fração da massa da pluma contida na camada limite convectiva ($f_p = 1$) se ocorre a penetração total da pluma
$\tilde{u}$	= velocidade efetiva do vento, $m.s^{-1}$;
σ_{zp}	= coeficiente de dispersão total para a “pluma penetrada”, m;
Z_i	= altura de mistura, m;
F_y	= função de distribuição da pluma, m^{-1} ;
h_{ep}	= altura da “pluma penetrada” acima da base da chaminé, m;

Z_{ieff} = altura da camada de limite estável acima da camada limite convectiva, m;

z = altura do receptor, m.

O pré-processador de dados meteorológicos AERMET prepara os dados de superfície e de altitudes (*Air Upper*), enquanto o AERMAP, determina as elevações do terreno, no domínio de interesse da modelagem, assim como altura e a localização do terreno que tem maior influência na dispersão em cada ponto receptor. Posteriormente, após esses dados serem processados, os mesmos são enviados ao AERMOD (FIGURA 22).

FIGURA 22 - Sequência geral do sistema de modelagem AERMOD



FONTE: Adaptada pelo autor de Cimorelli *et al.* (2004).

Na primeira etapa, o AERMET extrai os dados horários de superfície e de altitude (*Upper Air*) e depois os processa, fazendo uso de controle da qualidade desses dados. As observações horárias de dados meteorológicos de superfície e de altitude requeridos pelo AERMET, são no mínimo os seguintes:

Dados de superfície:

- a) velocidade do vento;
- b) direção do vento;
- c) temperatura;
- d) cobertura de nuvens.

Dados de altitude:

- a) velocidade do vento;
- b) direção do vento;
- c) umidade relativa do ar
- d) temperatura

Na segunda etapa, o AERMET agrupa os dados meteorológicos disponíveis (superfície e *Upper Air*) em períodos de 24 horas e os armazena em um único arquivo. Na terceira etapa, o programa AERMET faz a leitura dos arquivos de dados meteorológicos, provenientes da segunda etapa, e os processa, conjuntamente com os dados de características de superfície da região de interesse, a saber: albedo, rugosidade da superfície e razão de Bowen, a fim de calcular os parâmetros da camada limite planetária, tais como:

- a) Fluxo de calor sensível (H);
- b) Comprimento de Monin-Obukhov (L);
- c) Altura da camada de mistura (Zi);

O albedo, a rugosidade da superfície e a razão de Bowen são calculados e enviados ao AERMET por meio do AERSURFACE, que é um programa auxiliar do próprio AERMET. Finalmente, o AERMET gera dois arquivos de saída, que servirão de entrada no modelo AERMOD: AERMET.SFC e o AERMET.PFL

AERMET.SFC: arquivo de extensão SFC que contém um registro por hora, com todos os parâmetros da camada limite planetária, tais como: fluxo de calor sensível, comprimento de Monin-Obukhov e altura da camada de mistura.

AERMET.PFL: arquivo de extensão PFL que contém um ou mais níveis (perfis) verticais da velocidade do vento, turbulência vertical, temperatura potencial.

O AERMAP processa os dados do terreno de interesse utilizando um arquivo de terreno no formato digital denominado *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM, que está disponível gratuitamente na página eletrônica da *United States Geological Survey* (USGS) (http://www.webgis.com/terr_us75m.html ou <http://www.usgs.gov>) A Missão SRTM é um projeto conjunto entre a *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) e a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). A finalidade desse projeto foi produzir dados topográficos digitais para 80% da superfície da terra (todas as áreas de terra entre as latitudes 60° norte e 56° Sul). O produto é georreferenciado ao *datum* WGS84 em coordenadas geográficas decimais. A resolução espacial do SRTM para o hemisfério sul é de 90 metros.

2.6.3 Pesquisas desenvolvidas utilizando o modelo AERMOD

Barbon e Gomes (2010), utilizaram o modelo AERMOD na modelagem de dispersão das emissões atmosféricas produzidas pelas principais industriais do distrito industrial do município de Araucária do Paraná, tendo como foco de interesse a qualidade do ar na região central do referido município. O modelo foi utilizado para simular as concentrações de NO_x, SO_x, CO e materiais particulados. O trabalho foi desenvolvido principalmente com vistas a permitir uma futura avaliação do impacto do programa de modernização da Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) sobre a qualidade do ar na região central do município de Araucaria.

A avaliação inicial do modelo AERMOD mostrou, segundo Barbon e Gomes (2010), que as concentrações observadas dos poluentes NO_x e SO_x foram razoavelmente bem representadas. Verificou-se uma tendência de obtenção de valores simulados significativamente superiores aos observados para o poluente CO e significativamente inferiores para o poluente material particulado. As diferenças obtidas entre os valores simulados e observados tiveram como causa principal a não-representação das emissões das fontes externas, ou seja, das

emissões das chaminés de outras indústrias localizadas fora da planta da REPAR, na avaliação inicial do modelo. As chaminés localizadas dentro da planta da REPAR são chamadas de fontes internas.

Posteriormente, ao considerarem as fontes externas na modelagem foram obtidos valores de concentração dos poluentes simulados significativamente inferiores aos observados. Os autores justificaram esse fato por considerar as emissões de todas as fontes como uma única fonte interna equivalente, não considerando, por exemplo, os dados de altura e diâmetro das chaminés, localização espacial das fontes externas devido a dificuldade de obtenção junto às demais indústrias localizadas município de Araucária. Para uma avaliação mais criteriosa do trabalho esses dados seriam fundamentais.

Um dos estudos desenvolvidos por Silva e Arcos (2011) na cidade de Constitución - Chile, foi estimar a concentração média de MP_{10} no período de 24h utilizando o modelo AERMOD. O trabalho compreendeu o período de inverno para o ano de 2009. Foram avaliadas 25 fontes compostas por equipamentos de calefação à lenha na zona urbana habitada. De acordo com os autores, as taxas de emissão de MP_{10} não excederam o limite de $150 \mu g.m^{-3}$, valor estabelecido pelo Decreto 58/59 de 1998 do Ministério da Secretaria Geral da Presidência de Santiago do Chile. Contudo, os autores sugeriram que seja realizado o monitoramento da qualidade do ar para calibrar e validar o modelo usado na zona de estudo.

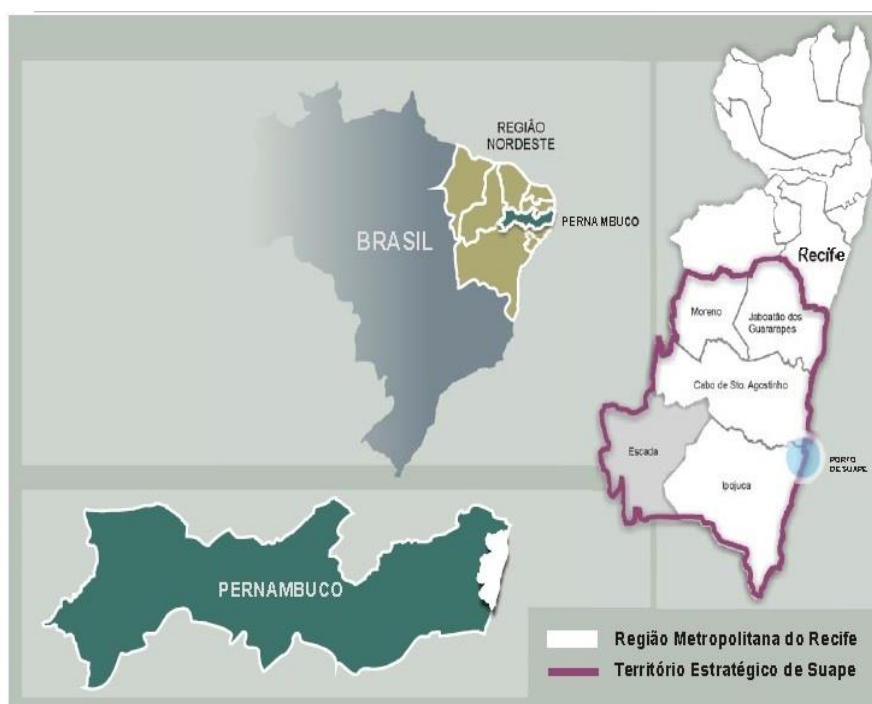
2.7 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Complexo Industrial Portuário Governador Eraldo Gueiros, conhecido como Porto de Suape, é um porto marítimo de uso público, cujo projeto foi baseado na integração porto-indústria, isto é, com uma infraestrutura de apoio a serviços portuários e a instalação de empreendimentos industriais (PLANO METRE DE SUAPE, 2012). O Porto de Suape é administrado pelo Governo de Pernambuco, por meio da empresa SUAPE Complexo Industrial Portuário, criada pela Lei Estadual nº 7.763/1978.

2.7.1 Localização do Complexo Industrial Portuário Governador Eraldo Gueiros

O Complexo Industrial Portuário Governador Eraldo Gueiros está localizado no Estado de Pernambuco, região do Nordeste do Brasil (FIGURA 23), na latitude 08°24' sul e na longitude 34°57' oeste.

FIGURA 23 - Localização do Complexo Industrial Portuário Eraldo Gueiros



FONTE: adaptado pelo autor da AGÊNCIA CONDEPE/FIDEM, 2008.

Pertence a Nucleação Sul da Região Metropolitana do Recife, situando-se entre os municípios do Cabo de Santo Agostinho e de Ipojuca. Possui uma área de 13.500 hectares e faz limite, num raio de 40 km do porto, com os municípios Jaboatão dos Guararapes, Moreno e Escada, municípios integrantes do espaço denominado Território Estratégico de Suape (AGÊNCIA CONDEPE/FIDEM, 2008). Além disso, possui uma infraestrutura capaz de atender às necessidades dos mais diversos tipos de empreendimentos, interessados em exportar seus produtos para outros países ou colocá-los no mercado regional, pois tem uma

localização estratégica em relação às principais rotas marítimas de navegação, mantendo o interligado a mais de 160 portos em todos os continentes (FIGURA 24) facilitando, assim a exportação e importação de mercadorias (SUAPE GLOBAL, 2010).

FIGURA 24 - Localização do Porto de Suape em relação as principais rotas marítimas



FONTE: SUAPE GLOBAL, 2010.

No Complexo Industrial Portuário de Suape existem, atualmente, mais setenta empresas que já se instalaram ou estão em processo de instalação. Pode-se destacar, entre as principais que já operam no Porto de Suape: refinaria de petróleo, indústria petroquímica, termelétricas, estaleiro, geração de energia eólica, cerâmica, granéis líquidos e gases, indústria de alimentos e logística. A crescente movimentação de cargas, vem consolidando-o como um porto concentrador e distribuidor de cargas (*hub port*) para os portos brasileiros. Os produtos derivados de petróleo, produtos químicos, álcoois, óleos vegetais são os mais movimentados.

2.7.2 Zoneamento do Complexo Industrial Portuário Governador Eraldo Gueiros

De acordo com o descrito no documento denominado Novo Plano Diretor Suape (2012), o zoneamento ambiental, industrial e portuário do Complexo Industrial Portuário Governador Eraldo Gueiros, compreende cinco zonas e três setores:

2.7.2.1 Zona de Preservação Ecológica – ZPEC

A Zona de Preservação Ecológica é a área que circunda as zonas produtivas e, desde sua origem, caracteriza-se como área de estoque de compensações ambientais.

2.7.2.2 Zona Central de Serviços – ZCS

A Zona Central de Serviços é uma área destinada a usos e atividades diversificados, tais como serviços bancários, escritórios e estabelecimentos comerciais, serviços de saúde e educacionais, equipamentos hoteleiros. No interior da ZCS insere-se o Setor de Preservação Cultural - SPC.

2.7.2.3 Zona Industrial – ZI

A Zona Industrial são áreas destinadas essencialmente à implantação de empreendimentos de produção industrial.

2.7.2.4 Zona Industrial Portuária– ZIP

A Zona Industrial Portuária abrange as instalações portuárias terrestres, cuja área é delimitada e definida como “Porto Organizado”, conforme Decreto Federal de 25 de maio de 2011, além daquela que abriga empreendimentos industriais de alta dependência e correlação direta com os terminais portuários

2.7.2.5 Zona de Preservação Cultural – ZPC

A Zona de Preservação Cultural são áreas onde registram sítios de interesse arquitetônicos ou arqueológico.

2.7.2.6 Setor de Preservação Cultural – SPC

Os Setores de Preservação Cultural são áreas que registram sítios de interesse arquitetônico ou arqueológico.

2.7.2.7 Setor Especial Ambiental – SEA

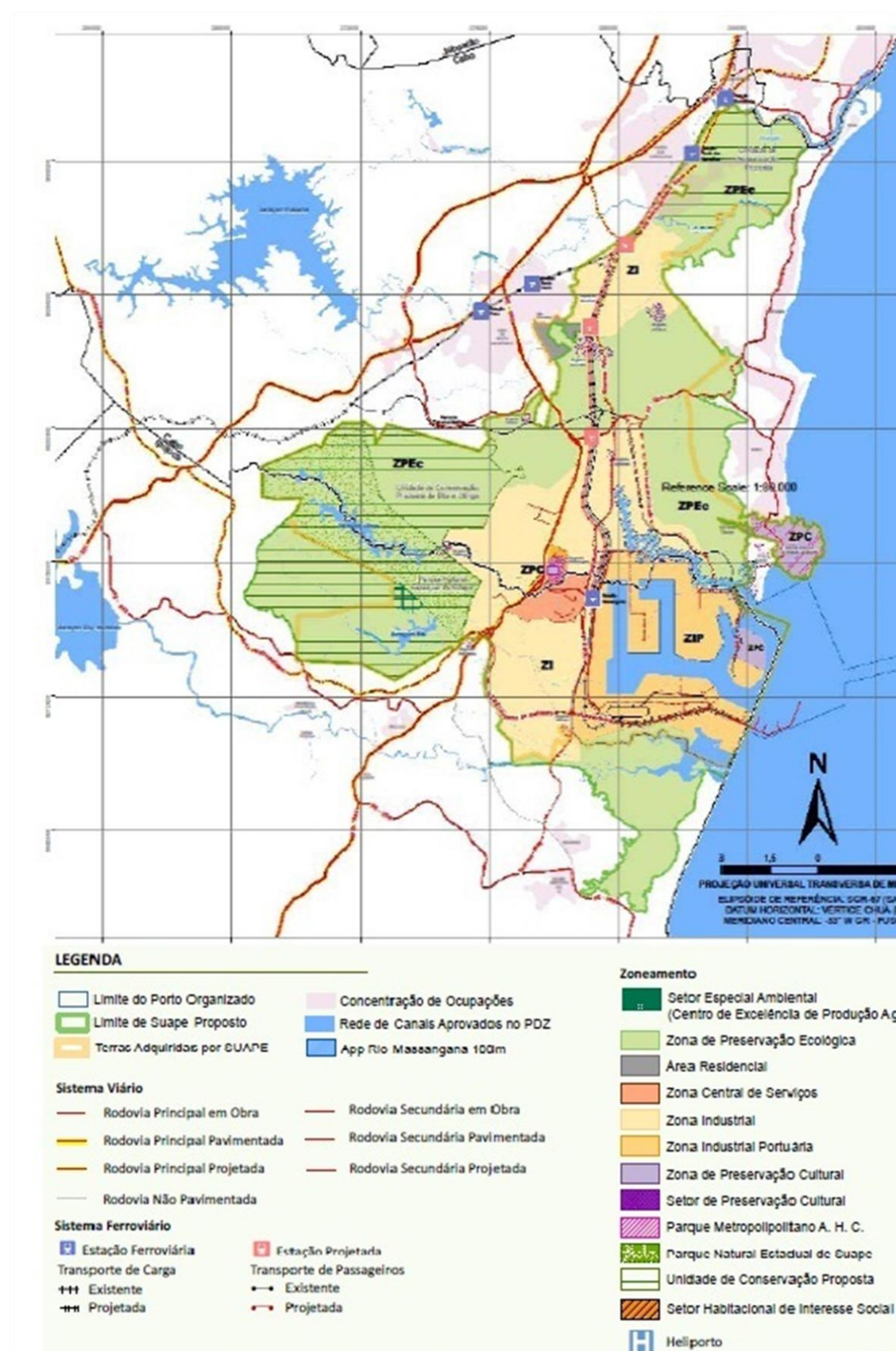
O SEA contempla área especial inserida na ZPEC para qual se prevê a instalação de um Centro de Excelência de Produtos Sustentável.

2.7.2.8 Setor Especial de Habitação de Interesse Social – SEHIS

O SEHIS compreende as áreas de consolidação dos assentamentos habitacionais informais de Massangana e Dois Irmãos que serão objeto de programa de urbanização e regularização fundiária permanecendo inseridos na Zona Central de Serviços – ZCS.

Na FIGURA 25, tem-se a distribuição dessas zonas e setores ao longo da área delimitada pelo Complexo Industrial Portuário Governador Eraldo Gueiros.

Figura 25- Zoneamento do Porto de Suape



FONTE: Novo Plano Diretor Suape 2030, 2012.

2.7.3 Delimitação da área de estudo e das Fontes de emissão

No Brasil a Resolução N° 2650/12 da AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO, instituiu o Índice de Desempenho Ambiental – IDA, como instrumento de acompanhamento e controle de gestão Ambiental em instalações portuárias, do qual o indicador específico “Poluentes atmosféricos (gases e partículas), é utilizado para avaliação do IDA. O complexo Industrial Portuário Governador Eraldo Gueiros, compreende cinco zonas, entre as quais destaca-se a Zona Industrial Portuária (FIGURA 26), localizado no município de Ipojuca, para qual a Resolução ANTAQ nº. 2650/12 é aplicada.

FIGURA 26 – Zona Industrial Portuária – Porto de Suape



FONTE: SUAPE GLOBAL (2010).

As principais fontes de emissão para o desenvolvimento desta pesquisa, compreende as fontes pontuais (chaminés das indústrias) e evaporativas, ou seja, aquelas provenientes de armazenamento de líquidos orgânicos voláteis, pertencentes a terminais e bases de combustíveis.

2.7.3.1 Clima e condições meteorológicas da região de estudo

De acordo com as informações descritas no documento RIMA/RNEST (2006), a climatologia a região de Ipojuca foi caracterizada pelas normais climatológicas de temperatura média do ar, umidade relativa, insolação, pressão atmosférica, nebulosidade e precipitação, variáveis meteorológicas medidas na Estação de Meteorológica de Recife (Curado), pertence ao INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET e registradas durante o período de 01/01/1961 a 31/12/1990. De acordo com o referido documento, a Estação Meteorológica de Recife (Curado), era mais próxima do Porto de Suape que possuía séries mais completas, em termos de dados meteorológicos, além de seguir a padronização da Organização Meteorológica Mundial (OMM), de forma a permitir o diagnóstico do clima. Cabe ressaltar que, as normais climatológicas são valores médios de variáveis meteorológicas calculadas para um período de trinta anos de dados, sendo as mais úteis para o estudo do clima. Portanto, as próximas normais climatológicas estão previstas para o ano de 2020.

A seguir serão apresentadas às avaliações referentes à temperatura média do ar, umidade relativa, insolação, pressão atmosférica ao nível da estação, nebulosidade e precipitação de acordo com as normais climatológicas da Estação Recife/Curado – A301, código OMM - 81958, latitude -8.059280 e longitude -34.959239 com altitude 8 metros.

Os dados históricos na Estação Recife/Curado registraram valores de temperatura do ar típicas das regiões tropicais. A normal climatológica anual foi de 25.5 °C e as temperaturas médias mensais variaram de 23.9°C de julho a agosto e de 26.6 °C de janeiro a fevereiro. Em dias isolados, observou-se que a temperatura do ar atingiu 35.1 °C (21 de março de 1988) e 15 °C (2 de setembro de 1965).

Em relação às horas de brilho de sol, o mês de menor insolação ocorreu em julho com 165 horas e o de maior insolação em novembro. As médias mensais dos dados climatológicos referente à umidade relativa apresentaram valores de 74% em novembro e 86% em junho. De acordo com as normais climatológicas, o período mais chuvoso ocorreu no período de abril a julho e o período mais seco foi de outubro a dezembro. A precipitação máxima em 24 horas (335,8 mm) foi

registrada entre o dia 10 a 11 de agosto de 1970. A nebulosidade média anual alcançou 6,3 décimos do céu. O valor mínimo e máximo de nebulosidade foi de 5,5 décimos e 7,0 décimos correspondentes aos meses de novembro e junho, respectivamente.

De acordo com OLIVEIRA (2017), no estado do Pernambuco a variabilidade interanual das chuvas é influenciada principalmente pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e pelos Vórtices Ciclônicos de Ar Superior, que de acordo com a posição do centro desse sistema, também exercem grande influência na quantidade das chuvas, além dos efeitos locais como a orografia e a cobertura vegetal. Além destes fatores existem diversos elementos climáticos que tendem a prolongar os períodos de secas sobre o Estado. O principal fenômeno que regula o clima do nordeste é a oscilação da Zona de Convergência Intertropical ZCIT, que dependendo da época do ano pode ocorrer longos períodos de seca ou de cheias da região. Esse cenário climático para a dispersão atmosférica de poluentes influencia a região da seguinte forma:

- a) O período chuvoso - atua como um lavador natural da atmosfera removendo todas as substâncias em suspensão na baixa atmosfera;
- b) O período quente e seco - atua no sentido de intensificar o campo do ventos influenciados pelos Alísios, ou seja, ventos que se originam pelo forte aquecimento continental e evaporação das superfícies líquidas na baixa atmosfera, condição que contribui fortemente para o transporte e a dispersão dos poluentes atmosféricos.

Portanto, o efeito das condições meteorológicas e climáticas sobre a dispersão de poluentes é iniciado a partir da ação dos sistemas de larga escala como a oscilação da Zona de Convergência Intertropical, fenômeno altamente predominante sobre toda faixa de latitude da Região Metropolitana do Recife, onde o município de Ipojuca está inserido.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As principais ferramentas, utilizadas para o desenvolvimento desta pesquisa, foram as seguintes:

- Guia de Modelagem de Dispersão de Poluentes Atmosféricos da Província de Ontário, Canadá (2009), utilizado como meio de orientação para o levantamento de dados necessários para executar o modelo AERMOD;
- Software AERMOD *view* versão 9.1.0, comercializado pela empresa canadense Lakes Environmental Software, o qual possui uma interface mais intuitiva para a manipulação e o processamento de dados;
- Programa *TANKS* versão 4.09D, desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency* para a estimativa de compostos orgânicos voláteis. O referido *software* pode ser obtido gratuitamente no *site*: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/software/tanks>;
- Planilha em excel contendo dados de emissões pontuais de poluentes atmosféricos, provenientes do Complexo Industrial Portuário Governador Eraldo Gueiros – Agência Estadual de Meio Ambiente – Estado de Pernambuco, ano base de 2013.
- Planilha em excel, contendo dados gerais das empresas localizadas na Zona Industrial Portuária (2017) – Coordenação de Meio Ambiente – Porto de Suape.
- Novo Plano Diretor Suape 2030;
- Resolução CONAMA N°. 03 de 28 de junho de 1990;

A metodologia para a coleta e o processamento de dados, abrangeram as seguintes atividades:

- 3.1 - Identificação, quantificação e caracterização das fontes de emissão pontuais e evaporativas de poluentes atmosféricos;
- 3.2 - Definição da grade de domínio de estudo e pontos receptores;
- 3.3 - Levantamento de dados de entrada para o sistema de modelagem AERMOD

3.1 IDENTIFICAÇÃO, QUANTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES DE EMISSÃO PONTUAIS E EVAPORATIVAS DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

3.1.1 Fontes de emissão pontuais

Os documentos necessários para identificação, quantificação e caracterização das fontes pontuais de emissão (chaminés) de poluentes atmosféricos, localizadas na Zona Industrial Portuária, foram cedidos pela Agência Estadual de Meio Ambiente e pela Coordenação de Meio Ambiente do Porto de Suape, conforme descrito a seguir:

a) Planilha em excel contendo dados de emissões pontuais de poluentes atmosféricos, provenientes do Complexo Industrial Portuário Governador Eraldo Gueiros – Agência Estadual de Meio Ambiente – Estado de Pernambuco, ano base de 2013. Trata-se de um arquivo contendo os dados dos parâmetros físicos e de exaustão das chaminés, taxa de emissão de poluentes atmosféricos e tipo de combustível no processo de combustão;

b) Coordenação de Meio Ambiente do Porto de Suape: planilha em excel contendo, razão social, as atividades desenvolvidas pelas empresas e cópias das licenças ambientais, as quais também podem ser acessadas pelo público por meio do seguinte endereço: www.cprh.pe.gov.br;

Primeiramente, tendo como base os documentos descritos nos itens a e b, identificou-se as principais tipologias das empresas e o número de fontes pontuais que atendiam aos objetivos desta pesquisa, os quais são mostrados na TABELA 2.

TABELA 2 - Tipologia e número de fontes pontuais de empresas localizada na Zona Industrial Portuária.

Código da empresa	Tipologia das empresas	Número de fontes pontuais (chaminés) por empresa
A	1. Geração de energia elétrica	2
	1.1. Termoelétrica	
B	2. Indústria química	5
	2.1 Produção de polímeros termoplástico de polietileno	
C	3. Indústria de produtos alimentares	1
	3.1 Fabricação de margarina	
D	3.2 Refino de óleo vegetal	2
Total		10

FONTE: Elaborado pelo autor

Cabe ressaltar que, os nomes das empresas (TABELA 2) não foram descritos por motivo de confidencialidade e, desse modo, foram substituídos por códigos alfabéticos

Em seguida, organizou-se um conjunto de dados característicos das fontes, contendo os parâmetros físicos e de exaustão das chaminés e taxa de emissão dos poluentes atmosféricos, os quais são apresentados na TABELA 3.

TABELA 3 – Características das principais fontes pontuais de poluentes atmosféricos localizadas na Zona Industrial Portuária.

Identificação Empresa/Número de fontes de emissão	Parâmetros das chaminés				Taxa de emissão dos poluentes (g.s ⁻¹)			
	Físicos		Exaustão		MP	NO _x	SO _x	CO
	Altura (m)	Diâmetro (m)	Velocidade de descarga à atmosfera (m.s ⁻¹)	Temperatura (°C)				
Empresa A								
Fonte 1	43,20	5,60	36,80	87,50		5,88		2,29
Fonte 2	43,20	5,60	36,80	87,50		7,75		0,99
Empresa B								
Fonte 1	6,00	0,60	5,13	190,00	2,80x10 ⁻³	5,55x10 ⁻³	2,80x10 ⁻³	
Fonte 2	6,00	0,60	5,13	190,00	5,55x10 ⁻³	5,55x10 ⁻³	5,55x10 ⁻³	
Fonte 3	42,50	0,91	14,41	193,00	1,66x10 ⁻²	7,22x10 ⁻²	1,1x10 ⁻²	
Fonte 4	42,50	0,91	14,41	193,00		2,50x10 ⁻²	2,50x10 ⁻²	
Fonte 5	42,50	0,91	15,80	193,00	1,94x10 ⁻²	3,05x10 ⁻²	4,44x10 ⁻²	
Empresa C								
Fonte 1	18,50	0,50	3,27	150,00	3,20x10 ⁻²	0,11	5,28x10 ⁻³	
Empresa D								
Fonte 1	24,50	0,60	0,16	368,00	9,40x10 ⁻²	3,61x10 ⁻¹	1,16x10 ⁻²	
Fonte 2	18,50	0,50	0,07	150,00	6,40x10 ⁻²			

FONTE: Elaborado pelo autor.

Por fim, identificou-se o combustível utilizado no processo de combustão (TABELA 4)

TABELA 4 – Tipo de combustível por fonte pontual.

Identificação Empresa/Nº de fontes pontuais	Tipo de combustível utilizado no processo de combustão
Empresa A	
Fonte 1	Gás natural
Fonte 2	Gás natural
Empresa B	
Fonte 1	Gás natural
Fonte 2	Gás natural
Fonte 3	Gás natural
Fonte 4	Gás natural
Fonte 5	Gás natural
Empresa C	
Fonte 1	Gás liquefeito de petróleo
Empresa D	
Fonte 1	Gás liquefeito de petróleo
Fonte 2	Gás liquefeito de petróleo

FONTE: Elaborado pelo autor

3.1.2 Fontes de emissão evaporativas

Para a estimativa de compostos orgânicos voláteis, a partir das fontes evaporativas, identificou-se as principais tipologias de empresas gestoras de parque de tancagem, as quais são mostradas na TABELA 5.

TABELA 5 – Principais tipologias de empresas que armazenam produtos orgânicos voláteis

1. Armazenamento de líquidos orgânicos voláteis	Número de empresas
1.1 Base de combustíveis	1
1.2 Terminais marítimos	5
Total de empresas	6

FONTE: Elaborado pelo autor.

Os dados necessários para estimar as emissões de compostos orgânicos voláteis, utilizando o programa *TANKS* versão 4.09D são descritos a seguir:

3.1.2.1 Tipo de construção e parâmetros físicos dos tanques de armazenamento.

a) Tanque vertical de teto fixo

- Altura do tanque (m);
- Diâmetro do tanque (m);
- Altura máxima do líquido contido no tanque (m);
- Altura média do líquido contido no tanque (m);
- Movimentação do produto armazenado no tanque por ano (m³.ano⁻¹)
- Quantidade de tanques
- Cor costado do tanque
- Condições de pintura do tanque;

- Cor do teto do tanque;
- Tipo de teto;
- Condição de pintura do teto do tanque;
- Pressão de regulação da válvula de alívio pressão e vácuo;
- Conteúdo do tanque;
- Temperatura do tanque, se aquecido (°C);

b) Tanque de teto flutuante interno

- Diâmetro do tanque (m);
- Volume do tanque (m³);
- Movimentação do produto armazenado no tanque por ano (m³.ano⁻¹)
- Quantidade de tanques
- Condições do revestimento interno do tanque (quanto a ferrugem);
- Cor costado do tanque
- Condições de pintura do tanque (boa ou ruim);
- Cor do teto do tanque;
- Categorias de acessórios do teto;
- Construção do tanque (aparafusado ou soldado);
- Tipos de selos (selo primário e secundário);
- Conteúdo do tanque.

As aquisições dos dados necessários para a estimativa de compostos orgânicos voláteis foram solicitados as empresas gestoras de parque de tancagem, os quais não serão divulgados neste trabalho por serem de uso privativo dessas empresas.

Para o levantamento dos dados, descritos nos itens a e b dessa seção, a Coordenação de Meio Ambiente do Porto de Suape, organizou-se reuniões envolvendo representantes das empresas gestoras de parque de tancagem para agendar calendários de visita de campo, cujo objetivo foi auxiliar no processo de coleta desses dados, por meio de formulários, e esclarecimentos de dúvidas pertinente ao trabalho.

3.1.2.2 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos requisitados pelo programa *TANKS* versão 4,09D, podem ser obtidos da estação meteorológica existente na área onde os tanques estão instalados ou de uma cidade mais próxima (USEPA, 2006). Neste contexto, como a estação meteorológica da Agência de Águas e Clima, instalada em Ipojuca, começou a operar em maio de 2013, utilizou-se os dados da estação meteorológica do INMET, medidos na estação Recife (Curado), disponíveis em www.inmet.gov.br, apresentados na TABELA 6.

TABELA 6 - Dados meteorológicos médios mensais medidos na estação Recife (Curado)

Mês	Temperatura (°C)			Radiação Solar (W.m ⁻²)	Velocidade do vento (m.s ⁻¹)	Pressão atmosférica (hPa)
	Máxima	Mínima	Média			
Janeiro	30,20	22,40	26,50	337,70	2,98	1010,90
Fevereiro	30,20	22,60	26,50	371,50	2,75	1010,60
Março	30,00	22,70	26,40	266,40	2,29	1010,40
Abril	29,70	22,60	25,60	241,80	2,25	1010,70
Maio	28,90	21,90	25,20	193,80	2,57	1011,90
Junho	27,90	21,60	24,50	192,60	2,57	1014,00
Julho	27,30	21,10	23,90	204,70	2,87	1014,70
Agosto	27,50	20,60	23,90	229,90	3,10	1014,70
Setembro	28,10	20,70	24,60	249,30	3,26	1014,20
Outubro	29,00	21,40	25,50	276,50	3,16	1012,60
Novembro	30,10	21,90	26,10	249,10	3,29	1011,50
Dezembro	30,20	22,20	26,40	317,40	3,12	1010,10
Médias	29,10	21,80	25,50	259,60	2,82	1012,20

FONTE: INMET – disponível na internet em www.inmet.gov.br, acesso em 21 de janeiro de 2017.

3.1.2.3 Dados das propriedades físicas dos líquidos armazenados nos tanques

Para o cálculo das estimativas de emissões de compostos orgânicos voláteis foram considerados os tanques que armazenavam óleo diesel S10, óleo diesel

S500, etanol anidro combustível, etanol hidratado combustível, gasolina tipo A comum, gasolina tipo C comum, n- hexano, p-xileno e querosene de aviação.

As informações simplificadas relativas aos produtos óleo diesel S10, óleo diesel S500, etanol anidro combustível, etanol hidratado combustível, gasolina tipo A comum e gasolina tipo C comum são mostradas na TABELA 7.

TABELA 7 – Informações simplificadas do diesel S10, diesel S500, etanol anidro combustível, etanol hidratado combustível, gasolina A e gasolina C

Produtos armazenados nos tanques	Informações simplificadas do produto	Fonte
Diesel S10	Combustível com teor máximo de enxofre de 10 mg.kg ⁻¹	Índio do Brasil; Araújo; Molina de Sousa, 2014.
Diesel S500	Combustível com teor máximo de enxofre de 500 mg.kg ⁻¹	Índio do Brasil; Araújo; Molina de Sousa, 2014.
Etanol anidro combustível (álcool etílico)	Misturado com a gasolina A na formulação da gasolina C; Teor máximo de água, 0,7% em massa.	Resolução ANP N°19 de 15/04/2015
Etanol hidratado combustível (álcool etílico)	Destinado à utilização direta em motores de combustão interna; Teor máximo de água, 7,5% em massa.	Resolução ANP N°19 de 15/04/2015
Gasolina tipo A comum	Mistura de naftas em uma proporção tal que especifique o produto como gasolina C, após a mistura com etanol anidro. Pressão de vapor a 37,8°C - 45,0 a 62,0 kPa	Farah, 2013. Resolução ANP N°40 de 25/10/2013
Gasolina tipo C comum	Mistura de gasolina tipo A com etanol anidro, na proporção legal prevista. Pressão de vapor a 37,8°C, máximo de 69,0 kPa	Farah, 2013. Resolução ANP N°40 de 25/10/2013

FONTE: Elaborado pelo autor

As informações simplificadas relativas aos produtos, n-hexano, p-xileno e querosene de aviação são mostradas na TABELA 8.

TABELA 8 - Informações simplificadas do n-Hexano, p-Xileno e querosene de aviação.

Produtos armazenados nos tanques	Informações simplificadas do produto	Fonte
n-Hexano	Produto de limpeza industrial e desengraxe.	Ficha de informação de segurança de produtos químicos – Petrobrás Distribuidora
p-Xileno	Matéria-prima principal para fabricação do ácido tereftálico e do tereftalato de dimetila.	Zanin; Mancini, 2015.
Querosene de aviação	Mistura de hidrocarbonetos na faixa de C ₉ a C ₁₅ , utilizado em turbinas aeronáuticas.	Farah, 2013.

FONTE: Elaborado pelo autor.

Em seguida, após definição dos tipos de produtos armazenados nos tanques, os quais se deseja estimar a emissão de compostos orgânicos voláteis, é necessário obter as seguintes propriedades físicas desses produtos: massa molar, massa específica do líquido a 15,55°C, massa molar do vapor à 15,55°C, pressão de vapor e pressão de vapor verdadeira a diferentes temperaturas (4,44°C; 10,00°C; 15,55°C; 21,11°C; 26,67°C; 32,22°C; 37,78°C).

Uma vez que as empresas gestoras dos parques de tancagem, consideradas neste trabalho, não possuíam os dados das propriedades físicas dos produtos armazenados nos tanques, tal como requerido pelo programa TANKS versão 4.09 D, adotou-se aquelas disponíveis na biblioteca desse programa, as quais são mostradas nas Tabelas 9, 10 e 11, após a conversão das unidades inglesas para o Sistema Internacional de Unidades.

TABELA 9 – Propriedades físicas do álcool etílico e n-hexano.

Nome	Massa molar (kg. kmol ⁻¹)	Massa específica do líquido em kg.m ⁻³ a 15,55 °C	<u>Pressão de vapor (kPa)</u>						
			4,44 °C	10,00 °C	15,55 °C	21,11°C	26,67°C	32,22°C	37,78°C
Álcool etílico	46,07	792,05	1,33	2,82	4,20	4,83	8,40	11,60	15,99
n-hexano	86,17	662,28	7,60	9,99	12,93	16,79	21,06	26,93	33,73

FONTE: Biblioteca do Programa TANKS versão 4.09D.

TABELA 10 – Propriedades físicas do p-xileno e constantes da Equação de Antoine.

Nome	Massa molar (kg. kmol ⁻¹)	Massa específica do líquido em kg.m ⁻³ a 15,55 °C	Constante da equação de Antoine		
			A (adimensional)	B (°C)	C (°C)
p-xileno	106,17	860,35	7,02	1474,40	217,77

FONTE: Biblioteca do Programa TANKS versão 4.09D.

TABELA 11 – Propriedades físicas de líquidos de petróleo.

Nome	Mol de vapor em kg. kmol ⁻¹ a 15,55°C	Massa específica do líquido em kg.m ⁻³ a 15,55 °C	Pressão de vapor verdadeira, P _{VA} (kPa)						
			4,44 °C	10,00 °C	15,55 °C	21,11°C	26,67 °C	32,22°C	37,78°C
Óleo diesel	130	850,77	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,11	0,15
Gasolina	65	671,03	26,68	32,75	39,78	47,98	57,50	68,39	80,94
PVR 11									
Querosene para jato	130	850,77	28,26x10 ⁻³	41,36x10 ⁻³	58,60 x 10 ⁻³	75,84x 10 ⁻³	0,10	0,14	0,19

FONTE: Biblioteca do Programa TANKS versão 4.09D

A Resolução ANP N°40 de 25/10/2013 regula as especificações das gasolinas de uso automotivo no Brasil. Pode-se observar na TABELA 7 que a pressão de vapor a 37,8°C permitida na gasolina tipo A comum pode variar entre 45,0 e 62,0 kPa, enquanto que a gasolina tipo C comum, a pressão de vapor a 37,8 °C deve ser 69,0 kPa. Essas pressões são conhecidas como Pressão de Vapor Reid - PVR.

Na indústria de petróleo, a PVR é uma propriedade física muito utilizada para quantificar a volatilidade de hidrocarbonetos líquidos, desde o petróleo até gasolina, entre outros produtos derivados. A PVR é a pressão absoluta determinada pelo método ASTM 323 e representa a pressão resultante da formação de duas fases, vapor e líquido em equilíbrio, pelo aquecimento da substância à temperatura 37,8°C. Enquanto a pressão verdadeira (P_{VA}), é a pressão parcial de equilíbrio exercida por um líquido orgânico volátil, conforme definida pelo método ASTM 2879.

Neste trabalho, adotou-se para a gasolina tipo A comum e a gasolina tipo C comum como sendo aquelas de pressão de vapor *Reid* 11 (TABELA 11), ou seja, pressão de vapor aproximadamente igual a 75,84 kPa a 37,8° C, para o cálculo das estimativas de emissão de COV, visto que as fichas de informações de

segurança de produto químico, disponíveis por algumas empresas, mostraram variações para valores maiores quanto a pressão Reid desses produtos, por exemplo, 69 kPa a 37,8° C para a gasolina A e 79 kPa a 37,8° C para a gasolina C.

Adicionalmente, o cálculo da P_V e P_{VA} à diferentes temperaturas é importante, pois são utilizadas para o cálculo da temperatura média diária na superfície do líquido (T_{LA}) armazenado. O programa *TANKS* versão 4.09 D é capaz de interpolar o valor da T_{LA} , mediante o fornecimento das P_V e P_{VA} a diferentes temperaturas.

Em relação ao cálculo da pressão de vapor na T_{LA} , provenientes do armazenamento de p-xileno, o programa *TANKS* versão 4.09 D utiliza a equação de Antoine para obter tal parâmetro, caso não disponível, conforme procedimentos descritos no APÊNDICE A.

A diferença entre o etanol anidro combustível e o etanol hidratado combustível está relacionada à quantidade de água presente em cada um deles, conforme descrito a TABELA 7. O programa *TANKS* versão 4.09D não faz distinção relativo a esse aspecto. Desse modo, ambos foram considerados com álcool etílico, apenas.

3.1.3 Equações para o cálculo de estimativas de emissões de compostos orgânicos voláteis

Tanque de teto fixo

As perdas evaporativas totais, provenientes do tanque vertical de teto fixo são devidas a dois processos: perda por respiração e perda por trabalho. O cálculo total dessas perdas é realizado por meio da Equação 20.

$$L_T = L_S + L_W \quad (20)$$

Em que:

L_T = perdas evaporativas totais (kg.ano⁻¹)

L_S = perda por respiração (kg.ano⁻¹)

L_W = perda por trabalho (kg.ano^{-1})

Tanques de teto flutuante interno

As emissões provenientes de tanques de teto flutuante interno são devidas as perdas ocorridas pelo selo de vedação de extremidade, colocado entre a borda da parede interna do costado e a borda do teto flutuante, por retirada do líquido no tanque, pelos acessórios do teto e pelas junções (costura) das placas do teto flutuante, conforme descrito pela Equação 21.

$$L_T = L_R + L_{WD} + L_F + L_D \quad (21)$$

Em que:

L_T = perda total (kg.ano^{-1})

L_R = perda pelo selo de vedação de extremidade, colocado entre a borda da parede interna do costado e a borda do teto flutuante (kg.ano^{-1})

L_{WD} = perda por retirada do líquido no tanque (kg.ano^{-1})

L_F = perda pelos acessórios do teto (kg.ano^{-1})

L_D = perda pelas junções das placas do teto flutuante (kg.ano^{-1})

A partir dos dados específicos dos tanques, dos dados meteorológicos, das propriedades do líquido armazenado é possível calcular as emissões anuais de compostos orgânicos voláteis para cada tanque individualmente.

As equações detalhadas para o cálculo de emissões de compostos orgânicos voláteis a partir de tanque vertical de teto fixo e teto vertical de teto flutuante interno, desenvolvidas pelo *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE - API* e incorporadas no Programa *TANKS* versão 4.09 D, pode ser encontrada no APÊNDICE A.

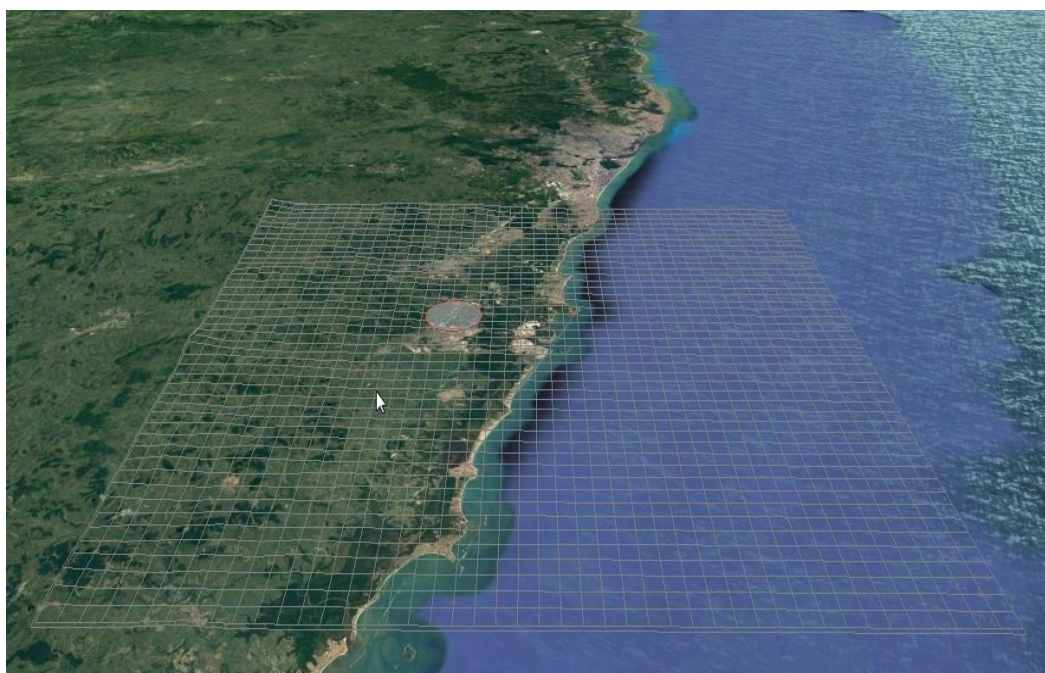
O procedimento de cálculo para COV não estão descritas neste capítulo por envolver várias etapas. Além disso, as unidades constantes no APÊNDICE A não foram convertidas para o Sistema Internacional de Unidades, pois os

procedimentos de cálculo envolvem vários fatores de emissão determinados pelo API e tais procedimentos poderiam incorrer em erros.

3.2 DEFINIÇÃO DA GRADE DE DOMÍNIO DA MODELAGEM E PONTOS RECEPTORES

A grade da área de domínio da modelagem foi definida com o objetivo de abranger todas as fontes de emissão de poluentes atmosféricos da Zona Industrial Portuária, consideradas neste trabalho, e pontos receptores, ou seja, pontos específicos para os quais se desejam conhecer as concentrações de poluentes do ar. Os pontos receptores estão situados no Porto de Suape (Zona Comercial e Serviço, Massangana I e Massangana II) e lugares onde posicionadas as estações de monitoramento da qualidade do ar. A área da grade de domínio da modelagem é de 2025 km², cuja dimensão de cada lado do quadrado é de 45 km por 45 km (FIGURA 27).

FIGURA 27 – Grade da área de domínio da modelagem sobre o Porto de Suape



FONTE: Oliveira, 2017

O centro da grade foi definido pelas coordenadas geográficas no Sistema Universal Transverso de Marcador (UTM) em $X = 282691,06$ mE; e em $Y = 9071356,54$ mN, localizado sobre o Porto de Suape.

O Sistema UTM é um sistema de coordenadas que descreve posições em um mapa, os quais podem ser determinadas por meio de equipamento denominado GPS - *Global Positioning System* ou Sistema de Posicionamento Global. O sistema UTM caracteriza-se por adotar coordenadas métricas planas, no qual a letra E significa leste (do inglês *East*) e N para Norte.

A grade receptora (FIGURA 27) é composta de quadrículas de espaçamentos de 1000 m por 1000 m gerando um total de 2158 receptores. Sobre cada quadrícula o modelo calcula as concentrações dos poluentes que irão resultar nos mapas das isoconcentrações. Os pontos receptores específicos selecionados para o cálculo das concentrações dos poluentes são descritos nas Tabelas 12, 13, 14 e 15.

TABELA 12 – Pontos receptores localizados na Zona de Comércio e Serviço

Código do ponto	Coordenadas Geográficas em UTM	
	X	Y
	(mE)	(mN)
8	276900,73	9074765,73
9	276423,65	9074519,50
10	276988,20	9074234,75
11	277118,98	9074190,21
12	277617,87	9074254,46

FONTE: Coordenação de cartografia – Porto de Suape, 2017.

TABELA 13 – Pontos receptores localizados em Massagana I.

Código do Ponto	Coordenadas geográficas em UTM	
	X	Y
	(mE)	(mN)
1	278665,04	9076640,90
2	278678,28	9076694,87
3	278409,41	9076784,26
4	278069,41	9076474,17
5	277771,89	9076392,69

FONTE: Coordenação de cartografia – Porto de Suape, 2017.

TABELA 14 – Pontos receptores localizados em Massagana II– Vilas dois irmãos.

Código do ponto	Coordenadas geográficas em UTM	
	X	Y
	(mE)	(mN)
9	278375,87	9075672,20
10	278306,64	9075757,62
11	227707,75	9075595,37
12	277635,54	9075383,62
13	277721,28	9072249,38

FONTE: Coordenação de cartografia – Porto de Suape, 2017.

TABELA 15 – Pontos receptores – Estações de monitoramento da qualidade do ar.

Código do ponto	Coordenadas UTM	
	X	Y
	(mE)	(mE)
Estação Gaibu	284553,90	9078798,40
Estação Ipojuca	278410,30	9066696,50
Estação Cone	277916,00	9085751,10

FONTE: RNEST, 2015.

3.3 LEVANTAMENTO DE DADOS DE ENTRADA PARA O SISTEMA DE MODELAGEM AERMOD

Os dados requisitados pelo sistema de modelagem AERMOD para o cálculo das concentrações dos poluentes atmosféricos, descarregados à atmosfera pelas chaminés e aqueles provenientes de tanques de armazenamentos de líquidos orgânicos voláteis são descritos a seguir:

3.3.1 Dados específicos das chaminés

Os principais dados específicos das chaminés compreendem:

Identificação da fonte:

- Nome;
- Coordenadas geográficas UTM;

Parâmetros físicos:

- Altura da chaminé (m);
- Diâmetro da chaminé (m).

Parâmetros de exaustão:

- Velocidade de saída dos gases de exaustão (m.s^{-1});
- Temperatura dos gases de saída (K)
- Taxa de emissão dos poluentes (g.s^{-1})

Os dados específicos das chaminés foram obtidos da TABELA 3, apresentada na seção 3.1.1, com exceção das coordenadas geográficas UTM, as quais não são divulgadas neste trabalho por questões de confidencialidade desses dados.

As concentrações de NO_x e SO_x , calculados pelo sistema de modelagem AERMOD serão expressos como NO_2 e SO_2 , enquanto concentrações de material particulado serão expressos como MP_{10} , com objetivo de comparar os resultados com os padrões da qualidade do ar estabelecidos pelas Resolução CONAMA N° 03/1990.

3.3.2 Dados específicos dos tanques de armazenamento de líquidos orgânicos voláteis

De acordo com o Guia de Dispersão de Modelagem da Província de Ontário – Canadá (2009), como os tanques de armazenamento de produtos voláteis são desprovidos de chaminés, uma maneira de simular a dispersão atmosférica e, assim, obter as concentrações desses poluentes, é realizada por meio dos seguintes procedimentos:

a) Tanque vertical de teto fixo

As emissões de compostos orgânicos voláteis, provenientes do tanque vertical de teto fixo, ocorrem pela válvula de alívio de pressão e vácuo (*vents*). Então, considera-se os *vents* como se fosse uma pequena fonte pontual (chaminé), localizada no centro do teto para simular a dispersão atmosférica.

A medida que não existe nenhuma pluma virtual sendo lançada a partir de tanques de armazenamento, deve-se considerar uma velocidade de saída dos

gases e diâmetro da pequena chaminé próximos a zero: 0,001m/s e 0,001m, respectivamente.

b) Tanques de teto flutuante

No tanque de teto flutuante, a maior parte das emissões de COV ocorre através do selo de vedação de extremidade. Desse modo, considera-se no mínimo oito pontos ao redor desse selo. Cada ponto irá representar uma pequena chaminé.

Como descrito anteriormente, a medida que não existe nenhuma pluma virtual sendo lançada a partir desses tanques, deve-se considerar também uma velocidade de saída dos gases e diâmetro das pequenas chaminés próximos a zero: 0,001m/s e 0,001m, respectivamente.

Além disso, no sistema de modelagem AERMOD deve-se adotar a temperatura de saída dos gases igual a 0,0 K, com o objetivo de fazê-lo processar os dados considerando a temperatura ambiente onde os tanques de armazenamento estão instalados.

Finalmente, os principais dados específicos requisitados pelo sistema de modelagem AERMOD para os tanques de armazenamento de teto vertical de teto fixo e de teto flutuante interno são os seguintes:

Identificação da fonte:

- Nome;
- Coordenadas geográficas UTM;

Parâmetros físicos da fonte:

- Altura do tanque (m);
- Diâmetro da chaminé = 0,001 (m).

Parâmetros de exaustão da chaminé:

- Velocidade de saída dos gases = 0,001 m/s;

- Temperatura de saída dos gases = 0,0 K
- Taxa de emissão de compostos orgânicos voláteis (g.s^{-1})

As taxas de emissão de compostos orgânicos voláteis são obtidas pelo programa *TANKS* versão 4.09D, conforme procedimento descrito na seção 3.1.2.

3.3.3 Dados topográficos da região de estudo

Na modelagem é necessário o arquivo digital de topografia da região de estudo, cujo objetivo é fazer com que o modelo realize a correção do efeito do terreno sobre a dispersão turbulenta da atmosfera. Desse modo, a fim de obter as cotas de altitudes do terreno, o sistema de modelagem *AERMOD view 9.1.0* utiliza um algoritmo computacional que faz um *link* com o satélite *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM1/SRTM3) da *National Oceanic & Atmospheric Administration* – NOAA. A resolução de captação, pelo satélite, das informações do contorno do terreno é de 90 m. Para maiores detalhes consultar o *site* <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>.

Após o levantamento das curvas de níveis do terreno é gerado um arquivo pelo pré-processador de terreno *AERMAP*, cujos resultados desse processamento são enviados para o programa principal *AERMOD*.

3.3.4 Dados meteorológicos da região de estudo

3.3.4.1 Dados de superfície

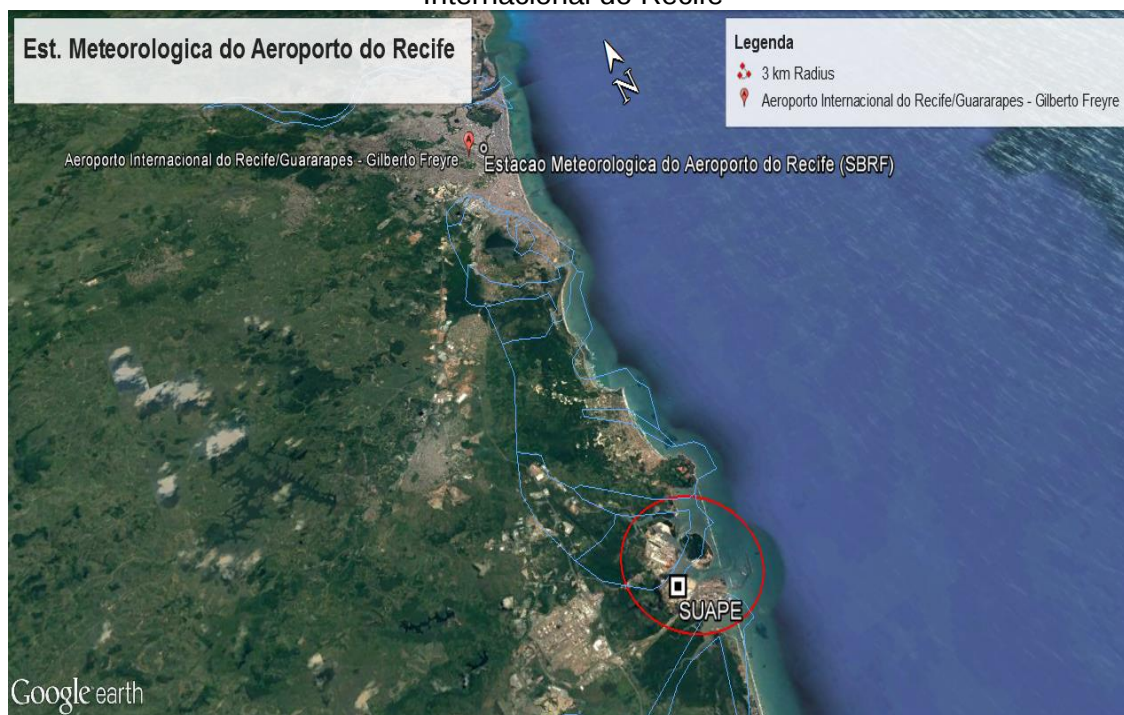
Neste trabalho foram utilizados três anos de dados meteorológicos de superfície, compreendidos entre os anos de 2013 e 2015, para uso no sistema de modelagem *AERMOD*. Essa etapa necessitou da consulta de três estações meteorológicas instaladas na Região Metropolitana do Recife - RMR:

- a) Estação meteorológica do Porto de Suape;
- b) Estação Meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET;
- c) Estação Meteorológica do Aeroporto Internacional do Recife;

Nas Estações do Porto de Suape e do INMET, verificou-se que não havia dados horários de nebulosidade, portanto, não foram utilizados neste trabalho. A estação do Aeroporto Internacional do Recife, atendia aos requisitos mínimos necessários para gerar os arquivos nas extensões SFC (*Surface File*) e PFL (*Profile File*), gerados pelo pré-processador de dados meteorológicos AERMET, os quais foram posteriormente enviados para o programa principal AERMOD.

A estação Meteorológica de Superfície do Aeroporto Internacional do Recife, localizada nas coordenadas de Latitude de 08° 08'S e longitude 34° 55'W, está distante cerca de 45 km do Porto de Suape, cujos os dados estão dentro do raio de validação recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). De acordo com a FIGURA 28, a referida estação está instalada em região plana a 3,00 km de distância, em linha reta da linha da costa, e isto faz com que a estação do Aeroporto Internacional de Recife capte o mesmo regime climático costeiro que ocorre sobre o município de Ipojuca (OLIVEIRA, 2017).

Figura 28 - Localização da estação meteorológica de superfície no Aeroporto Internacional do Recife



FONTE: Oliveira, 2017.

A estação meteorológica do Aeroporto Internacional do Recife, disponibiliza os dados publicamente na INTERNET, na forma de mensagens Meteorological Aerodrome Report – METAR ou Relatório Meteorológico de Aeródromo para fins de uso de aviação. Esses dados podem ser acessados na website da Rede Meteorológica do Comando da Aeronáutica REDEMET (www.redemet.aer.mil.br). O sistema METAR disponibiliza um relatório codificado, associado às observações meteorológicas horárias sobre condições do tempo em um aeródromo específico, composto das variáveis direção e velocidade do vento, temperatura do ar, pressão atmosférica, cobertura de nuvens, em outros.

3.3.4.2 Dados de uso de solo

O pré-processador de dados meteorológicos AERMET leva em consideração as influências de uso e ocupação do solo da área de estudo para realizar o processamento dos dados meteorológicos. Essas influências são quantificadas pelos parâmetros albedo, a rugosidade da superfície e a razão de Bowen. Para calcular os valores desses parâmetros, o sistema de modelagem AERMOD utiliza o programa auxiliar denominado *AERSURFACE*, desenvolvido para uso nos Estados Unidos da América. Porém, para utilização no Brasil, a empresa canadense *Lakes Environmental Software* desenvolveu um programa denominado *Lakes Use Creator* que utiliza um algoritmo computacional para obter os dados de albedo, rugosidade da superfície e razão de Bowen.

3.3.4.3 Dados de altitude

Para o AERMET gerar os arquivos SFC (*Surface File*) e o PFL (*Profile File*), além das informações dos parâmetros de uso do solo e dos dados meteorológicos de superfície, é necessário utilizar pelo menos dois perfis meteorológicos de dados de altitudes (*Upper Air*), os quais deveriam ser medidos no Aeroporto Internacional do Recife, mas a estação de radiosonda estava inoperante temporariamente, quando da *download* dos dados. Desse modo, devido a inexistência dos dados da radiosonda do referido aeroporto, foi

utilizado o recurso do AERMET, denominado de *Upper Estimator*. Esse último trata-se de programa desenvolvido pela *Lakes Environmental Software* que possui um algoritmo que gera os dados de altitudes a partir dos dados meteorológicos horários da estação de superfície.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS

4.1.1 Fontes pontuais

A partir dos documentos descritos na seção 3.1.1 do capítulo de materiais e métodos, deste trabalho, obteve-se a quantidade de chaminés, tipo de combustível utilizado no processo de combustão e a taxa de emissão de poluentes atmosférico, com objetivo de avaliar as emissões, originadas das fontes pontuais, conforme mostrado na TABELA 16.

TABELA 16 – Quantidade de chaminés, tipo de combustível utilizado e taxa de emissão de poluentes atmosféricos

Quantidade de chaminés por empresa	Tipo de combustível	Taxa de emissão dos poluentes (g.s ⁻¹)			
		PM	NO _x	SO _x	CO
Empresa A					
Chaminé 1	Gás natural		5,88		2,29
Chaminé 2	Gás natural		7,75		0,99
Empresa B					
Chaminé 1	Gás natural	2,80x10 ⁻³	5,55x10 ⁻³	2,80x10 ⁻³	
Chaminé 2	Gás natural	5,55x10 ⁻³	5,55x10 ⁻³	5,55x10 ⁻³	
Chaminé 3	Gás natural	1,66x10 ⁻²	7,22x10 ⁻²	1,1x10 ⁻²	
Chaminé 4	Gás natural		2,50x10 ⁻²	2,50x10 ⁻²	
Chaminé 5	Gás natural	1,94x10 ⁻²	3,05x10 ⁻²	4,44x10 ⁻²	
Empresa C					
Chaminé 1	Gás liquefeito de petróleo	3,20x10 ⁻²	0,11	5,28x10 ⁻³	
Empresa D					
Chaminé 1	Gás liquefeito de petróleo	9,40x10 ⁻²	3,61x10 ⁻¹	1,16x10 ⁻²	
Chaminé 2	Gás liquefeito de petróleo	6,40x10 ⁻²			
Total de chaminés = 10					
Total de chaminés que descarregam na atmosfera poluentes originados da queima de gás natural = 7 ou em termos de percentagem 70%					
Total de chaminés que descarregam na atmosfera poluentes originados da queima de gás liquefeito de petróleo = 3 ou em termos de percentagem 30%					

FONTE: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar que os poluentes MP, NO_x, SO₂ e CO (TABELA 16), originados das dez chaminés, possuem baixas taxas de emissão, as quais possivelmente podem estar relacionadas ao uso do gás natural e do gás liquefeito do petróleo no processo de combustão. Tem-se que 70% das emissões de poluentes atmosféricos, lançados pelas chaminés são provenientes da combustão de gás natural e 30%, de gás liquefeito de petróleo.

Em geral, o gás natural é apontado como o combustível que possui reduzido conteúdo de enxofre e pode queimar com baixas taxas emissão de NO_x e de material particulado. Além disso, um processo de combustão eficiente produz baixa emissão de monóxido de carbono. Porém, a utilização de gás natural no processo de combustão, pode ocasionar emissões mais elevadas de NO_x devido a ocorrência de NO_x térmico, principal mecanismo de formação desse poluente a partir da queima do gás natural. O NO_x térmico é formado pela dissociação térmica entre o nitrogênio e o oxigênio do ar de combustão. Uma das maneiras de se reduzir o NO_x térmico, é o controle da temperatura na câmara de combustão (USEPA, 1998). Essas observações também são verificadas para o uso de gás liquefeito do petróleo no processo de combustão (USEPA, 2008).

Fard *et al.* (2016), analisaram as taxas de emissão de NO_x, SO₂, CO e MP₁₀ provenientes de uma termoeletrica a gás natural com capacidade instalada 714 MW para geração de energia elétrica, localizada a 15 km a sudoeste da cidade de Qom (Irã). Os pesquisadores constaram que as taxas de emissão de SO₂, CO e MP₁₀, lançados pela chaminé dessa planta, foram muito baixas: 1,66 g.s⁻¹; 8,59.10⁻¹ g.s⁻¹ e 5,18 g.s⁻¹, respectivamente, exceto para o NO_x que foi de 262,81 g.s⁻¹. Os pesquisadores concluíram que os resultados para o NO_x foram preocupantes devido aos impactos desse poluente na saúde humana, pois, em geral, algumas dessas termoeletricas do país, inclusive a do referente estudo, estão situadas nas proximidades de áreas habitacionais. Os autores, não descreveram as causas que poderiam ter proporcionado essa taxa de emissão mais elevada do NO_x a partir da queima do gás natural. Mas, atribuíram as reduzidas emissões de SO₂ a uma menor quantidade de enxofre no gás natural e uma baixa emissão de CO a uma combustão eficiente desse combustível.

Na TABELA 16 a empresa A é uma termoeletrica a gás natural com capacidade de 532 MW para produção de energia elétrica. Observa-se que as taxas de emissão de CO são de 2,29 g.s⁻¹ e 0,99 g.s⁻¹, originados tanto da chaminé 1 quanto da chaminé 2, respectivamente, sendo consideradas baixas. Com isso, concorda-se que os resultados das emissões de CO provenientes da empresa A, poderão estar associadas a uma combustão eficiente desse combustível como observado por Fard *et al.* (2016). Em relação aos valores de NO_x, os quais resultaram em valores de 5,88 g.s⁻¹ e 7,75 g.s⁻¹, lançados da

chaminé 1 e chaminé 2, respectivamente, são bem menores do que aqueles verificados por Fard *et al.* (2016). Uma possível explicação pode estar relacionada a diferente tecnologia de controle, empregadas por ambas termométricas, para reduzir a formação do NO_x térmico. Uma tecnologia em potencial para reduzir as emissões de NO_x é o uso de queimadores de baixa emissão de NO_x denominado *Dry Low NO_x*, conforme observado por Korpela *et al* (2017). De acordo com Rodrigues (2011), os *Dry Low NO_x* podem reduzir as emissões de NO_x devido a uma baixa temperatura da chama que é obtida por uma relação combustível/ar, pobre em combustível.

As demais empresas, descritas na TABELA 16, como a B que é uma indústria química, cuja atividade é a produção de polímeros termoplástico de polietileno, a qual faz uso de gás natural no processo de combustão, e as empresas C e D que são indústrias de produção alimentares, fabricação de margarina e refino de óleo vegetal, respectivamente, as quais fazem uso de gás liquefeito de petróleo, as baixas taxas emissões de poluentes atmosféricos podem estar coerentes com o observado em USEPA (1998), USEPA (2008) e Korpela *et al* (2017), ao considerar, em termos gerais, o tipo de combustível utilizado no processo de combustão.

Sabe-se que outras variáveis podem interferir na quantidade de emissão desses poluentes. Porém, uma análise mais detalhada não foi possível devido à ausência de documentos relativos a composição química dos combustíveis, equipamentos de combustão, tipo de controle adotado, entre outros, indisponíveis na base de dados consultados.

4.1.2 Fontes evaporativas

Na Zona Industrial Portuária, verificou-se a existência de seis empresas que possuem parque de tancagem (base de combustíveis e terminais), as quais conjuntamente responderam por um total de cento e dezenove tanques (119), conforme as informações fornecidas por essas empresas. Porém, apenas setenta e seis (76) tanques foram considerados nesta pesquisa devido aos seguintes motivos:

- Neste trabalho, o cálculo das emissões anuais de compostos orgânicos voláteis, levou em consideração apenas os tanques que armazenavam gasolina, óleo Diesel, querosene de aviação, p-xileno e n-hexano, etanol anidro combustível e etanol hidratado combustível. Produtos como monoetilenoglicol, dietilenoglicol, dicloetano, biodiesel, combustíveis marítimos, foram excluídos, uma vez que o banco de dados de propriedades físicas de produtos orgânicos voláteis, disponíveis na biblioteca do programa *TANKS* versão 4.09D, não contemplavam tais compostos.
- Exclusão dos formulários de tanques que armazenam GLP, visto que o programa *TANKS* versão 4.09D não contempla vasos de pressão, pois *American Petroleum Institute-API* não encontrou correlações apropriadas disponíveis para estimativa de perdas evaporativas de produtos orgânicos voláteis a partir desses tanques;
- Exclusão de formulários com os principais dados de entrada para o processamento realizado pelo programa *TANKS* versão 4.0.9 D, conforme apresentado na seção 3.1.2.1 do capítulo 3.

Neste contexto, foram quantificados setenta e seis tanques, o que representam 63,86% do total de tanques existentes na Zona Industrial Portuária, e dos quais 55 foram identificados como tanque vertical de teto fixo e 21 como tanque de teto flutuante interno, conforme mostrado na TABELA 17.

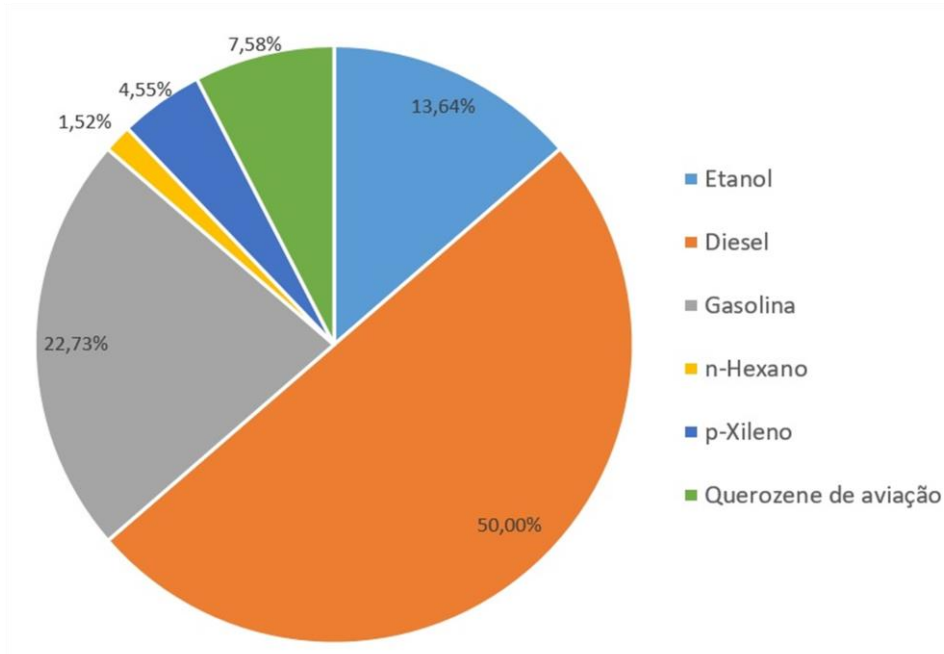
TABELA 17 – Tipo e quantidades de tanques de armazenamento para o ano base de 2013.

Tipo de tanque	Quantidade de tanques de armazenamento
Tanque vertical de teto fixo	55
Tanque de teto flutuante interno	21
Total de tanques	76

FONTE: Elaborado pelo autor.

Na FIGURA 29 é mostrada a frequência de ocorrência de tipos de produtos armazenados nos tanques da Zona industrial Portuário e considerados para o cálculo de emissões de COV para o ano base de 2013. Observou-se que o óleo Diesel (S10 e S550), a gasolina (tipo A e C) e o etanol (anidro e hidratado) constituíram os três tipos de produtos de maior frequência de ocorrência: 50,00%, 22,73% e 13,64% respectivamente. Os produtos n-hexano, p-xileno e querosene de aviação responderam, conjuntamente, por 13,65% dos produtos armazenados para o ano base de 2013.

Figura 29 – Frequência de ocorrência de produtos armazenados nos tanques da Zona Industrial Portuária e considerados para o cálculo das emissões de COV – ano base de 2013.



FONTE: Elaborado pelo autor

estimativas de compostos orgânicos voláteis (t.ano⁻¹) oriundos dos tanques vertical de teto fixo e tanques de teto flutuante interno.

Os resultados das estimativas de emissões anuais totais de COV indicaram um valor de 564,39 t.ano⁻¹, provenientes de um total de 55 tanques de teto fixo. No caso dos tanques de teto flutuante interno, com um total de 21 tanques, as emissões anuais totais de COV foram de 16,15 t.ano⁻¹, os quais são apresentados na Tabelas 18 e 18 respectivamente.

TABELA 18 – Emissões anuais totais de COV (t.ano⁻¹), obtidas pelo programa TANKS versão 4.09 D para os tanques de teto fixo, ano base de 2013.

Perdas (t.ano ⁻¹)		
Trabalho	Respiração	Total
436,26	128,13	564,39

FONTE: Elaborado pelo autor.

TABELA 19 - Emissões anuais totais de COV (t.ano⁻¹), obtidas pelo programa TANKS versão 4.09D para os tanques de teto flutuante interno, ano base de 2013.

Perdas (t.ano ⁻¹)				
Selos	Retirada do líquido no tanque	Acessórios	Costuras	Total
11,19	0,32	1,62	3,02	16,15

FONTE: Elaborado pelo autor.

Esses resultados mostrados na TABELA 18 e TABELA 19 já eram esperados, uma vez que o número de tanques verticais de teto fixo é superior aos de tanques de teto flutuante interno. Contudo, as emissões de COV, oriundas desse último tipo de tanque, são muito baixas quando comparadas as dos tanques vertical de teto fixo, representando apenas 2,76% do total das emissões.

Os resultados obtidos dessa pesquisa, relativa as emissões de COV por tipo de tanque, estão de acordo com os obtidos por Javanovic *et al.* (2010), os quais mostraram que as emissões de tanques de teto fixo são bem superiores aos de tanques de teto flutuante interno. Os autores utilizaram o programa TANKS 4.09D para estimar as emissões totais de COV, originados de vinte e sete

tanques de armazenamento de produtos orgânicos voláteis, incluindo gasolina, nafta, benzeno, tolueno, provenientes de uma refinaria de petróleo localizada em Pancevo (Sérvia). Os cálculos de emissões de COV foram realizados antes e depois de um projeto de modernização dos tanques implantado pela refinaria. De acordo com os resultados da pesquisa, as emissões totais de COV provenientes de tanques de teto flutuante externo foi de 143,3 t.ano⁻¹ e que após a conversão desse tanque para um tanque de teto flutuante interno, as emissões de COV passaram a ser 13,09 t.ano⁻¹, representando uma eficiência de redução de 91% das emissões anuais totais de COV. Os pesquisadores ressaltam que os demais tanques da refinaria, um total de 13 tanques vertical de teto fixo, que não sofreram modificações, produziram 203,24 t.ano⁻¹ de COV.

Os resultados obtidos por Mihajlovic *et al.* (2013), mostraram também que as emissões de COV, calculadas pelo programa *TANKS* versão 4.09D para diferentes tipos de derivados de petróleo, foram maiores para os tanques de teto fixo (2,07 kg COV.t⁻¹) do que para aqueles originados dos tanques de teto flutuante interno e tanque de flutuante externo com 0,0072 kg COV.t⁻¹ e 0,044 kg COV t⁻¹, respectivamente.

4.2 RESULTADO DO PROCESSAMENTO DADOS METEOROLÓGICO PARA A MODELAGEM DE DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Após a obtenção e decodificação dos dados meteorológicos da estação do Aeroporto Internacional do Recife, verificou-se que a série de dados correspondentes ao período de 2013 a 2015, atendeu o mínimo de 90% dos dados válidos para serem processados pelo AERMET, conforme recomendado pela United States Environmental Protection Agency (OLIVEIRA, 2017). Os dados meteorológicos dessa estação foram utilizados para a modelagem de dispersão de poluentes atmosféricos na região do Porto de Suape

A partir do processamento dos dados meteorológico da estação do Aeroporto Internacional do Recife, obteve-se a frequência combinada entre a direção e a velocidade do vento, mostrados na TABELA 20.

TABELA 20 - Distribuição de frequência combinada da direção e velocidade do vento anual, média do período de 2013 a 2015 da estação meteorológica do Aeroporto Internacional do Recife.

Direção do vento	Velocidade do vento (m.s ⁻¹)												Total	
	0,5 – 2,1		2,1 – 3,6		3,6 – 5,7		5,7 – 8,8		8,8 – 11,1		≥ 11,1			
	(%)	Abs	(%)	Abs	(%)	Abs	(%)	Abs	(%)	Abs	(%)	Abs	(%)	Abs
NORTE	0,091	24	0,095	25	0,027	7	0,000	0	0,000	0	0,000	0	0,21	56
NORTE-NORDESTE	0,095	25	0,259	68	0,358	94	0,019	5	0,000	0	0,000	0	0,73	192
NORDESTE	0,198	52	1,499	394	1,518	399	0,183	48	0,000	0	0,000	0	3,40	893
LESTE-NORDESTE	0,282	74	3,292	865	4,018	1056	0,232	61	0,000	0	0,000	0	7,82	2056
ESTE OU LESTE	0,308	81	4,151	1091	8,132	2137	0,460	121	0,000	0	0,000	0	13,05	3430
ESTE-SUDESTE	0,255	67	4,311	1133	12,112	3183	2,116	556	0,000	0	0,000	0	18,79	4939
SUDESTE	0,308	81	2,744	721	12,002	3154	4,985	1310	0,027	7	0,000	0	20,06	5273
SUL-SUDESTE	0,247	65	1,488	391	5,373	1412	4,692	1233	0,099	26	0,000	0	11,90	3127
SUL	0,457	120	1,385	364	2,877	756	2,846	748	0,030	8	0,000	0	7,60	1996
SUL-SUDOESTE	0,871	229	1,842	484	1,355	356	0,605	159	0,000	0	0,000	0	4,67	1228
SUDOESTE	1,438	378	2,314	608	0,491	129	0,011	3	0,000	0	0,000	0	4,25	1118
OESTE-SUDOESTE	1,176	309	1,092	287	0,171	45	0,000	0	0,000	0	0,004	1	2,44	642
OESTE	0,487	128	0,308	81	0,015	4	0,000	0	0,000	0	0,000	0	0,81	213
OESTE-NOROESTE	0,377	99	0,194	51	0,004	1	0,000	0	0,000	0	0,000	0	0,57	151
NOROESTE	0,457	120	0,392	103	0,050	13	0,000	0	0,000	0	0,000	0	0,90	236
NORTE-NOROESTE	0,289	76	0,206	54	0,034	9	0,004	1	0,000	0	0,000	0	0,53	140
subtotal	7,336	1928	25,57	6720	48,535	12755	16,153	4245	0,156	41	0,004	1	97,75	25690
calmaria	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,20	578
Dados Ausentes	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,05	12
Total	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100,00	26280
Frequência absoluta de ocorrência - Abs; Frequência relativa de ocorrência - %														

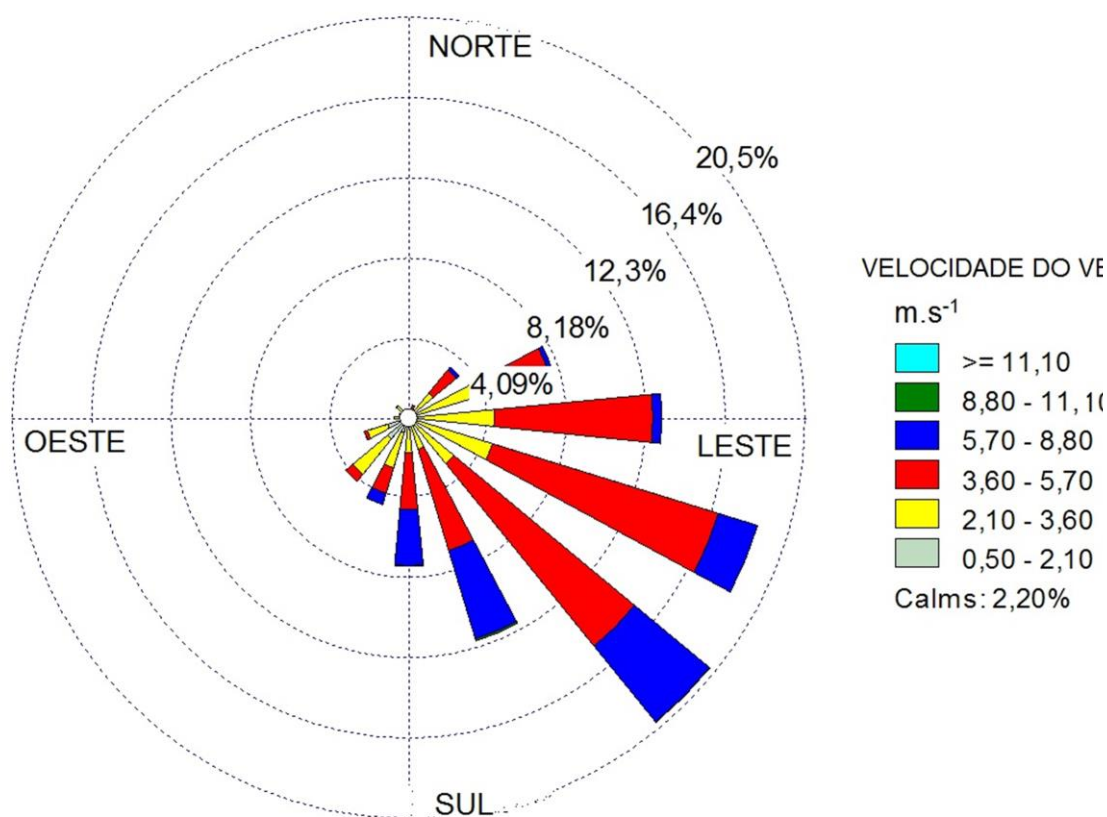
Frequência absoluta de ocorrência - Abs; Frequência relativa de ocorrência - %

FONTE: Oliveira, 2015.

Pode-se observar na TABELA 20 que os dados meteorológicos, correspondentes ao período de 2013 a 2015, produziram um total de 26.280 horas de dados. Os resultados demonstraram três predominâncias de direção de vento: a primeira direção é a sudeste com frequência de 20,06% do total das observações, soprando na faixa de velocidades médias entre 3,6 a 5,7 $m.s^{-1}$; a segunda direção é a este-sudeste com frequência de 18,79% do total das observações, soprando na faixa de velocidades entre 2,1 a 3,6 $m.s^{-1}$; e a terceira direção é a leste com frequência de 13,05% do total das observações, soprando na faixa de velocidades entre 3,6 e 5,7 $m.s^{-1}$. A calmaria média anual do período sobre a região é de 2,2%, sendo a velocidade média anual de 3,96 $m.s^{-1}$.

O processamento dos dados meteorológico da estação do Aeroporto Internacional do Recife também produziu o gráfico das rosas dos ventos, apresentado na FIGURA 30.

Figura 30 – Rosa dos ventos, período de 01/01/2013 a 31/12/2013, obtida a partir dos dados da estação meteorológica do Aeroporto Internacional do Recife.



FONTE: Oliveira, 2017.

A frequência de ocorrência para velocidades acima de $8,80 \text{ m.s}^{-1}$ ou as $0,50$ a $2,10 \text{ m.s}^{-1}$ são muito baixas e, por isso, não ficam visíveis nas rosas dos ventos.

Pode-se observar na rosa dos ventos (FIGURA 30) que as direções predominantes são de sudeste, este-sudeste e de leste, mostrando que o vento sopra a maior parte do tempo do oceano para o continente, o que caracteriza o domínio da brisa marítima sobre a região do Porto de Suape. Portanto, os resultados sugerem que essa área está propensa a condições de ventilação favorável a dispersão de poluentes, uma vez que a ocorrência de ventos mais intensos está associada a esse fenômeno.

Estes resultados estão de acordo com os estudos alcançados por Benlefki, Douaiba e Abbles (2015), que estudaram a dinâmica da brisa marinha sobre a atmosfera de Oran (Argélia), mostrando que a atuação desse fenômeno foi responsável em produzir ventos mais intensos de até 6 m.s^{-1} .

Carvalho *et al.* (2012) também relacionou a diminuição da concentração de ozônio sobre a Região Metropolitana de São Paulo com a atuação da brisa marítima, uma vez que esse fenômeno foi capaz de produzir ventos mais intensos. Adicionalmente, nos períodos em que os pesquisadores registram ventos fracos foi verificada a formação de altas concentrações de ozônio sobre a região.

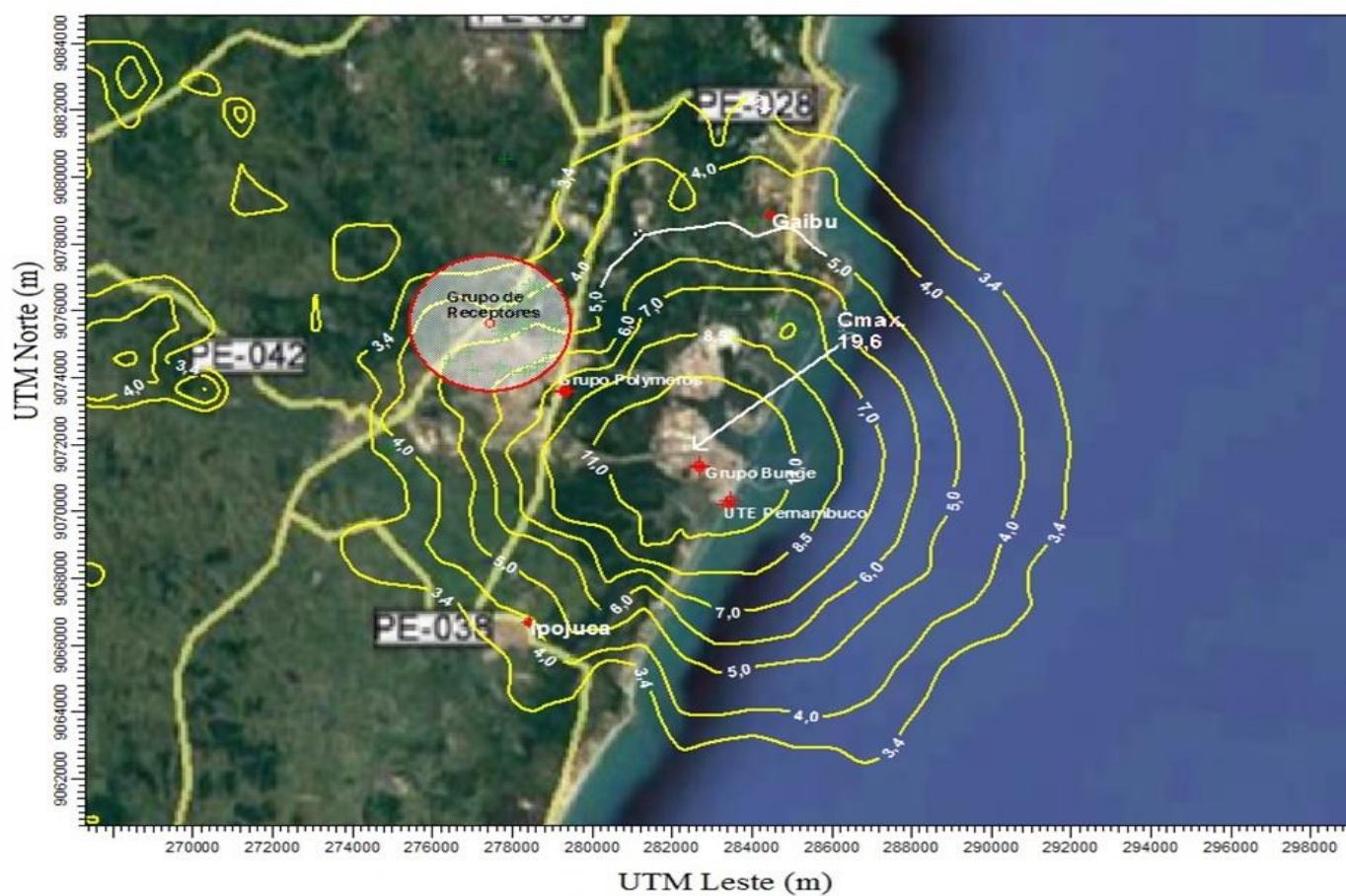
No entanto, os resultados obtidos por González e Rodríguez (2013) mostraram que a brisa marítima pode tanto contribuir para a uma redução quanto para um aumento nas concentrações de poluentes atmosféricos sobre uma determinada região. De acordo com os referidos autores, a brisa marítima, ao produzir ventos mais intensos, favorece a diminuição das concentrações de poluentes atmosféricos. Mas, podem colaborar também para um aumento nos níveis de concentrações de poluentes quando as fontes de emissão ficam próximas a costa. Esses pesquisadores observaram um aumento na concentração de dióxido de enxofre devido ao transporte, pela brisa marinha, da pluma desse poluente originados das emissões de navios e de uma refinaria localizados próximas a área costeira, ocasionado o acúmulo de dióxido de enxofre na região estudada.

4.3 CONCENTRAÇÕES DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS OBTIDOS PELO SISTEMA DE MODELAGEM AERMOD

4.3.1 Fontes pontuais

A partir do processamento dos dados relativo aos parâmetros físicos e de exaustão das chaminés e das taxas de emissão dos poluentes atmosféricos, relacionadas a essas fontes, além dos dados meteorológicos e topográficos da região do Porto de Suape, obteve-se os mapas das isoconcentrações NO₂ (média de 1 hora), NO₂ (média anual), SO₂ (média de 24 horas), SO₂ (média anual), MP₁₀ (média de 24 horas), MP₁₀ (média anual), CO (média de 1 hora), CO (média de 8 hora), apresentados nas FIGURAs 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37 e 38 respectivamente.

FIGURA 31 – Mapa das isoconcentrações de NO_2 , média de 1 hora, concentração máxima obtida de $19,60 \mu\text{g.m}^{-3}$. Padrão primário da qualidade do ar para NO_2 , média de 1 hora, igual a $320 \mu\text{g.m}^{-3}$ - Resolução CONAMA N°03/1990.



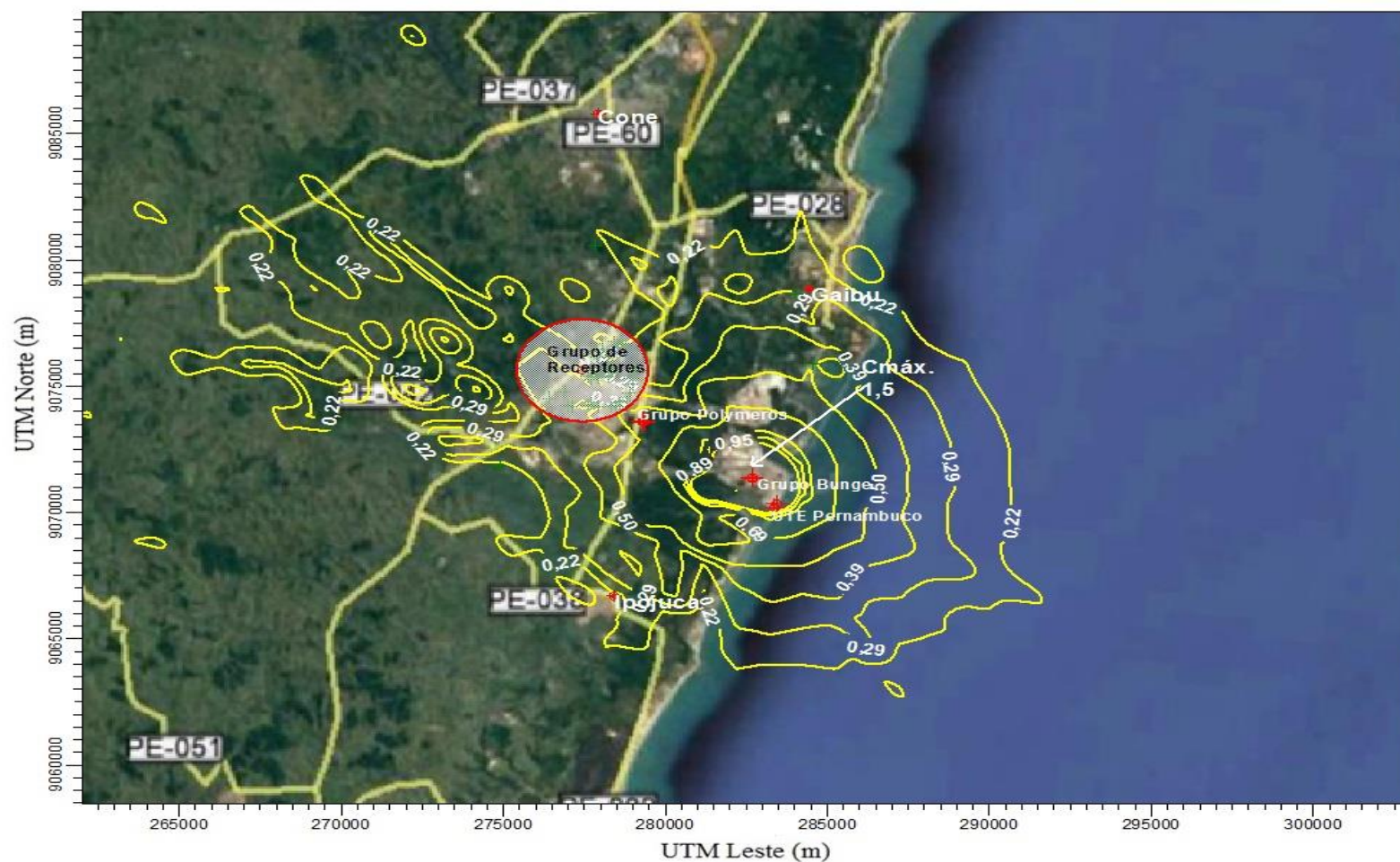
FONTE: Elaborado pelo autor

FIGURA 39 – Mapa das isoconcentrações de NO_2 , média de anual, concentração máxima obtida de $1,08 \mu\text{g.m}^{-3}$. Padrão primário da qualidade do ar para NO_2 , média anual, igual a $100 \mu\text{g.m}^{-3}$ - Resolução CONAMA N°03/1990.



FONTE: Elaborado pelo autor

FIGURA 33 – Mapa das isoconcentrações de SO_2 , média de 24 horas, concentração máxima obtida de $1,50 \mu\text{g}.\text{m}^{-3}$. Padrão primário da qualidade do ar para SO_2 , média de 24 horas igual a $365 \mu\text{g}.\text{m}^{-3}$ - Resolução CONAMA N°03/1990.



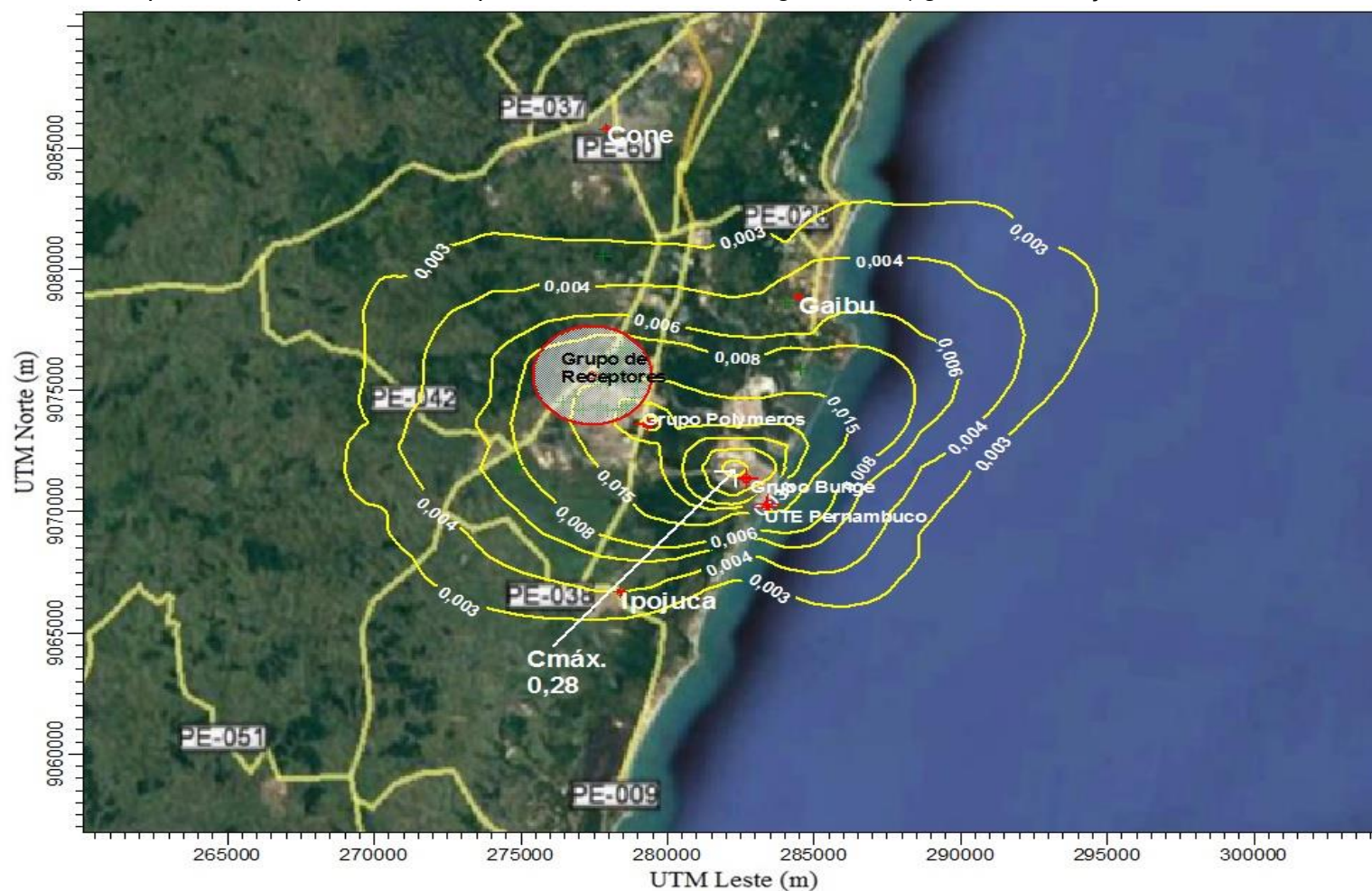
FONTE: Elaborado pelo autor

FIGURA 34 - Mapa das isoconcentrações de SO₂, média anual, concentração máxima obtida de 0,10 µg.m⁻³. Padrão primário da qualidade do ar para SO₂, média anual, igual a 80 µg.m⁻³ - Resolução CONAMA N°03/1990.



FONTE: Elaborado pelo autor

FIGURA 36 – Mapa das isoconcentrações de MP_{10} , média anual, concentração máxima obtida de $0,28 \mu g.m^{-3}$
Padrão primário da qualidade do ar para MP_{10} , média anual, igual a $150 \mu g.m^{-3}$ - Resolução CONAMA N° 03/1990



FONTE: Elaborado pelo autor

FIGURA 38 – Mapa das isoconcentrações de CO, média de 8 horas, concentração máxima obtida de $1,73 \mu\text{g.m}^{-3}$
Padrão primário da qualidade do ar para CO, média de 8 horas, igual a $10.000 \mu\text{g.m}^{-3}$ - Resolução CONAMA N° 03/1990



FONTE: Elaborado pelo autor

Pode-se observar nas FIGURAS 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37 e 38 que concentrações de NO₂ (média de 1 hora), NO₂ (média anual), SO₂ (média de 24 horas), SO₂, (média anual), MP₁₀ (média de 24 horas), MP₁₀ (média anual), CO (média de 1 hora), CO (média de 8 hora), geradas pelos grupos de fontes de emissão pontuais, considerados neste estudo, resultarem em concentrações muito baixas em todo o domínio da modelagem.

As concentrações máximas de NO₂, SO₂, MP₁₀ e CO, estimadas pelo modelo AERMOD para o grupo de receptores específicos (Zona de Comércio e Serviços, Massangana I, Massangana II-Vila dois irmãos), localizados próximos a Zona Industrial Portuária, são mostrados nas Tabelas 21, 22, 23 e 24, respectivamente.

TABELA 21 – Concentração máxima de NO₂, média de 1 hora, localizadas nos pontos receptores.

Áreas localizadas no Porto de Suape	Código do ponto receptor	Coordenadas geográficas UTM		Concentração de NO ₂ (média de 1h) (µg/m ³)
		X (m)	Y(m)	
Zona de comércio e serviço	8	276900,73	9074765,73	4,79
	9	276423,65	9074519,50	5,11
	10	276988,20	9074234,75	6,22
	11	277118,98	9074190,21	6,38
	12	277617,87	9074254,46	6,23
Massagana I	1	278665,04	9076640,90	3,76
	2	278678,28	9076694,87	3,48
	3	278409,41	9076784,26	3,72
	4	278069,41	9076474,17	3,47
	5	277771,89	9076392,69	3,32
Massangna II – Vila dois irmãos	9	278375,87	9075672,20	4,70
	10	278306,64	9075757,62	4,50
	11	227707,75	9075595,37	5,08
	12	277635,54	9075383,62	4,01
	13	277721,28	9072249,38	3,76

FONTE: Elaborado pelo autor.

TABELA 22 – Concentração máxima de SO₂, média de 24 horas, localizadas nos pontos receptores.

Áreas localizadas no Porto de Suape	Código do ponto receptor	Coordenadas geográficas UTM		Concentração de SO ₂ (média de 24 horas) (µg/m ³)
		X (m)	Y(m)	
Zona de comércio e serviço	8	276900,73	9074765,73	0,05
	9	276423,65	9074519,50	0,04
	10	276988,20	9074234,75	0,06
	11	277118,98	9074190,21	0,09
	12	277617,87	9074254,46	0,08
Massagana I	1	278665,04	9076640,90	0,04
	2	278678,28	9076694,87	0,04
	3	278409,41	9076784,26	0,04
	4	278069,41	9076474,17	0,03
	5	277771,89	9076392,69	0,03
Massangna II – Vila dois irmãos	9	278375,87	9075672,20	0,05
	10	278306,64	9075757,62	0,04
	11	227707,75	9075595,37	0,05
	12	277635,54	9075383,62	0,05
	13	277721,28	9072249,38	0,05

FONTE: Elaborado pelo autor.**TABELA 23** – Concentração máxima de MP₁₀, média de 24 horas, localizadas nos pontos receptores.

Áreas localizadas no Porto de Suape	Código do ponto receptor	Coordenadas geográficas UTM		Concentração de PM (média de 24 horas) (µg/m ³)
		X (m)	Y(m)	
Zona de comércio e serviço	8	276900,73	9074765,73	0,50x10 ⁻²
	9	276423,65	9074519,50	0,40x10 ⁻²
	10	276988,20	9074234,75	0,50x10 ⁻²
	11	277118,98	9074190,21	0,50x10 ⁻²
	12	277617,87	9074254,46	0,70x10 ⁻²
Massagana I	1	278665,04	9076640,90	0,60x10 ⁻²
	2	278678,28	9076694,87	0,60x10 ⁻²
	3	278409,41	9076784,26	0,40x10 ⁻²
	4	278069,41	9076474,17	0,20x10 ⁻²
	5	277771,89	9076392,69	0,20x10 ⁻²
Massangna II – Vila dois irmãos	9	278375,87	9075672,20	0,30x10 ⁻²
	10	278306,64	9075757,62	0,30x10 ⁻²
	11	227707,75	9075595,37	0,40x10 ⁻²
	12	277635,54	9075383,62	0,30x10 ⁻²
	13	277721,28	9072249,38	0,30x10 ⁻²

FONTE: Elaborado pelo autor.

TABELA 24 – Concentração máxima de CO, média de 1 hora, localizadas nos pontos receptores

Áreas localizadas no Porto de Suape	Código do ponto receptor	Coordenadas geográficas UTM		Concentração de CO (média de 1 hora) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
		X (m)	Y (m)	
Zona de comércio e serviço	8	276900,73	9074765,73	0,46
	9	276423,65	9074519,50	0,44
	10	276988,20	9074234,75	0,46
	11	277118,98	9074190,21	0,47
	12	277617,87	9074254,46	0,49
Massagana I	1	278665,04	9076640,90	0,44
	2	278678,28	9076694,87	0,44
	3	278409,41	9076784,26	0,42
	4	278069,41	9076474,17	0,41
	5	277771,89	9076392,69	0,40
Massangna II – Vila dois irmãos	9			0,44
		278375,87	9075672,20	
	10	278306,64	9075757,62	0,43
	11	227707,75	9075595,37	0,41
	12	277635,54	9075383,62	0,43
	13	277721,28	9072249,38	0,44

FONTE: Elaborado pelo autor.

Na TABELA 25 são mostrados os valores máximos das concentrações de NO_2 , SO_2 , MP_{10} e CO, obtidos pelo modelo AERMOD, na região do Porto de Suape.

TABELA 25 – Concentrações máximas de poluentes obtidas pelo modelo AERMOD para a região do Porto de Suape.

Médias	Modelo AERMOD (Concentração máxima, $\mu\text{g}.\text{m}^{-3}$)			
	NO_2	SO_2	MP_{10}	CO
Média de 1 hora	19,60			3,79
Média anual	1,08	0,10	0,28	
Média de 24 horas		1,50	1,74	
Média de 8 horas				1,73

FONTE: Elaborado pelo autor.

As baixas concentrações de NO_2 , SO_2 , MP_{10} e CO (Tabelas 21, 22, 23, 24, 25), originadas dos grupos de fontes pontuais, localizadas na Zona Industrial Portuária, estão associadas as reduzidas taxas de emissões desses poluentes. Conforme descrito na seção 4.1.1, ou seja, possivelmente, devido aos usos de gás natural e gás liquefeito de petróleo no processo de combustão.

Neste contexto, os resultados desta pesquisa estão de acordo com os alcançados por Kurmar et al. (2016), que utilizaram o modelo AERMOD para prever as concentrações dos poluentes NO_x e MP, considerando as emissões, provenientes de múltiplas fontes (chaminés), originadas de quatro indústrias, situadas em uma área industrial de Chembur (Mumbai). Os autores consideraram vários cenários de emissão para queimas de diferentes tipos de combustíveis. Eles constataram que, o uso de gás natural produziu as mais baixas concentrações de NO_x e MP, alcançando valores de 6,37 $\mu\text{g.m}^{-3}$ e 2,99 $\mu\text{g.m}^{-3}$, respectivamente, para média de 1 hora. Enquanto, as concentrações máximas de NO_x e MP foram de 21,38 $\mu\text{g.m}^{-3}$ e 13,19 $\mu\text{g.m}^{-3}$, respectivamente, para médias de 24 horas. De acordo com os pesquisadores a estimativa das concentrações de SO₂ não foi realizada porque os dados das taxas de emissão desse poluente não estavam disponíveis. Contudo, ressaltam que provavelmente, obteriam baixas concentrações de SO₂ devido ao uso de gás natural como fonte de combustão.

Pode-se observar nos mapas das isoconcentrações de NO₂ (média de 1 hora), NO₂ (média anual), SO₂ (média de 24 horas), SO₂, (média anual), MP₁₀ (média de 24 horas), MP₁₀ (média anual), CO (média de 1 hora), CO (média de 8 hora), FIGURAS 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38 respectivamente, que as concentrações máximas desses poluentes foram reduzidas a medida que se afastaram das fontes de emissão. Isso se deve a ação dos ventos que transportam e dilui as concentrações dos poluentes atmosféricos a partir das fontes. De acordo com os resultados obtidos do processamento meteorológico, seção 3.2, a região do Porto de Suape está propensa a condições de ventilação favorável a dispersão de poluentes. Os ventos mais intensos são de sudeste (3,6 a 5,7 m.s^{-1}).

Esses resultados estão de acordo com Boadl et al. (2015), os quais utilizaram o modelo AERMOD para estimar as concentrações de NO_x, originadas das chaminés de indústrias localizadas na zona costeira de Visakhapatnam (Índia). Os autores concluíram que velocidades de ventos mais altas proporcionaram a diluição das concentrações de NO_x a partir das fontes emissoras. Os pesquisadores registraram valores de velocidade do vento variando na faixa de 5 a 9 m.s^{-1} .

Além disso, constatou-se que as concentrações máximas NO_2 , SO_2 , MP e CO ocorreram na área central da área de domínio da modelagem, visto que estão mais próximas das fontes de emissão. Este fato também foi observado por Ma et al. (2013), os quais utilizaram o modelo AERMOD para simular a qualidade do ar em uma área industrial da China. Os autores observaram que as concentrações mais altas de SO_2 e NO_x também ocorreram na área central da área de domínio da modelagem, por ser localizado próximo a um grupo constituído de quatro empresas que emitiam esses poluentes. Não houveram simulações para MP e CO.

Por fim, pode-se observar na TABELA 26 as concentrações máximas de NO_2 , SO_2 , PM_{10} e CO, obtidas pelo Modelo AERMOD e os valores máximos das concentrações ambientais (padrões primários) desses poluentes estabelecidas na Resolução CONAMA N° 03/1990.

TABELA 26 – Comparação das concentrações máximas obtidas pelo modelo AERMOD na área de estudo com os padrões primários da qualidade do ar

Modelo AERMOD (Concentração máxima, $\mu\text{g.m}^{-3}$)		Padrão Primário da qualidade do ar definido pela Resolução CONAMA N°03/1990 (Concentração, $\mu\text{g.m}^{-3}$)	
19,60	NO ₂ (média de 1 hora)	320	NO ₂ (média de 1 hora)
1,08	NO ₂ (média anual)	100	NO ₂ (média anual)
1,50	SO ₂ (média 24 horas)	365	SO ₂ (média 24 horas)
0,10	SO ₂ (média anual)	80	SO ₂ (média anual)
1,74	MP ₁₀ (média 24 horas)	150	MP ₁₀ (média 24 horas)
0,28	MP ₁₀ (média anual)	50	MP ₁₀ (média anual)
3,68	CO (média de 1 hora)	40.000	CO (média de 1 hora)
1,68	CO (média de 8 horas)	10.000	CO (média de 8 horas)

FONTE: Elaborado pelo autor.

Os valores das concentrações máximas para NO₂, SO₂, MP₁₀ e CO, obtidas pelo modelo AERMOD (TABELA 26), considerado o impacto do grupo de fontes de emissão, considerados neste estudo, sendo estes localizados na Zona Industrial Portuária, não ultrapassaram os limites estabelecidos pelo padrão primário da qualidade do ar da Resolução CONAMA N° 03/1990. Portanto, os resultados evidenciam que esses grupos de emissão de poluentes atmosféricos não impactaram negativamente na qualidade do ar sobre a área do Porto de Suape.

4.3.2 Fontes evaporativas

A FIGURA 39 mostra o mapa das isoconcentrações dos compostos orgânicos voláteis para média de 1 hora.

FIGURA 39 – Mapa das isoconcentrações de COV (média de 1 hora). Concentração máxima obtida de $83.774 \mu\text{m}^{-3}$.



FONTE: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar na FIGURA 39 que a concentração máxima de compostos orgânicos voláteis, $83.775 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de 1 hora, considerando as emissões conjuntas de setenta e seis tanques de armazenamento, ocorreu na área central de domínio da modelagem, provavelmente por estarem próximas as fontes de emissão desses poluentes, onde as plumas podem conter quantidades mais elevadas de COV. Além disso, as concentrações máximas desses poluentes são reduzidas à medida que se afastam das fontes de emissão. Nos grupos receptores (FIGURA 39), constituídas por áreas destinadas a assentamentos habitacionais, escritórios e estabelecimentos comerciais, por exemplo, a concentração máxima de COV, média de 1 hora, foi de $450 \mu\text{g.m}^{-3}$. Uma possível explicação para esse fato seria, como descrito para os demais poluentes, pode estar relacionada a ação dos ventos que transportam e dilui as concentrações

dos poluentes atmosféricos a partir das fontes. Ressalta-se que, os resultados obtidos do processamento meteorológico, seção 4.2, para o Porto de Suape, indicam que a região está propensa a condições de ventilação favorável a dispersão de poluentes. Os ventos mais intensos foram de sudeste (3,6 a 5,7 m.s⁻¹), associados a ocorrência da brisa marítima.

A pesquisa realizada por Howari (2015), utilizou o programa *TANKS* versão 4.09 D para o cálculo das emissões de COV e o modelo AERMOD para simular a dispersão desse poluente em Sharjah, um dos sete territórios que integram os Emirados Árabes Unidos. O pesquisador estimou as emissões de COV, provenientes de quatro tanques de armazenamento: um de teto flutuante externo e três de teto flutuante interno. Os resultados mostraram que as concentrações de COV eram atenuadas com o tempo e a distância a partir da fonte e que a direção predominante do vento, na região de estudo, era de sudeste com velocidade alcançando 9 m.s⁻¹. Além disso, os valores estimados das concentrações de COV, pelo modelo AERMOD, atendiam aos limites da legislação federal desse território, que é de 20 mg.m⁻³ de COV no ar.

O trabalho de Howari, (2015) não faz referência se a concentração ambiental permitida para compostos orgânicos voláteis de 20 mg.m⁻³ ou 20.000 µg.m⁻³, adotada pelos territórios que integram os Emirados Árabes Unidos, seja relativa à média de 1 hora para a qualidade do ar ou se esse valor seja relativa a emissão a partir das fontes, de uma maneira geral. Portanto, não sendo possível a comparação dos resultados das concentrações de COV, obtidas neste trabalho, com a legislação estabelecida para os territórios que integram os Emirados Árabes Unidos.

Nos Estados Unidos os padrões da qualidade do ar são definidos para um grupo de poluentes constituídos por CO, SO₂, NO₂, MP_{2,5}, MP₁₀, O₃ e chumbo (USEPA, 2010). Portanto, os COV não são incluídos nesse grupo. Porém, conforme estabelecido na legislação americana, “Code of Federal Regulamentation, 40: Chapter I: Emission standards for hazardous air pollutants for categories source, Unites States Environemntal Agency Protection, 2009”, existe uma lista composta de mais 90 poluentes, denominados poluentes atmosféricos perigosos ou “tóxicos do ar”, reconhecidos como aqueles que podem causar câncer e outros impactos à saúde humana, como o benzeno,

etilbenzeno, tolueno e xilenos. A USEPA regulamenta os tóxicos do ar a partir de categorias de fontes (ex: terminais e refinarias) que operam com a distribuição de líquidos orgânicos voláteis. Entende-se por distribuição um conjunto de atividades que envolve armazenamento em tanques, transferência (entrada e saída) do líquido no tanque, carregamento de caminhões, inclusive componentes de tubulações (válvulas, flanges, bombas, conexões) que tem o potencial para vazamento. Por exemplo, para instalações que operam com líquidos orgânicos voláteis, com pressão verdadeira de $\geq 27,6$ kPa e $< 76,6$ kPa, armazenados em tanques com capacidade $\geq 18,9$ m³ e $< 189,3$ m³, deverão reduzir as emissões em 95% em peso de qualquer “tóxico do ar” ou mistura desses.

De acordo com essa norma americana sobre “tóxicos do ar, líquidos orgânicos voláteis são aqueles que contém pelo menos 5% em peso ou maior de qualquer líquido ou combinação de líquidos classificado como “tóxico do ar”. Cabe ressaltar que estão excluídos da denominação de líquidos orgânicos voláteis, produtos como gasolina, diesel, querosene, os quais são denominados de líquidos de petróleo. No entanto, há um controle de componentes existentes nos COV, como o benzeno, que podem ser encontrados na gasolina e no diesel, por exemplo.

De acordo com Javanovic et al. (2010), um dos motivos que levaram a modernização dos tanques da Refinaria de Pancevo (Sérvia) foi a presença de altos níveis de benzeno (100 $\mu\text{g.m}^{-3}$) nas áreas urbanas próximas a refinaria. Neste contexto, após a modernização dos tanques, a concentração de benzeno foi reduzida para 4,00 $\mu\text{g.m}^{-3}$.

A legislação Europeia, Diretiva 94/63/CE do parlamento Europeu e do Conselho, de 20 de dezembro de 1994, relativa ao controle e emissões de compostos orgânicos voláteis resultantes do armazenamento de gasolina e da sua distribuição em terminais para as estações de serviço, também estabelece o controle de COV na fonte. Por exemplo, para terminais, cuja instalação de armazenamento de gasolina seja superior a 25.000 toneladas.ano⁻¹, alguns requisitos para controle das emissões de COV são seguintes:

a) Os tanques de flutuante externo devem ser equipados com um sistema de

vedação primária, que ocupe o espaço anular entre a parede do reservatório e a periferia do teto flutuante, e com um sistema de vedação secundário instalado acima do primeiro. Os sistemas de vedação deverão ser concebidos de modo a efetuarem uma retenção total de pelo menos 95 % dos vapores quando comparado a um tanque de teto fixo sem qualquer sistema de contenção de vapores (ou seja, um tanque de teto fixo munido apenas de uma válvula de redução de pressão/vácuo);

b) Os tanques verticais de teto fixo devem estar ligados à unidade de recuperação de vapores;

c) Os tanques de armazenamento de teto flutuante, interno ou externo, devem ser equipado com sistemas de vedação primário e secundário;

d) Dispor de um teto flutuante interno equipado com um sistema de vedação primário concebido de modo a efetuar uma contenção total de pelo menos 95 % dos vapores, quando comparado ao tanque de teto fixo sem qualquer sistema de contenção dos vapores.

O total de 76 tanques, utilizados nesta pesquisa, para calcular as emissões de COV, não possui sistema de recuperação de vapores.

Cabe ressaltar que, devido à escassez de publicações disponíveis em www.periodicos.capes.gov.br, relacionados a existência de padrões de COV para a qualidade do ar, não foi possível, para este trabalho, continuar com uma análise mais crítica e detalhada sobre o tema.

Possivelmente, à escassez de publicações relativa a inclusão de COV como um padrão para a qualidade do ar, pode estar relacionada a composição desse poluente. Os COV constituem um grupo diversificado de compostos químicos e isso pode dificultar a realização de uma análise de risco à saúde humana associada a estudos epidemiológicos, que são normalmente ferramentas utilizadas para definir padrões da qualidade do ar e, desse modo, determinar quais as concentrações de COV no ar ambiente possam afetar a saúde da população exposta, com certa margem de segurança.

4.3.3 Comparação entre as concentrações calculadas e medidas

A TABELA 27 e a TABELA 28 apresentam as concentrações de NO₂, SO₂, MP₁₀ e CO, média de 1 hora, calculada pelo sistema de modelagem AERMOD, mostrando as datas e as horas em que tais concentrações ocorreram e aquelas medidas nas estações de monitoramento da qualidade do ar localizadas em Ipojuca e Gaibu.

TABELA 27 - Comparação entre as concentrações de poluentes calculadas com as medidas na Estação de monitoramento GAIBU – Coordenadas UTM (X (mE) = 284553,9; Y (mN) = 9078798).

Poluente	Modelo AERMOD Média 1h ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Medidas na estação de monitoramento. Média 1h ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Data/hora
NO ₂	5,50	5,70	25/07/2015-06h
SO ₂	$2,16 \times 10^{-2}$	5,25	25/07/2015-24h
MP ₁₀	$13,08 \times 10^{-2}$	18,00	25/07/2015-24h
CO	$47,58 \times 10^{-2}$	265	04/09/2015-07h

FONTE: Elaborado pelo autor.

TABELA 28- Comparação entre as concentrações de poluentes calculadas com as medidas na Estação de monitoramento IPOJUCA – Coordenadas UTM (X (mE) = 278410,3; Y (mN) = 9066696,5).

Poluente	Modelo AERMOD Média 1h ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Medidas na estação de monitoramento. Média 1h ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Data/hora
NO ₂	3,15	1,48	22/11/2015-21h
SO ₂	$13,47 \times 10^{-2}$	Sem dados na estação nessa data	22/12/2015-24h
MP ₁₀	$93,60 \times 10^{-2}$	Sem dados na estação nessa data	22/12/2015- 24h
CO	$57,52 \times 10^{-2}$	253	17/11/2015-07h

FONTE: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar na TABELA 27 e na TABELA 28, que as concentrações de NO₂, SO₂, MP₁₀, CO, média de 1 hora, calculadas pelo modelo sistema de

modelagem AERMOD são mais baixas quando comparadas as concentrações medidas nas estações de monitoramento da qualidade do ar de Gaibu e Ipojuca.

A diferença entre os resultados calculados pelo sistema de modelagem AERMOD e as concentrações medidas nas estações de monitoramento da qualidade do ar, pode ser justificada pelo fato de que as concentrações estimadas pelo sistema de modelagem AERMOD considerou apenas as emissões de dez fontes pontuais, localizadas na Zona Industrial Portuária, enquanto que as concentrações medidas nas estações de monitoramento da qualidade do ar podem captar contribuições de outras fontes de emissão desses poluentes, tais como veiculares, navios e demais indústrias do Porto de Suape.

Alhaddad, Ettouney e Saquer (2015) utilizaram o sistema de modelagem AERMOD para avaliar as concentrações de vários poluentes atmosféricos, incluindo SO_2 , CO nas vizinhanças de refinarias localizadas no Kuwait. As concentrações estimadas pelo sistema de modelagem AERMOD foram mais baixas do que aquelas medidas em campo. Os pesquisadores atribuíram esse efeito a ocorrência de outras fontes existentes na área de estudo, tais como termoeletrica e de tráfego veicular.

Não foi possível realizar a comparação das máximas concentrações dos poluentes, calculadas pelo modelo AERMOD, com aquelas medidas na estação de monitoramento da qualidade do ar denominada “cone”, visto que para horas e datas em que o modelo AERMOD encontrou as concentrações máximas, não haviam dados disponíveis na referida estação.

Cabe ressaltar que as concentrações dos poluentes, constantes nas Tabelas 27 e 28, estimadas pelo modelo AERMOD, referem-se as máximas concentrações, média de 1 hora, que ocorreram em um data e hora específica, as quais estavam disponíveis para realizar uma comparação com registros desses poluentes, média de 1 hora, nas mesmas datas e hora medidas nas estações de monitoramento da qualidade do ar, instaladas em Gaibu e Ipojuca, as quais começaram a operar em maio de 2015. Portanto, faz se necessário realizar um estudo, que possa validar o modelo AERMOD para a região do Porto de Suape, utilizando pelo menos um ano de dados medidos nas estações e métodos estatísticos de validação de modelos da qualidade do ar.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou o impacto das principais fontes antropogênicas de emissão NO_2 , SO_2 , MP_{10} , CO e COV da Zona Industrial Portuária, sobre a qualidade do ar do Porto de Suape, obtendo-se as seguintes conclusões:

- Baixas taxas de emissão de $\text{NO}_2 < 7,8 \text{ g.s}^{-1}$ (NO_x , expresso como NO_2), $\text{SO}_2 < 0,04 \text{ g.s}^{-1}$ (SO_x expresso como SO_2), $\text{MP}_{10} < 0,09 \text{ g.s}^{-1}$ (MP , expresso como MP_{10}) e $\text{CO} < 2,30$, foram verificadas para um grupo de fontes compostas por dez chaminés, e, podem estar associadas ao tipo de combustível utilizado no processo de combustão. Constatou-se que 70% das empresas utilizam gás natural e, 30% gás liquefeito de petróleo para essa finalidade. Esses combustíveis, com baixo teor de enxofre reduzem a emissão de SO_x , e se acompanhados de uma queima controlada, podem produzir baixas emissões de NO_x e de material particulado. Além disso, um processo eficiente de combustão também diminui a emissão de monóxido de carbono;
- O Programa *TANKS* versão 4.09 D, desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency* – USEPA, utilizado para a estimativa das emissões de compostos orgânicos voláteis (COV), provenientes de 76 tanques de armazenamento dos quais 55 são do tipo vertical de teto fixo e 21 do tipo teto flutuante interno. As emissões anuais totais de COV foram de $580,54 \text{ t.ano}^{-1}$, dos quais $544,39 \text{ t.ano}^{-1}$ foram originados de tanque de teto fixo e $16,15 \text{ t.ano}^{-1}$, dos tanques de teto flutuante interno. Portanto, os resultados indicaram que as emissões anuais de COV , originadas desses últimos, são muito inferiores, representando apenas 2,76% do total das emissões;
- As concentrações máximas estimadas pelo sistema de modelagem AEREMOD de NO_2 ($19,60 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de 1 hora), NO_2 ($1,08 \mu\text{g.m}^{-3}$,

média de anual), SO_2 ($1,50 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de 24 horas), SO_2 ($0,10 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de anual), MP_{10} ($1,74 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de 24 horas), MP_{10} ($0,28 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de anual), CO ($3,68 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de 1 hora), CO ($1,68 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de 8 horas), a partir das fontes pontuais de emissão, não ultrapassaram os padrões primários da qualidade do ar, estabelecidos pela Resolução CONAMA N°03/1990: NO_2 ($320 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de 1 hora), NO_2 ($100 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de anual), SO_2 ($365 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de 24 horas), SO_2 ($80 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de anual), MP_{10} ($150 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de 24 horas), MP_{10} ($50 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de anual), CO ($40.000 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de 1 hora), CO ($10.000 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de 8 horas). Além disso, os resultados obtidos do processamento meteorológico para o Porto de Suape, indicam que a região está propensa a condições de ventilação favorável a dispersão de poluentes. Os ventos mais intensos foram de sudeste ($3,6$ a $5,7 \text{ m.s}^{-1}$), associados a ocorrência da brisa marítima. Portanto, os resultados evidenciam que esses grupos de emissão de poluentes atmosféricos não impactaram negativamente a qualidade do ar sobre a área do Porto de Suape.

- A concentração máxima de compostos orgânicos voláteis, $83.775 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de 1 hora, estimada pelo modelo AERMOD, considerando as emissões conjuntas de setenta e seis tanques de armazenamento, ocorreu próxima as fontes de emissão, provavelmente, onde as concentrações de COV são mais elevadas. Nas áreas destinadas a assentamentos habitacionais, escritórios e estabelecimentos comerciais, nas proximidades da Zona Industrial Portuária, a concentração máxima de COV, média de 1 hora, foi de $450 \mu\text{g.m}^{-3}$. Devido à escassez de publicações relativa a inclusão de COV como um padrão para a qualidade do ar não foi possível avaliar o impacto das fontes de emissão de COV sobre a qualidade do ar no Porto de Suape.
- As concentrações de $5,50 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de 1 hora, de NO_2 (NO_x expresso como NO_2), $2,16 \times 10^{-2} \mu\text{g.m}^{-3}$, média de 1 hora, de SO_2 (SO_x

expresso como SO_2), $13,08 \cdot 10^{-2} \mu\text{g.m}^{-3}$, média de 1 hora MP_{10} (MP, expresso como MP_{10}) e $47,58 \cdot 10^{-2} \mu\text{g.m}^{-3}$ de CO, média de 1 hora, estimadas pelo sistema de modelagem AERMOD foram mais baixas do que aquelas medidas na estação de monitoramento da qualidade do ar (Gaibu): $5,70 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de 1 hora, de NO_2 (NO_x expresso como NO_2), $5,25 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de 1 hora, de SO_2 (SO_x expresso como SO_2), $18,00 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de 1 hora MP_{10} (MP, expresso como MP_{10}) e $265 \mu\text{g.m}^{-3}$, média de 1 hora, de CO. A mesma ocorrência foi verificada para a estação Ipojuca.

5.2 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar o modelo AERMOD para estimar as concentrações de NO_2 , SO_2 , PM_{10} e CO, considerando todas as fontes pontuais, localizadas no Porto de Suape e comparar com os dados medidos nas estações de monitoramento da qualidade do ar;
- Realizar uma análise comparativa das concentrações de NO_2 , SO_2 , PM_{10} e CO, estimadas pelo modelo AERMOD, com aquelas medidas nas estações de monitoramento da qualidade do ar, a partir da avaliação de índices estatísticos, tais como: desvio médio fracional, erro médio quadrático normalizado e fator de dois, este último muito utilizado para validar modelos da qualidade do ar;
- Estudar a influência da brisa marítima e da topografia sobre a qualidade do ar no Porto de Suape.
- Identificar e quantificar, na Zona Industrial Portuária ou no Porto de Suape, os compostos orgânicos voláteis mais abundantes e reativos, ou seja, que contribui como precursores de ozônio;

- Quantificar, na Zona Industrial Portuária ou no Porto de Suape, a concentração de benzeno a partir das emissões de compostos orgânicos voláteis;
- Estudar padrões de emissão de benzeno, a partir das fontes de emissão de compostos orgânicos voláteis;
- Aplicar a metodologia deste trabalho em outros portos do Brasil.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA CONDEPE/FIDEM. Diretrizes para ocupação sustentável do Território Estratégico de Suape. **Governo de Pernambuco**, 2008.
- ALHADDAD, A.; ETTOUNCY, H.; SAQUER, S. Analysis of air pollutants emission patterns in the vicinity of oil refinery in Kuwait. **Journal of Engineering Research**, v.3, n.1, p.1-24, 2015.
- ARYA, S.P. Introduction to micrometeorology, 2 ed. San Diego. California: **Academic Press**, 2001. 300p.
- BAIRD, Colin. Química Ambiental. 2.ed. Porto Alegre: **Bookman**, 2002. 622p.
- BARBON, A.; GOMES, J. Simulação das Emissões Atmosféricas sobre o Município de Araucária com uso do Modelo AERMOD. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.15 n.2, p. 129-140, 2010.
- BARRY, ROGER G.; CHORLEY, RICHARD J. Atmosfera, tempo e clima. 9ª. Ed, Porto Alegre: **Bookman**, 2013, 512p.
- BENLEKFI, A.; DOUAIBA, B.; ABBES, A. A sea breeze numerical simulation and circulation analysis in Oran, Algeria, Urban Atmosphere. **Journal of Urban and Environmental**, v.9, n.2, p.139-145, 2015.
- BOADH, R.; SATYANARAYANA, A.N.V; RANA KRISHNA, T.V.B.P.S; MADALA, S. Sensitivity of PBL parameterization schemes of Weather Research Forecasting Model and coupling with AERMOD in the dispersion of NOX over Visakhapatnam (India). Asia-Pacific **Journal of chemical engineering**, v.10, p.356-369, 2015
- BRASIL Agência Nacional do Petróleo. Resolução nº 19 de 15 de abril de 2015. **Brasília**, DF.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo. Resolução nº 40 de 25 de outubro de 2013. **Brasília**, DF.

BRASIL Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, **Senado**, 1998.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 03, de 28 de junho de 1990. **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**, Brasília, DF, 1990.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 05, de 15 de junho de 1989. **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**, Brasília, DF, 1989.

BRASIL Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 436, de 22 de dezembro de 2011. **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**, Brasília, DF, 2011.

BRASIL. Política Nacional do Meio Ambiente. Lei nº 6.938, de agosto de 1981. **Brasília**, DF, 1981.

BRASIL Ministério dos Transportes. Resolução nº 2650, de 26 de setembro de 2012. **Agência Nacional de Transporte Aquaviário (ANTAQ)**, Brasília, DF, 2012.

BUENO, F.F; FONSECA, A.R; BRAGA, F.A; MIRANDA, S.C. Qualidade do ar e internações por doenças respiratórias em crianças no município de Divinópolis, Estado de Minas Gerais. **Acta Scientiarum. Health Sciences**, 2010, n.2, p.185-189, 2010.

CALIJURI, Maria do Carmo; CUNHA, Davi Gasparini Fernandes. Engenharia Ambiental: Conceitos, tecnologia e gestão. Rio de Janeiro: **Elsevier**, 2013. 789p.

CARVALHO, V.S.B; FREITAS, E.D; MAZZONI, C.R; ANDRADE, M.F. Avaliação da influência de condições meteorológicas na ocorrência e manutenção de um episódio prolongado com altas concentrações de ozônio sobre a região metropolitana de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.4, p.463-474, 2012.

CASTNER, J.; GITERRE, S.; SEO, J.Y. Criteria Air Pollutants and Emergency Nursing. **Journal of Emergency Nursing**, v.4, n.3, p.186-192, 2015.

CHEREMISINOFF, NICHOLAS P.; ROSENFELD, PAUL E. Handbook of Pollution Prevention and Cleaner Production Vol. 2: Best Practices in the Wood and Paper Industries, ed. **Revisada. New York: WILLIAM ANDREW**, 2009. p.368.

CIMORELLI, A.J; PERRY, S.G; VENKATRAM, A.; WELL, J.C; PAINE, R.J; WILSON, R.B; LEE, R.F.; PETERS, W.D; BRODE, R.W.; PAUMIER, J.O. (2004). AERMOD: Description of model formulations, **US Environmental Protection Agency**, EPA Report Nº 454/R-03-002d, 85.p

CLAÚDIA, A. Pressão atmosférica, massas de ar, precipitação e ventos. Disponível em: <<http://www.coladaweb.com/geografia/pressao-atmosferica-massas-de-ar-precipitacao-e-ventos>>. Acesso em: 09 de julho.2017.

COOPER, C. David; ALLEY, F.C. Air pollution control. Fourth Edition. 5.ed. Illions: **Weveland Press**, 2011, 839 p.

DE MORAES, A. C. L; IGNOTTI, E.; JACOBSON, L. S. V.; HACON., S. S.; NETTO, P.A.; CASTRO, H. Wheezing in children and adolescents living next to a petrochemical plant in Rio Grande do Norte, Brazil. **Jornal de Pediatria**, v.86, n.4, p.337-344, 2010.

DIRECTIVA 2004/42/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO, de 21 de abril de 2004 Relativa à limitação de emissões de compostos

orgânicos voláteis resultantes da utilização de solventes orgânicos em determinadas tintas e vernizes e em produtos de retoque e que altera a Directiva 1999/13/CE. **Jornal Oficial da União Europeia**, 2004.

DERÍSIO, J.C. Introdução ao Controle da Poluição Ambiental. 4. ed. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2016. 164p.

DON LEE, H.; WOO YOO, J.; KYOUNG KANG, M.; SOON KANG, J.; HYUN JUNG, J.; JOONG OH, K. Evaluation of concentrations and source contribution of PM₁₀ and SO₂ emitted from industrial complexes in Ulsan, Korea: Interfacing of the WRF-CALPUFF modeling tools. **Atmospheric Pollution Research**, v. 5, p. 664-676, 2014.

ENVOLVERDE JORNALISMO & SUSTENTABILIDADE: Disponível em: <<http://envolverde.com.br/noticias/oms-poluicao-do-ar-mata-mais-de-seis-milhoes-de-pessoas-por-ano/>>. Acesso em: 10 de maio de 2013.

FARAH, Marcos Antônio. Petróleo e seus derivados: definição, constituição, aplicação, especificações, características de qualidade. Rio de Janeiro: **LTC**, 2013. 261p.

FARD, R.F; NADDAFI, K.; YUNESIAN, M.; NODEHI, R.N.; DEGHANI, M.H; HASSANVAND, M. S. The assessment of health impacts and external costs of natural gas-fired power plant of Qom. **Environmental Science e Pollution Research**, v.23, p.20922-20936, 2016.

FERREIRA, Arthur Gonçalves. Meteorologia prática. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2006.188p.

GOMES, J. Poluição atmosférica. 2ª. Ed. Porto: Publiindústria, **Edições Técnicas**, Ltda, 2010. 266 p.

GONZÁLEZ, Y; RODRÍGUEZ, S. A comparative study on the ultrafine

particles episodes induced by vehicle exhaust: A crude oil refiner and ship emissions. **Atmospheric Research**, p. 43-54, 2013.

HINRICHS, R; KLEINBACH, M; DOS REIS, L. B. Energia e Meio Ambiente. 4.ed. São Paulo: **Cengage Learning**, 2010, p. 675. 2010, p.298.

HIRANANDANI, V. Sustainable development in seaports: a multi-case study. **Word Maritime University**, V. 13, p.127-172, 2014.

HOWARI, F.M. Evaporation losses and dispersion of volatile organic compounds from tanks farms. **Environ. Monit. Assess**, p. 187-273, 2015.

ÍNDIO DO BRASIL, Nilo; ARAÚJO, Maria Adelina Santos; DE SOUZA, Cristina Molina. Processamento de petróleo e gás: petróleo e seus derivados, processamento primário, processos de refino, petroquímica e meio ambiente. 2.ed. Rio de Janeiro: **LTC**, 2014. 274p.

JAVANOVIC, J.; JAVANOVIC, M.; JAVANOVIC, A.; MARINOVIC, V.; Introduction of cleaner in the tank farm of Pancevo Oil Refinery, Serbia. **Journal of Cleaner Production**, v.18, p.791-898, 2010.

KASARKAR, A.P; DALVI, M.'KAGINALKAR, A.; OJJA, A. Coupling of the Weather Research and Forecasting Model with AERMOD for pollutant dispersion modeling. A case study for PM10 dispersion over Pune, India. **Science Direct**, v.41, p.1976-1988, 2007.

KORPELA, T.; KUMPULAINEN, P.; MAJANNE, Y.; HAYRINEN, A.; LAUTALA, P. Indirect NOx emission monitoring in natural gas fired boilers. **Control Engineering Practice**. v.65, p.11-25, 2017.

KORPELA, T.; KUMPULAINEN, P.; MAJANNE, Y.; HAYRINEN, A.; LAUTALA, P. Indirect NOX emission monitoring in natural gas fired boiler. **Control Engineering Practice**, v.66, p.11-25, 2017.

KUMAR, A.; PATIL, R.S; DIKSHIT, A.K; ISLAM, S; RAKESH, K. Evaluation of control strategies for industrial using American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model with simulated meteorology by Weather Research and Forecasting Model. **Journal of Cleaner Production**, v.116, p.110-117, 2016.

LENZI, E.; FAVERO, L.O.B. Introdução à Química da atmosfera: Ciência, vida e sobrevivência. Rio de Janeiro: **LTC**, 2011, 465p.

LOUGHLIN, D.H; BENJEY, W.G; NOLTE, C.G. ESP V1.0: methodology for exploring emission impacts of future scenarios in the United States. **Geoscientific Model Development**, v.4, p. 287-297, 2011.

MA, J; YI, H.; TANG, X.; ZHANG, Y.; XIANG, Y.; PU, L. Application of AERMOD on near future air quality simulation under the latest national emission control policy of China: A case study on an industrial city. *Journal of Environmental Science*, v.25, p. 1608-1617, 2013.

MANAHAN, STANLEY E. Química Ambiental. 9. Ed. **Bookman**, 2016. 944p.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I.M. Climatologia: Noções Básicas e Climas do Brasil. 1ª. Ed. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2007. 206 p.

MIGLIARETTI, G.; BERCHIALLA, P. Observational approaches in the study of the effects of Total Suspended Particulates (TSP) exposure. **International Journal of Environmental Health Research**, v.3, n.5, p.392-399, 2013.

MIHAJLOVIC, M, A.; VELJASSEVICI, A.S.; JAVANOVIC, J.M.; JOVANOVIC, M.B. Estimation of evaporation losses during storage of crude oil and petroleum products. **Hem. Ind.**, v.67, n.1, p.165-174, 2013.

MILLER, G. Tyler. Ciência Ambiental. 11. Ed. São Paulo: **Cengage Learning**, 2008. 501p.

MUKHERJEE, A.; AGRAWAL, M. World air particulate matter: sources, distribution and health effects, **Environ. Chem. Lett**, v.15, p.283-309, 2017.

NEDEL, A.S. Aplicação de um Modelo de Dispersão de Poluentes na Região de Candiota-RS e sua Relação com as Condições Meteorológicas. 2003. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**.

NIGAM, S.; NIGAM, R.; KULSHRESTHA, M.; KUMAR MITTAL, S. Carbon monoxide modeling studies: a review. **Environmental Reviews**, v.18, p.137-158, 2010.

NOVO PLANO DIRETOR SUAPE 2030. Administração do Complexo Industrial Governador Eraldo Gueiros, **Governo de Pernambuco**, 2012.

NUNES, ANDRÉ BECKER; MARIANO, GLAUBER LOPES. Meteorologia em tópicos. Joinville: **Clube de Autores**, 2015. 253p.

OLIVEIRA, S. Fundamentos da atmosfera para o controle da poluição do ar. Apostila, **Recife**, 2010.

OLIVEIRA, Análise meteorológica da estação de superfície do Aeroporto Internacional do Recife 2013-2015. **Relatório**. São Paulo, 2017.

QUAN, J.; GAO, Y.; ZHANG, G.; TIE, X.; CAO, J.; HAN, S.; MENG, J.; CHEN, P.; ZHAO, D. Evolution of planetary weather conditions, and its impact on aerosol concentration. **Particuology**, v.11, p. 34-40, 2013.

PAINE, R.; WARREN, L. L; MOORE, G.E. Source characterization refinements for routine modeling applications. **Atmospheric Environment**, v.129, p.55-67, 2016.

PLANO MESTRE DE SUAPE. Pesquisas e estudos para a logística portuária e desenvolvimento de instrumentos de apoio de planejamento portuário. Secretaria dos Portos da Presidência, 2012. 279p.

PLANETACLIX. Frente fria.< <http://to-campos.planetaclix.pt/nuvens1/frentes.htm>. Aceso em 23 de jun. 2013.

PLANETACLIX. Frente quente.< <http://to-campos.planetaclix.pt/nuvens1/frentes.htm>. Aceso em 23 de jun. 2013.

Planilha em excel contendo dados de emissões pontuais de poluentes atmosféricos proveniente do Complexo Industrial Portuário de Suape Governador Eraldo Gueiros – **Agência Estadual de Meio Ambiente**, 2013.

Planilha em excel contendo dados das empresas localizadas na Zona Industrial Portuária - Coordenação de Meio Ambiente - **Complexo Industrial Portuário de Suape Governador Eraldo**, 2017.

PANOFISKY, H. A. & DUTTON, J. A. A Atmospheric Turbulence Models and Methods for Engineering Application, New York: **John Wiley & Sons**, 1984.

PARK, J.H.; GOLDSTEIN, A.H; TIMKOVSKY, J.; FARES, S.; WEBER, R.; KARLIK, J. HOLZINGER, R. Active Atmosphere-Ecosystem exchange of the vast majority of detected volatile organic compounds. **Science**, v.341, 2013.

PAULAUSKIENE, T.; VAITIEKUNAS, P.; ZABUKAS, V. Investigation of volatile organic compounds (VOC) emission in oil terminal storage tank parks. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, v.17, n.2, p.81-92, 2009.

PÉREZ-VIDAL, H.; LUNAGÓMEZ-ROCHA, M.; ACOSTA-PÉREZ, L. analysis of total suspended particles (TSP) and breathable fraction-particulate matter (PM10) in Cunduacan, Tabasco. **Universidad y Ciencia**, v.26, n.2, p. 151-161, 2010.

PEREZ, L.; GRIZE, L.; INFANGER, D.; KUNZLI, N.; SOMMER, H.; ALL, GIAN-MARCO, SCHINDLER, C. Association of daily levels of PM10 and NO₂ with emergency hospital admissions and mortality in Switzerland: Trends and missed prevention over the last decade. **Environmental Research**, v. 140, p.554-561, 2015.

PETROBRÁS DISTRIBUIDORA. Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos- FISPQ do n-hexano. Disponível em: < <http://www.br.com.br/wcm/connect/6ce17e91-aaa7-454e-91d8-d8dcb32134ef/fispq-quim-sol-alif-hexabr.pdf?MOD=AJPERES&CVID=IQYvJG>>. Acesso em: 09 de julho.2017.

PIMENTAL, Luciene. Hidrologia: Engenharia e meio ambiente. **Elsevier Brasil**, 2015. p.414.

RAMANATHAN, V.; FENG, Y. On avoiding dangerous anthropogenic interference with the climate system: Formidable challenges ahead. **PNAS**, v.105, n.38, p.14245-14250, 2008.

RIMA/RNEST. Relatório de Impacto Ambiental – Refinaria Abreu e Lima. Ed. **FADE/UFPE**, 2006.

RODRIGUEZ, C.; LINGE, K.; BLAIR, P.; BUSETTI, F.; DEVINE, B.; BUYNDER, P.V; WEINSTEIN, P; COOK, A. Recycled Water: Potential health risks from volatile organic compounds and use of 1,4-diclorobenzene as treatment performance indicator. **Water Research**, v.46, p.93-106, 2012.

RODRIGUES, J.M. Análise das emissões de CO₂, CO e NO_x: Estudo de caso em usinas termométricas a gás natural e carvão mineral. Dissertação (mestrado) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia – **LACTEC**, Curitiba, 2011.

ROSENBERG, N.J; BLAD, B.L; VERMA, S.B . Microclimate: The biological environmental 2 Ed. Nebraska, **Johnm Willey & Sons**, 1983.

SCHNEIDEMESSER, E.V; MONKS, P.S; ALLAN, J.D; BRUHWILER, L.; FORSTER, P.; FOWLER, D.; LAUER, A. MORGAN, W.T; PAASONEN, P.; RIGHI, M.; SINDELAROVA, K.; SUTTON, M.A. Chemistry and the linkages between air quality and climate change. **Chemical Reviews**, v.115, p.3856-3897, 2015.

SEINFELD, J. H., PANDIS, S. N. Atmospheric Chemistry and Physics from air pollution to climate change. New Jersey, **Wiley Interscience Publication**, 2006.

SILVA, A.; ARCOS, D. Aplicación del programa AERMOD para modelar dispersión de PM₁₀ emitido por equipos de calefacción a leña en la ciudad de Constitución. **Obras y Proyectos**, n.9 p.4 -10, 2011.

SOARES, M. S. Avaliação do Sistema de Modelagem CALPUFF aplicado ao dióxido de enxofre para as Bacias Aéreas I, II e III da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. 2010. 107 f. Monografia (Graduação em Meteorologia) - **Universidade Federal do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro. 2010.

STEINKE, Ercília Torres. Climatologia Fácil. 1ª. Ed. São Paulo: Editora **Oficina de Textos**, 2012. 144p.

STULL, Roland B.. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Volume 13 de Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, ed. Ilustrada, reimpressão, **Springer Science & Business Media**, 2012. p.670.

SUAPE GLOBAL. Projetos e oportunidades. Apresentação em power point. Administração do Complexo Industrial Portuário Eraldo Gueiros, **Governo de Pernambuco**, 2010.

SUIB, S.L. New and Future Developments in Catalysis: Catalysis for Remediation and Environmental Concerns. **Newness**, 2013. 630p.

UNGLER, N. Global Climate Forcing by Criteria Air Pollutants. **Annual Review of Environmental and Resource**, v.37, p.1-24, 2012.

THAMBIRAN, T.; DIAB, R.D. Air quality and climate change co-benefits for the industrial sector in Durban, South Arica. **Energy Policy**, v. 39, p. 6668-6666, 2011.

TIBBETTS, J. H. Air Quality and Climate Change: A Delicate Balance. **Environmental Health Perspectives**. v.123, p.148-153, 2015.

TODAMATERIA. Inversão térmica. <
<https://www.todamateria.com.br/inversao-termica/>>. Acesso em 11 de jul. 2017.

UNGER, N. Global Climate Forcing by Criteria Air Pollutants. **Annual Review of Environment and Resources**, v.37, p.1-24, 2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (**USEPA**). User's Manual for TANKS 4.0.D. 5. Ed., 1995.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (**USEPA**).
Compilation of air pollutant emission factors. Volume I: Natural gas combustion. 5. Ed., 1998.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (**USEPA**).
SECTION 7.1 OF AP42, VOLATILE ORGANIC LIQUID STORAGE TANKS:
5. Ed., 2006.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (**USEPA**).
Compilation of air pollutant emission factors. Volume I: Liquefied petroleum gas combustion. 5 ed., 2008.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – **USEPA** –
Code of Federal Regulations, 40: Chapter 1, Subchapter C, Part 51, Subpart F, 51100, 2009.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – **USEPA** –
Code of Federal Regulations, 40: Chapter 1: Emission standards for hazardous air pollutants for categories source, 2009.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – **USEPA**.
Proposes new national ambient air quality standards for ozone. The Air Pollution Consultant, v.20, n.3, 2010.

VELLOSO, M. F., CATALDI, M., GUERRERO, J. S. P., et al. Estudo Numérico da Dispersão de Poluentes Proveniente de uma Fonte Pontual Contínua sob Diversas Condições de Estabilidade Atmosférica In: **Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Foz do Iguaçu, 2002.

WEINER, Ruth F; MATTHEWS, Robin A. **Environmental Engineering**.
Butterworth-Heinemann, 2003. 484p.

WRONG, G.K.S; NG, S.J; WEBSTER, R.D. Quantitative analysis of atmosphere volatile organic pollutants by thermal desorption gas chromatography mass spectrometry. **Analytical Methods**, v.5, p.219-230, 2013.

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

XUE, L.; WANG, T.; SIMPSON, I.J.; DING, A.; GAO, J.; BLAKE, D.R.; WANG, X.; WANG, W.; LEI, H.; JIN, D. Vertical distributions of non-methane hydrocarbons and halocarbons in lower troposphere over northeast China. **Atmospheric Environment**, v.45, p.6501-6509, 2011.

YOSHIMURA, T., NISHINO, K. Estimation of air Pollutant Concentrations by the Galerkin Finite Element Method", **International Journal of Systems Sciences**, v. 14, pp. 661-672, 1983.

ZANIN, M; MANCINI, S.D. Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologias. **SciELO-EduFSCar**, Ed.2º., 2015. 138p.

ZHANG, X.; XUE, Z.; LI, H.; YAN, L.; YANG, Y.; WANG, Y.; DUAN, J.; LI, L.; CHAI, F.; CHENG, M.; ZHANG, W. Ambient volatile organic compounds pollution in China. **Journal of Environmental Sciences**, p.1-7, 2016.

APÊNDICES

APÊNDICE A - CÁLCULO PARA ESTIMATIVA DE COV

O Programa TANKS 4.09d deve ser executado no sistema operacional Windows XP, 08 MB de memória RAM, pois não é compatível em certos sistemas operacionais com o Windows Vista ou Windows.

Os procedimentos gerais para o cálculo das estimativas de emissões evaporativas de líquidos orgânicos voláteis para tanques de teto fixo, tanques de teto flutuante externo e tanques de teto flutuante interno, serão descritos a seguir.

1 TANQUE DE TETO FIXO

As perdas evaporativas totais, provenientes do tanque vertical de teto fixo, operando a pressão atmosférica são devidas a perda por respiração e perda por trabalho. O cálculo total dessas perdas é realizado por meio da Equação 1.

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

Em que,

L_T = perdas evaporativas totais , lb.ano⁻¹

L_S = perda por respiração, lb.ano⁻¹

L_W = perda por trabalho, lb.ano⁻¹

A perda por respiração é calculada por meio da Equação 2.

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

Em que,

L_S = perda por respiração, lb.ano⁻¹

V_V = volume do espaço de vapor no tanque, ft³

W_V = massa específica do vapor a 60°F lb.ft⁻³

K_E = fator de expansão do espaço vapor, adimensional

K_S = fator de saturação do espaço vapor, adimensional

365 = constante, número de dias em um ano, (ano)⁻¹

O cálculo das variáveis V_V , W_V , K_E e K_S da Equação 2, são calculadas da seguinte maneira:

a) O volume do espaço vapor do tanque, V_V , é dado pela Equação 3.

$$V_V = \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) H_{VO} \quad (3)$$

Onde:

V_V = volume do espaço de vapor no tanque, ft³

D = diâmetro do tanque, ft

H_{VO} = altura média do espaço ocupado pelo vapor no tanque, ft

A altura média do espaço ocupado pelo vapor no tanque, H_{VO} , pode ser calculada usando a Equação 4.

$$H_{VO} = H_S - H_L + H_{RO} \quad (4)$$

Em que,

H_{VO} = altura média do espaço ocupado pelo vapor no tanque, ft

H_S = altura do costado do tanque, ft

H_L = altura média do líquido no tanque, ft

H_{RO} = altura do costado equivalente ao volume contido sob o teto do tanque, ft

A depender do tipo de teto, H_{RO} , pode ser calculado, de acordo com as equações apresentadas a seguir:

Teto plano

$$H_{RO} = 0 \quad (5)$$

Teto cônico

$$H_{RO} = 1/3 H_R$$

(6)

Onde:

H_R = altura do teto do tanque, ft

O valor de H_R , por sua vez, é calculado pela Equação 7

$$H_R = S_R R_S$$

(7)

Onde:

S_R = declividade do teto cônico, ft.ft⁻¹; caso desconhecido, o valor padrão adotado é de 0,0625

R_S = raio do tanque, ft

Teto tipo domo

$$H_{RO} = H_R \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[\frac{H_R}{R_S} \right]^2 \right] \text{ para o teto tipo domo} \quad (8)$$

Em que,

H_{RO} = altura do costado equivalente ao volume contido sob o teto do tanque, ft

H_R = altura do teto do tanque, ft

R_S = raio do costado do tanque, ft

O cálculo de H_R é realizado por meio da Equação 9

$$H_R = R_R - (R_R^2 - R_S^2)^{0,5} \quad (9)$$

H_R = altura do teto do tanque, ft

R_S = raio do costado do tanque, ft

R_R = raio do teto, ft

O valor de R_R , geralmente varia entre 0,8D a 1,2D, sendo D o diâmetro do tanque, o qual pode ser calculado pela Equação 10.

$$D = 2R_S \quad (10)$$

b) A massa específica do vapor, W_V , é descrita pela Equação 11.

$$W_V = \frac{M_V P_{VA}}{RT_{LA}} \quad (11)$$

Onde:

- P_{VA} = pressão de vapor à temperatura média diária da superfície do líquido, psia
 W_V = massa específica do vapor, lb.ft⁻³
 R = constante ideal dos gases igual a 10,731 psia ft³.lb-mole⁻¹ R⁻¹
 T_{LA} = temperatura média diária da superfície do líquido, R
 M_V = peso molecular do vapor, lb.lb-mole⁻¹

Na TABELA 1 e na TABELA 2, deste Apêndice encontra-se valores de M_V para alguns líquidos. No capítulo 7 da *Compilation of Air Pollution Emission Factors, Fifth Edition, Volume 1 - United States Environmental Protection Agency*, 1997, existem diversos valores de M_V para diferentes líquidos orgânicos, inclusive produtos refinados de petróleo.

A temperatura média diária da superfície do líquido, caso desconhecida, é calculada utilizando-se a Equação 12.

$$T_{LA} = 0,44T_{AA} + 0,56T_B + 0,0079\alpha I \quad (12)$$

Onde:

- T_{LA} = temperatura média diária da superfície do líquido, R
 T_{AA} = temperatura ambiental média diária, R
 T_B = temperatura no massa do líquido, R
 α = absorvência solar da pintura do tanque, adimensional
 I = radiação solar total diária, Btu.(ft².dia)⁻¹

Na TABELA 3, deste apêndice, encontram-se os valores de absorvência solar para uma variedades de cores de pintura para tanques de teto fixo. A temperatura ambiental média diária, T_{AA} , é calculada por meio da Equação 13.

$$T_{AA} = \left(\frac{T_{AX} + T_{AN}}{2} \right) \quad (13)$$

onde:

- T_{AA} = temperatura ambiental média diária, R

T_{AX} = temperatura ambiental máxima diária, R

T_{AN} = temperatura ambiental mínima diária, R

A temperatura na massa do líquido, T_B , é calculada por meio da Equação 14.

$$T_B = T_{AA} + 6\alpha - 1 \quad (14)$$

onde:

T_B = temperatura no bulk do líquido, R

T_{AA} = temperatura ambiental média diária, R

α = absorvência solar da pintura do tanque, adimensional

Uma vez conhecida o valor de T_{LA} , a pressão de um líquido orgânico puro pode ser calculada por meio da Equação de Antoine:

$$\log P_{VA} = A - \left(\frac{B}{T_{LA} + C} \right) \quad (15)$$

A = constante da equação de pressão de vapor, adimensional

B = constante da equação de pressão de vapor, °C

C = constante da equação de pressão de vapor, °C

T_{LA} = temperatura média diária da superfície do líquido, °C

P_{VA} = pressão de vapor à temperatura média diária da líquido armazenado,
mm Hg

Na TABELA 4, deste Apêndice, encontra-se os valores das constantes A, B e C para alguns líquidos orgânicos. Observe que T_{LA} é determinada em graus Celsius ao invés de graus Rankine. Enquanto P_{VA} , é determinada em mm Hg ao invés de psia (760 mm Hg = 14,7 psia).

Por conseguinte, conhecendo-se os valores das variáveis M_V , P_{VA} e T_{LA} é possível calcular W_V .

O fator de expansão do espaço vapor, K_E , é descrita pela Equação 17

$$K_E = 0,0018 \Delta T_V = 0,0018[0,72 (T_{AX} - T_{AN}) + 0,0028\alpha I] \quad (17)$$

Onde:

- K_E = fator de expansão do espaço vapor, adimensional
- ΔT_V = variação da temperatura diária do vapor, R
- T_{AX} = temperatura ambiental máxima diária
- T_{AN} = temperatura ambiental mínima diária
- α = absorvância solar da pintura do tanque, adimensional
- I = radiação solar total diária, Btu.(ft².dia)⁻¹
- 0,0018 = constante, R
- 0,72 = constante, adimensional

A variação da temperatura diária do vapor, ΔT_V , é calculado usando-se a Equação 18.

$$\Delta T_V = 0,72 \Delta T_A + 0,028\alpha I \quad (18)$$

onde:

- ΔT_V = variação da temperatura diária do vapor, R
- ΔT_A = variação da temperatura ambiental diária, R
- α = absorvância solar da pintura do tanque, adimensional
- I = radiação solar total diária, Btu.(ft².dia)⁻¹

A variação da temperatura ambiental diária, ΔT_A , é calculada usando-se a Equação 19.

$$\Delta T_A = T_{AX} - T_{AN} \quad (19)$$

Onde:

ΔT_A = variação da temperatura ambiental diária, R

T_{AX} = Temperatura ambiental máxima diária, R

T_{AN} = Temperatura ambiental mínima diária, R

A variação da pressão diária do vapor, ΔP_V , pode ser calculada por meio da Equação 20.

$$\Delta P_V = P_{VX} - P_{VN} \quad 20$$

Em que,

ΔP_V = variação da pressão diária do vapor, psia

P_{VX} = pressão de vapor a temperatura máxima diária da superfície do líquido, psia

P_{VN} = pressão de vapor a temperatura mínima diária da superfície do líquido, psia

As pressões P_{VX} , P_{VN} podem ser estimadas utilizando-se a Equação de Antoine (Eq.15). Contudo, os termos P_{VA} e T_{LA} serão substituídos por P_{VX} e T_{LX} , respectivamente, a fim de calcular P_{VX} . Por conseguinte, para o cálculo de P_{VN} , os termos P_{VA} e T_{LA} serão substituídos por P_{VN} e T_{LN} , respectivamente, de acordo com as Equações 20 e 21.

$$\log_{P_{VX}} = A - \left(\frac{B}{T_{LX} + C} \right) \quad (20)$$

$$\log_{P_{VN}} = A - \left(\frac{B}{T_{LN} + C} \right) \quad (21)$$

Onde:

A = constante da equação de pressão de vapor, adimensional

B = constante da equação de pressão de vapor, °C

C = constante da equação de pressão de vapor, °C

T_{LX} = temperatura máxima diária na superfície no líquido, °C

T_{LN} = temperatura mínima diária na superfície no líquido, °C

As temperaturas máximas e mínima diária na superfície do líquido são calculadas conforme as Equações (22) e (23), respectivamente.

$$T_{LX} = T_{LA} + 0,25 \Delta T_V \quad (22)$$

$$T_{LN} = T_{LA} - 0,25 \Delta T_V \quad (23)$$

As variáveis T_{LX} e T_{LN} das Equações 22 e 23 são dadas em °R. Desta forma, para o uso das Equações 20 e 21 será preciso realizar a conversão para °C.

A variação de pressão de ajuste dos *vents*, ΔP_B , é calculada, conforme a Equação 24.

$$\Delta P_B = P_{BP} - P_{BV} \quad (24)$$

onde:

ΔP_B = variação da pressão de ajuste dos *vents*, *psig*

P_{BP} = pressão de ajuste das válvulas de alívio de pressão, *psig*

P_{BV} = pressão de ajuste das válvulas de alívio de vácuo, *psig*

O fator de saturação do espaço vapor, K_S , pode ser calculado utilizando a Equação 25.

$$K_S = \frac{1}{1+0,053+P_{VA} H_{VO}} \quad (25)$$

K_S = fator de saturação do espaço vapor, adimensional

P_{VA} = pressão de vapor à temperatura média diária na superfície do líquido, *psia*

H_{VO} = altura média de espaço ocupado pelo vapor no tanque, *ft*

A perda por trabalho é calculada por meio da Equação 26.

$$L_W = 0,0010 M_V P_{VA} Q K_N K_P \quad (26)$$

Onde:

L_W = perda por trabalho, lb/ano

M_V = peso molecular do vapor, lb/lb-mole

P_{VA} = pressão de vapor a temperatura média diária na superfície do líquido, psia

Q = movimentação anual do produto, bbl/ano

As variáveis M_V , P_{VA} , Q , K_N e K_P da Equação 26 para o cálculo da perda evaporativa, conforme as equações descritas a seguir:

Na TABELA 1 e na TABELA 2, encontram-se os valores de M_V para alguns líquidos orgânicos, O valor de P_{VA} é calculado, conforme a Equação 15. O cálculo da movimentação anual do produto pode ser estimado pela Equação 27.

$$Q = \frac{N H_{LX}}{5,614} \left(\frac{\Pi}{4} \right)^2 \quad (27)$$

Onde:

Q = movimentação anual do produto

N = números de vezes que o tanque enche e esvazia em um ano, conhecido como número de “turnover”

H_{LX} = altura máxima do líquido no tanque, ft

O número de “turnover” por ano, N , pode ser estimado pela Equação 28, desde que se tenha o valor de Q . O valor de “turnover” também é necessário para o cálculo de K_N .

$$N = \frac{5,614 Q}{V_{LX}} \quad (28)$$

A altura máxima do líquido no tanque, V_{LX} , pode ser calculado por meio da Equação (29).

$$V_{LX} = \frac{\Pi}{4} D^2 H_{LX} \quad (29)$$

V_{LX} = volume máximo do líquido no tanque, ft³

D = diâmetro do tanque, ft

H_{LX} = altura máxima do líquido no tanque, ft

O fator de “turnover”, K_N , pode assumir valores, conforme descrito na Equação 30 ou na Equação 31.

Para número de “turnover” > 36 $K_N = \left(\frac{(180+N)}{6N} \right)$
(30)

Para número de “turnover” ≤ 36, $K_N = 1$
(31)

O fator do produto, K_N , depende da categoria do líquido armazenado no tanque, conforme descrito a seguir:

$K_p = 0,75$ para petróleo bruto

$K_p = 1$ para todos os outros líquidos

Desta forma, a quantidade total de compostos orgânicos voláteis poder ser calculados pela soma das perdas evaporativas por respiração e por trabalho, descrita na Equação 1.

2 TANQUE DE TETO FLUTUANTE EXTERNO

As emissões provenientes de tanques de teto flutuante externo são devidas as perdas ocorridas pelo selo de vedação de extremidade, pela retirada

do líquido no tanque, e pelos acessórios do teto, cuja perdas totais são calculadas pela Equação 32.

$$L_T = L_R + L_{WD} + L_F$$

(32)

Em que,

- L_T = perda total, lb.ano⁻¹
- L_R = perda pelo selo de extremidade, lb.ano⁻¹
- L_{WD} = perda pela retirada do líquido no tanque, lb.ano⁻¹
- L_F = perda pelos acessórios do teto, lb.ano⁻¹

A perda pelo selo de vedação periferia são calculados por meio da Equação 33.

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

(33)

Em que,

- L_R = perda pelo selo de vedação de extremidade, lb.ano⁻¹
- K_{Ra} = fator de emissão do selo de vedação de extremidade na velocidade do vento igual a zero, lb-mole.(ft.ano)⁻¹
- K_{Rb} = fator de emissão do selo de vedação de extremidade em função da velocidade do vento, lb-mole.(mph)ⁿ ft.ano
- v = velocidade média do vento no local do tanque, mph
- n = expoente da velocidade do vento relacionado ao selo, adimensional
- D = diâmetro do tanque, ft
- P^* = função pressão da vapor do produto armazenado, adimensional
- M_V = peso molecular médio do vapor, lb.lb-mol
- K_C = fator relativo ao produto
 - $K_C = 0,4$ para petróleo cru
 - $K_C = 1$ para os demais líquidos orgânicos

Os valores de K_{Ra} , K_{Rb} e n para diferentes tipos de selos de vedação de extremidade podem ser encontrados na TABELA 5, deste apêndice

Nas situações onde a velocidade média do vento, no local onde os tanques estão instalados

(v), não estiver disponível, pode ser utilizado dados de uma estação meteorológica mais próxima. O valor de (v) será zero para tanque de teto flutuante interno e tanque de teto flutuante com domo.

A função pressão de vapor P^* é descrita, de acordo com a Equação 34.

$$P^* = \frac{\frac{P_{VA}}{P_A}}{\left[1 + \left(1 - \frac{P_{VA}}{P_A}\right)^{0,5}\right]^2} \quad (34)$$

Em que,

P^* = função pressão de vapor, adimensional

P_{VA} = pressão de vapor à temperatura média diária da líquido armazenado,
psia

P_A = pressão atmosférica, psia

A Equação 15 pode ser utilizada para o cálculo de P_{VA} , uma vez conhecido o valor de T_{LA} . Na TABELA 1 e na TABELA 2, encontram-se os valores de M_V para as alguns de líquidos orgânicos.

A perda por esvaziamento do líquido no tanque pode ser calculada pela Equação 35.

$$L_{WD} = \frac{0,943 Q C_S W_L}{D} \left[1 + \frac{N_C F_C}{D}\right] \quad (35)$$

Onde:

L_{WD} = perda por esvaziamento do líquido no tanque, lb/ano

Q = movimento anual do produto armazenado no tanque, barril/ano

C_S = fator de aderência do costado, barril. (1000 ft²)⁻¹

W_L = massa específica do líquido, lb.gal⁻¹

D = diâmetro do tanque, ft

0,943 = constante, 1000 ft³.gal.(bb^l)⁻¹

N_C = número de colunas que suportam o teto fixo, adimensional

F_C = diâmetro efetivo para coluna, ft

Na TABELA 6, deste apêndice encontra-se valores para o fator de aderência do costado. O valor de $N_C = 0$ para tanques com teto flutuante externo ou aqueles autoportante, ou seja, o teto fixo não é suportado por colunas. Em relação ao tanque de teto flutuante interno, o valor de N_C pode ser estimado, conforme a TABELA 7 pode-se utilizar informações específicas do projeto, caso disponível.

Diâmetro efetivo para colunas de sustentação, F_C , é utilizado para tanques de teto flutuante interno e tanques de teto fixo. Pode-se utilizar informações específicas do projeto, caso F_C seja conhecido ou pode ser estimado, conforme valores descritos a seguir:

1. $F_C = 1,1$ para colunas de perfis compostos de 7" a 9" de diâmetro
2. $F_C = 0,8$ para colunas tubulares 8"
3. $F_C = 1,0$ para colunas cujo detalhes construtivos são desconhecidos

As perdas pelos acessórios do teto, L_F , podem ser estimadas a partir da Equação 36.

$$L_F = F_F P^* M_V K_C \quad (36)$$

Onde:

- L_F = perda pelos acessórios do teto, lb.ano⁻¹
 F_F = fator de perda total pelos acessórios do teto, lb-mole.ano⁻¹
 P^* = função pressão de vapor, adimensional
 M_V = peso molecular do vapor do produto armazenado no tanque, lb.(lb-mole)⁻¹
 K_C = Fator relativo ao produto
 $K_C = 0,4$ para petróleo cru
 $K_C = 1$ para os demais líquidos orgânicos

O fator de perda total pelos acessórios do teto, F_F , pode ser estimado por meio da Equação 37.

$$F_F = [(N_{Fi} K_{Fi}) + \dots + (N_{Fnf} K_{Fnf})] \quad (37)$$

Em que,

- N_{Fi} = número de acessórios do teto relacionado a um tipo em particular
($i = 0, 1 \dots n_f$), adimensional
- F_F = fator de perda de um acessório do teto relacionado a um tipo em particular ($i = 0, 1 \dots n_f$), lb-mole/ano
- n_f = número total de diferentes tipos de acessórios, adimensional

Na TABELA 8, deste apêndice, encontra-se uma lista de acessórios e números típicos existentes destes existentes em tanques de teto flutuante.

O fator de perda dos acessórios do teto, K_{Fi} , para a um tipo particular de acessório pode ser estimada pela Equação 38.

$$K_{Fi} = K_{Fai} + K_{Fbi} (K_V v)^{m_i} \quad (38)$$

Onde:

- K_{Fi} = fator de perda para um tipo particular de acessório do teto, lb-mole/ano
- K_{Fai} = fator de perda para um tipo particular de acessório do teto a velocidade do vento zero, lb-mole/ano
- K_{Fbi} = fator de perda, dependente da velocidade do vento, para um tipo particular de acessório do teto, lb-mole/ano
- K_V = fator de correção da velocidade do vento, adimensional
- v = velocidade média do vento, mph
- m_i = Fator de perda para um tipo particular de acessório, adimensional
 $i=0, 1, 2 \dots n$

O fator de correção da velocidade do vento, K_V , é igual a 0,7 para um tanque de teto flutuante externo. Em relação ao tanque de teto flutuante interno e ao tanque de teto flutuante externo tipo domo, o valor de v é zero. Portanto, a Equação 38 reduz-se a:

$$K_{Fi} = K_{Fai} \quad (39)$$

Os valores de K_{Fi} , K_{Fb} e m típicos para os acessórios de flutuante podem ser encontrados TABELA 8, deste apêndice. Esses fatores são aplicados apenas para acessórios típicos do teto e quando a média da velocidade do vento está abaixo de 15 mph.

3 TANQUE DE TETO FLUTUANTE INTERNO

As emissões provenientes de tanques de teto flutuante são devidas as perdas ocorridas pelo selo de vedação de extremidade, pela retirada do líquido no tanque, pelos acessórios do teto, pelas junções das placas (costura) do teto flutuante, conforme descrito pela Equação 40.

$$L_T = L_R + L_{WD} + L_F + L_D \quad (40)$$

Onde:

- L_T = perda total, lb.ano⁻¹
- L_R = perda pelo selo de vedação periférico, lb.ano⁻¹
- L_{WD} = perda por esvaziamento do líquido no tanque, lb.ano⁻¹
- L_F = perda pelos acessórios do teto, lb.ano⁻¹
- L_D = perda costura do teto flutuante, lb.ano⁻¹

Os valores de L_R , L_{WD} e L_F são calculados da mesma maneira como desenvolvido para os tanques de teto flutuante externo.

A perda pela costura para o tanque de teto flutuante interno, L_D , é calculada de acordo com a Equação 41.

$$L_D = K_D S_D D^2 P^* M_V K_C \quad (41)$$

Em que,

- L_D = perda pela costura da cobertura flutuante, lb.ano⁻¹

K_D = perda pela costura da cobertura flutuante por unidade de fator de comprimento da costura, lb-mole.(ft.ano)⁻¹

$K_D = 0$ para o teto flutuante soldado

$K_D = 0,14$ para o teto flutuante aparafusado

S_D = fator de comprimento da costura da cobertura

D = diâmetro do tanque, ft

P^* = função pressão de vapor, adimensional

M_V = peso molecular do vapor, lb.(lb-mole)⁻¹

K_C = fator relacionado ao produto

A perda pela costura, L_D , para tanque de teto flutuante interno soldado e tanque de teto flutuante externo é igual a zero. Estas perdas são típicas de tanque com teto flutuante interno rebitados ou aparafusados.

O fator de perda pela costura da cobertura flutuante, S_D , pode ser calculada pela Equação 40.

$$S_D = \frac{L_C}{A_C} \quad (42)$$

Em que,

S_D = fator de comprimento da costura da cobertura, ft.(ft²)⁻¹

L_C = comprimento total da costura da cobertura, ft

A_C = área da cobertura, ft²

A área da cobertura é calculada pela Equação 43.

$$A_C = \frac{\Pi D^2}{4} \quad (43)$$

Onde, D é o diâmetro do tanque em ft.

Em situações na qual o comprimento total da costura da cobertura seja desconhecido, a TABELA 9 do Apêndice A pode ser utilizada para determinar S_D .

APÊNDICE B – PARÂMETROS DE CÁLCULO PARA OS TANQUES

TABELA 1 – Propriedades físicas para líquidos orgânicos voláteis.

Nome	Peso molecular	Ponto de ebulição a 1 atm (°F)	Massa específica lb/gal a 60 °F	Pressão de vapor (psia)						
				40 °F	50 °F	60 °F	70 °F	80 °F	90 °F	100 °F
Álcool etílico	46,07	173,1	6,610	0,193	0,409	0,619	0,70	1,218	1,682	2,320
n-hexano	86,17	155,7	5,527	1,102	1,450	1,876	2,436	3,055	3,906	4,892
p-xileno	106,17		7,18							

FONTE: EPA (1995)

TABELA 2 - Propriedades físicas de líquidos de petróleo

Nome	Peso molecular do vapor a 60 °F (M _v) lb/lb-mole	Massa específica do líquido, a 60 °F (W _L) lb/gal	Pressão de vapor verdadeira, P _{VA} (psia)							
			40 °F	50 °F	60 °F	70 °F	80 °F	90 °F	100 °F	
Distillate fuel oil n° 2	130	7,1	0,0031	0,0045	0,0065	0,0090	0,0012	0,0016	0,022	
Gasoline PVR 11	65	5,6	3,87	4,75	5,77	6,96	8,34	9,92	11,74	
Jet Kerosene	130	7,0	0,0041	0,0060	0,0085	0,011	0,015	0,021	0,029	

FONTE: EPA (1995).

TABELA 3 – Absorbância solar da pintura for tanques de teto fixo

Cor da pintura	Tipo ou sombra da pintura	Fator de pintura (α)	
		Boa	Ruim
Alumínio	Especular	0,39	0,49
Alumínio	Difuso	0,60	0,68
Alumínio*	Não pintado	0,10	0,15
Branca	NA	0,17	0,34
Cinza	Claro	0,54	0,63
Cinza	Médio	0,68	0,74
Cinza	Escuro	0,89	0,91

FONTE: EPA (1995).

Notas:

NA – não aplicável

(*) – Refere-se ao alumínio com a base metálica, ao invés de ser pintado de alumínio.

Caso o teto do tanque e o costado estão pintados com cores diferentes, α, é determinado por meio da seguinte equação:

$$\alpha = \frac{(\alpha_R + \alpha_S)}{2}$$

Onde α_R é absorvância solar da pintura do teto do tanque e α_S é absorvância solar da pintura do costado.

TABELA 4 – Constantes da equação de pressão de vapor para líquidos orgânicos

Constantes da pressão de vapor			
Nome	A (adimensional)	B (°C)	C (°C)
Etanol	8,321	1718,21	237,52
n-hexano	6,8994	1331,53	212,41
p-xileno	7,02	1474,40	217,77

FONTE: EPA (1995).

TABELA 5– Fatores de perda para selos de vedação de extremidade para tanques de teto flutuante.

Tipo de construção e sistema de vedação periférica	K_{Ra} (lb-mole/ft.ano)	K_{Rb} (lb-mole/(mph)ⁿ ft.ano)	n
Tanque soldado			
A – Selo sapata mecânica			
Selo primário, sapata mecânica ^a ("Mechanical-shoe seal primary")	5,8	0,3	2,1
Selo secundário, sapata mecânica (shoe-mounted secondary")	1,6	0,3	1,6
Selo secundário, montado sobre o anel de vedação ("Rim-mounted secondary")	0,6	0,4	1,0
B – Selo montado sobre o líquido			
Selo primário, montado sobre o líquido ("Liquid mounted seal primary")	1,6	0,3	1,5
Selo secundário, montado sobre o anel de vedação ("Rim-mounted secondary")	0,3	0,6	0,3
C – Selo montado sobre o vapor			
Selo primário, montado sobre o vapor ("Vapor mounted seal")	6,7 ^b	0,2	3,0
Selo secundário, montado sobre o anel de vedação (Rim-mounted secondary")	2,2	0,003	4,3
Tanque rebitado			
A – Selo sapata mecânica			
Selo primário, sapata mecânica ("Mechanical-shoe seal primary")	10,8	0,4	2,0
Selo secundário, sapata mecânica (shoe-mounted secondary")	9,2	0,2	1,9
Selo secundário, montado sobre o anel de vedação ("Rim-mounted secondary")	1,1	0,3	1,5

FONTE: EPA (1995).

Notas:

Os fatores de selo de vedação de extremidade, K_{Ra} e K_{Rb} e n pode ser usados para velocidade do vento abaixo de 15mph.

(a) - Caso não se tenha nenhuma informação disponível sobre os sistemas de selo e o tanque for soldado, pode-se utilizar selo primário, sapata mecânica como sendo o tipo de selo típico utilizado em tanques de teto flutuante externo ou tanque de teto flutuante externo tipo domo.

(b) - Caso não se tenha nenhuma informação disponível, este valor pode ser assumido para representar o sistema de selo em uso para tanques de teto flutuante interno.

TABELA 6 – Fator médio de aderência ao costado (bbl/10³ ft²)^a

Produto armazenado	Condições do costado	
	Levemente enferrujado	Densamente enferrujado
Gasolina	0,0015	0,0075
Armazenamento de único componente	0,0015	0,0075

FONTE: EPA, 1995.

Nota:

(a) Caso nenhuma informação esteja disponível, os valores desta TABELA podem ser assumidos para representar a condição típica dos tanques em uso.

TABELA 7 – Número típico de colunas em função do diâmetro do tanque para tanques de teto flutuante interno com teto fixo suportado por colunas

Diâmetro do tanque (D), ft	Número típico de colunas, Nc
8 < D ≤ 85	1
85 < D ≤ 100	6
100 < D ≤ 120	7
120 ≤ D ≤ 135	8
135 < D ≤ 150	9
150 < D ≤ 170	16
160 < 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: EPA, 1995.

TABELA 8 - Fatores de perda para os acessórios do teto flutuante (*Deck*), K_{Fa} , K_{Fb} , m e Número típico de acessórios do *Deck*, N_F .

1 - Detalhes de construção e tipo de acessórios	K_{Fa} lbmole/ano	K_{Fb} lb0mole/ano	m adimen sional	Número típico de acessórios N_F
Escotilha de acesso (com poço de 24 polegadas de diâmetro)				1
Tampa aparafusada com gaxeta	1,6	0	0	
Tampa não aparafusada sem gaxeta	36	5,9	1,2	
Tampa não aparafusada com gaxeta	31	5,2	1,3	
2 - Poço da coluna que suporta o teto				Nc – ver Tabela 7
Tubo redondo com tampa deslizante sem gaxeta	31			
Tubo redondo com tampa deslizante com gaxeta	25			
Tubo redondo com selo da luva de tecido flexível	10			
Colunas de perfis compostos com tampa deslizante sem gaxeta	51			
Colunas de perfis compostos com tampa deslizante com gaxeta	53			
3 - Guia sólida e poços (tubos sem ranhuras com 8 polegadas de diâmetro e poços com 21 polegadas de diâmetro)				1
Tampa deslizante sem gaxeta	31	150	1,4	
Tampa deslizante sem gaxeta com tubo	25	2,2	2,1	
4 - Guia sólida / poço de amostragem (tubo com ranhuras de 8 polegadas de diâmetro e poço com 21 de diâmetro)				1
Tampa deslizante com gaxeta ou sem gaxeta	43	270	1,4	
Tampa deslizante com gaxeta ou sem gaxeta, com flutuador	31	36	2,0	
5- Poço do flutuador (Indicador de nível automático)				1
Tampa não aparafusada sem gaxeta	14	5,4	1,1	
Tampa não aparafusada com gaxeta	4,3	17	0,38	
Tampa aparafusada com gaxeta	2,8	0	0	
6 - Tomada para manômetro/Poço de coleta				1
Atuador mecânico com contra peso, com gaxeta	0,47	0,02	0,97	
Atuador mecânico com contra peso sem gaxeta	2,3	0	0	
7 – Quebra-vácuo				
Atuador mecânico com contra peso sem gaxeta	7,8	0,01	4,0	
Atuador mecânico com contra peso com gaxeta	6,2	1,2	0,94	
8 - Pernas de sustentação da cobertura (3 polegadas de diâmetro)				
Pernas do teto flutuante interno, ajustáveis.	7,9			
Ajustáveis, área do pontão sem gaxeta	2,0	0,37	0,91	
Ajustáveis, área do pontão com gaxeta	1,3	0,08	0,65	
Ajustáveis, área central com gaxeta	0,53	0,11	0,13	
Ajustáveis, área central sem gaxeta	0,82	0,53	0,14	
Ajustáveis, teto com dupla teto	0,82	0,53	0,14	
9 –Selo de extremidade				1
Palhetas com contrapeso, atuação mecânica, sem gaxeta	0,68	1,8	1,0	
Palhetas com contrapeso, atuação mecânica, com gaxeta	0,71	0,10	1,0	
10 – Poço da escada				1
Tampa deslizante sem gaxeta	98			
Tampa deslizante com gaxeta	56			

FONTE: EPA, 1995.

TABELA 9 – Valores de S_D para tanques de teto flutuante interno.

Chapas contínuas	S_D (ft/ft²)
5 ft de extensão	0,20 ^a
6 ft de extensão	0,17
7 ft de extensão	0,14
Painel ^b	
5 x 7,5 ft retangular	0,33
5 x 12 ft retangular	0,28

FONTE: EPA, 1995.

Notas:

(a) Caso não se tenha nenhuma informação disponível, este valor pode ser utilizado para representar

um valor típico tanque com o teto flutuante interno aparafusado.

(b) $S_D = (L + W)/LW$, onde W= largura do painel (ft) e L = comprimento do painel (ft).