

# TANQUES DE ARMAZENAMENTO DE COMBUSTÍVEIS: CRITÉRIOS DE PROJETO VISANDO A REDUÇÃO DE EMISSÕES DE COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS (COV)

FUEL STORAGE TANKS: DESIGN CRITERIA AIMING TO REDUCE VOLATILE J

## **Mônica Beatriz Kolicheski**

Doutora em Engenharia pela Universidade Federal do Paraná (Curitiba/Brasil).  
Professora na Universidade Federal do Paraná (Curitiba/Brasil).  
E-mail: monica.beatriz@ufpr.br. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6408-1696>

## **José Augusto Castilho**

Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial pela Universidade Federal do Paraná (Curitiba/Brasil).  
Engenheiro de Meio Ambiente na Petrobras (Araucária/Brasil).  
E-mail: josecastilho@petrobras.com.br. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5007-5487>

## **Mauricy Kawano**

Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (Florianópolis/Brasil).  
Coordenador do Plano de Logística Reversa no Sinpacel (Curitiba/Brasil).  
E-mail: kawano@sinpacel.org.br. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7098-9200>

Recebido em: 20 de novembro de 2022  
Aprovado em: 10 de janeiro de 2023  
Sistema de Avaliação: Double Blind Review  
RGD | v. 20 | n. 1 | p. 54-76 | jan./jun. 2023  
DOI: <https://doi.org/10.25112/rgd.v20i1.2803>

## RESUMO

Os parques de tancagem de hidrocarbonetos geram impactos ambientais devido às emissões fugitivas de COV oriundas dos tanques, pois esses são projetados basicamente com critérios econômicos. As emissões de COV geram problemas de poluição do ar. Com o objetivo de estabelecer critérios ambientais para o desenvolvimento de projetos de tanques de armazenamento, visando a redução das emissões, foram estimadas as emissões de COV pelo *software* Tanks para três tipos de tanques de armazenamento de hidrocarbonetos. A configuração, distribuição de tancagem, cor e integridade da superfície para três produtos (gasolina, diesel e petróleo) foram avaliadas. O estudo indicou que a aplicação dos critérios ambientais resultam no aumento da eficiência de armazenamento, redução das perdas e minimização da poluição do ar. O uso dos critérios no dimensionamento dos tanques pode reduzir em torno de 50% as emissões de COV, dependendo do tipo de hidrocarboneto armazenado. Os critérios propostos na distribuição de volumes permitiriam reduções de até 80% e o revestimento adequado de até 40% das emissões de COV.

**Palavras-chave:** Hidrocarbonetos. Emissões fugitivas. Poluição do ar.

## ABSTRACT

Hydrocarbon tank parks generate environmental impacts due to the fugitive emission of VOCs from tanks of storage, because these are basically designed with economic criteria. VOC emissions generate air pollution problems. With the objective of establishing environmental criteria for the development of storage tank projects, aiming at the reduction of emissions, VOC emissions were estimated by the Tanks software for three types of hydrocarbon storage tanks. The configuration, tank distribution, colour and surface integrity for three products (gasoline, diesel and petroleum) were evaluated. The study indicated that the application of the environmental criteria resulted in increased storage efficiency, reduced losses and minimization of air pollution. Using the criteria in tank sizing can reduce VOC emissions by as much as 50%, depending on the type of hydrocarbon stored. The proposed volume distribution criteria would allow for reductions of up to 80% and adequate coating of up to 40% of VOC emissions.

**Keywords:** Hydrocarbons. Fugitive emissions. Air pollution.

## 1 INTRODUÇÃO

A emissão de compostos orgânicos voláteis (COV) em refinarias de petróleo pode ser afetada por muitos fatores, incluindo condições meteorológicas (por exemplo, temperatura, velocidade do vento), condições de produção, transferência do produto e pontos de amostragem (LV *et al.*, 2021). Os tanques de armazenamento de hidrocarbonetos são responsáveis pela emissão de 56% a 79% dos COV em refinarias e plantas petroquímicas (LV *et al.*, 2021; PREZOTTI; TRESMONDI, 2006).

Alguns destes compostos são tóxicos e perigosos para a saúde e todos eles contribuem para a formação de ozônio ( $O_3$ ) na baixa troposfera (JAECKER-VOIROL, 2000). Segundo Dai *et al.* (2017), os COV podem, a curto e a longo prazo, causar efeitos adversos à saúde, incluindo irritação, alergias, redução das funções pulmonares, asma e até mesmo leucemia, especialmente em populações vulneráveis.

O ozônio é um subproduto importante da degradação dos COV na atmosfera. A substância é tóxica e afeta o crescimento de plantas, a saúde humana e os materiais (MARTINS, 2004). A formação de ozônio ao nível do solo, induzida pela luz, é um problema em muitos centros urbanos do mundo. O fenômeno é chamado smog fotoquímico (BAIRD, 2011). Estudos mostram que os poluentes precursores do ozônio não apresentam apenas efeitos locais, de acordo com Ryoo *et al.* (2017), elevações nas concentrações de ozônio no oeste dos Estados Unidos foram atribuídas ao transporte de poluentes originados na Ásia.

Outros poluentes secundários derivados dos COV, como os chamados aerossóis orgânicos secundários (AOS) e o peroxiacetilnitrato (PAN), também têm recebido considerável atenção, sendo citados em diversos estudos sobre poluição do ar, como em Zhang *et al.* (2017), Li *et al.* (2015) e Huang *et al.* (2015). Os estudos são relacionados à abundância dos compostos, composição e fontes, assim como os processos químicos responsáveis pela sua geração, além de estratégias para controle dos poluentes primários.

As concentrações de COV em locais próximos a complexos petroquímicos são muito maiores que em áreas residenciais (WU *et al.*, 2014; CETIN; ODABASI; SEYFIOGLU, 2003). Uma das fontes de COV nesses complexos industriais são as emissões fugitivas de tanques de armazenamento de combustíveis (OLIVEIRA; KOLICHESKI; KAWANO, 2017).

Klepikov, Klepikova e Shahbaz (2022) estimaram as emissões de tanques das refinarias da Rússia, país que é um dos maiores produtores de petróleo do mundo, e concluíram que há grandes possibilidades de redução das emissões dos parques de tancagem. Segundo o estudo, melhorias nas refinarias do país poderiam reduzir as emissões relativas à tancagem em um fator de 55.

A redução das emissões está de acordo com o princípio da prevenção, derivado do direito ambiental, que decorre da constatação lógica de que, em razão da irreversibilidade de grande parte dos danos

ambientais, é melhor prevenir as degradações ambientais em vez de ter, posteriormente, que remediá-las (CARVALHO, 2007).

Do ponto de vista jurídico, aquele que exerce uma atividade potencialmente poluidora ou que implique risco a alguém assume a responsabilidade pelos danos oriundos do risco criado (COLOMBO, 2007). Um aspecto importante é que as perdas por evaporação provenientes de armazenamentos em tanques apresentam, além dos aspectos ambientais citados, um fator econômico associado à perda de produtos, gerando um interesse econômico por parte das indústrias.

Os fatores de emissão são uma ferramenta importante na gestão de emissões em parques de tancagem de combustíveis, pois permitem avaliações de grandes volumes de informação, de maneira rápida e com razoável confiabilidade. A quinta edição do AP-42 – *Compilation of air emission factors* –, documento elaborado pela agência ambiental dos Estados Unidos (U.S. EPA), apresenta em seu capítulo 7, publicado em 2006, os fatores de emissão para tanques de armazenamento de produtos químicos (U.S. EPA, 2006).

Os fatores de emissão estabelecidos no documento são a base do *software* Tanks, que permite que o usuário obtenha relatórios de emissões de tanques mediante o fornecimento de informações sobre as características do tanque de armazenamento, o conteúdo líquido e sobre o local de instalação do tanque (PREZOTTI; TRESMONDI, 2006).

O tipo de tanque de armazenamento é fundamental na quantidade de emissões. Além dos aspectos construtivos, condições de movimentação de produtos e aspectos climáticos interferem nas emissões (OLIVEIRA; KOLICHESKI; KAWANO, 2017; U. S. EPA, 2006). No caso de refinarias, a emissão de COV depende, dentre outros fatores, das características do óleo processado, e as emissões totais típicas variam entre 50 a 1000 toneladas por milhão de toneladas de óleo cru processado (MALAKAR *et al.*, 2017).

O padrão mundial usado para projetos de tanques cilíndricos de grande porte para armazenamento de produtos líquidos é a norma API STD 650. No Brasil, existe ainda a norma N-270, da Petrobras, que complementa a primeira. Segundo a norma N-270, a seleção do tipo de tanque de armazenamento deve ser feita com o uso de um estudo adequado, levando em consideração: condições e requisitos ambientais, segurança operacional, custo do tanque, perdas operacionais e qualidade exigida no produto armazenado (PETROBRAS, 2014). O Quadro 1 apresenta os tipos de tanques recomendados pela N-270 para alguns hidrocarbonetos.

**Quadro 1 - Tipos de tanques recomendados pela norma N-270 para armazenamento de alguns hidrocarbonetos**

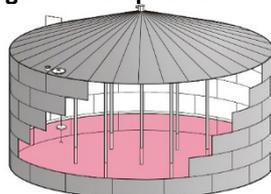
Produto Armazenado	Tipo de tanque
Produtos leves da faixa da gasolina. Petróleo cru.	Tanque atmosférico de teto flutuante externo. Tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno.
Óleo diesel classes I e II.	Tanque atmosférico de teto flutuante externo. Tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno.
Óleo diesel classe III.	Tanque atmosférico de teto fixo.

Fonte: Adaptado de PETROBRAS, 2014

Os tanques utilizados nas simulações para obtenção das estimativas de emissões foram os mais comuns nas indústrias do Brasil, que são os tanques de teto fixo, tanques de teto flutuante externo e tanques de teto flutuante interno.

Os tanques de teto fixo (Figura 1) consistem de uma armação de aço cilíndrica, com um teto permanentemente afixado, que pode variar num formato cônico ou domo. Nos projetos de tanques, os de teto fixo são os mais econômicos para construir e são considerados como o equipamento mínimo aceitável para armazenamento de compostos orgânicos líquidos (OLIVEIRA, 2015).

**Figura 1 - Tanques de teto fixo**



Fonte: Adaptado de U.S. EPA, 2006

De acordo com a NBR 15.724-1, os tanques de teto fixo geram as maiores emissões de hidrocarbonetos quando comparados os quatro tipos principais de tanques, devido principalmente ao espaço de vapor que existe entre a superfície do líquido e o teto fixo. Como o tanque é exposto às variações de temperatura ambiente e radiação solar, uma mistura contendo vapor do líquido armazenado e ar se forma no espaço e o vapor é emitido através do respiro ou de uma válvula de pressão e vácuo (ABNT, 2009).

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

Os tanques de teto flutuante externo (Figura 2) típicos consistem de um casco de aço cilíndrico aberto, equipado com um teto que flutua na superfície do líquido armazenado (U.S. EPA, 2006). O objetivo

do sistema flutuante é reduzir a perda evaporativa do líquido armazenado, mas alguns espaços ainda permanecem entre o sistema de vedação e a parede do tanque, permitindo que ocorram as emissões.

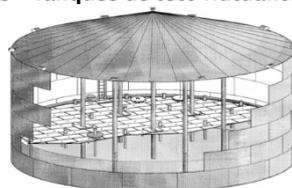
**Figura 2 - Tanques de teto flutuante externo**



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

Os tanques de teto flutuante interno (Figura 3), por sua vez, possuem um teto fixo no seu topo e um teto flutuante no seu interior (U.S. EPA, 2006). Existem dois tipos básicos de tanques de teto flutuante interno: tanques em que o teto é suportado por colunas verticais dentro do tanque e tanques com teto fixo autoportante, sem suporte interno de colunas (ABNT, 2009).

**Figura 3 - Tanques de teto flutuante interno**



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

O estudo teve como objetivo estabelecer critérios para o desenvolvimento de projetos de tanques de armazenamento de hidrocarbonetos, com o propósito de redução das emissões. Foram determinadas as emissões de COV para três tipos de hidrocarbonetos (gasolina, diesel e petróleo), variando parâmetros de projeto, com o uso de fatores de emissão do *software* Tanks.

Os critérios ambientais podem ser utilizados para auxiliar na decisão da melhor tecnologia a ser aplicada em projetos de novos tanques, resultando no aumento da eficiência dos processos de armazenamento de hidrocarbonetos e contribuindo para a minimização da poluição atmosférica.

### **3 METODOLOGIA**

O estudo consistiu na realização de simulações das emissões de COV de três tipologias de tanques (teto fixo, teto flutuante externo e teto flutuante interno), variando parâmetros relacionados ao dimensionamento dos tanques, distribuição de volumes no parque de tancagem e cor e integridade do costado e do teto dos tanques. Para representar a realidade dos parques de armazenamento, foram

avaliados tanques de 2.000 m<sup>3</sup>, 10.000 m<sup>3</sup>, 40.000 m<sup>3</sup> e 80.000m<sup>3</sup> para os produtos gasolina e diesel e tanques de 80.000 m<sup>3</sup> para o petróleo, que normalmente é estocado em grandes volumes.

As simulações dos fatores de emissão de COV foram realizadas com três produtos, os quais estão presentes no banco de dados do *software* Tanks: gasolina (*gasoline* RVP10), diesel (*distillate oil* n°21) e petróleo (*crude oil* RVP5). Algumas das propriedades físico-químicas dos produtos estão mostradas na Tabela 1, nas unidades originais do programa.

**Tabela 1 - Propriedades físico-químicas dos produtos utilizados nas simulações**

Propriedades	Gasolina	Diesel	Petróleo
Peso molecular líquido	92	387	207
Densidade (lb/gal a 60 °F)	5,6	7,9	7,1
Peso molecular vapor	66	190	50
Pressão de vapor (psia a 100 °F)	10	1,9 x 10 <sup>-4</sup>	5

**Fonte: Banco de dados do programa Tanks (U.S. EPA, 1999)**

Para as simulações, foi utilizado o *software* Tanks. Esse *software* foi desenvolvido e distribuído pela Agência Ambiental dos Estados Unidos (U.S. EPA, 1999), o mesmo é de uso público, para fins não comerciais.

Além das características dos produtos e do tipo de tanque, o *software* precisa ser alimentado com dados construtivos dos tanques, tipo e quantidade de acessórios, taxa de transferência de produto, cor e condição do teto e do costado do tanque e dados meteorológicos e com as condições iniciais para cada cenário. Cada tipo de tanque possui uma lista específica de parâmetros que precisam ser alimentados ao Tanks, conforme mostrado no Quadro 2.

**Quadro 2 - Variáveis do *software* Tanks para cada um dos tanques avaliados**

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

Fonte: Os autores, 2021

Os dados meteorológicos que foram inseridos no *software* Tanks foram obtidos de uma estação de monitoramento localizada no estado do Paraná – Brasil, consistindo de médias mensais.

### 1.1 CRITÉRIOS DE PROJETO AVALIADOS

As variações das emissões de COV foram simuladas considerando critérios de dimensionamento dos tanques, distribuição de volumes num parque de tancagem e cor e integridade do costado e do teto dos tanques.

A influência do dimensionamento foi avaliada em função da variação das suas dimensões básicas, o diâmetro (D) e a altura (H), representados no estudo pela razão das duas dimensões (D/H). A relação D/H determina a área superficial dos tanques, assim como outras características que contribuem para as emissões, como circunferência de selos de vedação, volumes de espaço de vapor e número de acessórios (U.S. EPA, 2006).

A distribuição da taxa de transferência de produtos em um parque de tancagem foi testada para diferentes configurações, variando a quantidade e o volume dos tanques. A taxa de transferência de produto corresponde ao volume movimentado de líquido ao longo do ano. O valor é obtido da multiplicação do número de giros (enchimentos e esvaziamentos completos) pelo volume do tanque (U.S. EPA, 2006).

Outro critério que também foi avaliado é a influência da cor e da integridade do revestimento externo do costado e do teto dos tanques. Apesar de parecer sutil, essa alteração pode causar variações significativas nas emissões em tanques de armazenamento de hidrocarbonetos. Os tanques testados apresentavam as seguintes cores e condições de costado e teto: branco em bom estado, branco em mal estado, cinza médio em bom estado, vermelho *primer* em bom estado.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 DIMENSIONAMENTO

A determinação dos cenários simulados na avaliação do dimensionamento teve como referência limitações de engenharia ou do *software* Tanks, o diâmetro e a altura. As dimensões limitantes utilizadas foram diâmetro máximo de 100 metros e altura entre 4 m e 18,5 m. Os volumes dos tanques considerados no estudo permitem uma combinação diferente da relação diâmetro/altura (D/H), assim foram testados os valores limitantes (diâmetro e altura mínimos e máximos), e alguns valores intermediários, como mostrado na Tabela 2. As relações D/H foram simuladas para as três tipologias de tanques escolhidas, totalizando 164 simulações.

Para a gasolina e o diesel, todos os volumes (Tabela 2) foram simulados para estimar as emissões de COV. Para o petróleo foram simuladas apenas as relações D/H de tanques de 80.000 m<sup>3</sup>, uma vez que nos parques de armazenamento de hidrocarbonetos os tanques para esse produto geralmente são de grandes proporções.

**Tabela 2 – Configurações testadas para estimativa das emissões referentes ao dimensionamento**

<b>Volume (m³)</b>	<b>D/H</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Diâmetro (m)</b>
2.000	6,31	4,00	25,23
	6,00	4,14	24,81
	4,00	5,42	21,68
	2,00	8,60	17,21
	1,00	13,66	13,66
	0,63	18,50	11,73
10.000	14,10	4,00	56,42
	10,00	5,03	50,31
	8,00	5,84	46,70
	6,00	7,07	42,43
	4,00	9,27	37,07
	2,00	14,71	29,42
	1,42	18,5	26,23
40.000	19,63	5,09	100,00
	12,00	7,07	84,86
	10,00	7,99	79,86
	8,00	9,27	74,14
	6,00	11,23	67,36
	4,00	14,71	58,84
	2,84	18,50	52,47
80.000	9,82	10,19	100,00
	8,00	11,68	93,40
	6,00	14,14	84,86
	4,01	18,50	74,20

**Fonte: Os autores, 2021**

A variação da relação D/H resultou em diferentes emissões, como pode ser observado na Tabela 3, a qual mostra os resultados expressos como percentual de redução das emissões.

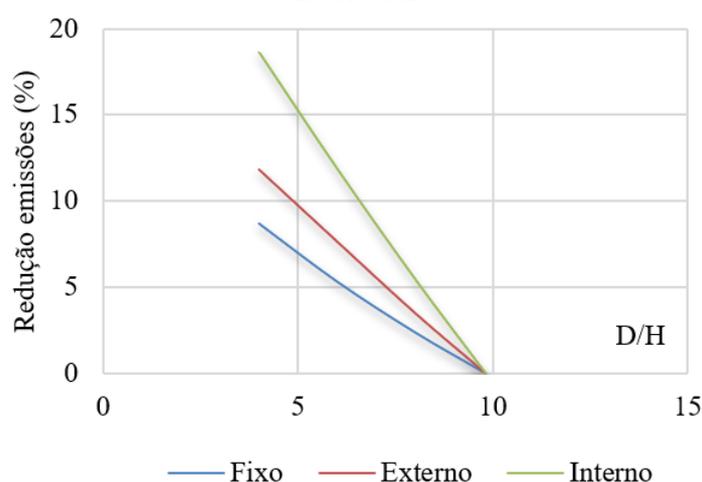
**Tabela 3 – Percentual de redução das emissões nas simulações para avaliação do dimensionamento, comparando os três tipos de tanques e os produtos gasolina (G) e diesel (D)**

Volume (m³)	D/H	Redução de emissões de COV (%)					
		Teto Fixo		Teto flutuante			
				Externo		Interno	
		G	D	G	D	G	D
2.000	6,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	6,00	1,03	0,43	0,96	-0,57	1,06	-0,80
	4,00	8,32	3,52	8,74	-5,82	13,20	-6,97
	2,00	17,46	7,10	20,14	-18,56	29,73	-22,33
	1,00	23,09	9,31	29,75	-36,64	41,79	-44,48
	0,63	26,50	10,29	34,12	-52,36	47,62	-63,27
10.000	14,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10,00	6,70	3,50	9,16	-4,37	12,65	-3,90
	8,00	10,39	5,35	14,90	-8,47	19,55	-7,38
	6,00	14,43	7,27	20,83	-13,94	27,59	-12,82
	4,00	19,08	9,35	28,77	-23,13	37,66	-22,31
	2,00	24,87	11,73	39,06	-44,31	50,52	-44,44
40.000	1,42	26,96	12,53	43,40	-57,42	56,04	-58,13
	19,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	12,00	8,24	4,97	13,92	-8,09	19,43	-6,13
	10,00	10,69	6,34	18,79	-11,76	25,59	-9,25
	8,00	13,35	7,78	23,91	-16,93	32,33	-13,77
	6,00	16,27	9,27	30,09	-24,50	39,81	-21,03
80.000	4,00	19,63	10,88	37,52	-37,25	48,79	-32,64
	2,84	21,89	11,91	43,17	-50,00	55,18	-44,79
	9,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	8,00	2,32	1,26	6,10	-3,01	8,63	-4,13
	6,00	5,15	2,74	13,80	-8,09	19,29	-10,90
	4,01	8,33	4,28	23,63	-16,86	31,84	-22,32

Fonte: Os autores, 2021

Para a gasolina em tanque de teto flutuante interno de 10.000 m<sup>3</sup>, a redução de emissões de COV chegou a 56% com a relação D/H mínima, e em todos os tipos e volumes de tanque há redução das emissões quando a relação diminui. O mesmo perfil foi observado para o petróleo (80.000 m<sup>3</sup>), porém os resultados foram menos expressivos (Figura 2). De acordo com Paulauskienė, Zabukas e Vaitiekūnas (2009), a intensidade das emissões de COV em tanques de armazenamento depende diretamente dos parâmetros de construção do tanque e do tipo de produto, o que também foi constatado neste estudo.

**Figura 2 - Percentual de redução das emissões de COV em relação à variação da relação D/H para o petróleo para tanques de 80.000 m<sup>3</sup>**



Fonte: Os autores, 2021

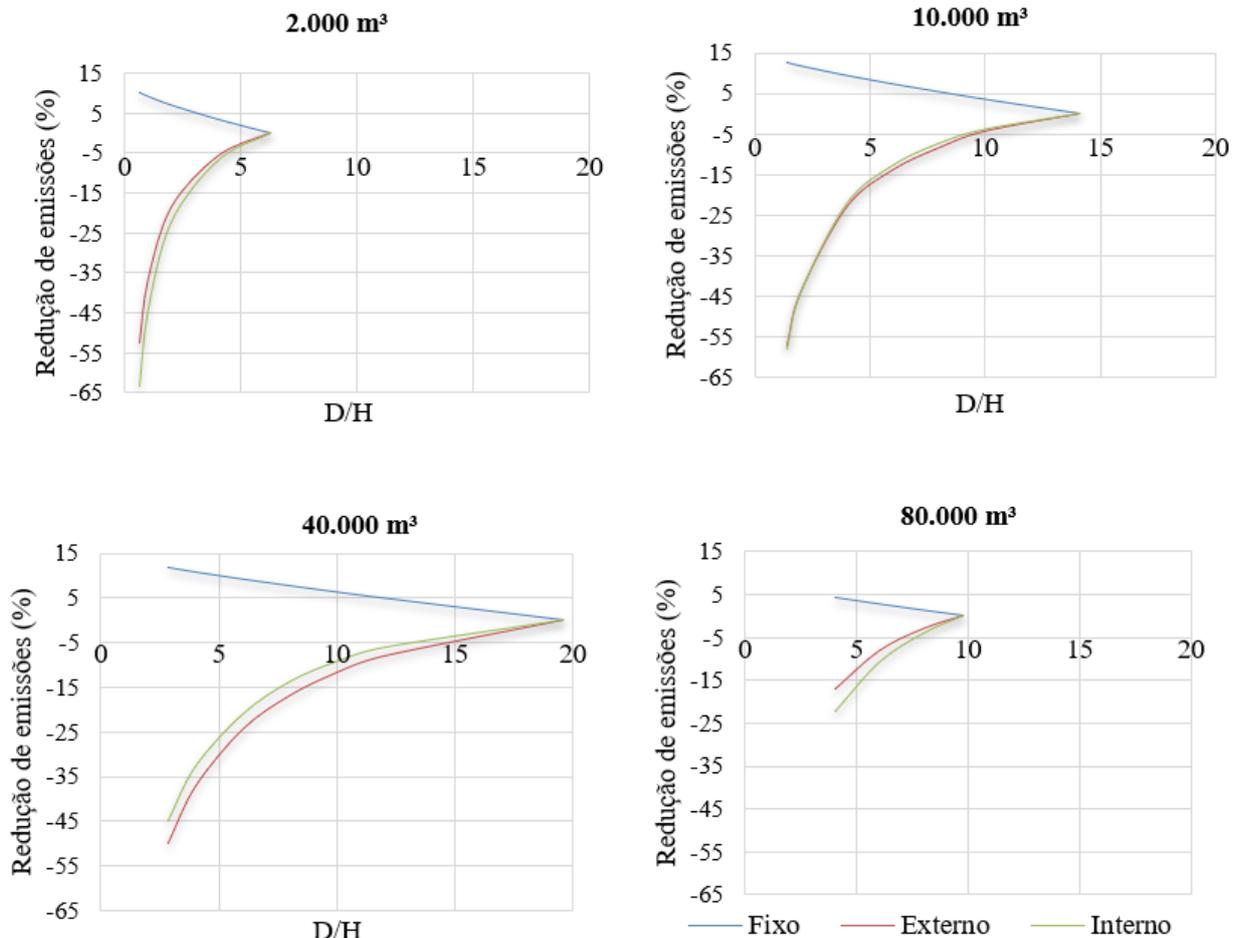
Isto mostra que a escolha das dimensões do tanque de armazenamento deve ser associada ao tipo de produto que será armazenado, pois, como se observa na Tabela 3, a relação D/H não pode ser generalizada, ou seja, nem sempre a menor relação permitirá a maior redução de COV. A Figura 3 ilustra a inversão desse comportamento, para os diferentes tipos de teto, quando o produto armazenado é o diesel. Para o diesel, a redução da relação D/H também resulta em redução das emissões de COV nos tanques de teto fixo, porém, esta condição se inverte para os tanques de teto flutuante. Nesse caso, as emissões aumentam quando a relação D/H diminui, independentemente do volume do tanque.

De acordo com Zinke, Kohler e Krause (2018), os tanques de teto flutuante apresentam emissões devido a duas condições: (i) imperfeições nas selagens; e (ii) formação de filmes na parede interna durante o descarregamento do tanque.

Nos tanques de teto flutuante que armazenam gasolina ou petróleo, os mecanismos que dominam as emissões são os relacionados ao armazenamento, diretamente ligados à vedação do tanque. Esses mecanismos causam aumento das emissões à medida que o diâmetro aumenta. Nos tanques de teto

flutuantes que armazenam diesel, o mecanismo dominante é o de descarregamento, que tem efeito oposto ao anterior e diminui as emissões conforme aumenta-se o diâmetro.

**Figura 3 - Percentual de redução das emissões de COV em relação à variação da relação D/H para o diesel**



Fonte: Os autores, 2021

Skaf e Iervolino (2019) ressaltam a importância de dados meteorológicos adequados para que se obtenham boas estimativas de emissão. Deve-se selecionar dados meteorológicos compatíveis com o local de estudo. De acordo com Zhang *et al.* (2020), a velocidade do vento em tanques de teto flutuante interno influenciam muito a taxa de perda de vapor dos tanques.

As reduções das emissões devido ao dimensionamento são mais significativas nos tanques menores (Tabela 4). Isso ocorre porque o espaço considerado entre a altura efetiva do tanque e a altura operacional (altura máxima de carregamento), que implica no volume disponível para os gases vaporizados

dos produtos, chamado “espaço vapor”, foi considerada igual em todos os tanques, assim, quanto maior o volume do tanque, menos representativa é essa diferença.

**Tabela 4 - Redução percentual das emissões de COV considerando relações D/H de 4 e 6 para tanques de teto fixo e gasolina**

Volume (m³)	D/H	Redução de emissões de COV (%)
2.000	4	7,37
	6	0,00
10.000	4	5,44
	6	0,00
40.000	4	4,01
	6	0,00
80.000	4	3,35
	6	0,00

Fonte: Os autores, 2021

#### 4.2 DISTRIBUIÇÃO DOS VOLUMES NOS PARQUES DE TANCAGEM

A avaliação da distribuição de volumes nos parques de tancagem consistiu na estimativa das emissões considerando 3 cenários, variando quantidade e capacidade dos tanques, com um volume armazenado total constante de 80.000 m³. A primeira configuração consistiu de 8 tanques de 10.000 m³, a segunda de 2 tanques de 40.000 m³ e a terceira apenas 1 tanque de 80.000 m³.

De acordo com Paulauskienė, Zabukas e Vaitiekūnas (2009), o tipo de operação de carregamento (carga, descarga, armazenamento) e o nível de um produto no tanque de armazenamento influenciam na emissão de COV. Para os autores, o volume de COV aumenta no nível mínimo de enchimento do tanque de armazenamento, pois a evaporação é favorecida.

Para avaliar este comportamento, foram realizadas simulações para três diferentes números de giro: 1,52 e 365 ano<sup>-1</sup>. O número de giros representa o número de enchimentos e esvaziamentos anuais de um tanque, e esse valor, multiplicado pelo volume do tanque ou do parque de tancagem, resulta na taxa de transferência de produto. Os resultados de gasolina e diesel são mostrados na Tabela 5. Essa avaliação não considerou o petróleo, que é armazenado tipicamente em tanques de grandes volumes.

Os resultados indicam que para tanques de teto flutuante, um tanque único de grande volume é sempre a melhor opção, para ambos os produtos e para qualquer número de giros. Considerando a gasolina, a diferença nas emissões de COV chega a 78% para tanques de teto flutuante externo.

Nos tanques de teto fixo, o uso de um único tanque também é mais vantajoso, mas a diferença é menor do que para os tanques de teto flutuante. Quando avaliaram-se giros mais altos, a vantagem é ainda menor. No caso do diesel, a redução varia de 1 a 2% quando o número de giros é maior do que 52.

**Tabela 5 - Redução percentual das emissões de tanques variando configurações do parque de tancagem, para gasolina (G) e diesel (D)**

Nº de tanques	Volume (m³)	Giros (ano <sup>-1</sup> )	Redução de emissões de COV (%)					
			Teto Fixo		Teto flutuante			
					Externo		Interno	
			G	D	G	D	G	D
1	6,31		41	9	78	74	72	68
2	6,00	1	30	6	65	60	58	54
8	4,00		0	0	0	0	0	0
1	2,00		7	2	78	53	71	52
2	1,00	52	5	1	64	40	57	39
8	0,63		0	0	0	0	0	0
1	14,10		3	1	76	50	69	50
2	10,00	365	2	1	62	37	55	37
8	8,00		0	0	0	0	0	0

Fonte: Os autores, 2021.

De acordo com Klepikov, Klepikova e Shahbaz (2022), a utilização de tanques com maiores capacidades é uma das medidas que podem ser aplicadas para obter redução das emissões globais. Os resultados deste estudo demonstram que um planejamento e uma gestão adequada da transferência dos produtos dos tanques trará benefícios ambientais com a redução das emissões de COV ao longo do ano.

#### 4.3 COR E INTEGRIDADE DO REVESTIMENTO EXTERNO DE COSTADO E TETO

A cor e integridade da superfície de tanques de armazenamento implica em variações nas quantidades de emissões de COV. De acordo com U.S. EPA (2006), tanques de cor metálica natural são os que emitem menos e tanques com aspectos de ferrugem recobridos a pintura original apresentam considerável aumento nas emissões. De acordo com Halliday e Resnick (2012), a diferença entre as emissões está relacionada à absorção de radiação solar que cada condição oferece.

No AP-42, documento que contém os fatores de emissão utilizados pelo *software* Tanks (U.S. EPA, 2006), o fator de absorção de radiação térmica é chamado de fator de absorção de energia luminosa e

representado por  $\alpha$  (Tabela 6). Sabe-se que a taxa com a qual um objeto absorve energia da radiação térmica do ambiente depende da área superficial e da temperatura do ambiente, além de propriedades da superfície do objeto (HALLIDAY; RESNICK, 2012).

**Tabela 6 - Fatores  $\alpha$  para diversas cores de tanques de armazenamento de hidrocarbonetos**

Cor	Tipo	Fatores $\alpha$ em função da integridade do revestimento	
		Boa	Ruim
Alumínio	Especular	0,39	0,49
Alumínio	Difuso	0,60	0,68
Alumínio	Sem pintura	0,10	0,15
Bege/Creme	-	0,35	0,49
Preto	-	0,97	0,97
Marrom	-	0,58	0,67
Cinza	Claro	0,54	0,63
Cinza	Médio	0,68	0,74
Verde	Escuro	0,89	0,91
Vermelho	Primer	0,89	0,91
Ferrugem	Óxido de ferro	0,38	0,50
Bronze	-	0,43	0,55
Branco	NA	0,17	0,34

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

O dimensionamento utilizado nas simulações foi padronizado, de maneira a possibilitar a comparação entre os diferentes volumes de tanques. A relação diâmetro/altura (D/H) foi mais uma vez utilizada para esta padronização. Foram estimadas as emissões de COV considerando a relação D/H que implicava na menor área superficial possível, que pode ser obtida igualando a zero a derivada da equação do volume do cilindro (forma geométrica do tanque). Os cálculos indicam que a relação D/H = 2 é a solução. Onde há limitações de engenharia para a relação D/H = 2 (tanques de grandes volumes), foi utilizada a relação possível mais próxima desta. Os resultados estão mostrados na Tabela 7.

Os resultados (Tabela 7) indicam que reduções nas emissões de COV podem ser alcançadas se utilizados critérios adequados relacionados à cor e à integridade do revestimento externo. No caso da gasolina, os tanques de teto flutuante apresentaram redução das emissões de até 24,40% quando comparados o revestimento vermelho *primer* (V) e o branco (B) em bom estado (b). Já para o diesel, a

redução das emissões em tanques de teto fixo chegou a 46,25%. O petróleo apresentou redução de emissões de 27,18% nos tanques de teto fixo e acima de 14% nos tanques de teto flutuante.

Entre o revestimento branco em bom estado (B/b) e branco em estado ruim (B/r), a redução das emissões foi de aproximadamente 15% para o diesel em tanque de teto fixo, 6% para a gasolina em tanque de teto flutuante e 3% para petróleo em tanque de teto flutuante, o que mostra a importância de um programa de manutenção de tanques de armazenamento de hidrocarbonetos.

**Tabela 7 - Percentual de redução das emissões de COV na avaliação da cor, branco (B), cinza (C) e vermelho (V) e com integridade boa (b) e ruim (r) do revestimento externo, para gasolina (G), diesel (D) e petróleo (P)**

Volume (m³)	Cor / Estado	Redução de emissões de COV (%)								
		Teto Fixo			Teto flutuante					
					Externo			Interno		
		G	D	P	G	D	P	G	D	P
2.000	B/b	40,62	46,25	-	24,40	9,16	-	24,34	6,08	-
	B/r	32,75	36,75	-	19,37	7,12	-	19,33	4,74	-
	C/b	14,07	15,76	-	8,03	3,05	-	8,01	2,02	-
	V/b	0,00	0,00	-	0,00	0,00	-	0,00	0,00	-
10.000	B/b	34,43	45,21	-	24,31	5,33	-	24,24	3,86	-
	B/r	27,60	35,88	-	19,30	4,14	-	19,24	3,00	-
	C/b	11,72	15,38	-	8,00	1,77	-	7,98	1,28	-
	V/b	0,00	0,00	-	0,00	0,00	-	0,00	0,00	-
40.000	B/b	32,05	45,01	-	24,24	3,84	-	24,19	3,31	-
	B/r	25,63	35,72	-	19,25	2,99	-	19,21	2,57	-
	C/b	10,82	15,30	-	7,98	1,28	-	7,96	1,10	-
	V/b	0,00	0,00	-	0,00	0,00	-	0,00	0,00	-
80.000	B/b	32,06	45,22	27,18	24,23	5,95	14,92	24,21	3,54	14,71
	B/r	25,63	35,89	20,22	19,24	4,63	11,70	19,22	2,75	11,54
	C/b	10,83	15,38	5,06	7,97	1,98	4,72	7,97	1,18	4,65
	V/b	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Os autores, 2021.

#### 4.4 APLICAÇÃO DE CRITÉRIOS CONSTRUTIVOS

A norma técnica API STD 650 (API, 2010) é o padrão mundialmente usado para projeto de tanques cilíndricos de grande porte para armazenamento de produtos líquidos, especialmente para petróleo e derivados (AZZUNI; GUZEI, 2015). Esse documento possui uma gama de apêndices para condições e alternativas de construção, que vão desde pressão ou vácuo acima dos limites de corpo da norma, tanques em aço inoxidável, tetos flutuantes internos, externos, geodésicos, dentre outras situações específicas (OLIVEIRA, 2015). Existem também normas específicas de algumas empresas, como a Norma Petrobras N-270 (PETROBRAS, 2014), que tem o objetivo de complementar a API STD 650 (API, 2010).

De acordo com Meneguzzi e Carvalho (2009), mesmo existindo a necessidade de que o Estado imponha medidas preventivas, a fim de ser evitada a poluição ambiental, em caso de dano provocado pela atividade poluidora, a responsabilização é daquele que causou o dano. Assim, deve-se priorizar a aplicação de medidas preventivas. Além disso, apesar da abrangência e complexidade das normas para o projeto de tanques, essas não mencionam critérios ambientais para o desenvolvimento dos projetos de tanques de armazenamento. Embora possa haver o entendimento de que tais critérios devem ser estabelecidos e exigidos pelos órgãos ambientais, sua aplicação pode trazer benefícios inclusive para o empreendedor, que reduz a perda de produto comercial, além da redução da poluição da atmosfera.

Valle (1995) *apud* Naime e Andara (2009) ressalta ainda que a poluição gerada pela indústria nada mais é do que uma forma de desperdiçar matérias-primas e insumos, além de ser um forte indício de ineficiência dos processos produtivos. Ou seja, todo tipo de desperdício deve ser evitado, e a aplicação das análises realizadas neste estudo - que são de fácil aplicação - permitem evitar esse tipo de desperdício e reduzem a possibilidade de poluição do ar. No Quadro 3, podem ser observados os critérios identificados neste estudo para a construção de tanques, visando a redução das emissões de COV, com uma avaliação de relevância da aplicação.

**Quadro 3 - Critérios para projetos propostos por este estudo para o dimensionamento de tanques de armazenamento de hidrocarbonetos visando a redução das emissões de COV**

<b>Dimensionamento</b>		
<b>Produto</b>	<b>Melhor condição</b>	<b>Relevância</b>
Gasolina	Menor diâmetro possível	Muito relevante
Diesel	Menor diâmetro possível (tanque de teto fixo) Maior diâmetro possível (tanque de teto flutuante)	Relevante
Petróleo	Menor diâmetro possível	Relevante
<b>Distribuição da tancagem</b>		
<b>Produto</b>	<b>Melhor condição</b>	<b>Relevância</b>
Gasolina	Menor número de tanques Maior volume possível	Muito relevante
Diesel	Menor número de tanques Maior volume possível	Relevante
Petróleo	Menor número de tanques Maior volume possível	Muito relevante
<b>Cor do revestimento externo</b>		
<b>Produto</b>	<b>Melhor condição</b>	<b>Relevância</b>
Gasolina	Branco	Relevante
Diesel	Branco ou cinza	Pouco relevante
Petróleo	Branco	Relevante

**Fonte: Os autores, 2021**

De acordo com Lv *et al.* (2021), os tanques de armazenamento são a maior fonte de emissão de COV na refinaria estudada e correspondem a 56,4% das emissões totais, mostrando a importância do uso de critérios ambientais, além de técnicos e econômicos para o dimensionamento de tanques de armazenamento de hidrocarbonetos. Koçak (2022) comparou estimativas de emissão geradas pelo *software* Tanks com medições em campo, obtendo uma forte correlação estatística, sugerindo que a estrutura de modelagem pode ser usada como uma ferramenta para plantas que possuem tanques de armazenamento de hidrocarbonetos para planejar suas estratégias de gestão de COV.

A aplicação dos critérios estabelecidos pode ser muito útil na gestão de projetos de parques de tancagem. Os critérios, nesse caso, devem ser utilizados para auxiliar na decisão da melhor tecnologia

a ser aplicada. Uma análise das emissões pode demonstrar que um investimento inicial mais alto para a instalação de uma determinada tecnologia pode, eventualmente, compensar devido a redução das perdas de produtos durante a vida útil do tanque.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação das emissões de COV em diferentes tipologias de tanques de armazenamento de hidrocarbonetos indicou que a aplicação de alguns critérios construtivos pode representar consideráveis vantagens ambientais, com vantagens econômicas associadas, devido à possibilidade de redução das emissões. Entre os critérios construtivos, pode-se citar o uso de tanques com a menor relação D/H possível para armazenamento de gasolina e petróleo, para tanques de qualquer tipo, e a maior relação D/H para tanques de teto flutuante com diesel.

O volume de cada um dos tanques do parque de tancagem deve ser maximizado, de modo a haver o menor número possível de tanques. Essa condição aplica-se para qualquer tanque e produto avaliado neste estudo, contudo, é mais relevante para gasolina quando armazenada em tanques de teto flutuante.

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

## REFERÊNCIAS

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

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

AZZUNI, E.; GUZEY, S. Comparison of the shell design methods for cylindrical liquid storage tanks. **Engineering Structures**, v. 101, p. 621-630, 2015. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.07.050.

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

CARVALHO, D. W. O direito e o gerenciamento dos riscos ambientais. **Gestão e Desenvolvimento**, v. 4, n. 1, 2007. DOI: <https://doi.org/10.25112/rgd.v4i1.866>.

CETIN, E.; ODABASI, M.; SEYFIOGLU, R. Ambient volatile organic compound (VOC) concentrations around a petrochemical complex and a petroleum refinery. **The Science of the Total Environment**, v. 312, p. 103-112, 2003. DOI: 10.1016/S0048-9697(03)00197-9.

COLOMBO, S. A responsabilidade civil objetiva no direito ambiental. **Gestão e Desenvolvimento**, v. 4, n. 2, 2007. DOI: <https://doi.org/10.25112/rgd.v4i2.892>.

DAI, H.; JING, S.; WANG, H.; MA, Y.; LI, L.; SONG, W.; KAN, H. VOC characteristics and inhalation health risks in newly renovated residences in Shanghai, China. **Science of Total Environment**, v. 577, p. 73-83, 2017. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.071.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos de Física**. Volume 2. 9. ed. Barueri: LTC, 2012.

HUANG, C.; WANG, H. L.; LI, L.; WANG, Q.; LU, Q.; GOUW, J. A.; ZHOU, M.; JING, S. A.; LU, J.; CHEN, C. H. VOC species and emission inventory from vehicles and their SOA formation potentials estimation in Shanghai, China. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 15, p. 11081-11096, 2015. DOI: 10.5194/acp-15-11081-2015.

JAECKER-VOIROL, A. VOC - Volatile Organic Compounds. **Pollutants from Combustion**, v. 547, p. 241-261, 2000. DOI: 10.1007/978-94-011-4249-6\_12

KOÇAK, T. K. A modeling framework to quantify routine VOC emissions and concentrations from organic liquid tanks. **International Journal of Environment and Geoinformatics**, v. 9, n. 1, p. 11-17, 2022.

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

LI, J.; XIE, S. D.; ZENG, L. M.; LI, L. Y.; LI, Y. Q.; WU, R. R. Characterization of ambient volatile organic compounds and their sources in Beijing, before, during, and after Asia-Pacific Economic Cooperation China 2014. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 15, p. 7945-7959, 2015. DOI: 10.5194/acp-15-7945-2015.

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

MALAKAR, S.; SAHA, P. D.; BASKARAN, D.; RAJAMANICKAM, R. Comparative study of biofiltration process for treatment of VOCs emission from petroleum refinery wastewater – A review. **Environmental Technology e Innovation**, v. 8, p. 441- 461, 2017. DOI: 10.1016/j.eti.2017.09.007.

MENEGUZZI, A.; CARVALHO, D. W. O princípio do poluidor pagador e a reparação dos danos ambientais. **Gestão e Desenvolvimento**, v. 6, n. 2, 2009. DOI: <https://doi.org/10.25112/rgd.v6i2.950>.

MARTINS, D. O. **Estudo do controle de emissões de compostos orgânicos voláteis em tanques de armazenamento de produtos químicos**. 2004. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo, Universidade Federal da Bahia. Salvador: UFBA, 2004.

NAIME, R.; ANDARA, S. G. Benefícios da implantação do sistema de gestão ambiental na indústria. **Gestão e Desenvolvimento**, v. 7, n. 2, 2010. DOI: <https://doi.org/10.25112/rgd.v7i2.975>.

OLIVEIRA, R. A. de; KOLICHESKI, M. B.; KAWANO, M. Utilização do software Tanks para cálculo de emissões em tanques. **Revista Banas Qualidade**, edição 299, p. 98-109, julho, 2017. Disponível em: <https://bit.ly/2HArXdO>. Acesso em: 14 fev. 2020.

OLIVEIRA, R. A. A. **Modelo matemático para avaliação ambiental e financeira da aplicação de dispositivos de controle de emissão em tanques de armazenamento: tetos flutuantes internos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente) – Curso de Pós-Graduação Meio Ambiente Urbano e Industrial, Universidade Federal do Paraná. Curitiba: UFPR, 2015.

PARANÁ – Secretaria do Meio Ambiente. **RESOLUÇÃO 016**. Curitiba, 26 de março de 2014.

PAULASKIENĖ, T.; ZABUKAS, V.; VAITIEKŪNAS, P. Investigation of volatile organic compound (VOC) emission in oil terminal storage tank parks. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, v. 17, n. 2, p. 81–88, 2009. DOI: 10.3846/1648-6897.2009.17.81-88.

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

PREZOTTI, P. R.; TRESMONDI, A. C. C. L. Inventário de emissões de compostos orgânicos voláteis de uma indústria petroquímica: tanques e emissões fugitivas. **Engenharia Ambiental**. v. 3, n. 2, p. 58-72, 2006. Disponível em: <https://bit.ly/2UP890a>. Acesso em: 15 jun. 2021.

RYOO, J.; JOHNSON, M. S.; IRACI, L. T.; YATES, E. L.; GORE, W. Investigating sources of ozone over California using AJAX airborne measurement and models: Assessing the contribution from long-range transport. **Atmospheric Environment**, v. 155, p. 53-67, 2017. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.02.008.

SKAF, D. W.; IERVOLINO, T. Atmospheric Storage Tank Emission Estimates: Understanding the Calculation Basis and Effects of Uncertainty in Meteorological Inputs. **Journal of Environmental Engineering**, v. 145, n. 12, 2019.

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

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

WU, C. F.; WU, T. G.; HASHMONAY, R. A.; CHANG, S. Y.; WU, Y. S.; CHAO, C. P.; HSU, C. P.; CHASE, M. J.; KAGANN, R. H. Measurement of volatile organic compound emission from a petrochemical tank farm using open-path Fourier transform infrared spectrometry. **Atmospheric Environment**, v. 82, p. 335-342, 2014. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.10.036.

ZHANG, G.; HUANG, F.; HUANG, W.; ZHU, Z.; FANG, J.; JI, H.; FU, L.; SUN, X. Analysis of Influence of Floating-Deck Height on Oil-Vapor Migration and Emission of Internal Floating-Roof Tank Based on Numerical Simulation and Wind-Tunnel Experiment. **Processes**, n. 8, 2020. <https://doi.org/10.3390/pr8091026>.

ZHANG, Z.; CHEN, H. W. D.; LI, Q.; THAI, P.; GONG, D.; LI, Y.; ZHANG, C.; GU, Y.; ZHOU, L.; MORAWSKA, L.; WANG, B. Emission characteristics of volatile organic compounds and their secondary organic aerosol formation potentials from a petroleum refinery in Pearl River Delta, China. **Science of the Total Environment**, v. 585, p. 1162-1174, 2017. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.179.

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