



Poluição Atmosférica na Indústria de Fertilizantes: Identificação das Fontes e Tecnologias de Controle

Matheus Brasil Monteiro

Monografia em Engenharia Química

Orientador

Marcelo Mendes Viana

Janeiro de 2023

POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA NA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES: IDENTIFICAÇÃO DAS FONTES E TECNOLOGIAS DE CONTROLE

Matheus Brasil Monteiro

Monografia em Engenharia Química submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Valéria Castro de Almeida, D.Sc.

Everton Grippa Marques, D.Sc.

Karina Moita de Almeida, D.Sc.

Orientado por:

Marcelo Mendes Viana, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Janeiro de 2023

Ficha Catalográfica

Monteiro, Matheus Brasil.

Poluição atmosférica na indústria de fertilizantes: identificação das fontes e tecnologias de controle/ Matheus Brasil Monteiro. Rio de Janeiro: EQ/UFRJ, 2023 ix, 52p; il.

(Monografia) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2023.

Orientador: Marcelo Mendes Viana

1. Fertilizantes. 2. Controle. 3. Poluição. 4. Monografia. 5. Marcelo Mendes Viana. I. Poluição atmosférica na indústria de fertilizantes: identificação das fontes e tecnologias de controle.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que estiveram comigo e me apoiaram nesta jornada árdua desde 2016 por todas as contribuições e lembranças que carregarei.

Agradeço a minha família por todo suporte e apoio que me forneceram durante esta jornada, mesmo nos momentos mais difíceis que enfrentamos.

Agradeço aos meus colegas que estiveram comigo na Legado Consultoria durante a minha passagem, e que contribuíram com muito aprendizado e bons momentos.

Agradeço aos meus amigos com quem dividi momentos inesquecíveis durante minha formação, que sempre estiveram ao meu lado em momentos de estudo e de descontração, especialmente nos jogos de baralho.

Agradeço a meus orientadores de estágio que compartilharam comigo muito conhecimento em um curtíssimo espaço de tempo.

Agradeço ao meu orientador, Marcelo, por todo apoio que me forneceu nesta última etapa do curso.

Agradeço a todos que contribuíram de certa forma para meu crescimento profissional em algum momento do curso.

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA NA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES: IDENTIFICAÇÃO DAS FONTES E TECNOLOGIAS DE CONTROLE

Matheus Brasil Monteiro

Janeiro de 2023

Orientador: Marcelo Mendes Viana

Fertilizantes compõem um insumo fundamental para o desenvolvimento da agricultura moderna, agindo como fonte de suplementação de nutrientes necessários para o desenvolvimento das plantas, podendo ser de origem mineral ou orgânica, dentre os quais, Nitrogênio, Potássio e Fósforo são os de maior demanda de suplementação, a depender da espécie da planta e condições de solo. Os fertilizantes de origem mineral são oriundos de diferentes processos e transformações industriais, as quais são responsáveis por emissões atmosféricas que podem afetar o meio ambiente e por consequência a saúde humana. Nesse contexto, nessa monografia fez-se o levantamento do processo produtivo dos principais fertilizantes de uso no território brasileiro, avaliando as possíveis fontes de emissões atmosféricas, os principais poluentes atmosféricos gerados, os limites legais estabelecidos pelas resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), as principais ferramentas de controle e métodos de monitoramento. Constatou-se que os principais poluentes atmosféricos gerados são os materiais particulados, óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre, amônia e fluoretos. Para gerir esses poluentes é fundamental a existência de mecanismos de controle de emissões atmosféricas, com a utilização de equipamentos específicos como lavadores de gases, ciclones, filtros, precipitadores eletrostáticos, queimadores e flares. O monitoramento é necessário para verificar a eficiência dos métodos de controle, com intuito final de seguir a legislação e evitar que concentrações nocivas de poluentes prejudiquem a população vizinha, seja em exposições curtas ou a longo prazo.

1. Introdução	1
2. Objetivos	4
3. Poluição Atmosférica	5
3.1 Fontes de Poluição Atmosférica na Indústria de Fertilizantes	5
3.2 Principais poluentes	7
3.3 Legislação Brasileira	9
4. Produção de Fertilizantes	13
4.1. Fertilizantes Nitrogenados:	13
4.2. Fertilizantes Fosfatados:	21
4.3. Fertilizantes Potássicos:	29
5. Controle da Poluição Atmosférica	32
5.1. Ferramentas de Controle	32
5.2. Equipamentos de Controle	32
5.3. Métodos de Monitoramento	41
6. Conclusões e Considerações Finais	44
7. Referências Bibliográficas	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama Esquemático do Processo Produtivo de Ureia com Reciclo de CO₂.....	15
Figura 2: Diagrama Esquemático do Processo Produtivo de Ureia com Reciclo de NH₃.....	16
Figura 3: Diagrama Esquemático de Possíveis Rotas do Processo Produtivo de Sulfato de Amônio.....	20
Figura 4: Diagrama Esquemático do Processo Produtivo de Fosfato Monoamônico.....	24
Figura 5: Diagrama Esquemático do Processo Produtivo de Superfosfato Simples.....	27
Figura 6: Diagrama Esquemático do Processo Produtivo de Cloreto de Potássio.....	31
Figura 7: Câmara de Poeira Industrial.....	33
Figura 8: Ciclone de Uso Industrial.....	34
Figura 9: Associação de Ciclones de Uso Industrial.....	35
Figura 10: Precipitador Eletrostático de Uso Industrial.....	36
Figura 11: Filtro Manga de Uso Industrial.....	37
Figura 12: Queimador Tipo NO_x de Uso Industrial.....	38
Figura 13: Lavador de Gases de Uso Industrial.....	40
Figura 14: Flares Industriais.....	41

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Dados de Produção, Consumo Aparente, Importação e Exportação de Fertilizantes no Território Brasileiro em 2017.....	2
Tabela 2: Limites de padrões de qualidade do ar, conforme CONAMA 491/2018.....	10
Tabela 3: Níveis de atenção, alerta e emergência para poluentes, e suas concentrações.....	11
Tabela 4: Principais emissões Gasosas no Processo Produtivo de ureia, fontes geradoras e toxicidade.....	18
Tabela 5: Principais emissões Gasosas no Processo Produtivo de Sulfato de Amônio, fontes geradoras e toxicidade.....	21
Tabela 6: Principais emissões Gasosas no Processo Produtivo de Fosfato Monoamônico, fontes geradoras e toxicidade.....	25
Tabela 7: Principais emissões Gasosas no Processo Produtivo de Fosfato Supersimples, fontes geradoras e toxicidade.....	28
Tabela 8: Principais emissões Gasosas no Processo Produtivo de Cloreto de Potássio, fontes geradoras e toxicidade.....	31

1. Introdução

Assim como em organismos mais complexos, a absorção de nutrientes é fundamental para o correto desenvolvimento das plantas. A inserção de fertilizantes orgânicos ou minerais, é responsável por contribuir ativamente na agricultura, sendo amplamente utilizada no Brasil, principalmente em culturas latifundiárias voltadas para comercialização.

Existem 17 nutrientes essenciais para o crescimento das culturas. Três deles – carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O) – são fornecidos pelo ar e pela água. Os três macronutrientes primários – nitrogênio (N), fósforo (P), e potássio (K) são, principalmente, fornecidos pelo solo, mas deficiências no solo e remoção pelas culturas devem ser repostas via fontes suplementares – principalmente com fertilizantes (REETZ, 2016).

As plantas são capazes de absorver estes nutrientes apenas em seu formato mineral, logo, fertilizantes orgânicos precisam passar por uma etapa de mineralização antes de sua absorção pelas plantas, enquanto os minerais atuam diretamente, uma vez aplicados no solo (YARA, 2020).

Esta necessidade de mineralização dos fertilizantes orgânicos evidencia que a absorção de seus nutrientes pelas plantas é mais lenta do que a de fertilizantes minerais, o que gera certa preferência pelos fertilizantes minerais em culturas voltadas para fins comerciais.

Fertilizantes minerais são produzidos por diversos processos industriais, sendo de uso mais comum na agricultura os que possuem Nitrogênio, Fósforo e Potássio em suas composições, por integrarem os macronutrientes primários para o desenvolvimento das culturas. O Brasil, como país que possui mais de 25% da fatia de seu PIB advinda do agronegócio, é altamente dependente do uso destes insumos.

Analisando dados de consumo, importação e exportação de fertilizantes de 2017, é possível observar os mais utilizados pela agricultura brasileira, conforme representado na Tabela 1.

Tabela 1: Dados de Produção, Consumo Aparente, Importação e Exportação de Fertilizantes no Território Brasileiro em 2017

Fertilizante	Produção	Importação	Exportação	Consumo Aparente
(NH ₄) ₂ SO ₄	264.208	1.779.309	1.496	2.042.021
CO(NH ₂) ₂	836.754	4.769.793	10.330	5.596.217
NH ₄ NO ₃	407.838	1.378.931	30	1.786.779
DAP	-	433.711	300	433.411
MAP	1.184.560	3.343.693	4.167	4.524.086
SSP	4.255.164	716.201	868	4.970.497
STP	953.790	869.927	1.957	1.821.760
Termofosfato	117.463	-	398	117.065
Fosfato Natural	-	116.079	20	116.059
KCl	484.877	9.203.088	9.236	9.678.729
Complexos	144.271	2.863.756	-	3.008.027

Fonte: Nutrição de Plantas Ciência e Tecnologia (NPCT), 2019

O consumo aparente dos fertilizantes pode ser definido pela Eq. 1:

$$\text{Consumo Aparente (CA)} = \text{Produção} + \text{Importação} - \text{Exportação} \quad (1)$$

Tomando como base este parâmetro, o qual, quanto mais elevado, representa maior tendência de consumo do produto, podemos observar que os cinco fertilizantes minerais simples que possuíram maior consumo aparente no Brasil no ano de 2017 são:

1. Cloreto de Potássio (KCl);
2. Ureia (CO(NH₂)₂);
3. Superfosfato Simples (SSP);
4. Fosfato Monoamônio (MAP);
5. Sulfato de Amônio ((NH₂)₂SO₄).

Os processos industriais têm uma grande participação na poluição no ar, onde destacam-se como maiores emissores as indústrias de petróleo, combustíveis, produtos químicos e de metalurgia (FILHO, 1989). Analisando as características dos fertilizantes minerais, é possível constatar que a indústria de fertilizantes se enquadra na categoria de indústria de produtos químicos, o que a inclui no grupo das indústrias que mais contribuem para poluição do ar.

Dentre os cinco fertilizantes mais utilizados para a agricultura no Brasil, todos irão sofrer algum tipo de processamento industrial, gerando poluentes atmosféricos que poderão afetar o meio ambiente. Assim, essa monografia traz informações sobre o processo produtivo desses fertilizantes, visando identificar as principais fontes de emissão, os parâmetros legais e as tecnologias de controle da poluição do ar que podem ser utilizadas, de forma a mitigar o impacto ao meio ambiente.

2. Objetivos

Essa monografia visa a identificação das principais fontes de poluentes atmosféricos na produção dos fertilizantes de maior consumo no território brasileiro (Ureia, Sulfato de Amônio, Fosfato Monoamônico, Superfosfato Simples e Cloreto de Potássio) e dos mecanismos utilizados para o controle, monitoramento e mitigação dessas emissões, visando a manutenção de padrões de qualidade do ar estabelecidos pelas Resoluções CONAMA 491/2018 e 382/2006.

3. Poluição Atmosférica

3.1 Fontes de Poluição Atmosférica na Indústria de Fertilizantes

Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), a poluição atmosférica é a contaminação do ambiente interno ou externo por qualquer agente químico, físico ou biológico que modifique as características naturais da atmosfera. Dispositivos de combustão domésticos, veículos motorizados, instalações industriais e incêndios florestais são fontes comuns de poluição do ar. Poluentes de grande preocupação para a saúde pública incluem material particulado, monóxido de carbono, ozônio, dióxido de nitrogênio e dióxido de enxofre. A poluição do ar exterior e interior causa doenças respiratórias e são fontes importantes de morbidade e mortalidade (OMS, 2022).

A poluição atmosférica pode ter dois tipos distintos de fontes de emissões. Fontes móveis ou fontes fixas. As fontes fixas são aquelas que ocupam uma área relativamente limitada, permitindo uma avaliação direta na fonte, como por exemplo, as indústrias. As fontes móveis são as que se dispersam pela comunidade, por exemplo, os veículos automotores (FIESP, 2022).

Tendo em vista o objetivo da monografia voltado para a indústria de produção de fertilizantes minerais, serão avaliadas neste trabalho apenas fontes fixas, não sendo objeto de análise as fontes móveis de emissão. Além disso, serão investigados somente os poluentes atmosféricos estabelecidos nas Resoluções CONAMA 491/2018 (dispõe sobre padrões de qualidade do ar) e 382/2006 (estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas), o que exclui diretamente o dióxido de carbono, que não é classificado como poluente atmosférico, e sim como um gás do efeito estufa.

Nas unidades industriais de produção de fertilizantes ocorre a geração de poluentes atmosféricos em estado gasoso (amônia, óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre e fluoretos) e de material particulado. Devido às características físico-químicas desses poluentes, são necessárias etapas de controle para minimizar o seu impacto na atmosfera. Esse controle busca a mitigação das emissões para adequação aos limites permitidos pela legislação, os quais são fiscalizados (ou deveriam ser) periodicamente nas regiões industriais.

É importante ressaltar que, para o setor industrial, o controle preventivo das emissões atmosféricas é realizado por meio do licenciamento ambiental, tendo como instrumentos básicos os limites de emissão e as informações sobre a qualidade do ar na região (SANT'ANNA et al, 2021).

Na indústria de fertilizantes é fundamental o mapeamento e a identificação das principais etapas que geram os poluentes atmosféricos, de modo a aumentar a eficiência do controle, evitando possíveis problemas com órgãos ambientais e multas.

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) estabeleceu um guia que elenca as alternativas de melhor tecnologia prática disponível (MTPD), para auxiliar na elaboração de um diagnóstico das fontes de emissões atmosféricas do Estado de São Paulo com base no Decreto Estadual nº 59.113/2013. Esse guia agrupa as MTPD por fonte de poluição e/ou atividade produtiva. Assim, segundo a CETESB (2016), durante a produção de fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos, as principais etapas responsáveis pela emissão dos poluentes atmosféricos são:

- Armazenamento de matéria-prima;
- Armazenamento de produto final;
- Granulação - processo de aglomeração de partículas onde, são produzidos fertilizantes em forma de grânulos;
- Secagem;
- Resfriamento;
- Cura - etapa de armazenamento do produto em local apropriado para finalização de sua reação de formação;
- Transferências - transporte de produto, insumo ou matéria-prima, por qualquer meio;
- Classificação - operação destinada a separar por tamanhos, os granulados;
- Evaporação;
- Perolação - processo de formação de partículas onde são produzidos fertilizantes em forma de pérolas;
- Misturação;
- Peneiramento;

- Moagem;
- Ensacamento.

Observa-se que todas estas etapas são fontes de emissão de Material Particulado (MP), podendo também gerar outros poluentes (CETESB, 2016).

3.2 Principais poluentes

De acordo com dados coletados do guia de melhores práticas na produção de fertilizantes da CETESB (2016) e das resoluções CONAMA 491/2018 e 392/2006, os principais poluentes atmosféricos associados ao processo produtivo de fertilizantes minerais, gerados pelas fontes de emissão mencionadas no item 3.1 são os seguintes:

- Amônia (NH_3);
- Fluoreto (HF ou SiF_4);
- Material Particulado (MP);
- Óxidos de nitrogênio (NO_x);
- Óxidos de enxofre (SO_x).

Conforme mencionado no item 3.1, todas as principais possíveis fontes de emissão de poluentes nos processos produtivos de fertilizantes também são potenciais fontes de emissão de MP. Este fato expõe a necessidade de maior atenção para o MP nas indústrias de fertilizantes, com a utilização de métodos de controle específicos para este poluente, o qual pode ser definido conforme abaixo:

Material Particulado (MP), pode ser composto por diversos tipos de poluentes, dentre eles:

- Partículas Totais em Suspensão (PTS), que são partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fuligem, entre outros, com diâmetro aerodinâmico equivalente de corte de 50 micrômetros;
- Partículas Inaláveis (MP_{10}), que são partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fuligem, entre outros, com diâmetro aerodinâmico equivalente de corte de 10 micrômetros.

- Partículas Inaláveis Finas (MP_{2,5}), que são partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fuligem, entre outros, com diâmetro aerodinâmico equivalente de corte de 2,5 micrômetros;
- Fumaça (FMC), material proveniente de combustão.

Esses materiais se referem a um conjunto de poluentes constituídos de poeiras, fumaças e todo tipo de material sólido e/ou líquido que se mantém suspenso na atmosfera por causa de seu pequeno tamanho (CETESB, 2022).

Segundo CETESB (2022), quanto menor o tamanho do MP, maior é o seu potencial de causar efeitos adversos à saúde humana, o que torna impreterível a existência de ferramentas de controle, principalmente para o MP_{2,5}.

O MP, porém, não é o único poluente nocivo para a saúde humana. As emissões de NO_x são altamente perigosas. Um dos possíveis efeitos de NO_x dependendo da sua concentração, é causar prejuízos à saúde, visto que são altamente tóxicos ao homem, aumentando os riscos de desenvolvimento de problemas respiratórios e irritação das mucosas. Além disso, este composto pode ser transformado em nitrosaminas (agentes cancerígenos) nos pulmões e causar chuva ácida ao se ligar com oxigênio e água na atmosfera (CPRH, 2022).

As emissões de SO_x podem ser no formato de SO, SO₂ ou SO₃ e possuem efeitos prejudiciais tanto para a saúde quanto para o meio ambiente. Os efeitos adversos do SO_x na saúde, como acontece com a maioria dos poluentes atmosféricos, dependem de fatores como a duração e a quantidade de exposição. A exposição a níveis elevados pode causar náuseas, vômitos, dores de estômago e danos corrosivos nas vias respiratórias e pulmões. No caso de exposição prolongada pode ocorrer dificuldades respiratórias crônicas (CROWCON, 2022).

O SO_x pode também concentrar-se perto do nível do solo e causar *smog/fog*, além de reagir com oxigênio e água da atmosfera gerando o ácido sulfúrico, causador de chuva ácida. Durante o Grande Nevoeiro de Londres em 1952, que durou cinco dias, os níveis de dióxido de enxofre atingiram máximos de 3.500 µg/m³ (CROWCON, 2022).

Por fim, há a necessidade de pontuar quanto aos danos causados pela emissão de fluoretos e compostos com este elemento. Nas plantas, o flúor pode causar problemas de toxidez, sendo as dicotiledôneas as mais sensíveis. Os sintomas nas plantas incluem cloroses, necroses, redução no crescimento e remoção da cera epicuticular, entre outros". (SANTOS et al., 2013).

O flúor na forma iônica (F-) apresenta toxicidade para os humanos quando ingerido, dependendo da dose e do tempo a que o indivíduo é exposto. Ingestões altas de fluoreto de sódio causam ulcerações nos lábios e nas mucosas bucal e gástrica, reações alérgicas cutâneas, desconforto gastrintestinal, fraqueza, perda de apetite e dor de cabeça” (SANTOS et al, 2013).

Tendo em vista a alta toxicidade destes poluentes mencionados para a fauna, flora e a ecossistemas vizinhos de regiões com emissões periódicas, há uma regulamentação quanto aos limites máximos permitidos para cada tipo de atividade e de poluente em cada localidade. No Brasil, estes limites são monitorados de acordo com parâmetros estabelecidos pelo CONAMA e órgãos ambientais de âmbito local.

3.3 Legislação Brasileira

Atualmente no Brasil, o CONAMA é responsável por estabelecer normas, critérios e padrões relativos ao controle e à manutenção da qualidade do meio ambiente, com vistas ao uso racional dos recursos ambientais em âmbito nacional.

Por meio de resoluções e portarias, são estabelecidos limites e padrões de qualidade a serem seguidos em fontes de emissão, inclusive, na produção industrial em todo o território brasileiro.

A resolução CONAMA 382/2006 estabelece limites máximos de emissões de poluentes por fontes fixas para diferentes tipos de equipamentos e indústrias, dentre elas, um de seus anexos regula a produção de fertilizantes. Além disso, ela também estabelece procedimentos a serem seguidos para a emissão destes poluentes à atmosfera, de acordo com as instalações vizinhas, de modo a minimizar os impactos nestas.

Como forma de padronização, os limites de Amônia, Fluoreto e Material Particulado, são expressos em mg/Nm³ (miligramas por metro cúbico normal), onde 1 Nm³ equivale a 1m³ em condições de 1 atm, 0°C e 0% de umidade relativa do ar.

Além disso, esta mesma resolução estabelece ainda as seguintes restrições para emissões atmosféricas na indústria de fertilizantes:

- O somatório das taxas de emissão das chaminés e dutos de cada unidade de produção deve atender, em conjunto, ao limite de emissão estabelecido;
- As fontes de emissão devem possuir estrutura necessária para a realização da amostragem e/ou determinação direta de poluentes em dutos e chaminés;
- O lançamento de efluentes gasosos na atmosfera deverá ser realizado através de dutos ou chaminés, cujo projeto deve levar em consideração as edificações do entorno à fonte emissora e os padrões de qualidade estabelecidos;
- Em função das características locais da área de influência da fonte emissora sobre a qualidade do ar, o órgão ambiental licenciador poderá estabelecer limites de emissão mais restritivos que aqueles expressos na CONAMA 382/2006.

Outra resolução vigente atualmente é a CONAMA 491/2018, que atua na complementação de resoluções existentes, estabelecendo padrões de qualidade do ar, onde determina valores limites à concentração de poluentes atmosféricos em intervalos de tempo de exposição, visando a preservação do meio ambiente e da saúde da população local.

Para cumprimento desta resolução, órgãos ambientais estaduais e distritais são responsáveis pelo monitoramento dos padrões de qualidade do ar e a elaboração de um relatório anual contendo os dados do monitoramento e a evolução da qualidade do ar no período.

Relacionando aos principais poluentes emitidos na indústria de fertilizantes, a CONAMA 491/2018 determina os seguintes padrões de qualidade do ar, conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2: Limites de padrões de qualidade do ar, conforme CONAMA 491/2018

Poluente	Período de Referência	PI-1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PI-2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PI-3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Material Particulado - MP ₁₀	24 Horas	120	100	75	50
Material Particulado - MP _{2,5}	Anual ¹	40	35	30	20

	24 Horas	60	50	37	25
Dióxido de Enxofre - SO ₂	Anual ¹	20	17	15	10
	24 Horas	125	50	30	20
Dióxido de Nitrogênio - NO ₂	Anual ¹	40	30	20	-
	1 Hora ²	260	240	220	200
Fumaça	Anual ¹	40	35	30	20
	24 Horas	120	100	75	50
Partículas Totais em Suspensão - PTS	Anual ³	-	-	-	80
	24 Horas	-	-	-	240

Fonte: CONAMA - Resolução 491/2018 ¹ Média aritmética anual ² Média horária ³ Média geométrica anual

Onde, “PI-1”, “PI-2” e “PI-3” representam valores temporários de padrões de qualidade do ar intermediários, a serem cumpridos em etapas e “PF” representa o valor de padrão de qualidade do ar final, de acordo com definição da Organização das Nações Unidas (ONU).

Além dos padrões de qualidade do ar, a resolução CONAMA 491/2018 dispõe de níveis de atenção, alerta e emergência de concentração de poluentes atmosféricos.

Relacionando a resolução aos principais poluentes da indústria de fertilizantes que possuem regulamentação por esta norma, deve ser atentado aos limites representados na Tabela 3.

Tabela 3: Níveis de atenção, alerta e emergência para poluentes, e suas concentrações

Poluente	Período de Referência	Atenção (µg/m ³)	Alerta (µg/m ³)	Emergência (µg/m ³)
Material Particulado - MP ₁₀	Média de 24 Horas	250	420	500
Material Particulado - MP _{2,5}	Média de 24 Horas	125	210	250
Dióxido de Enxofre - SO ₂	Média de 24 Horas	800	1.600	2.100

Dióxido de Nitrogênio - NO ₂	Média de 1 Hora	1.130	2.260	3.000
---	-----------------	-------	-------	-------

Fonte: Resolução CONAMA 491/2018

Tendo em vista o que já foi analisado em relação às principais emissões da indústria de fertilizantes e à impreterível necessidade de controle dos poluentes gerados, é de extrema importância avaliar o processo produtivo de cada um dos fertilizantes alvos deste trabalho, para que seja possível identificar os poluentes associados a cada produto e os métodos de controle aplicáveis.

4. Produção de Fertilizantes

4.1. Fertilizantes Nitrogenados:

- **Ureia - $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$:**

A Ureia é o fertilizante nitrogenado com maior consumo aparente no território brasileiro, algumas razões para seu alto consumo no Brasil são seu baixo custo e facilidades envolvidas no transporte do produto acabado.

Esse fertilizante nitrogenado é fundamental para o Brasil, um país com forte participação do Produto Interno Bruto (PIB) voltado para o setor primário da economia, podendo ser utilizado como fertilizante para vegetais e para suplementação complementar para ruminantes em criações pecuárias. Em termos de mercado, o setor industrial brasileiro não possui produção capaz de suprir as demandas internas deste produto, o que gera alta dependência de importação.

De acordo com a Associação Europeia de Produtores de Fertilizantes (FERTILIZERS EUROPE, 2000), seu processo produtivo em escala comercial envolve uma reação entre amônia e dióxido de carbono em altas pressões para produção de carbamato de amônio ($\text{NH}_2\text{COONH}_4$), o qual, posteriormente é desidratado para formação da ureia, conforme as Equações 2 e 3.



De acordo com Meessen (2014) e com a Associação Europeia de Produtores de Fertilizantes, Fertilizers Europe (2000), a Eq. 2, para a produção do carbamato de amônio, é altamente exotérmica e usualmente possui rendimento elevado, atingindo taxas próximas a 100%, desde que haja o correto controle da temperatura do meio reacional e a pressão esteja suficientemente alta para forçar a amônia e o dióxido de carbono a estarem em fase líquida.

Já a Eq. 3, que é endotérmica, representa a etapa lenta do processo de desidratação do carbamato de amônio, que atinge entre 50 a 80% de rendimento, o

qual pode ser controlado com o aumento da razão de NH_3/CO_2 e a queda da razão de $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ no meio reacional.

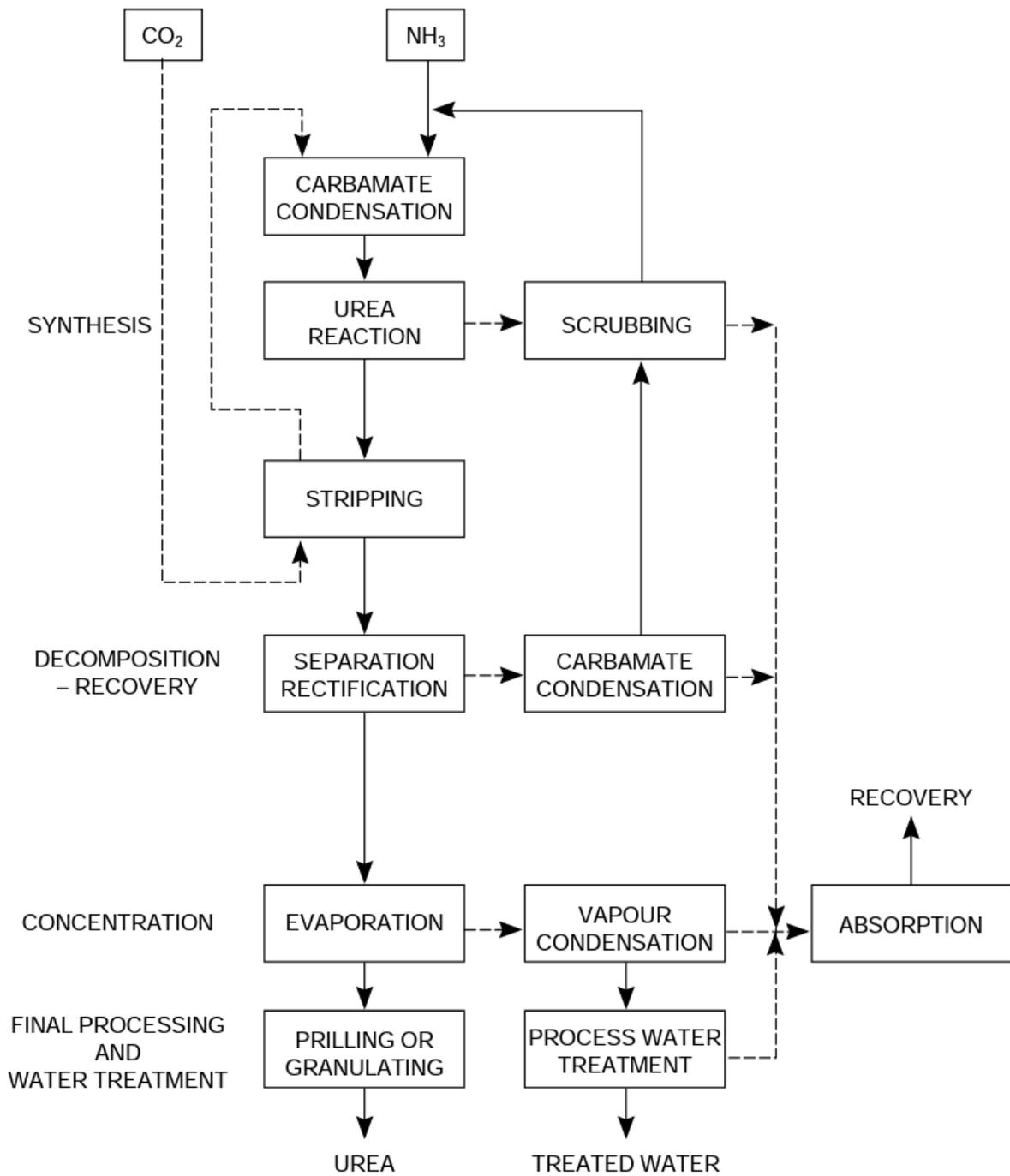
Devido às Eq. 2 e 3 compartilharem o mesmo sistema, para otimização do processo produtivo da ureia, é necessária a operação em um ponto ótimo, de forma a favorecer o equilíbrio e a cinética de ambas as reações e não favorecer a ocorrência de reações secundárias. De acordo com Meessen (2014), em processos comerciais, há usualmente a operação entre 170°C e 220°C , e entre 125 bar e 250 bar.

Após a formação dos produtos, a ureia é destinada a um processo físico de granulação e paletização para comercialização de ureia sólida para uso como fertilizante. Nesta etapa, ocorre uma geração significativa de material particulado, o qual requer rígido controle, de forma a evitar dispersão na atmosfera de “pó de Ureia”.

De acordo com a associação europeia de produtores de fertilizantes, desde suas primeiras aplicações, o processo de produção de ureia sofreu diversas modernizações, buscando principalmente seu barateamento com a otimização do uso de reagentes e aumento da conversão em produto (FERTILIZER EUROPE, 2000).

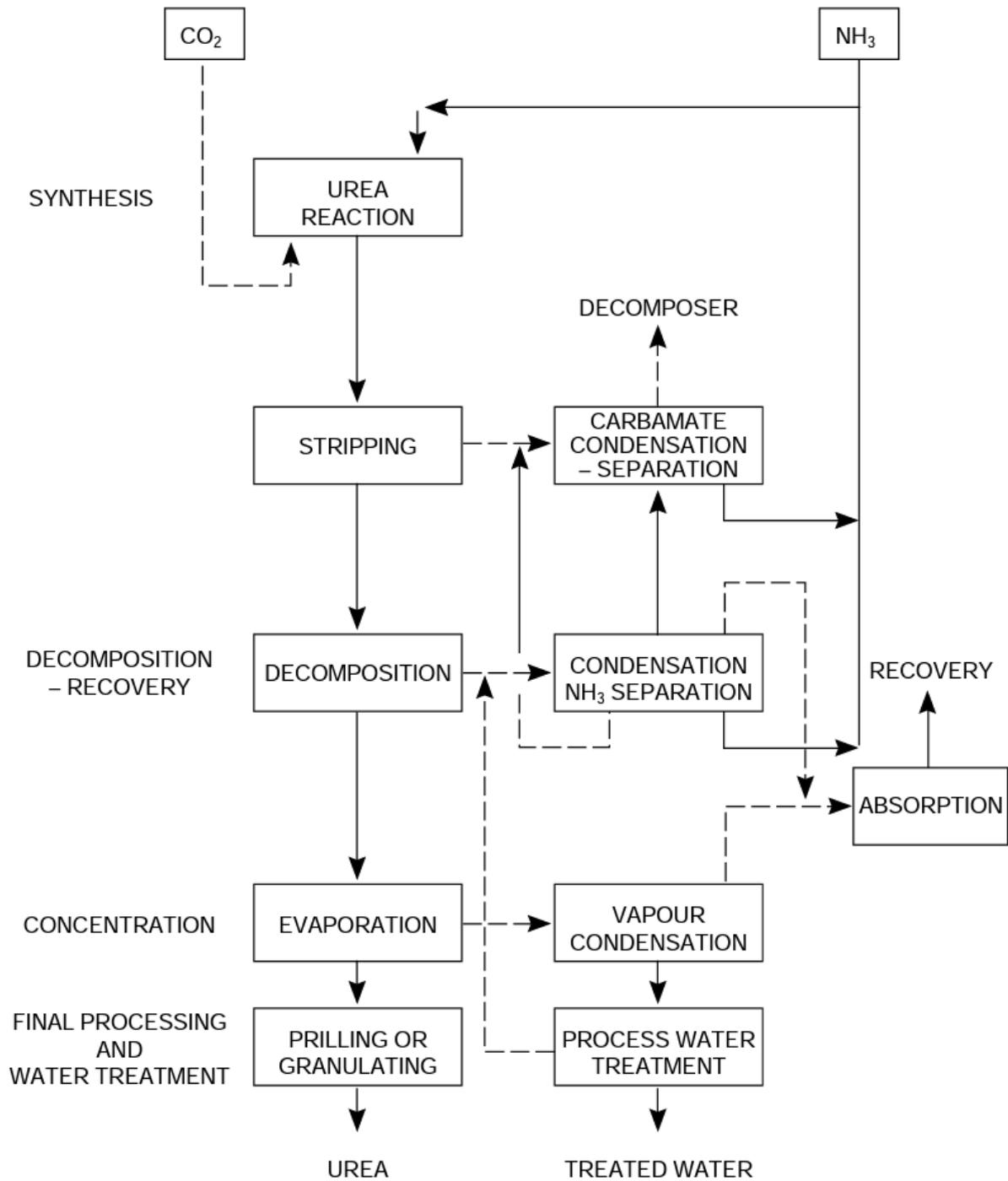
O processo foi revolucionado com a inclusão de etapas de *Stripping*. As rotas utilizadas atualmente possuem reciclo de quantidades expressivas de amônia e dióxido de carbono não convertidos, minimizando custos, e principalmente, o impacto ambiental do processo. O reciclo no processo produtivo de ureia pode ser de dióxido de carbono ou de amônia, variando entre indústrias. Diagramas de bloco esquemáticos deste processo são apresentados na Figura 1 (reciclo de CO_2) e Figura 2 (reciclo de NH_3).

Figura 1: Diagrama Esquemático do Processo Produtivo de Ureia com Reciclo de CO₂



Fonte: Fertilizers Europe (2000)

Figura 2: Diagrama Esquemático do Processo Produtivo de Ureia com Reciclo de NH_3



Fonte: Fertilizers Europe (2000)

Mesmo com o aproveitamento quase que total das matérias-primas, devido aos seus reciclos, o processo produtivo da ureia possui fontes poluentes significantes. No estado líquido, há a formação de água como subproduto, a qual é

gerada misturada com NH₃, CO₂ e até mesmo ureia, tornando fundamental a existência de etapas de tratamento para minimizar o impacto ambiental.

A Tabela 4 apresenta as principais emissões atmosféricas geradas na produção de ureia, suas fontes geradoras e toxicidade.

Tabela 4: Principais emissões Gasosas no Processo Produtivo de ureia, fontes geradoras e toxicidade

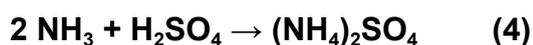
Principais Emissões	Fontes geradoras	Toxicidade
NH ₃	Vazamentos, Resíduo do Tratamento de Água, Tratamento Ineficiente em Equipamentos	Alta
NO _x	Possíveis direcionamentos de Amônia a Flares	Muito Alta
Particulados	Diversas fontes, principalmente em etapas de granulação e empacotamento	Muito Alta

De acordo com a Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA), a amônia e o MP são as principais emissões no processo produtivo de ureia sólida. Outras emissões também são possíveis, tais como formaldeído, metanol, além de alguns poluentes perigosos, caso sejam utilizados aditivos ao processo (EPA, 1995).

- **Sulfato de Amônio - (NH₄)₂SO₄:**

O sulfato de amônio é um sal inorgânico que possui inúmeras aplicações comerciais, dentre elas, a principal é seu uso como fertilizante devido a sua composição com 21% (p/p) de nitrogênio e 24% (p/p) de enxofre (SPEIGHT, 2017).

Uma das possíveis, e principais formas de produção deste fertilizante é com a reação direta entre amônia anidra e ácido sulfúrico, conforme a Eq. 4.



De acordo com a EPA (1995), cerca de 90% da produção mundial do sulfato de amônio para comercialização ocorre por três rotas.

Na primeira, o fertilizante proveniente como subproduto em plantas de caprolactama, $(\text{CH}_2)_5\text{COHN}$. Na segunda, é resultante da reação da amônia recuperada de emissões gasosas na queima de coque (C) com ácido Sulfúrico, e a terceira, é a reação direta entre amônia anidra e ácido sulfúrico, conforme a Eq. 4.

Outras rotas para geração de sulfato de amônio também possuem aplicação industrial para comercialização, porém, como são menos representativas na fatia de mercado deste composto, estas não serão analisadas neste trabalho.

De acordo com a EPA (1995), na produção de sulfato de amônio, em uma das possíveis rotas, ocorre uma reação entre amônia anidra e ácido sulfúrico, a qual possui característica de ser altamente exotérmica, logo, é fundamental o acoplamento de uma torre de resfriamento neste processo para seu controle térmico, acarretando formação de vapor. Após a finalização da reação, o produto de interesse é encaminhado para equipamento centrífugo para posterior etapa de separação e tratamento.

Uma segunda possibilidade de rota para a produção do sulfato de amônio pode ser a geração como subproduto em plantas de caprolactama em formato de solução. Neste caso, há a necessidade de tratamento para purificação e geração de valor agregado ao composto.

O tratamento é realizado por meio de aquecimento em etapa térmica para evaporação do solvente e concentração do sulfato de amônio, então, o composto é enviado a um cristalizador. Após esta etapa de tratamento primário para aumento da concentração do soluto, há posterior encaminhamento para equipamento centrífugo, compartilhando a etapa final do processo produtivo com a rota anterior.

Já na rota que utiliza gás de coqueria como matéria-prima, é fundamental a existência de um pré-tratamento do mesmo para alcançar maiores rendimentos na reação com ácido sulfúrico. Para tal, o gás é levado primeiramente a uma torre absorvedora e posteriormente a uma torre de destilação, antes de sua reação com o ácido sulfúrico. Ao sair do reator, após a reação com o ácido, o produto de interesse também é enviado para um equipamento de centrifugação.

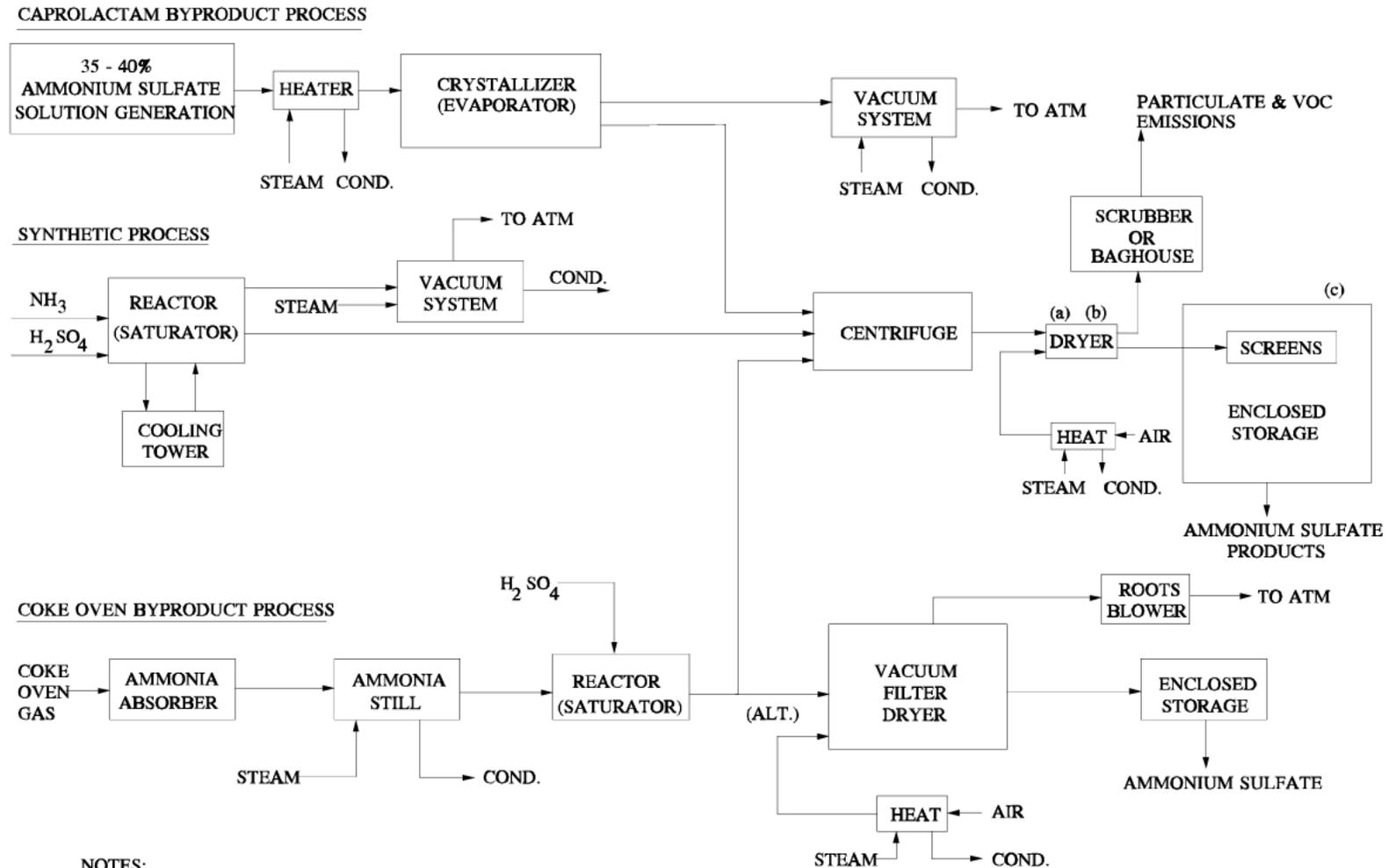
As três rotas mencionadas acima compartilham o mesmo processo a partir da etapa de centrifugação, onde a solução é separada dos cristais de sulfato de amônia. Estes então, são enviados para secagem com ar quente, para eliminação de qualquer água residual. Para conseguir cristais com o tamanho mais adequado para a aplicação desejada, as condições da reação são controladas com a seleção

e secagem das partículas, até a obtenção do tamanho desejado (MOSAIC FERTILIZANTES, 2022).

O ar, após a secagem, passa por um processo de tratamento, de forma a minimizar a emissão de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) e MP para a atmosfera, enquanto o produto seco é levado para etapas posteriores de armazenamento, embalagem e distribuição para venda.

O processo produtivo de sulfato de amônio pelas três rotas mencionadas é representado no diagrama esquemático da Figura 3.

Figura 3: Diagrama Esquemático de Possíveis Rotas do Processo Produtivo de Sulfato de Amônio



NOTES:

- (a) Dryer may be rotary or fluidized bed type.
 - (b) Coke oven plant may integrate centrifuge and drying or centrifuging only.
 - (c) Coke oven plant product not screened.
- ATM = atmosphere. ALT. = alternate. COND. = condensate

Fonte: EPA (1995)

A Tabela 5 apresenta as principais emissões atmosféricas geradas na produção de sulfato de amônio, suas fontes geradoras e toxicidade.

Tabela 5: Principais emissões Gasosas no Processo Produtivo de Sulfato de Amônio, fontes geradoras e toxicidade

Principais Emissões	Principais Causas	Toxicidade
NH ₃	Vazamentos, Tratamento Ineficiente em Equipamentos	Alta
NO _x	Possíveis direcionamentos de Amônia a Flares	Muito Alta
Material Particulado	Diversas fontes, principalmente na etapa de secagem	Muito Alta
Gás de Coque	Vazamentos, Tratamento Ineficiente em Equipamentos	Alta, Pode Possuir CO
COVs	Ar proveniente da etapa de secagem	Muito Alta

De acordo com a EPA (1995), apenas em plantas em que o sulfato de amônia é produzido como subproduto na fabricação de Caprolactama, há a possibilidade de emissão de compostos orgânicos voláteis (COVs). Da mesma forma, as emissões de gases poluentes, provenientes de coqueria, só são possíveis em plantas que produzem o sulfato de amônio a partir desta fonte.

4.2. Fertilizantes Fosfatados:

Os produtos principais da indústria de fertilizantes fosfatados são fosfatos de amônia (MAP e DAP), superfosfato simples e superfosfato triplo. O fosfato monoamônico é favorecido pelo seu alto conteúdo de fósforo (CHEREMISINOFF & ROSENFELD, 2011), enquanto que o superfosfato simples (SSP), que será discutido posteriormente, é favorecido pela simplicidade de seu processo produtivo..

- **Fosfato Monoamônico (MAP)**

De acordo com Toama (2017), o fosfato monoamônico (MAP) pode ser produzido a partir de uma reação entre amônia anidra e ácido fosfórico, conforme representado na Eq. 5



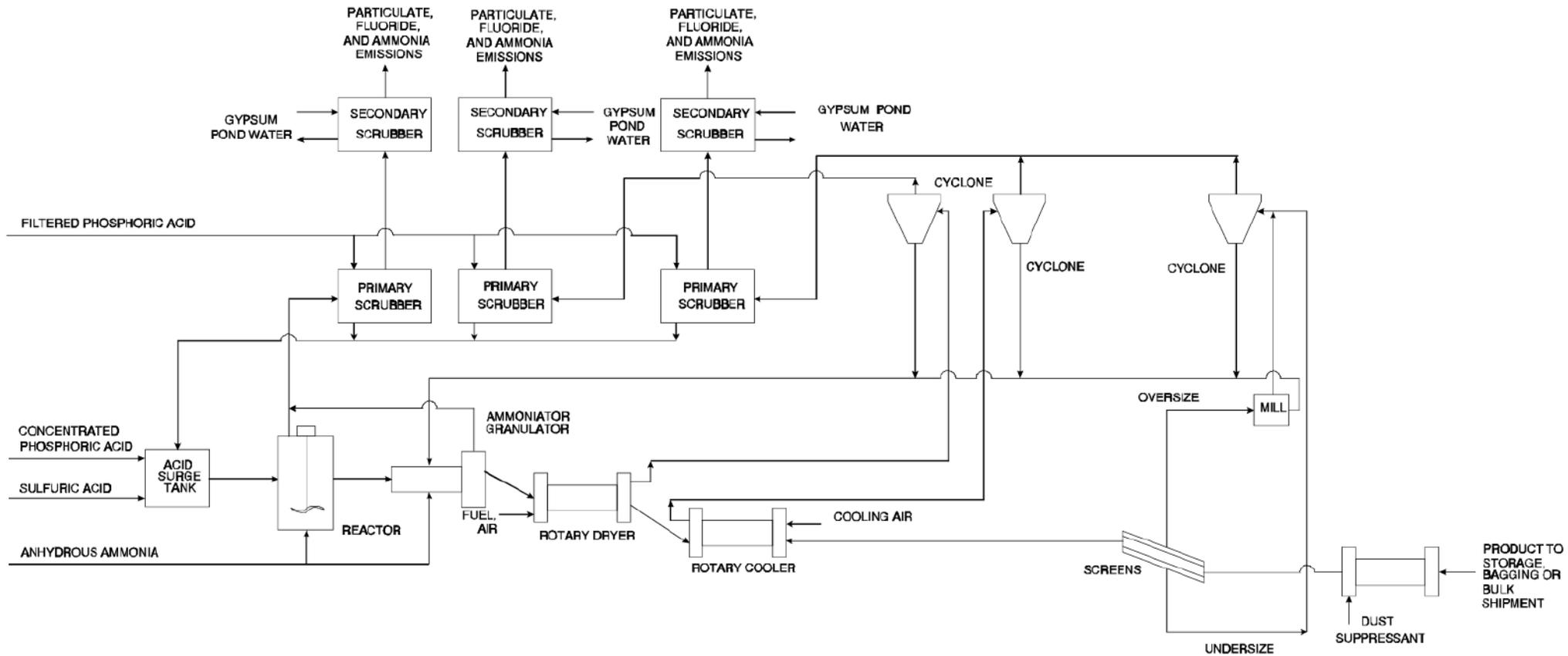
De acordo com a EPA (1995), um dos processos produtivos mais utilizados nos Estados Unidos para obtenção deste fertilizante é patenteado pela Tennessee Valley Authority (TVA), sendo composto pelas seguintes etapas:

- Criação de mistura ácida entre ácido fosfórico e ácido sulfúrico 93% em equipamento específico;
- Neutralização da mistura de ácidos com a utilização de 70% da amônia anidra gasosa destinada a produção de fosfato monoamônico;
- Formação de pasta composta por fosfato monoamônico e água;
- Borbulhamento dos 30% restantes de amônia gasosa com a pasta de fosfato monoamônico formada após a neutralização dos ácidos;
- Envio do produto de interesse para etapa de granulação, para posterior comercialização;
- Envio do gás de amônia para etapas de tratamento, com a utilização de lavadores de gás antes de seu envio para atmosfera;
- Secagem com a utilização de ar quente, e posterior resfriamento dos grânulos úmidos de MAP, também com a utilização de ar;
- Tratamento dos gases de secagem com a utilização de um circuito de equipamentos de separação, tais como ciclones e lavadores de gás, antes de seu envio para atmosfera;
- Separação dos grânulos pelos seus diâmetros de partículas, tendo o envio para comercialização dos que tiverem diâmetro inferior a 4mm, e esmagamento e reciclo pelo processo, de volta à etapa com a pasta úmida, dos que possuírem tal parâmetro superior a 4mm.

Grande parte das etapas do processo produtivo de fosfato monoamônico são potenciais fontes de poluentes atmosféricos, uma vez que há a manipulação de

compostos gasosos em condições naturais de temperatura e pressão, além de etapas de granulação, formadoras de materiais particulados, o que evidencia a necessidade de controle rígido neste processo, de forma a minimizar eventuais emissões, o que pode ser observado pelo alto quantitativo de equipamentos de controle da poluição atmosférica indicados na Figura 4, a qual mostra um diagrama esquemático do processo produtivo de MAP.

Figura 4: Diagrama Esquemático do Processo Produtivo de Fosfato Monoamônico



Fonte: EPA (1995)

A Tabela 6 apresenta as principais emissões atmosféricas geradas na produção de MAP, suas fontes geradoras e toxicidade.

Tabela 6: Principais emissões Gasosas no Processo Produtivo de Fosfato Monoamônico, fontes geradoras e toxicidade

Principais Emissões	Fontes Geradoras	Toxicidade
NH ₃	Vazamentos	Alta
NO _x	Possíveis direcionamentos de Amônia a Flares	Muito Alta
HF	Tratamento Ineficiente de Controle de Emissões	Muito Alta
SiF ₄	Tratamento Ineficiente de Controle de Emissões	Muito Alta
Particulados	Diversas fontes, principalmente em etapas de granulação do produto	Muito Alta

As principais emissões na produção de ácido fosfórico são compostas de fluoretos gasosos, na forma de tetrafluoreto de silício (SiF₄) e ácido fluorídrico (HF). A fonte do fluoreto é a rocha fosfática, que contém entre 3,5% e 4,0% (p/p) de flúor (SPEIGHT, 2017).

Desta forma, sabendo que o flúor está presente na composição do ácido fosfórico como impureza advinda da rocha fosfática, pode-se realizar um controle mais eficiente de poluentes deste elemento.

● **Superfosfato Simples (SSP)**

O superfosfato simples foi o primeiro fertilizante mineral comercializado, o que levou para o desenvolvimento da indústria de fertilizantes moderna. Este já foi o fertilizante mais utilizado, porém, outros fertilizantes fosfatados têm substituído o SSP devido ao seu baixo teor de Fósforo (IPNI, 2022).

Superfosfatos são os mais simples e mais comuns tipos de fertilizantes fosfatados. Eles facilmente se dissolvem em água, o que facilita a absorção do Fósforo pelas plantas. Este tipo de fertilizante pode ser utilizado em todos os tipos de solos e

todos os tipos de plantações, assim como em campos e pastos, por isso, eles são chamados de fertilizantes universais (PCC GROUP, 2018).

De acordo com a *Environment Agency Austria* (2017), o superfosfato simples pode ser produzido a partir do tratamento da rocha fosfática com ácido sulfúrico, conforme as Eq. 6 e 7.

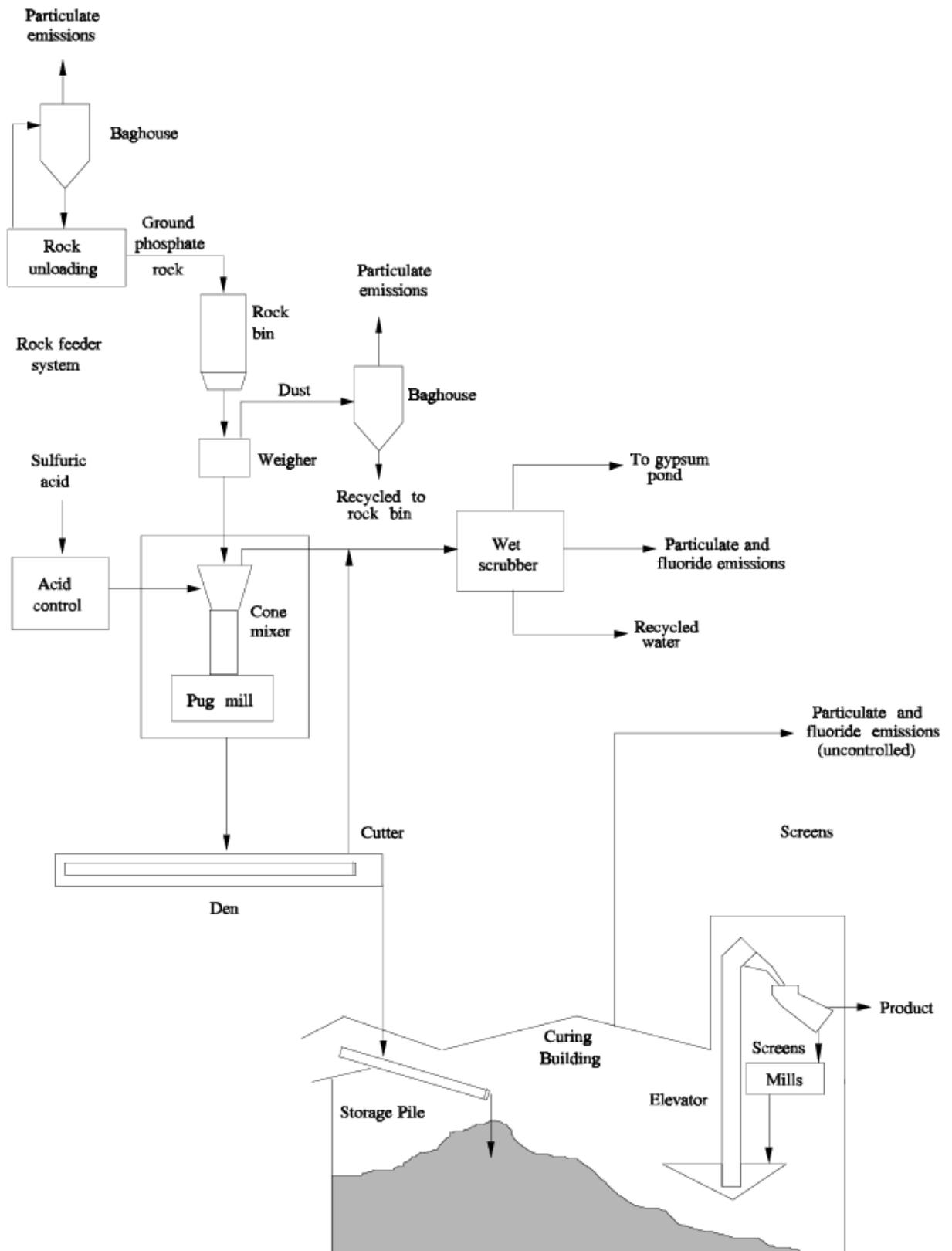


Para produção deste fertilizante, uma massa reacional é formada, composta pela rocha fosfática e o ácido sulfúrico, misturada em um recipiente, e então transferida para um equipamento transportador, onde há a continuidade da reação, até que haja a solidificação do produto. Após a solidificação, o produto é transferido para uma área de armazenagem para realização de um processo de cura, e finalização da reação por pelo menos uma semana, para que possa prosseguir para etapas posteriores de moagem (*ENVIRONMENT AGENCY AUSTRIA*, 2017).

De acordo com o PCC Group (2018), a última etapa para produção de SSP é extremamente importante e crítica para o processo, pois a granulação afeta diretamente as propriedades físicas do fertilizante para uso. Nela, é realizada uma hidratação do superfosfato simples e o mesmo é levado para um tambor rotativo, que em operação, gera a formação de grânulos de diversos tamanhos, que é posteriormente separado e enviado para ensacamento e comercialização.

Um diagrama esquemático do processo produtivo de SSP é representado na Figura 5.

Figura 5: Diagrama Esquemático do Processo Produtivo de Superfosfato Simples



Fonte: EPA (1995)

A Tabela 7 apresenta as principais emissões atmosféricas geradas na produção de SSP, suas fontes geradoras e toxicidade.

Tabela 7: Principais emissões Gasosas no Processo Produtivo de Superfosfato Simples, fontes geradoras e toxicidade

Principais Emissões	Fontes Geradoras	Toxicidade
HF	Tratamento Ineficiente de Controle de Emissões	Muito Alta
SiF ₄	Tratamento Ineficiente de Controle de Emissões	Muito Alta
Particulados	Diversas fontes, principalmente em etapas de granulação do produto	Muito Alta

Podemos observar que ambas as reações para produção de superfosfato simples possuem o ácido fluorídrico como subproduto. Este, além de ser gerado durante as etapas iniciais do processo, também é produzido durante a cura, em armazém. O mesmo representa uma emissão altamente nociva para diversos organismos, e necessita ser controlado.

De acordo com a *Environment Agency Austria* (2017), assim como o flúor, a rocha fosfática possui silício em sua composição. Durante a produção de superfosfato simples, com a formação de ácido fluorídrico, há também a reação deste subproduto com óxido de silício, conforme a Eq. 8.



Gerando assim a necessidade de controle de emissões deste outro subproduto da reação. Ainda há a formação de material particulado em diversas etapas do processo, tais como no pré-tratamento da rocha fosfática antes de sua reação com o ácido sulfúrico, e durante as etapas de granulação e reação, tanto no reator, quanto no equipamento transportador. Para mitigação das emissões atmosféricas, lavadores de gases são utilizados no tratamento de correntes provenientes destas etapas do processo (*ENVIRONMENT AGENCY AUSTRIA*, 2017).

4.3. Fertilizantes Potássicos:

- **Cloreto de Potássio (KCl)**

A qualidade ou a pureza de um fertilizante potássico é expressa com a porcentagem de óxido de potássio equivalente ou K_2O (LANE, FINCH & SAMUEL, 2014).

O cloreto de potássio (KCl) é responsável pela maioria do potássio utilizado na agricultura mundial. Ele representa cerca de 96% da capacidade mundial de fertilizantes potássicos, enquanto os outros 4% são representados por sulfato de potássio (K_2SO_4), nitrato de potássio, (KNO_3) e sais de potássio-magnésio. O cloreto de potássio comercial contém entre 60% e 62% de K_2O , o maior teor dentre todos os fertilizantes potássicos (KAFKAFI et al., 2001).

Os minerais de potássio podem ser extraídos de depósitos subterrâneos, corpos d'água salgados e salmouras. O mineral mais abundante nestes depósitos é a silvinita, do qual o cloreto de potássio é extraído. Para esta extração, existem dois métodos principais, a mineração convencional, com a extração de rochas para sua posterior moagem e tratamento para obtenção do cloreto de potássio, e a mineração por solução, a qual é utilizada em situações em que o mineral está demasiadamente profundo, inviabilizando economicamente a sua extração por métodos convencionais (KAFKAFI et al., 2001).

A mineração por solução consiste na escavação até a identificação do mineral no subterrâneo, com a injeção de água para dissolução dos sais. A salmoura resultante é então extraída e tratada na superfície para remoção do NaCl e concentração do KCl, que representa o produto de interesse, até seu ponto de saturação. A salmoura saturada é então tratada com a utilização de métodos de flotação e cristalização para recuperação do cloreto de potássio.

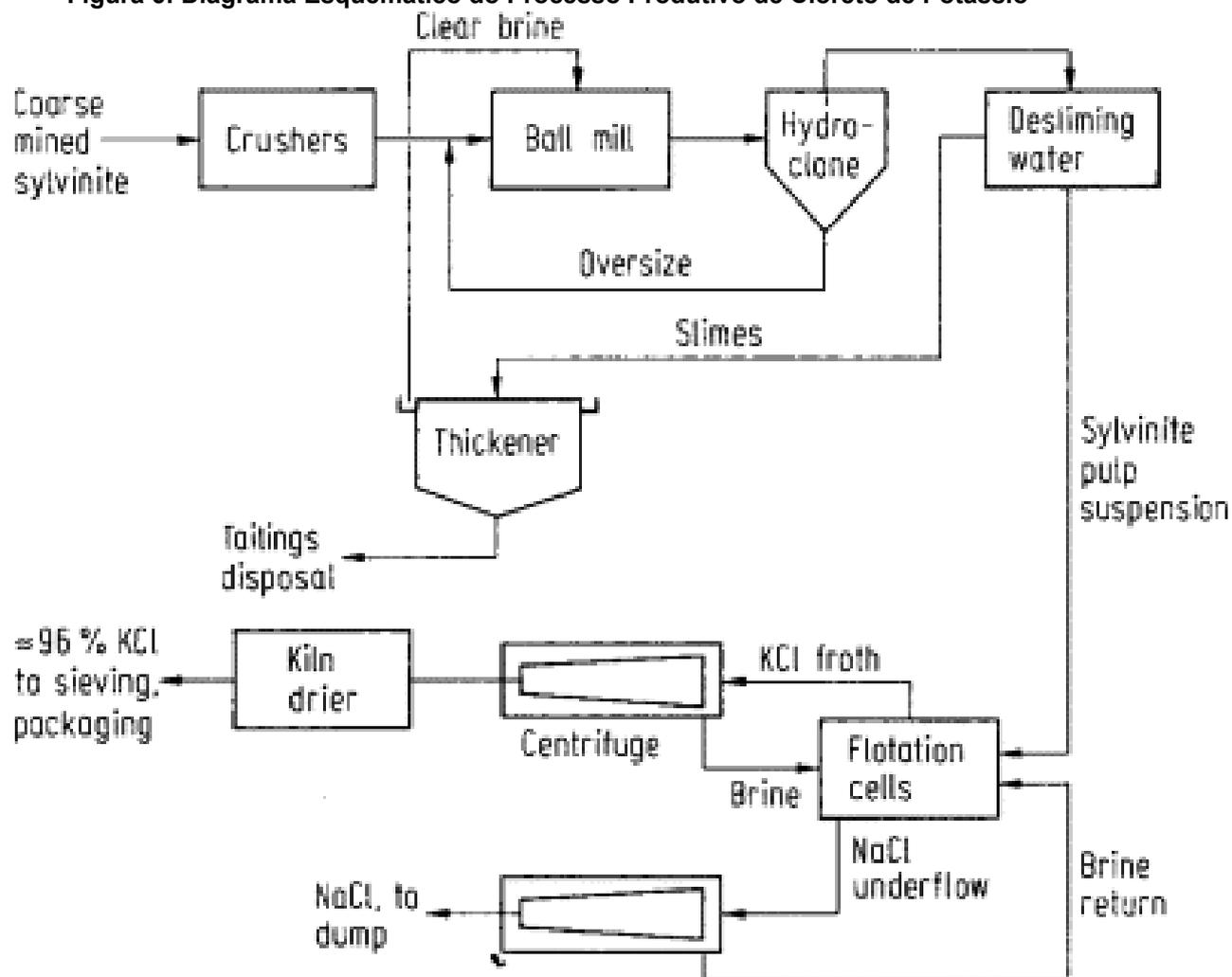
O cloreto de potássio também pode ser produzido com a utilização de salmouras naturais, a exemplo do Mar Morto. Neste caso, o processo consiste em coletar e preencher recipientes com a salmoura para posterior evaporação da água. Primeiramente, ocorre a precipitação do cloreto de sódio por ser o sal mais insolúvel a temperatura ambiente, e então, a salmoura concentrada deve ser enviada para outro recipiente para precipitação de carnalita ($KCl.MgCl_2.6H_2O$). Esta, é posteriormente direcionada para refinarias para tratamento com a utilização de

métodos de flotação e cristalização para recuperação do cloreto de potássio (KAFKAFI et al., 2001).

Pode-se observar que diferentemente do processo produtivo de outros fertilizantes já analisados, o cloreto de potássio não é obtido a partir de reações, e sim, a partir de métodos de separação, o que contribui para que ele possua menos fontes de emissões atmosféricas, sendo a mais relevante a de materiais particulados, principalmente durante etapas de moagem de rochas e etapas de cristalização. Entretanto, outros tipos de impacto ambiental podem ser observados, tais como a contaminação de solos e águas.

O processo produtivo do cloreto de potássio é representado no diagrama esquemático da Figura 6.

Figura 6: Diagrama Esquemático do Processo Produtivo de Cloreto de Potássio



Fonte: HOCKING (2005)

A Tabela 8 apresenta as principais emissões atmosféricas geradas na produção de KCl, suas fontes geradoras e toxicidade.

Tabela 8: Principais emissões Gasosas no Processo Produtivo de Cloreto de Potássio, fontes geradoras e toxicidade

Principais Emissões	Principais Causas	Toxicidade
Particulados	Diversas fontes, principalmente em etapas de moagem e granulação do produto	Muito Alta

5. Controle da Poluição Atmosférica

5.1. Ferramentas de Controle

A seleção de um sistema de controle de poluentes atmosféricos adequado é baseada no impacto ambiental e na viabilidade econômica (SINGH & SINGH, 2019).

Para mitigação da poluição atmosférica gerada pela atividade industrial na produção de fertilizantes, é fundamental a utilização de equipamentos específicos para reduzir o quantitativo de material nocivo à saúde e ao meio ambiente que é destinado à atmosfera. Estas ferramentas de controle necessitam ainda de apoio complementar para monitoramento e garantia de que a qualidade do ar da região da fonte fixa e de áreas vizinhas está dentro dos parâmetros estabelecidos pela legislação local e que os equipamentos utilizados estão sendo suficientes e eficientes.

Esta atividade é realizada por equipamentos de medição, os quais possuem princípios específicos e muitas vezes diferentes, para o monitoramento da concentração de cada poluente, seja ele regulado por alguma legislação ou não. A frequência do monitoramento pode variar, dependendo das exigências locais, do poluente, e de procedimentos internos de saúde, segurança e meio ambiente, caso seja realizado por uma empresa privada e seja mais rígido que a legislação.

5.2. Equipamentos de Controle

- **Câmaras de Poeira ou de sedimentação**

Este tipo de dispositivo é baseado no princípio da gravidade para depositar o material particulado de uma corrente gasosa que está atravessando ao longo desta câmara. Câmaras de poeira são altamente eficientes para material particulado, com tamanho maior de 50 micrômetros de diâmetro aerodinâmico. A eficiência de coleta de câmaras de poeira para partículas MP_{10} é muito baixa, geralmente inferior a 10% (SINGH & SINGH, 2019).

A Figura 7 apresenta uma exemplificação de uma câmara de poeira de uso industrial.

Figura 7: Câmara de Poeira Industrial



Fonte: MANUTENÇÃO E SUPRIMENTOS (2018)

- **Ciclones**

Em um ciclone, o gás carregado com partículas entra tangenciando uma câmara cilíndrica em alta velocidade. O mecanismo de separação baseia-se na impactação do MP com as paredes da câmara. A eficiência de remoção de ciclones é da ordem de 50% para partículas de tamanho de $10\mu\text{m}$ e cai para menos de 10% para partículas com diâmetro de $2,5\mu\text{m}$ ou inferior (BACON, LI & LIANG, 1997).

De acordo com Singh e Singh (2019), a eficiência de separação do ciclone pode ser aumentada com a associação de múltiplos equipamentos no controle de emissões, uma vez que possuem baixo custo de implementação e baixo custo de manutenção. Ainda assim, este não é o método mais recomendado para controle de material particulado com diâmetro inferior a $10\mu\text{m}$, uma vez que mesmo com uma associação de ciclones, não há um aumento significativo na eficiência de retenção destas partículas, e há aumento de possibilidade de corrosão e erosão dos equipamentos.

As Figuras 8 e 9 apresentam imagens de ciclones de uso industrial.

Figura 8: Ciclone de Uso Industrial



Fonte: ALFA E ÔMEGA (2022)

Figura 9: Associação de Ciclones de Uso Industrial



Fonte: ASTRAL AMBIENTAL (2013)

● **Precipitadores Eletrostáticos**

Os precipitadores eletrostáticos geralmente são preferidos para remoção de material particulado, devido ao seu design simples, sua eficiência satisfatória e sua queda de pressão muito baixa (queda de pressão baixa possibilita a economia de energia durante a vida útil do equipamento). O mecanismo de remoção de partículas neste equipamento é pelo uso de força eletrostática (VEHLOW, 2015).

A eficiência de remoção para partículas de $10\mu\text{m}$ excede 99,5% (BACON, LI & LIANG, 1997). Segundo Singh e Singh (2019), a remoção de partículas menores que $5\mu\text{m}$ em um ciclone não é satisfatória, sendo o precipitador eletrostático utilizado para este propósito. O precipitador eletrostático também pode remover as partículas mais finas, tão pequenas quanto um décimo de um micrômetro com quase 100% de eficiência, mas as desvantagens são que este processo possui requerimentos de alto custo e espaço.

A Figura 10 apresenta a exemplificação de um precipitador eletrostático de uso industrial.

Figura 10: Precipitador Eletrostático de Uso Industrial



Fonte: SUGAR ASIA (2019)

- **Filtro Manga**

O filtro manga alcança uma eficiência de remoção ainda mais alta do que a do precipitador eletrostático, em particular, para a fração fina de cinzas. Sua desvantagem frente ao precipitador eletrostático é a queda de pressão acentuada (VEHLOW, 2015).

No contexto de indústrias químicas e de fertilizantes, o filtro manga é geralmente considerado uma melhor escolha, comparados ao precipitador eletrostático para o controle de material particulado, MP_{10} e $MP_{2.5}$. A razão é porque para um precipitador eletrostático alcançar o mesmo nível de retenção de material particulado fino que um filtro manga, seria necessária uma área de placa muito maior, ocasionando em custos muito mais altos (ALBERTA GOVERNMENT, 2017).

Um filtro manga corretamente projetado gerará uma coleta de material particulado extremamente alta, com eficiência maior que 99,9%. Comparado a outras tecnologias, filtros manga são particularmente eficientes para coleta de partículas pequenas. Como exemplo, testes realizados em dois boilers de utilidades, mostraram eficiência de 99,8% para MP_{10} e eficiência entre 99,6% e 99,9% para $MP_{2,5}$. (ALBERTA GOVERNMENT, 2017).

A Figura 11 representa uma imagem de um filtro manga de uso industrial.

Figura 11: Filtro Manga de Uso Industrial



Fonte: CORBARI (2022)

- **Queimadores Tipo $LowNO_x$**

O nível de redução de NO_x que pode ser obtido por várias fontes de combustão em uma indústria química ou de fertilizantes, como em forno de pirólise, reformadores a vapor de metano, boilers, aquecedores, etc. depende de vários fatores, tais como o tamanho e tipo de aplicação, condições de operação, tipo de

combustível, qualidade do combustível e condições de controle do queimador (ALBERTA GOVERNMENT, 2017).

A tecnologia dos queimadores baseia-se no princípio de redução das temperaturas máximas da chama, retardando, mas completando a combustão, e aumentando a transferência de cabienal (maior capacidade de emissão de chama). Os queimadores tipo Ultra-LowNO_x (ULNB) incorporam a combustão por etapas (ar/combustível) e a recirculação dos gases de combustão (CETESB, 2016)

Assumindo uma emissão não controlada de NO_x de 85ppm, os níveis de emissão atingidos com a utilização de queimadores tipo LowNO_x e Ultra-LowNO_x, foram de 30ppm e 9ppm, ou menos, respectivamente. A porcentagem mínima de redução com queimadores tipo LowNO_x e Ultra-LowNO_x é de 65% e 89% respectivamente (ALBERTA GOVERNMENT, 2017).

Na Figura 12 está representada uma imagem de um queimador tipo NO_x (boiler) de uso industrial.

Figura 12: Queimador Tipo NO_x de Uso Industrial:



Fonte: ATIOFNY (2022)

- **Lavador de Gases**

Os lavadores de gás são ferramentas de controle para remoção de partículas ou gases de correntes de exaustão industriais. Um lavador de gás é utilizado quando gases solúveis estão presentes e o contaminante não pode ser removido de forma seca (SINGH & SINGH, 2019).

Um lavador de gás opera com a introdução de um líquido para lavagem na corrente de gás sujo, geralmente água. Material particulado ou gases são coletados pelo líquido de lavagem. Existem vários tipos de lavadores, mas a seleção do lavador é baseada em diversos fatores, tal como a temperatura do gás (SINGH & SINGH, 2019).

A eficiência de remoção de lavadores de gás varia de acordo com o sistema de poluente-solvente e o tipo de absorvedor utilizado. A eficiência de coleta pode variar entre 50% e 99%. A maioria dos processos de lavagem de gás alcançam eficiências de remoção superiores a 90%, dependendo do poluente absorvido. Os lavadores são projetados para remoção de poluentes, tais como os COVs, SO₂, MP e CO, de correntes gasosas por absorção (ALBERTA GOVERNMENT, 2017).

Abaixo, na **Figura 13**, está representada uma imagem de um lavador de gás de uso industrial:

Figura 13: Lavador de Gases de Uso Industrial:



Fonte: Corbari

- **Flares**

Os flares são dispositivos de controles que destroem hidrocarbonetos, tais como COVs, ou gases inorgânicos, tais como a amônia, via combustão. Eles são utilizados em indústrias químicas ou de fertilizantes que dispõem de gases intermediários ao processo durante sua partida, parada, ou mudanças no processo. Em algumas plantas com utilização de produtos gasosos, flares são conectados a tanques de armazenamento e áreas de carregamento, para garantir que vapores concentrados não sejam direcionados para a atmosfera (ALBERTA GOVERNMENT, 2017).

Flares devem ser capazes de atingir uma eficiência mínima de destruição e remoção de pelo menos 98% ou mais para constituintes combustíveis nas correntes gasosas de descarte. Para flares devidamente operados, o conselho de qualidade ambiental do Texas recomenda a utilização daqueles com 98% de eficiência para

destruição e remoção de COVs com C_4 ou mais pesados, sulfito de hidrogênio e hidrogênio, e 99% para COVs entre C_1 e C_3 e amônia (ALBERTA GOVERNMENT, 2017). A Figura 14 apresenta uma imagem de flares industriais em operação.

Figura 14: Flares Industriais:



Fonte: MERAJ (2020)

5.3. Métodos de Monitoramento

Após conhecer um pouco sobre os principais equipamentos de controle, pode-se observar que todos podem possuir uma alta eficiência no controle de poluentes em unidades industriais, mesmo que para tal seja necessária sua associação com outros equipamentos. Porém, é fundamental que a eficiência operacional destes equipamentos de controle seja o mais próxima possível da esperada, de forma a evitar que as emissões ultrapassem os limites de legislações locais.

Para tal, existem métodos para monitoramento da qualidade do ar nas proximidades de regiões industriais, os quais podem ser automáticos ou manuais. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA), alguns dos principais métodos de amostragem de poluentes atmosféricos são os seguintes (MMA, 2019):

- Método automático por fluorescência na região do ultravioleta para medição de dióxido de enxofre;
- Método de referência manual do Amostrador de Grande Volume (AGV) para medição de partículas totais em suspensão;
- Método automático por fotometria infravermelha não dispersiva para medição de monóxido de carbono;
- Método automático de quimiluminescência para medição de ozônio;
- Método automático de quimiluminescência em fase gasosa para medição de dióxido de nitrogênio;
- Método de referência manual para determinação de chumbo nas partículas totais em suspensão;
- Método de referência manual para determinação de MP_{10} na atmosfera;
- Método de referência manual para determinação de $MP_{2,5}$ na atmosfera;
- Método de referência manual por refletância de luz para determinação da concentração de fumaça.

Ainda de acordo com o MMA (2019), é fundamental a escolha do local de coleta das amostras para o monitoramento. De acordo com cada tipo de fonte de emissão, há a necessidade de posicionamento espacial diferente. Em atividades industriais, diversas emissões ocorrem por uma fonte fixa, de tipo chaminé, o que acarreta maiores impactos em localidades distantes da fonte, necessitando a utilização de modelos de dispersão atmosférica para determinação do melhor posicionamento dos instrumentos de coleta.

O monitoramento constitui uma etapa fundamental do processo produtivo industrial, de forma a verificar a qualidade do ar de certa região e evitar que o nível de emergência de poluentes atmosféricos determinado pela resolução CONAMA 491/2018 seja atingido, impedindo a reincidência de situações como aquela que ocorreu em Cubatão/SP, que ficou conhecida nas décadas de 1970 e 1980 como a cidade mais poluída do mundo, ou Vale da Morte.

Segundo a COSTA (2017), o município de Cubatão caracterizou-se por uma alta taxa de emissão de poluentes químicos, tais como benzeno, NO_x , SO_x , CO, hidrocarbonetos e MP, a qual ultrapassava 1000 toneladas por dia, aumentando a

incidência de malformações nos membros e sistema nervoso humano, com inúmeros recém-nascidos mortos devido a anencefalia.

6. Conclusões e Considerações Finais

Desde a ocorrência da primeira revolução industrial, houve um significativo acréscimo da atividade industrial, e, em conjunto, um acréscimo na emissão de gases à atmosfera, dentre eles, diversos poluentes.

Assim como nos mais diversos ramos de atividade industrial, para a produção de fertilizantes, foi observado que a emissão de poluentes atmosféricos é inevitável. Uma vez que os fertilizantes possuem um papel vital para o desenvolvimento e aumento de produtividade do setor primário da economia, é de extrema importância a aplicação de métodos de controle e mitigação de emissões de poluentes atmosféricos para evitar malefícios ao meio ambiente e a saúde da população vizinha das áreas produtivas.

Como apresentado anteriormente neste trabalho, as plantas são dependentes de nutrientes para seu desenvolvimento, dentre os quais Nitrogênio, Potássio e Fósforo estão entre os principais, e podem ser suplementados ao solo de regiões de cultivo por meio de uma variedade de fertilizantes químicos.

Para produção dos mesmos, há diversas peculiaridades em cada processo produtivo, desde condições operacionais e matérias-primas, até o quantitativo e o material poluente formado em cada um, possuindo ainda, diferentes graus de nocividade, devendo estes serem controlados e monitorados por equipamentos específicos constantemente.

Métodos de controle são impreteríveis para a manutenção dos parâmetros de qualidade do ar, e observando os diagramas introduzidos no tópico 4 deste trabalho, é possível identificar diversas aplicações na indústria de fertilizantes.

Foram apresentados métodos capazes de reduzir consideravelmente a emissão dos principais poluentes atmosféricos da indústria de fertilizantes (particulados, óxidos de nitrogênio e enxofre e amônia), podendo estes serem associados em conjunto para obtenção de maior eficiência no controle de emissões.

Além dos equipamentos e métodos de controle, é possível esperar que o desenvolvimento de novas tecnologias possa contribuir para a árdua tarefa de redução de emissões, seja com novas ferramentas de controle e monitoramento, ou até com aprimorações nos processos, as quais se tornam viáveis com o crescente desenvolvimento de novas tecnologias.

7. Referências Bibliográficas

ALBERTA GOVERNMENT. (2017). **Air Pollution Control Technology Review for the Chemical and Fertilizer Sectors.** Government of Alberta. Ramboll Environ. Alberta, Canada.

ALFA E ÔMEGA. (2022). **Ciclones industriais.** Disponível em: <<https://www.alfaeomegaengenhariadoar.com.br/ciclones-industriais>>. Acesso em 25 de dezembro de 2022.

ATIOFNY. (2022). **How to Reduce Emissions & Improve ROI by Switching to a Low-NOx Burner or Boiler.** Disponível em: <<https://atiofny.com/low-nox-burners-boilers/>>. Acesso em 25 de dezembro de 2022.

ASTRAL AMBIENTAL. (2013) **Ciclone Separador.** Disponível em: <<http://www.astralambiental.com.br/produtos/ciclone-separador/>>. Acesso em 25 de dezembro de 2022.

BACON, G.H; LI, R; LIANG, K.Y. (1997). **Control Particulate and Metal HAPs.** Chemical Engineering Progress, AIChE. New York, NY, Estados Unidos. p. 59–67.

CEPEA. - PIB do agronegócio brasileiro. **Cepea.** Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx#:~:text=Considerando%2Dse%20os%20desempenhos%20parciais,%2C5%25%20registrados%20em%202021>>. Acesso em 27 de novembro de 2022.

CETESB. (2016). Plano de redução de emissões de fontes estacionárias. Guia de melhor tecnologia prática disponível: Fertilizantes. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2016/06/Capítulo-3-MTPD-Fertilizantes.pdf>>. Acesso em 18 de dezembro de 2022.

CETESB. (2022). **Poluentes.** Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>>. Acesso em 18 de dezembro de 2022.

CHEREMISINOFF, N. P; ROSENFELD, P. E. (2011). **Handbook of Pollution Prevention and Cleaner Production Vol. 3: Best Practices in the Agrochemical Industry**. Doi: 10.1016/C2009-0-20362-X

CPRH (2022). Poluentes atmosféricos. Disponível em: <<http://www2.cprh.pe.gov.br/monitoramento-ambiental/qualidade-do-ar-2/poluentes-atmosfericos/>>. Acesso em 18 de dezembro de 2022.

CONAMA. (2006). **Resolução CONAMA nº 382 de 26 de dezembro de 2006**. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Disponível em: <<http://www.ipaam.am.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/Conama-382-Poluentes-atmosfericos.pdf>>. Acesso em 24 de dezembro de 2022.

CONAMA. (2018). **Resolução CONAMA nº 491 de 19 de novembro de 2018**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/guest/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/do1-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603>. Acesso em 24 de dezembro de 2022.

CONAMA. (2022). **O que é CONAMA?**. Disponível em: <<http://conama.mma.gov.br/o-que-e-o-conama>>. Acesso em 24 de dezembro de 2022.

CORBARI. (2022). **Filtro de manga**. Disponível em: <<https://www.corbari.com.br/filtro-manga>>. Acesso em 25 de dezembro de 2022.

COSTA, C. (2017). **BBC News Brasil. Mais de 3 décadas após 'Vale da Morte', Cubatão volta a lutar contra alta na poluição**. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/brasil-39204054>>. Acesso em 26 de dezembro de 2022.

CROWCON. (2022). **Compreender os Poluentes do Ar: Um guia de óxidos de enxofre (SO_x)**. Disponível em:

<<https://www.crowcon.com/pt/blog/understanding-air-pollutants-a-guide-to-sulphur-oxides-sox/>>. Acesso em 24 de dezembro de 2022.

ENVIRONMENT AGENCY AUSTRIA. (2017). Multi-nutrient. Fertilisers Production. **Umweltbundesamt**. Disponível em: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/themen/industrie/fertiliser_production-installation_1.pdf>. Acesso em 08 de dezembro de 2022.

EPA. (1995). Environmental Protection Agency. AP-42: Compilation of air emissions factor: **Inorganic Chemical Industry**. Estados Unidos, v. 1, n. 5. Disponível em: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-fifth-edition-volume-i-chapter-8-inorganic-1>. Acesso em 23 de novembro de 2022.

FERTILIZERS EUROPE. (2000). Production of urea and Urea Amonium Nitrate. Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Fertilizer Industry. Disponível em: https://www.fertilizerseurope.com/wp-content/uploads/2019/08/Booklet_5_final.pdf. Acesso em 05 dezembro 2022.

FIESP. (2022). EMISSÕES Atmosféricas. Disponível em: <<https://www.fiesp.com.br/temas-ambientais/ver-todos/emissoes-atmosfericas/>>. Acesso em 15 de dezembro de 2022.

FILHO, J. (1989). Poluição do ar - aspectos técnicos e econômicos do meio ambiente. **ECP**, 1989. Disponível em: <<https://www.consultoriaambiental.com.br/pdf/pdf-35.pdf>>. Acesso em 27 de novembro de 2022.

HOCKING, M. (2005). **Handbook of Chemical Technology and Pollution Control (Third Edition)**. p. 175-199. Academic Press.

IPNI. (2022). International Plant Nutrition Institute. Nutrient source specifics: Single Superphosphate. Norcross, Georgia, Estados Unidos. n. 21. Disponível em:

http://www.avocadosource.com/tools/useful_data/Single%20Superphosphate.pdf.

Acesso em 13 de dezembro de 2022.

KAFKAFI, U; XU, G; IMAS, P; MAGEN, H; TARCHITZKY, J. (2001). Potassium chloride in crops and soils: the role of potassium chloride fertilizer in crop nutrition. Basel, Suíça. International Potash Institute. n. 22.

LANE, G; FINCH, H; SAMUEL, A. (2014). **Lockhart & Wiseman's Crop Husbandry Including Grassland: Grassland and forage crops**. Woodhead Publishing, 9. ed.

MANUTENÇÃO E SUPRIMENTOS. (2022). **Vantagens dos coletores de poeira**. Disponível em: <https://www.manutencaoesuprimentos.com.br/vantagens-dos-coletores-de-poeira/#gsc.tab=0>>. Acesso em 25 de dezembro de 2022.

MEESSEN, J. (2014). Urea synthesis. **Chemie Ingenieur Technik**, 10 de novembro de 2014. p. 2180-2185. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cite.201400064>>. Acesso em 10 de Dezembro de 2022.

MERAJ, K. (2020). **Automated Flare Monitoring – A step towards digitalization**. Axis Communications. 19 de Agosto de 2020. Disponível em: <https://www.axis.com/blog/secure-insights/automated-flare-monitoring/>>. Acesso em 26 de dezembro de 2022.

MMA. (2019). Ministério do Meio Ambiente. **Guia técnico para o monitoramento e avaliação da qualidade do ar**. Brasília, Brasil. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/mma-guia-tecnico-qualidade-do-ar-pdf>>. Acesso em 26 de dezembro de 2022.

MOSAIC FERTILIZANTES. (2022). **Ficha de informações de segurança de produtos químicos**. Ureia. Disponível em: <https://mosaicco.com.br/fileLibrary/publicFiles/0-FISPQ---Uria.pdf>>. Acesso em 03 de dezembro de 2022.

NPCT. (2022). Evolução do consumo aparente de N, P, K e total de NPK no Brasil. **NPCT.** Disponível em: <<https://www.npct.com.br/npctweb/npct.nsf/article/BRS-3132>>. Acesso em 13 de Dezembro de 2022.

OMS. Organização Mundial da Saúde. (2022). Health topics/Air pollution. Disponível em: <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>. Acesso em 23 de dezembro de 2022.

PCC GROUP. (2018). Single superphosphates - production and application. Disponível em: <<https://www.products.pcc.eu/en/blog/single-superphosphates-production-and-application/>>. Acesso em 05 de dezembro de 2022.

REETZ, H. (2016). Fertilizantes e seu uso eficiente. **International Fertilizer Industry Association.** Disponível em: <<https://www.ufla.br/dcom/wp-content/uploads/2018/03/Fertilizantes-e-seu-uso-eficiente-WEB-Word-Ouubro-2017x-1.pdf>>. Acesso em 27 de novembro de 2022.

SANT'ANNA, A; ALENCAR, A; PINHEIRO, B et al. (2021). **O estado da qualidade do ar no Brasil.** WRI Brasil. 2021. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/wri-o-estado-da-qualidade-do-ar-no-brasil.pdf>>. Acesso em 18 de dezembro de 2022.

SANTOS, H; SOUZA, P; SILVA, P. BRAGA, R; GUEDES, E; LOBATO, A. (2013). **Flúor: Elemento potencialmente tóxico para plantas, animais e seres humanos.** Amazonas, Brasil. Revista EDUCAmazônia, Ano 6, v. X, n. 1, p. 78-92. Disponível em: <<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4709180.pdf>>. Acesso em 24 de dezembro de 2022.

SINGH, R. P; SINGH, S. (2019). Air pollution: sources, impacts and controls. Chapter 10: Cost-Effective Technologies Used to Curb Air Pollution. Cabi. <http://dx.doi.org/10.1079/9781786393890.0165>

SPEIGHT, J. (2017). **Environmental Inorganic Chemistry for Engineers: Industrial Inorganic Chemistry**. Estados Unidos, Wyoming: Butterworth-Heinemann.

SUGAR ASIA. (2019). **Sustaining Reliability of Electrostatic Precipitator (ESP) Starts with Proper Actions**. Disponível em: <<https://sugar-asia.com/sustaining-reliability-of-electrostatic-precipitator-esp-starts-with-proper-actions/>>. Acesso em 25 de dezembro de 2022.

TOAMA, H. Z. (2017). World Phosphate Industry. **Iraqi Bulletin of Geology and Mining**, n. 7, p. 5-23.

VEHLOW, J. (2015). Air pollution control systems in WtE units: An overview, *Waste Management*, Volume 37, Pages 58-74.

YARA, B. (2020). Importância dos fertilizantes para o mundo. Yara Brasil. Disponível em: <<https://www.yarabrasil.com.br/conteudo-agronomico/blog/importancia-fertilizantes-mundo/#:~:text=O%20papel%20dos%20fertilizantes%20%C3%A9,dificultaria%20ainda%20mais%20o%20cultivo>>. Acesso em 27 de novembro de 2022.