



Diogo Henrique Caramori Manzan

SISTEMA INTEGRADO DE EVAPORAÇÃO E TRATAMENTO DE GASES RESIDUAIS DE INCINERAÇÃO

Uberaba-MG

2024

Diogo Henrique Caramori Manzan

SISTEMA INTEGRADO DE EVAPORAÇÃO E TRATAMENTO DE GASES RESIDUAIS DE
INCINERAÇÃO

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Química no Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da
Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Orientador: Prof. Dr. Edilberto Pereira Teixeira

Coorientador: Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer

Uberaba-MG

2024

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

- M319s Manzan, Diogo Henrique Caramori.
Sistema integrado de evaporação e tratamento de gases residuais de incineração / Diogo Henrique Caramori Manzan. – Uberaba, 2024.
25 f. : il., color.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia Química. Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.
Orientador: Prof. Dr. Edilberto Pereira Teixeira.
Coorientador: Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer.
1. Resíduos perigosos. 2. Resíduos perigosos – Tratamento térmico. 3. Resíduos industriais. 4. Engenharia Química. I. Teixeira, Edilberto Pereira. II. Finzer, José Roberto Delalibera. III. Universidade de Uberaba. Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia Química. IV. Título.
- CDD 363.72

Tatiane da Silva Viana – Bibliotecária – CRB-6/3171

DIOGO HENRIQUE CARAMORI MANZAN

**SISTEMA INTEGRADO DE EVAPORAÇÃO E TRATAMENTO DE GASES
RESIDUAIS DE INCINERAÇÃO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

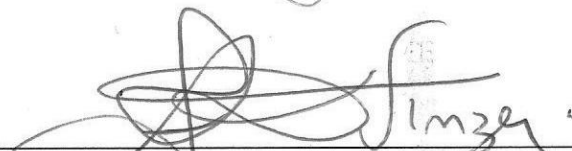
Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais

Aprovado em: 24/04/2024

BANCA EXAMINADORA:



Prof(a). Dr(a). Edilberto Pereira Teixeira - Orientador
Universidade de Uberaba



Prof(a). Dr(a). José Roberto Delalibera Finzer
Universidade de Uberaba

gov.br

Documento assinado digitalmente
GUSTAVO ARAUJO TEIXEIRA
Data: 12/12/2024 11:18:26-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Gustavo Araújo Teixeira
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais que apesar de todas dificuldades nunca deixaram de me apoiar ou acreditar em mim, e com grande esforço pretendo retribuir.

AGRADECIMENTO

À empresa que tanto preso por todas oportunidades a mim dadas, a Neotech Soluções Ambientais, que vem sendo um grande marco em minha vida profissional e pessoal, com grandes conquistas, graças a toda confiança depositada em mim pelo Sr. Vinicius Guimarães Franco.

Aos meus familiares e amigos que tanto me cativaram nesta jornada.

Ao meu amigo Valério Bezerra, que foi meu grande incentivador na engenharia, grande amigo e com tantos ensinamentos que trago até hoje.

À empresa Zamfor, por contribuir com tantas informações e orientações sobre o equipamento, em especial ao Sr. Estéfano Zampieri.

E em especial todo apoio de meu Orientador Prof. Dr. Edilberto Pereira Teixeira e Coorientador Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer que me ajudaram tanto desde o início deste trabalho, contribuindo imensamente com seu vasto conhecimento para alcançar tal resultado.

Ao Prof. Dr. Mauro Luiz Begnini que tem me apoiado muito no meu caminho acadêmico, compartilhando sempre sua vasta experiência para contribuir com o crescimento da minha.

Por fim ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Mestrado Profissional da UNIUBE, à UNIUBE - Universidade de Uberaba, à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais - FAPEMIG (Processos: MPR-01119-16; APQ-01203-23), à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo suporte dado ao desenvolvimento dessa dissertação.

“É em meio à dificuldade que se encontra a oportunidade”

RESUMO

O estudo foi conduzido na central de tratamento de resíduos industriais agroquímicos da empresa Neotech Soluções Ambientais, situada em Uberaba-MG, a uma altitude de 569 metros. A empresa possui um equipamento de evaporação a vácuo com capacidade produtiva de 30 m³/dia e um sistema de incineração de leito fixo com capacidade produtiva de 2,91 MW, acoplado a um sistema de tratamento de gases úmidos com capacidade de 6.000 Nm³/h. No sistema de evaporação, os resíduos líquidos segregados no processo de triagem são direcionados para tanques decantadores, onde são separados de acordo com a compatibilidade de cada material. Após análise das propriedades físicas e químicas, são adicionados agentes neutralizantes e polímeros para floculação e aglomeração dos resíduos. Após a decantação, o lodo é coletado e direcionado para incineração, enquanto a parte líquida é processada em evaporadores. O condensado resultante do sistema de evaporação passa por um sistema de polimento antes de ser utilizado no sistema de lavagem de gases. O sistema de incineração consiste em um forno com câmaras primária e secundária, que opera em temperaturas elevadas com queimadores alimentados por GLP. Os gases resultantes são submetidos a diversas etapas de tratamento, incluindo resfriamento, lavagem, remoção de particulados e separação de micropartículas, antes de serem liberados na atmosfera através da chaminé. O resíduo utilizado neste estudo é proveniente da fabricação do herbicida Tebutiuron, onde se concentra os resíduos para uma redução de volume a ser tratado e posteriormente destruição térmica, assim tendo uma redução de custos devido ao seu volume. O condensado resultante do sistema de evaporação passa por um sistema de polimento, onde se obteve resultados significativos na redução do contaminante, antes de ser utilizado no sistema de lavagem de gases.

Palavras chave: Incineração de resíduos perigosos; Evaporador de múltiplos efeitos; Tratamento de resíduos perigosos; Destruição térmica de resíduos.

ABSTRACT

The study was conducted at the agrochemical industrial waste treatment plant of the company Neotech Soluções Ambientais, located in Uberaba-MG, at an altitude of 569 meters. The company has a vacuum evaporation equipment with a production capacity of 30 m³/day and a fixed bed incineration system with a production capacity of 2.91 MW, coupled to a wet gas treatment system with a capacity of 6,000 Nm³/h. In the evaporation system, the liquid waste segregated in the sorting process is directed to decanting tanks, where it is separated according to the compatibility of each material. After analyzing the physical and chemical properties, neutralizing agents and polymers are added to flocculate and agglomerate the waste. After decantation, the sludge is collected and directed to incineration, while the liquid part is processed in evaporators. The condensate resulting from the evaporation system passes through a polishing system before being used in the gas scrubbing system. The incineration system consists of a furnace with primary and secondary chambers, which operates at high temperatures with burners fueled by LPG. The resulting gases are subjected to several treatment processes, including cooling, washing, particulate removal and separation of microparticles, before being released into the atmosphere through the chimney. The residue used in this study comes from the manufacture of the herbicide Tebuthiuron, where the residues are concentrated to reduce the volume to be treated and subsequently thermally destroyed, thus reducing costs due to its volume. The condensate resulting from the evaporation system passes through a polishing system, where significant results were obtained in the reduction of the contaminant, before being used in the gas washing system.

Keywords: Incineration of hazardous waste; Multi-effect evaporator; Hazardous waste treatment; Thermal destruction of waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Teste de proveta na sedimentação de uma suspensão (McCABE et al, 2004): A, líquido clarificado; B, mistura inicial; C, região intermediária; D, lodo espessado.	3
Figura 2 - Curva de sedimentação (METCALF et al, 2016).	4
Figura 3-Fluxograma de um evaporador a triplice efeito, com alimentação direta (FOUST, 1980)....	5
Figura 4 - Incinerador típico de leito fixo. Fonte: Adaptada de (VIEIRA, 2012).	7
Figura 5 - Fluxograma típico de uma planta de incineração com recuperação de energia (LEITE,2016).	8
Figura 6 - Compatibilidade entre resíduos (VIEIRA,2012)	10
Figura 7 - Imagem do sistema de evaporação de triplice efeitos (AUTOR, 2023).	12
Figura 8 - Fluxograma simplificado do sistema de evaporação (AUTOR,2023).....	12
Figura 9 - Fluxograma completo do sistema de evaporação com inclusão do sistema de automação (AUTOR, 2023).	13
Figura 10 – Curva de vapor a vácuo (AUTOR, 2024).....	13
Figura 11 - Gerador de vácuo tipo venturi - ejetor (AUTOR, 2023).	14
Figura 12 - Imagens da interface de operação remota, tela de histórico de alarmes (AUTOR, 2024).14	
Figura 13 - Imagens da interface de operação remota, tela do processo EV1/ EV2 (AUTOR, 2024).15	
Figura 14 - Forno incinerador leito fixo com sistema de lavagem de gases úmidos. (ZAMFOR,2015).	16
Figura 15 - Bico aspersor de líquidos (AUTOR, 2024).....	16
Figura 16 - Estrutura molecular do Tebutiuron (AUTOR,2023).....	17
Figura 17 - Vista de tanque decantador com fundo cônico de 20m ³ (AUTOR, 2023).	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados do sistema de evaporação de tríplice efeitos (AUTOR, 2024).....	19
Tabela 2 - Poderes caloríficos típicos de materiais residuais (VIEIRA, 2012).	21

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

EDR	Eficiência de Destruição e Remoção
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
IBC	<i>Intermediate Bulk Container</i> (Recipiente intermediário para granel)
IHM	Interface homem maquina
Kcal/h	Quilocaloria por hora
Kcal/Kg	Quilocaloria por quilograma
Kg	Quilograma
L	Litro
MG	Minas Gerais
MJ/Kg	Mega joules por quilograma
MW	Megawatt
mmH ₂ O	Milímetros de coluna de água
m ³ /dia	Metro cubico por dia
Nm ³ /h	Normal metro cúbicos por hora
PAC	Policloreto de alumínio
PCDDs	Polychlorinated Dibenzodioxins
PCDFs	Polychlorinated Dibenzofurans
PCI	Poder calorifico inferior
PCOP	Principal composto orgânico perigoso
PCS	Poder calorifico superior
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> (Controlador lógico programável)
pH	Potencial hidrogeniônico
RSU	Resíduo solido urbano
µg/L	Micrograma por litro
°C	Graus celsius

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	2
2.1	Geral.....	2
2.2	Específicos.....	2
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1	Tratamento físico-químico para decantação	3
3.2	Evaporadores de múltiplos efeitos.....	4
3.3	Fornos de incineração e sistema depurador de gases	6
4.	MATERIAL E MÉTODOS	10
4.1	Sistema de evaporação.....	10
4.2	Sistema de incineração e tratamento de efluentes gasosos	15
4.3	Resíduo.....	17
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
5.1	Decantação.....	18
5.2	Evaporação	18
5.3	Polimento de condensado	19
5.3.1	Osmose reversa	19
5.3.2	Ultra filtração.....	19
5.3.3	Carvão ativado	19
5.4	Forno incinerador	20
5.5	Sistema de tratamento de efluentes gasosos	21
5.5.1	Chaminé.....	21
5.5.2	Trocador de calor.....	21
5.5.3	Resfriamento rápido (Flash)	22
5.5.4	Scrubber	22
5.5.5	Venturi.....	22
5.5.6	Coalescimento.....	22
5.5.7	Conjunto microciclones	22
5.5.8	Sistema de exaustão	23
5.5.9	Piscina de sedimentação	23
5.5.10	Torre de resfriamento.....	23
6.	CONCLUSÃO	24
7.	REFERÊNCIAS.....	25

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento industrial e agrícola, a gestão adequada de resíduos industriais tornou-se uma preocupação fundamental para a sustentabilidade ambiental. Empresas que lidam com resíduos agroquímicos enfrentam desafios únicos devido à natureza complexa e potencialmente perigosa desses materiais. Em resposta a esses desafios, o presente estudo investiga o processo de tratamento de resíduos industriais agroquímicos na central da empresa Neotech Soluções Ambientais, localizada em Uberaba-MG. A localização estratégica desta empresa reflete a importância de abordagens eficazes para lidar com resíduos industriais em regiões onde a atividade agrícola e industrial é intensa. A Neotech Soluções Ambientais adota um sistema integrado de tratamento, que inclui evaporação a vácuo e incineração de leito fixo, bem como um tratamento cuidadoso dos gases resultantes. Este estudo visa analisar e avaliar a eficácia desses processos de tratamento, com foco especial no tratamento de resíduos provenientes da fabricação do herbicida Tebutiuron. A escolha deste herbicida como material de estudo é motivada por sua ampla utilização na agricultura e pela necessidade de abordagens eficazes para lidar com seus resíduos. Ao compreender os processos e os resultados do tratamento de resíduos agroquímicos, este estudo contribui para o desenvolvimento de práticas sustentáveis na gestão de resíduos industriais. Além disso, destaca a importância da conformidade ambiental e da segurança dos processos industriais para garantir a saúde pública e a preservação do meio ambiente.

No presente trabalho foi dado ênfase especial nos seguintes aspectos.

À descrição da sistemática de decantação, evaporadores de múltiplos efeitos, forno de incineração e sistema depurador de gases.

A descrição do sistema de evaporação da empresa Neotech Soluções ambientais, assim como o sistema de incineração e tratamento de efluentes gasosos.

À indicação dos resultados de decantação, evaporação, polimento de condensado, do forno incinerador e do sistema de tratamento de gases.

Ao fim efetua-se a conclusão sobre o estudo desenvolvido.

Acredita-se que o presente estudo se constitui em um trabalho abrangente sobre o tratamento de resíduos perigosos e que constitui em uma contribuição para o processamento dos resíduos industriais que se classificam como perigosos.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar e avaliar a eficácia dos processos de tratamento de resíduos industriais agroquímicos na central da empresa Neotech Soluções Ambientais, localizada em Uberaba-MG. Isso inclui apresentar a eficiência dos sistemas de evaporação a vácuo e incineração de leito fixo, bem como a reutilização da água gerada em processos de lavagem de gases, com foco especial no tratamento de resíduos provenientes da fabricação do herbicida Tebutiuron. O foco principal é fornecer percepções sobre a conformidade ambiental, a segurança dos processos industriais e a sustentabilidade das práticas de gestão de resíduos nesta empresa específica.

2.2 Específicos

- a. Avaliar de maneira abrangente o desempenho do sistema de evaporação a vácuo utilizado pela Neotech Soluções Ambientais, analisando não apenas sua capacidade de separação e tratamento de resíduos líquidos agroquímicos, mas também sua eficiência energética e impacto ambiental.
- b. Realizar uma análise detalhada do processo de tratamento específico aplicado aos resíduos provenientes da fabricação do herbicida Tebutiuron, com ênfase na concentração e remoção desse composto químico durante as diferentes etapas de tratamento, garantindo sua completa destruição e minimizando o potencial de contaminação ambiental.
- c. Explorar oportunidades de aplicação de tecnologias emergentes ou inovadoras no tratamento de resíduos agroquímicos, visando aumentar a eficiência, reduzir os custos operacionais e melhorar os resultados ambientais e operacionais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Tratamento físico-químico para decantação

A separação de uma fase líquida de uma fase sólida em uma suspensão, frequentemente, consiste em um sistema em duas etapas. A primeira é físico-química e envolve a conversão de partículas não floculáveis da suspensão em um sedimento (*underflow*) espessável, e possibilitando obter um clarificado (*overflow*). Isso é conseguido pela adição de um coagulante ou floculante. A segunda etapa, que consiste em uma operação de engenharia, deve reduzir o conteúdo de água por meio de uma operação de separação sólido-líquido, tal que o sólido concentrado contenha apenas uma pequena quantidade de água (SVAROVSKY, 2000).

Sedimentação é o termo aplicado à separação de partículas suspensas, com densidade maior que a água, por sedimentação gravitacional (METCALF & EDDY, 2016).

A sedimentação é a operação que possibilita a separação sólido-líquido em um líquido clarificado e um lodo denso que contém uma grande concentração de sólidos (BROWN et al., 1965).

O mecanismo da sedimentação pode ser descrito por meio da observação dos efeitos que ocorrem num ensaio de sedimentação dos sólidos, como demonstrado na Figura 1 de uma suspensão colocada numa proveta (FOUST, 1982), de onde se obtém uma curva de sedimentação representado na Figura 2. Na Figura 2, a construção gráfica consiste em um procedimento necessário para aplicação do método de KINCH usado no projeto de um sedimentador, especificamente para especificação da área de sedimentação, sendo H corresponde à altura, t ao tempo, C à concentração e A corresponde à área.

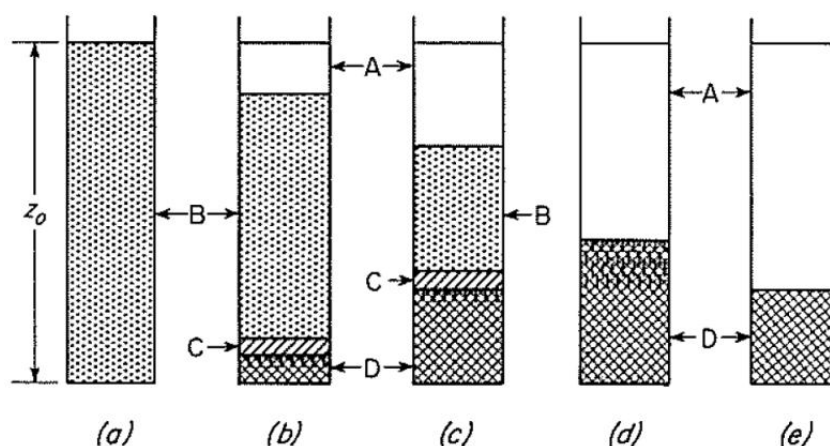


Figura 1 - Teste de proveta na sedimentação de uma suspensão (McCABE et al, 2004): A, líquido clarificado; B, mistura inicial; C, região intermediária; D, lodo espessado.

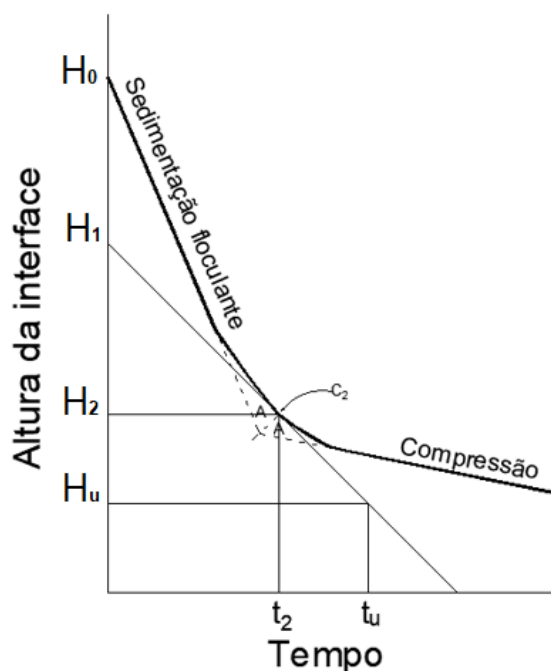


Figura 2 - Curva de sedimentação (METCALF et al, 2016).

Para acelerar a sedimentação, utilizam-se substâncias poliméricas que são definidas como polímeros orgânicos (biopolímeros) que, em sistemas microbianos, são frequentemente responsáveis pela ligação de células e outros materiais particulados (coesão) a um substrato (adesão)” (MELO et al., 2022).

As partículas eletricamente desestabilizadas (coágulos) são fisicamente aglutinadas para formar outras partículas maiores (flocos), suscetíveis de separação por decantação seguido de filtração. A floculação pode ocorrer pela própria movimentação hidráulica e/ou movimentação mecânica. Os polímeros atuam favorecendo a formação de pontes de hidrogênio e/ou forças de *Van der Waals*. A robustez e densidade do floco são influenciadas pelo “gradiente de velocidade”, que varia entre plantas de tratamento (DELMONICO et al., 2020).

3.2 Evaporadores de múltiplos efeitos

A evaporação é a operação unitária que consiste em concentrar uma solução pela evaporação do solvente, estando a solução no ponto de ebulição. Normalmente, suspende-se a etapa de concentração antes do soluto começar a precipitar da solução (FOUST et al, 1982).

Na sua forma básica, portanto, um evaporador é constituído por um trocador de calor, capaz de levar a solução à ebulição, e de um dispositivo para separar a fase vapor do material em ebulição (FOUST et al, 1982).

No caso de múltiplos efeitos, o vapor gerado em uma etapa é utilizado na alimentação de uma segunda etapa e assim por diante. O sistema é denominado de evaporação a múltiplos efeitos (McCABE et al., 2004).

O objetivo do sistema de evaporação é a concentração de uma solução que consiste em um soluto não volátil e um solvente volátil. Na maioria dos processos, o solvente é a própria água. O sistema de evaporação difere da secagem em relação ao produto. Nos evaporadores, o concentrado encontra-se em fase líquida ou pastosa, às vezes constituído por viscosidades altas, enquanto nos secadores o produto geralmente é sólido (McCABE et al., 2004).

O evaporador de tubos horizontais é um tipo clássico de construção e durante muitos anos foi amplamente utilizado. Nele, a solução a ser evaporada entra em ebulição no exterior dos tubos horizontais, em cujo interior, há vapor que ao ser condensado consiste na fonte de calor. Os tubos horizontais interferem na circulação natural do líquido em ebulição e, assim, a agitação do líquido é dificultada. Por esse motivo o coeficiente global de troca de calor é mais baixo do que nas outras opções de evaporadores, em especial quando as soluções possuem alta viscosidade (FOUST et al., 1982). A Figura 3 consiste em um exemplo de evaporação de uma solução de hidróxido de sódio, visando a concentração da solução, em que U_1 , U_2 e U_3 consistem em coeficientes globais de transferência de calor e outras grandezas não indicadas na figura.

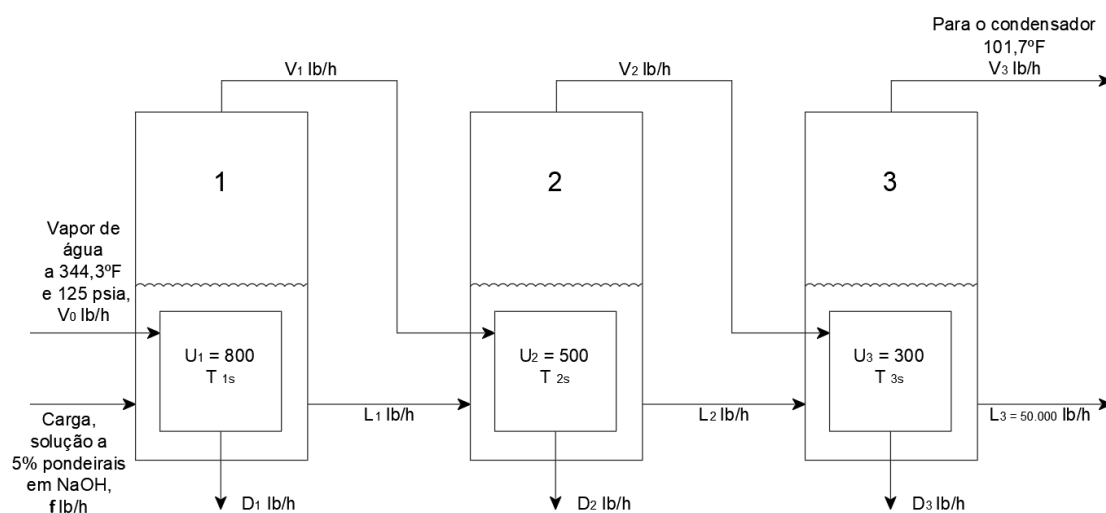


Figura 3-Fluxograma de um evaporador a tríplice efeito, com alimentação direta (FOUST, 1980).

Uma das formas mais comuns de se descrever os evaporadores é com abordagem fenomenológica. Esses modelos são embasados nas leis fundamentais da física e da química descritiva usando princípios de conservação de massa e transferência energia. Os

modelos são ainda complementados com relações que descrevem propriedades físicas ou características específicas do sistema (ARAUJO et al., 2016).

3.3 Fornos de incineração e sistema depurador de gases

A incineração de resíduos perigosos consiste na transformação de compostos termicamente, tendo como principal objetivo a redução de volume e ter como resultado um resíduo menos nocivo que o original incinerado, também eliminando microrganismos. Os resíduos nos estados sólido e semissólido resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Incluídos nesta definição, estão os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos, ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004). O estudo atual refere-se a tratamento de resíduos industriais. Para o estudo de viabilidade econômica da implantação e da instalação de Usina Incineradora com sistema de aproveitamento energético, necessita-se de uma análise financeira baseada no Fluxo de Caixa. Para tal estudo, devem ser consideradas as receitas provenientes do tratamento do lixo, da comercialização de energia elétrica e dos créditos de carbono gerados (BRITO, 2013).

A Figura 4 consiste em esquema de um incinerador operando em leito fixo (VIEIRA, 2012). A incineração consiste geralmente em dois estágios. O resíduo colocado na câmara primária é queimado a uma temperatura suficientemente alta para que as substâncias se transformem quimicamente em gases ou assumam a forma de pequenas partículas. Os gases e partículas que são gerados na câmara primária escoam para a câmara secundária, onde a mistura é submetida à temperatura mais elevada para que haja combustão completa. O tempo de residência representativo é de 30 minutos para o primeiro estágio e de 2 a 3 segundos para o segundo estágio. Na segunda etapa, a atmosfera apresenta-se altamente oxidante apresentando-se com o excesso de oxigênio em torno de 7%, e a temperatura de operação varia entre 800°C e 1400°C, e, nesta faixa de temperatura, é praticamente nula a probabilidade de existência de moléculas com grande número de átomos como dioxinas e furanos (OLIVEIRA et al., 2018).

Dioxinas e furanos são compostos químicos altamente tóxicos e persistentes no meio ambiente, classificados como poluentes orgânicos persistentes. As dioxinas

(PCDDs) e os furanos (PCDFs) possuem estruturas similares com anéis benzênicos e oxigênio.

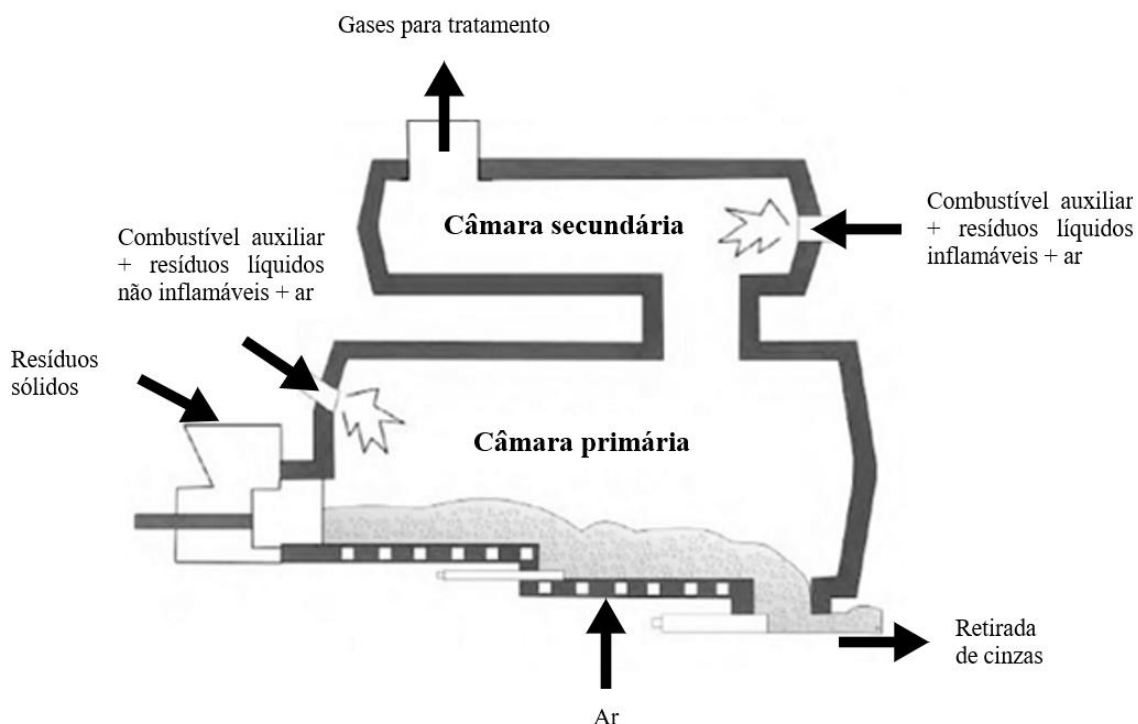


Figura 4 - Incinerador típico de leito fixo. Fonte: Adaptada de (VIEIRA, 2012).

A incineração de resíduos possui complexidade e a Figura 5 ilustra o fluxograma típico de uma planta de incineração de resíduos sólidos urbanos com geração de energia (LEITE, 2016). Os detalhes serão descritos na continuidade deste estudo. Além de resultar em redução de massa e volume de RSU (Resíduos sólidos urbanos) de cerca de 70 e 90%, respectivamente, a incineração é vista por diversos pesquisadores como forma segura de recuperação de energia, pela qual também ocorre a minimização da periculosidade dos resíduos (CARDOZO, 2019).

O processo de incineração consiste em quatro etapas consecutivas e, às vezes, simultâneas, que ocorrem lado a lado: secagem - primeiro a água (H_2O) é evaporada para transformar o combustível úmido em uma "substância seca"; desgaseificação - à medida que mais calor é adicionado, substâncias orgânicas voláteis escapam (baixa temperatura, gás de carbonização), sendo que o resíduo sólido é então referido como "coque pirolítico" ou "coque"; gaseificação - o carbono sólido é então convertido em monóxido de carbono (CO) ou em dióxido de carbono (CO_2). O resíduo sólido obtido, uma vez que a gaseificação esteja completa, é referido como "cinza" (ou escória, material do leito, cinza

volante); oxidação - consiste na combustão dos gases (combustíveis) CO e hidrogênio (H_2) para convertê-los em CO_2 e H_2O . Isso é acompanhado por alta liberação de calor. A oxidação requer oxigênio ou ar. Para a incineração completa, é necessário excesso de ar, que se apresenta como oxigênio residual no gás proveniente da incineração.

A Figura 5 apresenta o processo térmico, já com aproveitamento energético, utilizando um sistema de incineração do tipo grelha. Observa-se que os RSU são descarregados no fosso (1), de onde são encaminhados, através de garras, à moega (2). Os resíduos da moega alimentam o incinerador (3) do tipo grelha, que por sua vez fornece calor, através da combustão, para a caldeira (4). Na caldeira o vapor é produzido e conduzido ao sistema turbina-gerador, para a geração de energia elétrica. As cinzas restantes sobre a grelha passam por separadores eletromagnéticos (5). E os gases resultantes da combustão são encaminhados aos sistemas de tratamento (6 e 7) para remoção de poluentes, sendo posteriormente lançados, através da chaminé (8), ao ambiente.

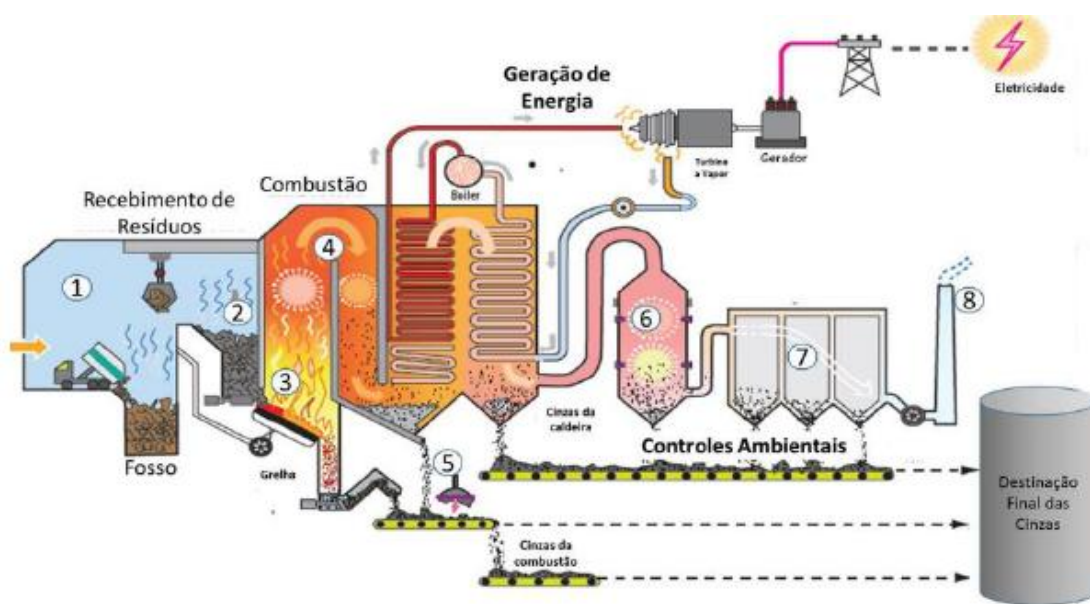


Figura 5 - Fluxograma típico de uma planta de incineração com recuperação de energia (LEITE, 2016).

O sistema de controle de emissões pode ser dividido em sistemas secos e sistemas úmidos, em função do seu *modus operandi* e, mais importante, em função das características dos resíduos a serem incinerados (VIEIRA, 2012).

Cada vez mais, as legislações internacionais sobre o tema têm se mostrado bastante rigorosas, de modo a exigir e garantir que os projetos, a operação e a manutenção

dos sistemas de incineração proporcionem a máxima confiabilidade, aumentando a segurança das operações (VIEIRA,2012).

Todo sistema de tratamento térmico para resíduos industriais deverá atingir a taxa de eficiência de destruição e remoção (EDR) superior ou igual a 99,99% para o principal composto orgânico perigoso (PCOP) definido no teste de queima, de acordo com a resolução CONAMA 316/2002 (BRASIL,2002).

4. MATERIAL E MÉTODOS

Esse estudo foi realizado na central de tratamento de resíduos industriais agroquímicos da empresa Neotech Soluções Ambientais, localizada na cidade de Uberaba-MG, a uma altitude de 569 metros.

Empresa dispõe de equipamento de evaporação a vácuo com capacidade produtiva de 30 m³/dia, e um sistema de incineração de leito fixo com capacidade produtiva de 2,91 MW, que é acoplado a um sistema de tratamento de gases úmidos com capacidade de 6.000 Nm³/h.

4.1 Sistema de evaporação

Os resíduos líquidos segregados no processo de triagem são direcionados ao setor de evaporação da empresa, o que é descrito a seguir. Os resíduos inicialmente são armazenados em tanques decantadores de fundo cônico, e são separados de acordo com a compatibilidade de cada material, o que é detalhado na Figura 6. A combinação na interseção entre as linhas e colunas (ver significado na legenda), possibilita identificar as possíveis reações e resultados que acontecem (ver na legenda). Para exemplificar na mistura de um hidrocarboneto e um metal tóxico, tem-se a indicação “C”, significando que não ocorrem reações.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	C	H	HF	HFT	HFI	S	HF	HF	C	HFT	H	Muito reativo, não misturar com nenhum material
2	H	C	C	HI	C	S	C	C	H	C	C	
3	HF	C	C	C	C	C	C	C	HF	C	C	
4	HFT	HI	C	C	HF	C	C	C	C	HT	HE	
5	HFI	C	C	HF	C	C	C	C	HF	C	C	
6	S	S	C	C	C	C	C	C	H	C	S	
7	HF	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	
8	HF	C	C	C	C	C	C	C	C	HI	C	
9	C	H	HF	C	HF	H	C	C	C	HFE	C	
10	HFT	C	C	HT	C	C	C	HI	HFE	C	TI	
11	H	C	C	HE	C	S	C	C	C	TI	C	
12	Muito reativo, não misturar com nunhum material											
Legenda:												
1 → Ácido mineral oxidante				5 → Metal				9 → Ag. Oxidante				
2 → Base cáustica				6 → Metal tóxico				10 → Ag. Redutor				
3 → Hidrocarboneto aromático				7 → Hidrocarboneto alifático				11 → Água e soluções				
4 → Orgânico halogenado				8 → Fenóis e cresóis				12 → Reage com água				
H → Produz calor				T → Produz gás tóxico				S → Solubiliza toxinas				
F → Produz fogo				I → Produz gás inflamável				E → Mistura explosiva				
C → Compatível												

Figura 6 - Compatibilidade entre resíduos (VIEIRA,2012)

Após recebido o material em laboratório são analisadas as propriedades físicas e químicas, iniciando com a medida do pH. Determinado o grau de acidez se determina a proporção de agentes neutralizantes a serem utilizados no volume armazenado no tanque.

Os agentes comumente utilizados na indústria são o NaOH (hidróxido de sódio) e $Al_n(OH)_mCl_{(3n-m)}$ (PAC: policloreto de alumínio).

Segue-se a determinação do polímero a ser utilizado para flocular e aglomerar os resíduos, classificado como: aniônico, catiônico ou não-iônico. Necessitando se determinar a quantidade a ser utilizada.

Então assim que é adicionado no tanque o agente neutralizante, é medido o pH novamente, e é adicionado o polímero. Quando a mistura se torna homogênea é suprimida a agitação, e se aguarda que ocorra a decantação, ocorrendo uma separação de fases entre lodo e a água sobrenadante. Após estabilização da mistura, inicia-se a separação das fases, primeiro é retirado a fase líquida (sobrenadante), seguindo a retirada o lodo.

O lodo é coletado em IBCs e direcionado à incineração.

A parte líquida é enviado a um tanque de estoque para ser processada em evaporador. As Figuras 7, 8 e 9 consiste no sistema de evaporação utilizado nesse estudo.

Os principais dados de um estágio do sistema de evaporação de triplice efeitos:

Instalação: Horizontal

Operação: Pressão Negativa

Volume Total: 2377 L

Volume de Trabalho: 1426 L (60% do volume)

Tampo esquerdo/direito: tipo Toroesférico 10%

As condições operacionais do sistema de evaporação conforme apresentado na Figura 10, onde a pressão reduzida faz com que se reduza a temperatura de ebulição do material dentro da câmara, o aquecimento no primeiro estágio é efetuado com água quente na temperatura de 85°C que circula em um sistema fechado entre a serpentina e o gerador de água quente. Água quente é obtida em trocador de calor flama tubular, aquecido com os gases da combustão de GLP (gás liquefeito de petróleo). Nesse sistema o vapor gerado no primeiro estágio é usado como fonte de calor para o segundo estágio, o mesmo para o

terceiro estágio. Para que isso aconteça a pressão decresce do primeiro até o terceiro estágio.



Figura 7 - Imagem do sistema de evaporação de tríplex efeitos (AUTOR, 2023).

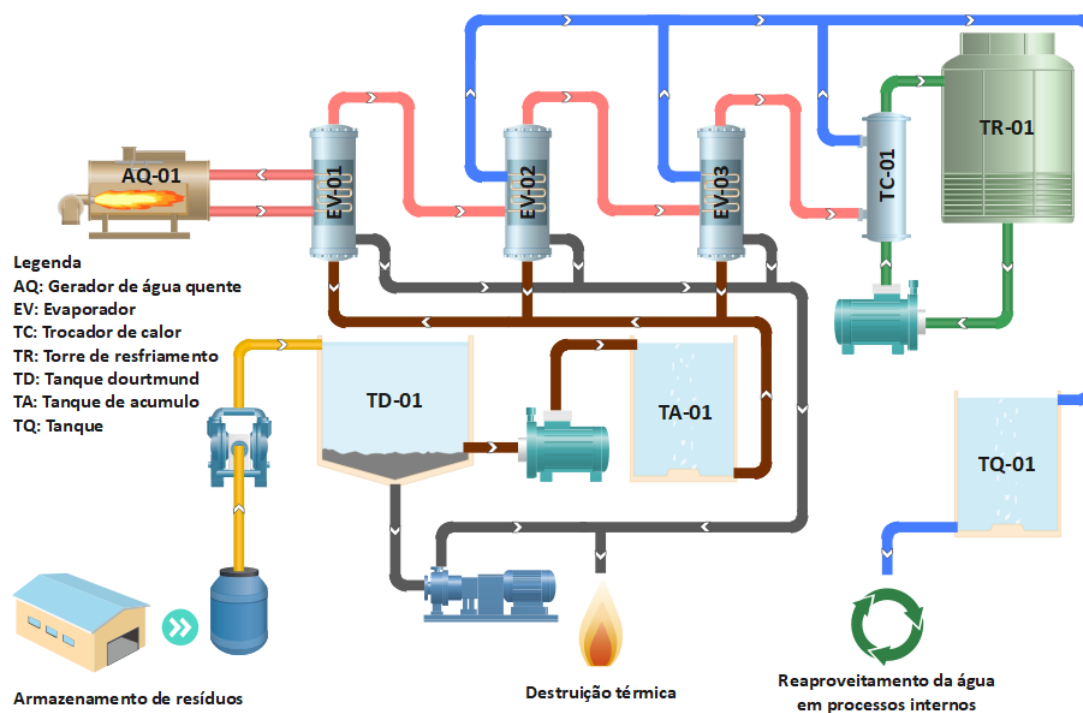


Figura 8 - Fluxograma simplificado do sistema de evaporação (AUTOR,2023).

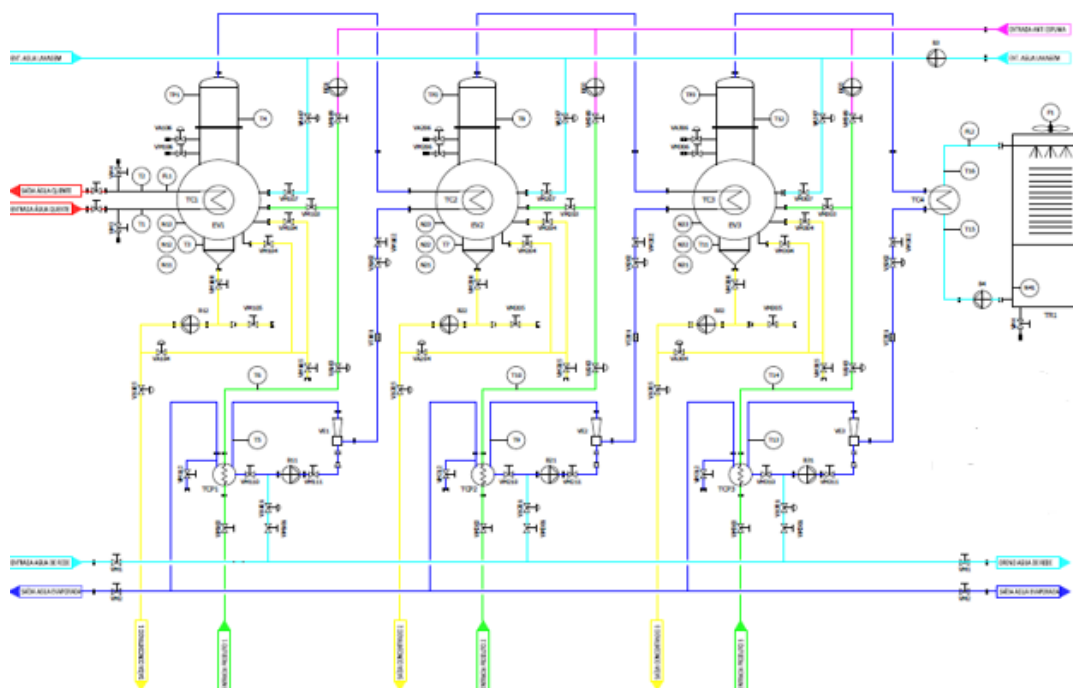


Figura 9 - Fluxograma completo do sistema de evaporação com inclusão do sistema de automação (AUTOR, 2023).

A produção de vácuo é efetuada com ejetores do tipo venturi, sendo instalado um em cada efeito, conforme curva de vapor a vácuo apresentado na Figura 11, demonstrando que quanto mais for reduzida a pressão do sistema, menor é a temperatura para a água evaporar. O vapor gerado no terceiro efeito alimenta um condensador onde ocorre troca de calor com água na superfície de uma serpentina. A água é alimentada na serpentina na temperatura de 30°C e é descarregada na temperatura de 36°C. A água aquecida alimenta uma torre de resfriamento de água, sendo reciclada e um sistema fechado para o condensador, com reposição da água evaporada no processo de resfriamento.

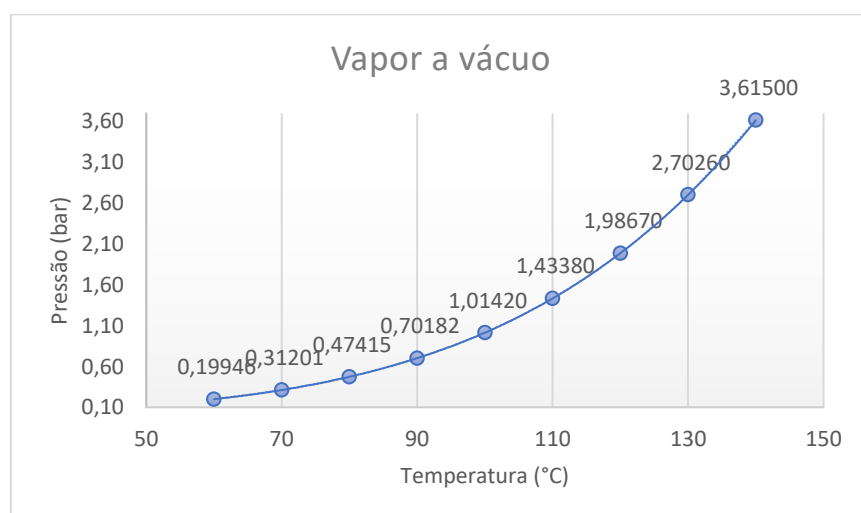


Figura 10 – Curva de vapor a vácuo (AUTOR, 2024).

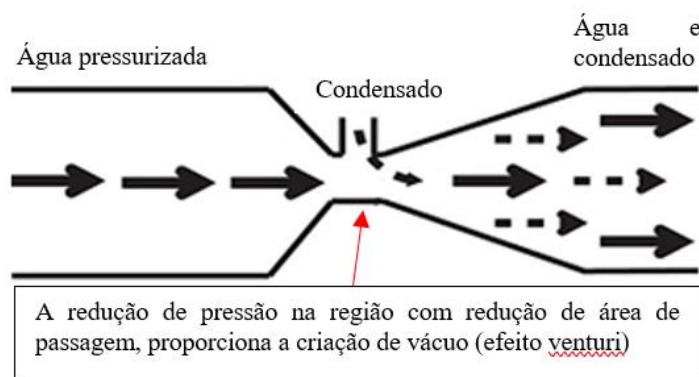


Figura 11 - Gerador de vácuo tipo venturi - ejetor (AUTOR, 2023).

O condensado do sistema de evaporação é submetido a um polimento. Inicialmente passa por um pós tratamento de osmose reversa, seguindo um sistema de ultra filtração com resina polimérica, finalizando com tratamento em um filtro de carvão ativado.

O sistema de controle do equipamento é todo automatizado, no qual dispensa a interferência do operador pois todos os controles das variáveis de pressões, depressões, temperaturas, níveis e vazões são monitorados e controlados por um PLC (Controlador Lógico Programável). Os comandos são efetuados através de uma IHM (Interface Homem Máquina) ou através de um computador com acesso à internet, sendo possível operar ou apenas monitorar o equipamento de qualquer localidade do mundo desde que se tenha acesso a internet. Como demonstrado na Figura 12 o sistema de operação remoto tem uma tela com histórico de alarmes, e como exemplo na Figura 13 demonstra uma das telas de operação, onde podemos observar os dados dos evaporadores 1 e 2. Essas telas contém um diagrama esquemático do processo facilitando ao operador monitorar.



Figura 12 - Imagens da interface de operação remota, tela de histórico de alarmes (AUTOR, 2024).

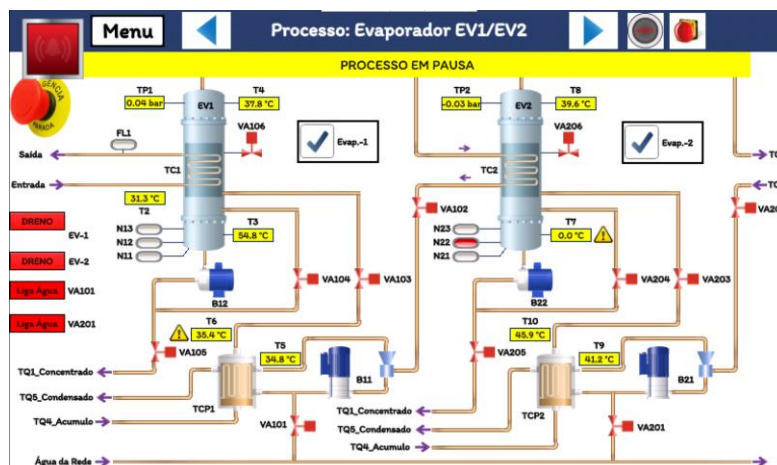


Figura 13 - Imagens da interface de operação remota, tela do processo EV1/ EV2 (AUTOR, 2024).

4.2 Sistema de incineração e tratamento de efluentes gasosos

O concentrado do sistema de evaporação de triplice efeitos, juntamente com lodo obtido nos decantadores de fundo cônico, são incinerados no forno incinerador.

O forno incinerador demonstrado na Figura 14 é constituído de: Esteira transportadora de taliscas; forno incinerador constituído por Câmara primária e secundária (pós queima), com uma temperatura média de trabalho na primeira câmara de 800 a 1100°C e na segunda câmara de 800 a 1200°C, sistemas de queimadores com potência total instalada de 2,91 MW, a energia é proveniente da combustão de GLP; Chaminé onde ocorre a continuidade da oxidação dos gases; trocador de calor de tubo duplo, refrigerado com escoamento do ar atmosférico a temperatura ambiente, promovendo uma redução de temperatura de 900°C para 350°C; Resfriamento rápido (flash) através de bicos injetores de água, ocorrendo contato direto entre os fluidos (gás e água) promovendo um resfriamento rápido de temperatura de 350 para 80°C (convém relatar que isto impossibilita a formação de dioxinas e furanos; lavador de gás tipo *scrubber*, onde ocorre lavagem do gás e remoção de particulados, sendo acoplado um demister (separador de gotículas); um venturi possibilita o aumento de velocidade do gás para o coalescimento. Já o coalescimento com atuação de força centrífuga que leva as pequenas gotículas se combinarem, sendo descarregadas em tanque de sedimentação, um segundo demister é acoplado ao equipamento; conjunto de 30 microciclones separa micropartículas e umidade condensada dos gases; sistema de exaustão composta por três exaustores axiais em série, com uma depressão de trabalho de 200 mmH₂O cada equipamento, devido os equipamentos serem instalados em série se soma esta depressão; Piscina de sedimentação por gravidade é utilidade para receber toda água proveniente do

sistema de lavagem por via úmida, podendo assim ser feito a correção de pH, decantação e redução da temperatura para retornar ao processo como água de lavagem.

A injeção de líquidos no forno incinerador é feito pela tecnologia desenvolvida pela empresa para atender suas demandas, a aspersão de líquidos através do bico, conforme demonstrado na Figura 15, bico é produzido em aço INOX 316L devido a agressão do gases de processo e líquidos, o mesmo utiliza a injeção de ar comprimido para que ocorra a aspersão dos líquidos e para refrigeração de sua estrutura metálica, o ar comprimido também colabora para enriquecimento de O₂ contribuindo com a queima do líquido.

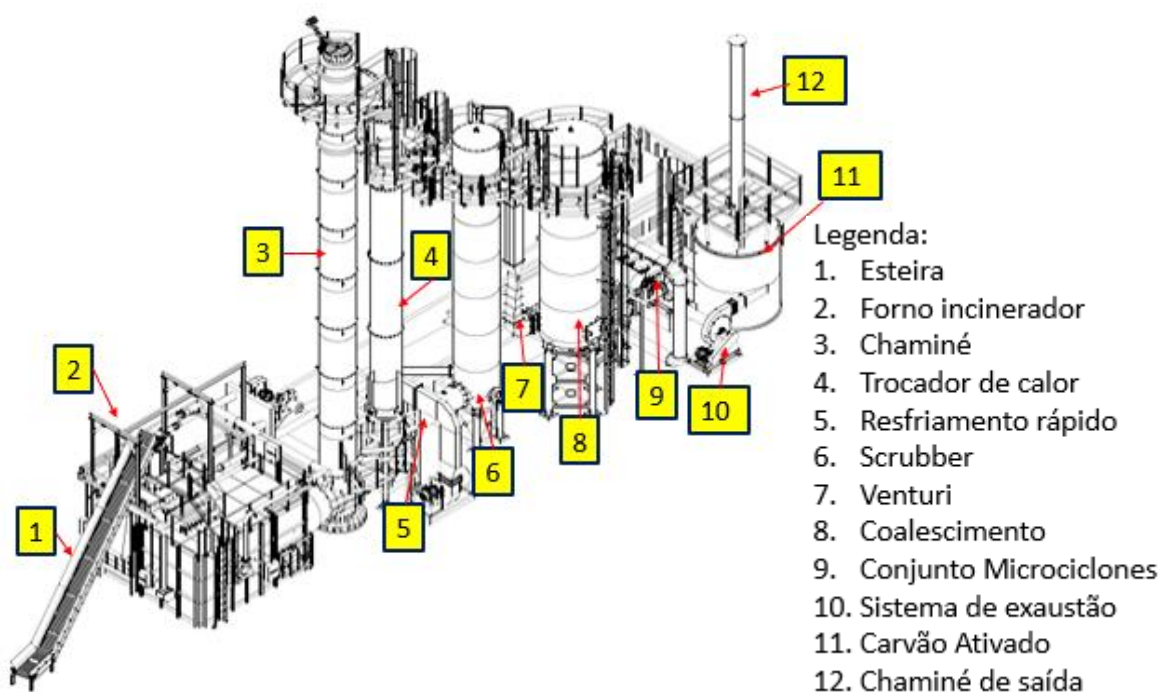


Figura 14 - Forno incinerador leito fixo com sistema de lavagem de gases úmidos. (ZAMFOR,2015).

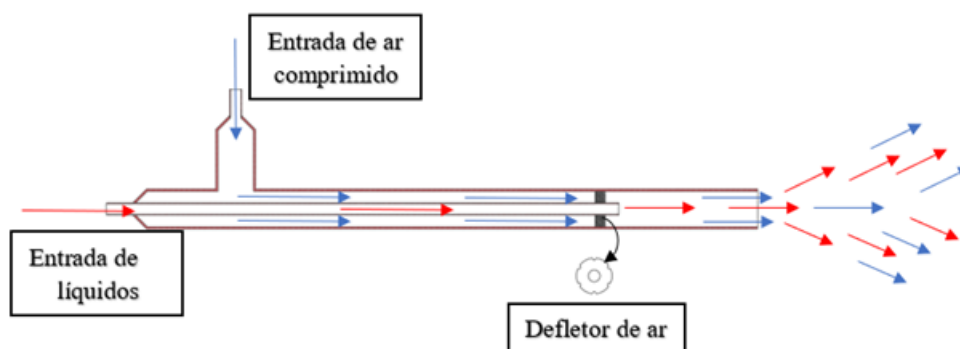


Figura 15 - Bico aspersor de líquidos (AUTOR, 2024).

4.3 Resíduo.

Como parâmetro de processo foi utilizado águas residuais do herbicida Tebutiuron, que consiste na substância a ser concentrada para depois ser transformada termicamente. A concentração se dá pelo motivo de redução de custo em volume de efluente a ser incinerado. O Tebutiuron consiste em um herbicida não seletivo de amplo espectro da classe da ureia. É usado em vários herbicidas para controle de ervas daninhas, plantas lenhosas e herbáceas e cana-de-açúcar.

O Tebutiuron cuja formula molecular é $C_9H_{16}N_4OS$, sendo a formula estrutural mostrada na Figura 16, possui as seguintes propriedades físicas:

Densidade: 1,1248 g/cm³

Ponto de Fusão: 157,3 a 163,3 °C

Ponto de Ebulição: 394,2 °C

pH: 7,52

Solubilidade: 2,4 g/L em água (pH 4,9 à 20,0°C)

Viscosidade: 1850 mPa.s (20 °C)

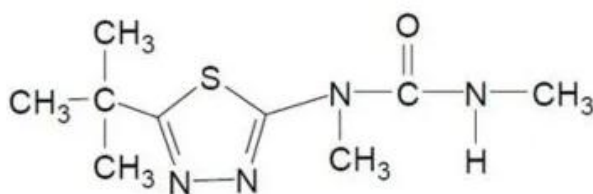


Figura 16 - Estrutura molecular do Tebutiuron (AUTOR,2023).

O resíduo obtido da fabricação é proveniente da lavagem dos misturadores que fabricam o defensivo agrícola, contendo em média 5 % do volume total de Tebutiuron diluído em água.

O próximo capítulo trata dos resultados obtidos no tratamento do resíduo gerado no processo de fabricação de Tebutiuron, o qual é recebido pela empresa para tratamento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Decantação

O resíduo recebido tem seu teor de acidez quantificado, consistindo 20 m³ em uma única batelada. A correção do pH foi efetuada utilizando o agente neutralizante necessário para que a substância fique com pH neutro ou próximo de neutro, onde é utilizado Hipoclorito de sódio para correção da acidez e policloreto de alumínio para correção da alcalinidade. Seguiu-se a adição de agente floculantes catiônicos ou aniônicos ou ambos sendo o parâmetro analítico a obtenção do clarificado em teste de jarro (jar test). Já no processo industrial o resíduo com os floculantes adicionados alimenta o decantador similar ao representado na Figura 17. O lodo decantado, que ainda é drenado do tanque em fase líquida, é armazenado em IBC (Intermediate Bulk Container) para posteriormente ser incinerado em um sistema de aspersão de resíduo líquido (bicos aspersores alimentam o resíduo dentro do forno). O clarificado é retirado e direcionado a um tanque de armazenamento de 10 m³ com fundo plano, onde fica armazenado para posterior tratamento em sistema de evaporação.

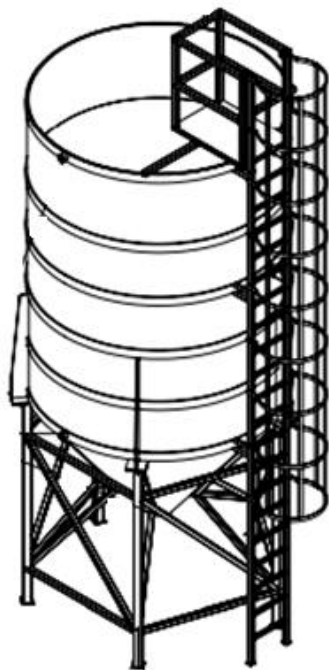


Figura 17 - Vista de tanque decantador com fundo cônico de 20m³ (AUTOR, 2023).

5.2 Evaporação

O clarificado proveniente do processo de decantação, que fica armazenado no tanque, alimenta o sistema de evaporação a triplice efeitos, e o resultado da produção é sumarizado no Quadro 2.

Descrição	Quant.	Unid. De med.
Concentrado	99,75	Kg/hr
Condensado	432,75	Kg/hr
Total tratado	532,5	Kg/hr

Tabela 1 - Resultados do sistema de evaporação de tríplex efeitos (AUTOR, 2024).

Analisando os resultados na Tabela 1 verifica-se que em média que o clarificado tratado no sistema gera 80% do seu volume em vapor, que ao final do processo é condensado, e os 20% restantes é o resultado de parte da água não evaporada com os concentrados do clarificado tratado, sendo assim o material ainda é tirado em fase líquida do equipamento. O vapor é condensado e direcionado a um tanque de armazenamento para posterior polimento. O condensado é direcionado a um tanque de acúmulo para posteriormente passar por um processo de polimento do condensado.

Foi efetuada a quantificação da concentração do Tebutiuron no condensado, obtendo-se 67.100 µg/L (Resultado obtido pela empresa Bioagri Ambiental LTDA.).

5.3 Polimento de condensado

O condensado tratado passa por um sistema de osmose reversa, ultra filtração e carvão ativado, que serão descritos a seguir.

5.3.1 Osmose reversa

O condensado foi tratado no sistema de osmose reversa, obtendo-se o resultado do líquido tratado de 171 µg/L (Resultado obtido pela empresa Bioagri Ambiental LTDA.). Portanto a redução de concentração do Tebutiuron foi de 392 vezes. Isso mostra que a osmose reversa apresenta alto desempenho na remoção do Tebutiuron.

5.3.2 Ultra filtração

O líquido proveniente da etapa de ultra filtração, teve a concentração de Tebutiuron reduzida para 2,2 µg/L (Resultado obtido pela empresa Bioagri Ambiental LTDA.). Portanto a redução da concentração em relação ao condensado foi de 30500 vezes.

5.3.3 Carvão ativado

Essa etapa efetuada apenas para redução de possíveis odores no líquido, não efetuada quantificação analítica.

Após a redução de concentração do composto, a água do processo é direcionada o sistema de lavagem de gases do forno incinerador.

5.4 Forno incinerador

Foi realizada a mistura do lodo gerado no processo de decantação físico química e o concentrado gerado no sistema de evaporação, direciona-se essa mistura a um sistema de bombeamento de líquidos de base água, que se utiliza uma bomba pneumática de duplo diafragma. Há uma linha exclusiva para distribuição do líquido em variados pontos nas câmaras de incineração, principalmente direcionado a primeira câmara do forno onde ocorre a combustão de materiais sólidos, construída em INOX 316L. Utiliza-se a injeção por bicos aspersores com aspersão redonda, gotas médias e distribuição uniforme em INOX 316L. Devido à alta temperatura de trabalho na câmara do forno é utilização a injeção de ar pressurizado para refrigeração dos bicos e melhorar e promover um enriquecimento de O₂ para se ter uma melhor combustão do líquido aspergido.

Para queima no forno é feito um *blend* que deve ser elaborado para manter uma média de alimentação de 5.000 Kcal/h, obtendo de acordo com PCI dos materiais utilizados para alimentação do forno, sendo dividido entre: resíduo sólido, resíduo líquido base água e solvente. Um material pode queimar sem a necessidade de um combustível auxiliar quando se tem um poder calorífico mínimo de 14,4 MJ/Kg, o valor típico da madeira seca (VIEIRA, 2012). Na empresa é utilizado como combustível auxiliar o GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) que possui um poder calorífico médio de 49,19 MJ/kg, que é injetado em queimadores e se obtém uma potência de 1.634.000 kcal/h. Com consumo máximo de 140 kg/h, e um consumo mínimo de 28 kg/h que corresponde a 20 % da potência máxima instalada, ele possui um sistema modulante automático que é acionado de forma proporcional quando há a necessidade de que seja elevada a temperatura da câmara.

Para elaboração do *blend*, é utilizada o Quadro 3, onde se pode identificar o poder calorífico de alguns resíduos.

Tipo de resíduo	PCS (MJ/Kg)	PCS (Kcal/Kg)
Resíduo hospitalar	19-24	4540-5735
Resíduo industrial	22-40	5257-9558
Resíduo doméstico sem reciclo	07-16	1673-3823
Resíduo doméstico com reciclo	10-14	2389-3345
PVC	41	9797
Madeira seca	14,4	3441
Papel	13,5	3226
Carbono (grafite)	07-12	1673-2867
Petróleo (benzina)	45-47	10573-11231
Carvão	15-27	3584-6452
Diesel	46	10992
Etanol	30	7168

Tabela 2 - Poderes caloríficos típicos de materiais residuais (VIEIRA, 2012).

Para se determinar o PCI adotou-se o seguinte cálculo:

$$PCI = PCS - 600 (9 H / 100) \quad (6.1)$$

Sendo:

PCI = Poder calorífico inferior (Kcal/Kg)

PCS = Poder calorífico superior (Kcal/Kg)

H = Teor de hidrogênio (%)

5.5 Sistema de tratamento de efluentes gasosos

Os gases provenientes da destruição térmica dos resíduos incinerados no forno foram submetidos aos seguintes tratamentos:

5.5.1 Chaminé

A chaminé é constituída por aço carbono revestido internamente com material refratário, com a função de tiragem natural em caso de falha no sistema de tratamento. A temperatura aproximada na entrada é de 1200 °C e na sua saída de 950 °C, onde ocorre a combustão final dos gases.

5.5.2 Trocador de calor

O trocador de calor é constituído por um tubo cilíndrico (diâmetro de 800 mm) de parede dupla (espaçamento entre paredes de 150 mm), sendo refrigerado por ar

atmosférico que escoar na camisa por ação de um soprador. No início da alimentação existe um helicóide para direcionamento do ar em sentido tangencial para maior aproveitamento de troca de calor, constituído de tubo de tubo de aço inoxidável, sendo inox 310S no tubo interno e inox 316L no tubo externo, onde ocorre uma redução de temperatura dos gases, de aproximadamente 950 °C para 350 °C

5.5.3 **Resfriamento rápido (Flash)**

Nesta etapa, ocorre a aspersão de água alimentada à temperatura de 40 °C proveniente do sistema de recirculação da etapa de lavagem dos gases, reduzindo a temperatura bruscamente de aproximadamente 350 °C para 80 °C. Este procedimento evita a formação de dioxinas e furanos.

5.5.4 **Scrubber**

O scrubber é constituído por um sistema com injeção de água pela lateral da parede cilíndrica, ocorrendo ligeiramente redução de temperatura. Contudo, ocorre a lavagem dos gases e os particulados aderem-se às gotículas. No topo do scrubber, um demister coleta as micro gotículas após ocorrer a formação de gotas maiores, as quais retornam para o interior do scrubber.

5.5.5 **Venturi**

O venturi é constituído por um tubo de secção transversal quadrada, de aço carbono, com um estreitamento em seu percurso de modo a permitir que pequenas gotículas entrem em contato. Na sequência o gás alimenta o sistema de coalescimento, detalhado a seguir.

5.5.6 **Coalescimento**

O coalescimento consiste na intensificação da junção de gotículas que são separadas pela ação conjunta da força centrífuga e gravitacional, deslocando-se para parte inferior do equipamento. O gás escoar para o topo do separador, que passa por um demister constituído por 20 telas perfuradas dispostas sequencialmente sem espaçamentos.

5.5.7 **Conjunto microciclones**

O gás após abandonar o coalescimento alimenta um conjunto de microciclones dispostos em paralelo com objetivo de separar as micropartículas e as gotículas residuais.

5.5.8 Sistema de exaustão

O sistema de exaustão é constituído por três exaustores em série, cada um com vácuo de 650 mmH₂O, construídos em INOX 316L.

5.5.9 Piscina de sedimentação

Esse sistema é constituído por três decantadores dispostos em série e com alturas decrescentes, o que possibilita o escoamento da água admitida em temperatura de aproximadamente 80 °C. Na lateral do primeiro decantador, alimenta-se uma solução de hidróxido de sódio na concentração de 50 % em massa. A função da base é neutralizar a acidez do efluente que geralmente apresenta pH ácido. O controle da vazão de hidróxido de sódio é efetuado automaticamente em função do pH do efluente. Contudo, a temperatura do efluente é alta e ocorre evaporação apreciável de água, em torno de 15m³/dia. Utiliza-se a água proveniente do sistema de polimento de condensado dos evaporadores para repor a água que evaporou. Para reciclar essa água a temperatura deve ser diminuída, que além do tempo de estadia médio no tanque de 30 minutos onde ocorre uma troca de calor com ambiente, reduzindo então no final da piscina a temperatura para aproximadamente 65°C, onde é direcionado a uma torre de resfriamento de água para continuar com o resfriamento.

5.5.10 Torre de resfriamento

A torre de resfriamento de água é do tipo induzido existindo um exaustor lateral para promover o escoamento de ar nas gotículas de água que escoam através do recheio estruturado formado por blocos. Isso possibilita o contato entre o líquido e o gás e com transferência simultânea de calor e massa. O efeito psicrométrico consiste na diminuição da temperatura da água para cerca de 50 °C, que já é novamente bombeada para o sistema de lavagem de gases.

6. CONCLUSÃO

A implementação de um sistema abrangente de tratamento de resíduos, como descrito nesta dissertação, apresenta uma solução eficaz para lidar com os desafios associados à gestão de resíduos perigosos. Ao longo deste estudo, diversos processos foram detalhados, desde a triagem dos resíduos até o tratamento final dos efluentes gasosos.

O processo de decantação demonstrou ser crucial na preparação do resíduo para tratamento posterior. Além disso, a evaporação permitiu a concentração do material a ser tratado, maximizando a eficiência dos processos subsequentes.

Os resultados do polimento do condensado mostraram reduções significativas na concentração de contaminantes, destacando a eficácia dos sistemas de osmose reversa e ultrafiltração na remoção de impurezas.

O tratamento dos efluentes gasosos foi abordado de forma abrangente, com múltiplos estágios projetados para remover efetivamente poluentes e garantir a conformidade com regulamentações ambientais rigorosas.

Em conclusão, o sistema proposto demonstra ser uma solução eficaz e sustentável para o tratamento de resíduos perigosos, garantindo a proteção do meio ambiente e a segurança de processo. A implementação dessas práticas pode servir como um modelo para enfrentando desafios semelhantes, promovendo o desenvolvimento sustentável e a preservação dos recursos naturais e do meio ambiente.

7. REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 10004:2004. RESÍDUOS SÓLIDOS - CLASSIFICAÇÃO. RIO DE JANEIRO, 2004.
- ARAÚJO, M. N, PINHEIRO, O. S., JUNIOR, E. F. C., COSTA, A. O. S.. **MODELAGEM FENOMENOLÓGICA DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLO EFEITO**. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA, CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO (UFES), CAMPUS DE ALEGRE, ES, BRASIL, 2016.
- BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. RESOLUÇÃO CONAMA Nº 316, DE 29 DE OUTUBRO DE 2002. DISPÕE SOBRE PROCEDIMENTOS E CRITÉRIOS PARA O FUNCIONAMENTO DE SISTEMAS DE TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS. DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, BRASÍLIA, DF, 13 NOV. 2002. SEÇÃO 1, P. 113-115.
- BRITO, ADAILTON PEREIRA. **ANÁLISE ECONÔMICA PRELIMINAR DA IMPLANTAÇÃO DE INCINERADOR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA REGIÃO DE BAURU** / ADAILTON PEREIRA DE BRITO, 2013 85 F. ORIENTADOR: CELSO LUIZ DA SILVA DISSERTAÇÃO (MESTRADO)–UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. FACULDADE DE ENGENHARIA, BAURU, 2013 1. VIABILIDADE ECONÔMICA. 2. INCINERAÇÃO DE RSU. 3. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO. I. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. FACULDADE DE ENGENHARIA. II. TÍTULO.
- BROWN, G. G., FOUST, A. S., KATZ, D.V., SCHNEIDEWIND, R., WHITE, R. R., WOOD, W. P., BROWN, G. M., BROWNELL, L. E., MARTIN, J. J., WILLIAMS, G. B., BANCHERO, J. T., YORK, J. L.. **OPERACIONES BÁSICAS D ELA INGENIERÍA QUÍMICA**. EDITORIAL MARIN. BARCELONA. 1965. 629p.
- CARDOZO, B. C., MANNARINO, C. F., FERREIRA, J. A.. **ANÁLISE DO MONITORAMENTO AMBIENTAL DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA EUROPA E A NECESSIDADE DE ALTERAÇÕES NA LEGISLAÇÃO BRASILEIRA**. UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO – RIO DE JANEIRO (RJ), BRASIL. JAN/FEV 2021.
- DELMONICO, E. L., CONSTANTINO, A. F., CARNEIRO, C.. **USO DE POLÍMEROS CATIÔNICOS E ANIÔNICOS COMO PRODUTOS AUXILIARES NO TRATAMENTO DE ÁGUA**. REVISTA MOSAICOS: ESTUDOS EM GOVERNANÇA, SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO. 2021.
- FOUST, A. S., WENZEL, L. A., CLUMP, C. W., MAUS, L., ANDERSEN, L. B.. **PRINCÍPIOS DAS OPERAÇÕES UNITÁRIAS**. EDITORA GUANABARA DOIS. 2ª EDIÇÃO. 670p.. 1982.
- LEITE, C. B. **TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS COM APROVEITAMENTO ENERGÉTICO: AVALIAÇÃO ECONÔMICA ENTRE AS TECNOLOGIAS DE DIGESTÃO ANAERÓBIA E INCINERAÇÃO**. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2016.
- MCCABE, W. L., SMITH, J. C., HARRIOTT., P. **UNIT OPERATIONS OF CHEMICAL ENGINEERING**. 7ª EDIÇÃO. 2004.
- MELO, A., QUINTELAS, C., FERREIRA, E.C., MESQUITA, D. P.. **THE ROLE OF EXTRACELLULAR POLYMERIC SUBSTANCES IN MICROPOLLUTANT REMOVAL**, 2022.
- METCALF, L.; EDDY, H.. **TRATAMENTO DE EFLUENTES E RECUPERAÇÃO DE RECURSOS**. 5. ED. MCGRAW-HILL, 2016.

NEOTECH. NEOTECH SOLUÇÕES AMBIENTAIS. DISPONÍVEL EM:
<WWW.NEOTECHAMBIENTAL.COM.BR>. ACESSO EM: 10/10/2023.

POLETTTO, J. A. F., **VIABILIDADE ENERGÉTICA E ECONÔMICA DA INCINERAÇÃO DE RSU CONSIDERANDO A SEGREGAÇÃO PARA RECICLAGEM**. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO, UNESP, BAURU, 2008.

REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIA.VOL. 24 | Nº 1 | 1º TRIM. 2018 27-53.
INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS COM GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: ANÁLISE DO PANORAMA BRASILEIRO E SOTEROPOLITANO THIAGO FIGUEIREDO DE OLIVEIRA; CINTIA RAMOS COSTA DA CRUZ; ELIZABETH DA ROCHA COUTO

RICHARDSON, J.F.; HARKER, J.H.; BACKHURST, J.R. CHEMICAL ENGINEERING. **PARTICLE TECHNOLOGY AND SEPARATION PROCESSES**. BUTTERWORTH. LONDON: 2006. 1229p.

SVAROVSKY, P. L.. **SOLID-LIQUID SEPARATION**. BUTTERWORTH-HEINEMANN, 2000.

VIEIRA, M. P. **FUNDAMENTOS DE INCINERAÇÃO**. 1ª EDIÇÃO. SÃO PAULO: EDITORA GREGORY, 2012. 298 p

WASTE-TO-ENERGY IN AUSTRIA, WHITE BOOK. AUSTRIAN MINISTRY OF LIFE. 2 EDIÇÃO. 2013.

ZAMFOR. ZAMFOR SOLUÇÕES EM TECNOLOGIA AMBIENTAL. DISPONÍVEL EM:
<[HTTP://WWW.ZAMFOR.COM.BR/](http://WWW.ZAMFOR.COM.BR/)>. ACESSO EM: 05/11/2023.