

SISTEMA INTEGRADO DE EVAPORAÇÃO E TRATAMENTO DE GASES RESIDUAIS DE INCINERAÇÃO

DIOGO H. C. MANZAN^{1*}, MAURO L. BEGNINI¹, JOSE ROBERTO DELALIBERA FINZER¹.

Universidade de Uberaba, Programa de Mestrado em Engenharia Química

*e-mail: diogomanzan@gmail.com

RESUMO - A sustentabilidade e a destinação correta de resíduos vêm sendo exigência mundial para um controle ambiental melhor e de redução da poluição. A Neotech Soluções Ambientais LTDA, na cidade de Uberaba, Minas Gerais, tem, como etapa de seus processos, a incineração de Resíduo Sólido de Saúde (RSS) e de resíduo gerado em indústrias agroquímicas (geralmente plásticos, vidros, papeis, papelão, borrachas, líquidos de base água e líquidos de base solventes, resíduos de reagentes e resíduos de matéria prima). No processo, há uma redução de volume e de massa acima de 80%, processo que passa por um sistema de filtragem com uma grande eficiência para atingir os parâmetros legais de emissão de gases na atmosfera.

INTRODUÇÃO

Resíduos industriais provenientes de indústrias de formulação de defensivos agrícolas são gerados, em sua maioria, em limpeza de reatores ou misturadores e envasadores. Os resíduos perigosos devem ser eliminados antes de se efetuar uma nova formulação. A água de lavagem que contém os resíduos deve ser tratada para ser utilizada em outras aplicações. A ideia de desenvolver o estudo foi no sentido de possibilitar que a água residual evaporada no processamento fosse reutilizada em etapas internas de destinação de resíduos em tratamento de resíduos.

Revisão bibliográfica

Tratamento físico-químico para decantação: A separação de uma fase líquida e uma fase sólida de 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) espaçável, e possibilita 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, 1977).

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

Denomina-se sedimentação 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 na Figura 2.

Na figura 2: H corresponde à altura; t ao tempo; C à concentração; A corresponde à área.

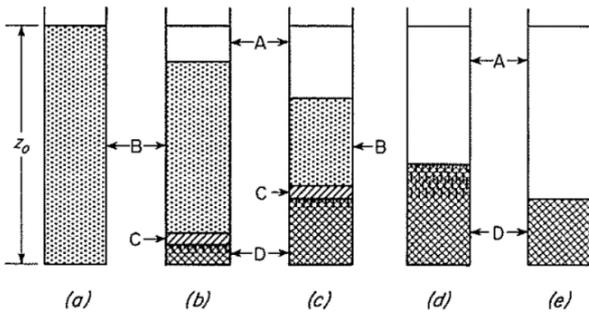


Figura 1: Teste de proveta na sedimentação de uma suspensão (MCCABE et al, 2004): A, líquido clarificado; B, mistura inicial; C, região intermediária; D, lodo espessado.

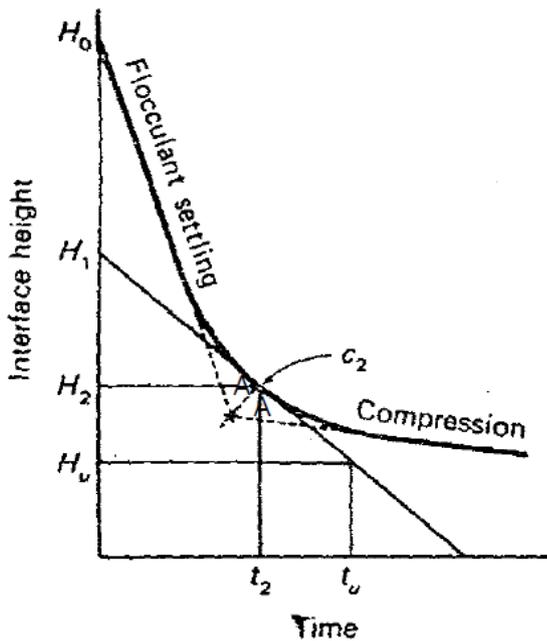


Figura 2: Curva de sedimentação (METCALF et al, 2016).

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 remoção 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).

Evaporador 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 fervura, e de um dispositivo para separar a fase vapor do líquido 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.,1993).

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 produto é líquido ou pastoso, às vezes constituído por viscosidades altas, enquanto nos secadores o produto é sólido (McCABE et al.1993).

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 condensado que é a 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, U1; U2 e U3 consistem em coeficientes globais de transferência de calor e outras grandezas são indicadas na figura.

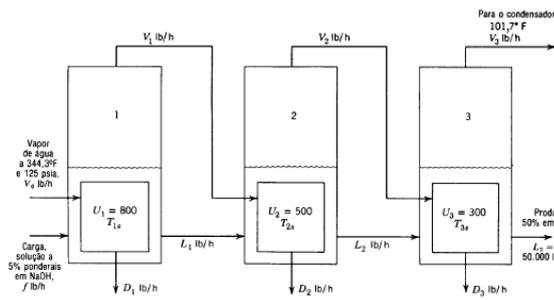


Figura 3: Fluxograma de um evaporador a triplice efeito, com alimentação direta (FOUST, 1980).

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).

Forno incinerador e sistema depurador de gases: A incineração de resíduos perigosos consiste na destruição 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 incineração consiste geralmente em dois estágios, que está elucidado na Figura 4. 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).

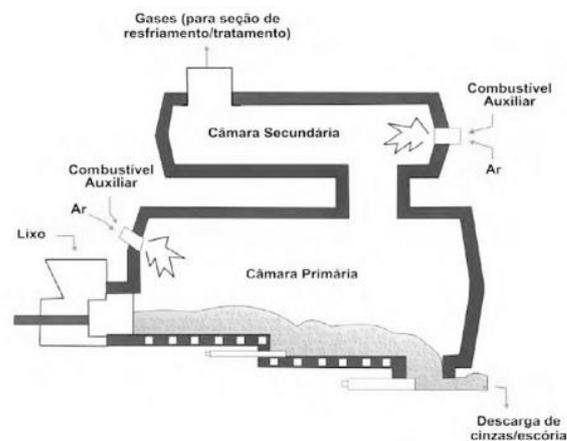


Figura 4: Incinerador típico de leito fixo (VIEIRA, 2012; OLIVEIRA et al., 2018).

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 (H₂O) 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) combustível, utilizando um agente de gaseificação (por exemplo, H₂O, CO₂, O₂). 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 (H₂) para convertê-los em CO₂ e H₂O. 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 (GRECH et al., 2010).

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).

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

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.

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 recipientes e direcionado à incineração.

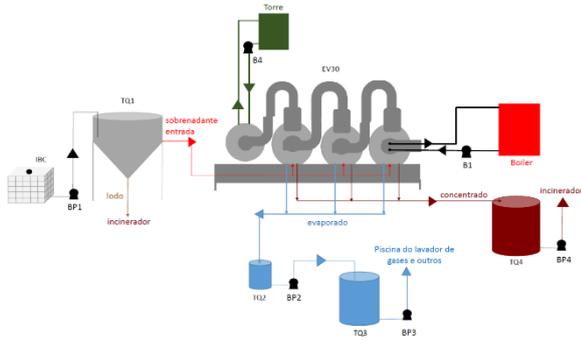


Figura 5: Fluxo simplificado de sistema de evaporação (NEOTECH, 2023).

As condições operacionais do sistema de evaporação são descritas na Tabela 1, o aquecimento no primeiro estágio é efetuado com água quente na temperatura de 90°C que circula em um sistema fechado entre a serpentina e o gerador de água quente. Água quente é obtida em trocador de calor flamo 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 acontece a pressão desce do primeiro até o terceiro estágio. A produção de vácuo é efetuada com ejetores do tipo venturi, sendo instalado um em cada efeito. O vapor gerado no terceiro efeito alimenta um condensador onde ocorre troca de calor com água através da 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.

Tabela 1: Condições operacionais nas câmaras do sistema de tríplex efeitos (NEOTECH, 2023).

Dados	1ª camara	2ª camara	3ª camara
Vacu (bar)	-0,67	-0,78	-0,92
Temperatura do vapor (°C)	65/67	54/57	42/47

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).

Sistema de incineração e tratamento de efluentes gasosos: O concentrado do sistema de evaporação de tríplex efeitos, juntamente com lodo obtido nos decantadores de fundo cônico, é incinerado no forno incinerador.

O forno incinerador demonstrado na Figura 6 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 em que 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 (ZAMFOR, 2016)); 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; coalescimento com atuação de força centrífuga que leva as pequenas partículas a se aglomerarem, sendo descarregadas em tanque de sedimentação, um segundo demister é acoplado ao equipamento; conjunto de 30 microciclones que separa micropartículas e umidade condensada dos gases; sistema de exaustão composto por dois exaustores axiais em série, com uma depressão de trabalho de

200 mmH₂O, devido aos 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 de lavagem.

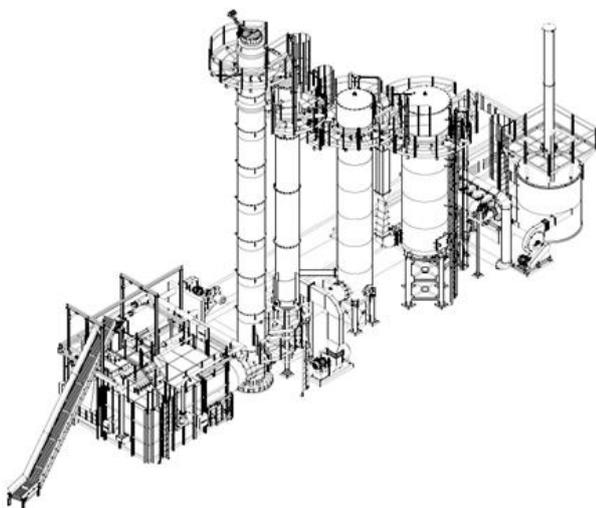


Figura 6: Forno incinerador leito fixo com sistema de lavagem de gases úmidos. (ZAMFOR,2015).

Resultados e discussão

Como parâmetro, utilizaram-se águas residuais do herbicida Tebutiuron na substância a ser concentrada para depois ser destruída termicamente. A concentração se dá pelo motivo de redução de custo em volume de efluente a ser processado. É 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, cuja fórmula molecular é C₉H₁₆N₄OS, e sua estrutura molecular representada na Figura 6.

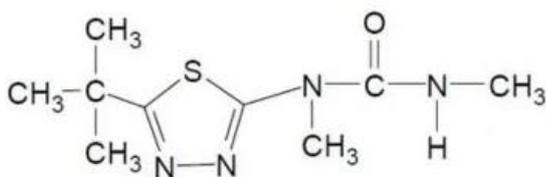


Figura 6: Estrutura molecular do Tebutiuron (NEOTECH,2023).

Evaporação e polimento de condensado: No equipamento analisado,

verifica-se que em média o sistema concentra o clarificado a 20% do valor original, sendo em média 80% o vapor gerado no sistema de evaporação. O vapor é condensado e direcionado a um tanque de armazenamento para posterior polimento.

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

O condensado tratado passa por um sistema de osmose reversa, ultra filtração e carvão ativado. Após, o líquido é direcionado para utilização no sistema de lavagem de gases oriundos da incineração.

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. Em seguida, direcionado para a etapa de 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. Após foi feita a filtragem pelo carvão ativo.

Já a etapa de filtragem pelo carvão ativado foi realizada apenas para redução de possíveis odores no líquido, não efetuada quantificação analítica.

Sistema de incineração e filtro depurador de gases: Em torno de 20% a 30% dos resíduos gerados são enviados para incineração, reduzindo seu volume em torno de 80%, e transformando-o em material inerte. Já os 80% de condensado, após sistema de polimento, são enviados para o filtro depurador de gases, que evapora em média 8m³/dia de água no processo de lavagem dos gases, sendo necessária uma reposição constante.

A eficiência desse sistema deve ser analisada bianualmente para quantificar se as emissões estão dentro dos limites permitidos pela legislação.

Conclusão

O processo estudado apresenta alta performance para recuperação de água para utilização no reuso direto com vastos ganhos diretos e indiretos.

Trata-se de equipamentos totalmente adequados, de acordo com as legislações vigentes, com segurança operacional, e incluindo um sistema de automação que constantemente passa por melhorias, sempre visando uma melhor performance com baixo custo e segurança de processo. Devido a agressividade do resíduo tratado, há um alto custo de manutenção nos equipamentos, que constantemente sofrem melhorias nos materiais empregados na sua construção para que tenham maior segurança operacional e redução nos custos de manutenção do equipamento.

O ideal é que esse processo seja conduzido por uma equipe especializada e com bom conhecimento operacional e de funcionamento dos equipamentos.

O processo citado no estudo demonstra a alta confiabilidade no processo, com grandes ganhos ambientais, visando a destruição térmica de resíduos perigosos, redução significativa de resíduos destinados e geração de água de reuso, evitando assim a captação de água de meios naturais.

Referências

- ARAUJO, 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
- 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. ET AL. 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 CATIONICOS E ANIÔNICOS COMO PRODUTOS AUXILIARES NO TRATAMENTO DE ÁGUA. REVISTA MOSAICOS: ESTUDOS EM GOVERNANÇA, SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO. 2021.
- FOUST, A. S. PRINCÍPIOS DAS OPERAÇÕES UNITÁRIAS. 2.ED. RIO DE JANEIRO. 1980. 670P.
- 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.
- MCCABE, W. L., SMITH, J. C., HARRIOTT., P. UNIT OPERATIONS OF CHEMICAL ENGINEERING. 7ª EDIÇÃO. 2004.
- METCALF, EDDY, TRATAMENTO DE EFLUENTES E RECUPERAÇÃO DE RECURSOS. 5. ED. MCGRAW-HILL.
- 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.; BACKHUSRST, J.R. CHEMICAL ENGINEERING. PARTICLE TECHNOLOGY

AND SEPARATION PROCESSES.
BUTTERWORTH. LONDON: 2006. 1229P.
VIEIRA, M.P. FUNDAMENTOS DE
INCINERAÇÃO. 1ª EDIÇÃO. 2012.
WASTE-TO-ENERGY IN AUSTRIA, WHITE
BOOK. AUSTRIAN MINISTRY OF LIFE. 2
EDIÇÃO. 2013.