

## INCINERAÇÃO DE REJEITOS RADIOATIVOS DE BAIXA ATIVIDADE CONCEITOS BÁSICOS PARA PROJETO E AQUISIÇÃO

Luiz Amaral LUNKES, Roberto VICENTE  
Inst. de Pesq. Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP  
Caixa Postal 11049 CEP 05499 - São Paulo - SP

### RESUMO

Apresenta-se um estudo onde a incineração de rejeitos radioativos é analisada dentro de um enfoque sistêmico e são discutidos: os conceitos básicos da incineração; os requisitos funcionais, operacionais e construtivos de uma unidade de incineração; os requisitos para licenciamento; e uma análise de viabilidade econômico-financeira. Objetiva-se estabelecer uma base conceitual para orientar projetos ou para avaliar projetos de unidades de incineração.

### INTRODUÇÃO

Uma parte substancial dos rejeitos radioativos de baixa e média atividade, gerados no ciclo do combustível e nas diversas aplicações dos radioisótopos, são combustíveis.

O meio mais eficiente de tratamento destes rejeitos é a incineração, devido ao seu elevado fator de redução de volume e a conversão de rejeitos orgânicos em rejeitos inorgânicos, química e biologicamente inertes, os quais são facilmente condicionados em formas adequadas para deposição final.

A incineração é um complexo processo de tratamento térmico a alta temperatura e sua utilização exige que sejam atendidos certos requisitos de segurança. Na operação de incineração são gerados aerossóis e gases contendo radionuclídeos e poluentes não radioativos que são dispersos no meio ambiente se não houver um tratamento adequado. Isto requer um sofisticado sistema de instrumentação e controle de processo.

Além disto, é necessária uma elevada capacidade e disponibilidade de recursos para investimento, pois trata-se de um processo caro em relação às outras técnicas alternativas de tratamento de rejeitos.

Uma parcela significativa do investimento está relacionada ao sistema de instrumentação e controle (30 - 40 % para unidades de grande porte e 50 - 60 % para pequeno porte), o que torna o investimento, até certo ponto, independente da capacidade de processamento.

Frente ao elevado custo de investimento e à complexidade técnica do processo, torna-se necessário uma análise custo/benefício preliminar cuidadosa e um planejamento minucioso do empreendimento, de forma a minimizar os riscos do investimento.

Assim, a finalidade deste trabalho é discutir uma base conceitual para auxiliar futuros projetos ou avaliações para aquisição de sistemas de incineração de rejeitos radioativos.

A incineração é uma técnica atraente para o tratamento de rejeitos radioativos porque grande parte dos rejeitos radioativos de baixa e média atividade são combustíveis, porque tem capacidade para processar uma grande diversidade de materiais e devido às propriedades do produto final (cinzas).

Conseqüentemente, a partir de 1984, o IPEN iniciou um programa visando estudar e desenvolver esta tecnologia. A experiência adquirida neste programa da suporte à este trabalho.

### CONCEITOS BÁSICOS

**Combustão de Sólidos.** A combustão é uma reação química exotérmica entre a substância combustível e o oxigênio (comburente), dando origem aos produtos finais da combustão e a liberação de energia na forma de calor, chamada calor de combustão ou poder calorífico.

O combustível é toda substância que possui elementos químicos em sua constituição tais que, ao se combinarem com o oxigênio, liberam certa quantidade de calor.

O comburente utilizado é, na maioria dos casos, o oxigênio proveniente do ar atmosférico. Neste caso, parte da energia liberada é consumida para aquecer elementos constituintes do ar atmosférico que não participam da reação.

A combustão é, geralmente, um fenômeno de fase gasosa, com exceção da combustão de carbono sólido o qual, em formas tais como carvão e fuligem, reage heterogeneamente.

Nas substâncias sólidas a combustão é iniciada pela degradação e desprendimento de material volátil, sendo necessário o aquecimento da substância até uma certa temperatura, chamada ponto de fulgor ou temperatura de inflamação. Com o aquecimento, a substância é degradada, basicamente por pirólise, e volatiliza moléculas que são hidroxiladas ou craqueadas e, finalmente, oxidadas.

Tanto o poder calorífico quanto o ponto de fulgor são característicos para cada substância em particular.

Algumas substâncias queimam mais rapidamente que outras e, em geral, isto depende de quão fácil seja tornar gás esta substância particular. e da taxa de liberação de calor da reação. A velocidade da reação de combustão depende da pressão, temperatura, composição química e estado físico do combustível e concentração de oxigênio.

Em princípio, os produtos finais da combustão são óxidos dos elementos presentes no combustível (nos reatantes). Estes óxidos estão, basicamente, na forma de gases, vapores e partículas sólidas. A fase sólida é chamada de cinza ou escória.

A reação de combustão, na prática, nem sempre ocorre de forma completa, devido à dificuldade de degradação das moléculas da substância sólida e de um contato perfeito entre as moléculas do combustível e do comburente. Assim, são gerados compostos intermediários, tais como aldeídos e alcatrão, e partículas finas não queimadas, tais como a fuligem.

Os combustíveis são geralmente materiais orgânicos resultando, no caso de uma combustão completa, um produto de combustão constituído de água e dióxido de carbono, além das cinzas.

Quando a temperatura em que ocorre a reação é muito elevada, ocorre o fenômeno da dissociação, surgindo compostos como CO e NOx nos produtos da combustão.

As principais propriedades dos materiais combustíveis, com relação ao balanço energético da combustão são o ponto de fulgor ou inflamação e os poderes caloríficos superior e inferior e, com relação ao balanço de massa, a composição química.

**Incineração.** A incineração é um tratamento térmico à alta temperatura cujo objetivo é a degradação térmica do material.

A incineração de substâncias sólidas envolve, primeiramente, a combustão de vapores e gases volatilizados resultantes da decomposição térmica desta substância e, em seguida, a combustão do carvão residual. Como produto final são obtidos gases, vapores e cinzas inertes.

Diferentemente do processo de combustão para geração de energia (p.e., caldeiras), onde o combustível apresenta propriedades físico-químicas praticamente constantes, a incineração processa materiais combustíveis heterogêneos, com um largo espectro de variação de propriedades, elevando o grau de dificuldade de controle do processo.

Além disto, os combustíveis utilizados para geração de energia, em função da aplicação, são geralmente compostos mais simples, em formas mais favoráveis à realização da reação de combustão e possuem um poder calorífico elevado.

Já os materiais processados na incineração, além da sua heterogeneidade, não apresentam, muitas vezes, formas favoráveis para a combustão e poder calorífico suficiente para a manutenção desta, exigindo, inclusive, energia auxiliar para o seu processamento.

Visto que os materiais processados por incineração nem sempre apresentam formas favoráveis para a reação de combustão, na incineração a combustão não ocorre de forma absolutamente completa, gerando compostos gasosos intermediários e partículas finas, que são poluentes atmosféricos, geralmente tóxicos, e cuja liberação para o meio ambiente é limitada devendo, pois, ser tratados.

**Incineração de Rejeitos Radioativos.** A incineração de rejeitos convencionais perigosos é empregada com a finalidade de destruir ou eliminar o(s) agente(s) de risco (patogenicidade, toxicidade e outros) presentes no rejeito.

No caso de rejeitos radioativos a utilização da incineração objetiva a redução de volume, a estabilização química e biológica, a homogeneização e a obtenção de uma forma mais favorável para imobilização do rejeito. Porém, não há eliminação do agente de risco (radiotoxicidade) que, ao contrário, é ampliado, devido ao aumento da atividade específica do produto final (cinzas).

A redução de volume busca reduzir os custos em etapas posteriores do gerenciamento de rejeitos (imobilização, armazenamento temporário, transporte e deposição final), que são elevados.

A estabilização química e biológica objetiva auxiliar a durabilidade do produto final para deposição (imobilizado) por décadas ou centenas de anos no repositório, minimizando a degradação química e microbiológica e a geração de gases da biodigestão anaeróbica e de radiólise.

A redução da reatividade química, a homogeneidade e a forma física de particulado, apresentadas pelas cinzas, auxiliam a compatibilização física e química do rejeito com a matriz de imobilização, além de permitir a sua inclusão em uma gama maior de matrizes.

Como visto no item anterior, a incineração gera com produtos finais da reação cinzas, gases, vapores e compostos resultantes da queima incompleta. Na incineração de rejeitos radioativos estes produtos contêm radionuclídeos, ampliando os riscos de liberação destes produtos para o meio ambiente. Isto requer que sejam utilizados sofisticados sistemas de tratamento dos gases e de controle das emissões gasosas para a atmosfera.

Uma forma de controlar a combustão dos rejeitos, a composição química e a atividade das cinzas e dos gases é através da preparação de mesclas de rejeitos combustíveis antes do processamento

A incineração de rejeitos radioativos gera rejeitos radioativos secundários que são produzidos durante as operações de processamento e manutenção da planta. Estes rejeitos são constituídos principalmente por leitos e elementos filtrantes, líquidos de lavagem

dos gases, cinzas retidas no sistema de filtros, partes de equipamentos, componentes de sistemas de manipulação e processamento e equipamentos de proteção individual. A geração destes rejeitos deve ser adequadamente analisada e minimizada, evitando que a incineração torne-se anti-econômica.

É importante observar que, em certos casos, pode ocorrer a presença de agentes de risco convencional nos rejeitos radioativos (p.e., rejeitos radioativos hospitalares ou rejeitos radioativos quimicamente perigosos). Nestes casos, estes materiais devem ser, obrigatoriamente, tratados em uma planta de incineração de rejeitos radioativos e esta deve ser capaz de processar estes rejeitos de forma a eliminar os agentes de risco convencional presentes.

## VISÃO SISTÊMICA DA INCINERAÇÃO

Sob um enfoque sistêmico, a incineração é um sistema constituído dos seguintes subsistemas: Preparação da Carga, Alimentação, Queima, Tratamento dos Gases, Coleta e Remoção das Cinzas, Coleta e Remoção dos Rejeitos Secundários, Exaustão dos Gases.

Por sua vez, o sistema incineração está inserido no super sistema Gerência de Rejeitos Radioativos e não pode ser tratada como um sistema isolado, pois, possui interfaces e relações de interdependência com outros sistemas, dentro e fora do supersistema. O sistema incineração realiza suas funções de forma integrada com estes sistemas.

As interfaces de entrada do sistema incineração são realizadas com o sistema de segregação e triagem, onde há o fluxo de rejeitos combustíveis segregados e triados, e com o sistema meio ambiente, onde há o fluxo de ar atmosférico.

A função do sistema de segregação e triagem, com relação ao sistema incineração, é segregar os rejeitos combustíveis que serão incinerados e a interdependência entre estes sistema está relacionada com a capacidade do sistema de segregação e triagem de evitar que materiais indesejáveis à incineração sejam inseridos no fluxo de rejeitos para este tratamento.

As interfaces de saída do sistema incineração são realizadas com o sistema meio ambiente, onde há o fluxo de gases de processo tratados, com o sistema de gerenciamento das cinzas, onde há o fluxo de cinzas radioativas, e com o sistema de gerenciamento de rejeitos secundários, onde há o fluxo de rejeitos secundários.

A função do sistema de gerenciamento das cinzas é realizar as etapas subsequentes da gerência das cinzas, até o seu condicionamento. A função do sistema de gerenciamento de rejeitos secundários é a mesma do sistema de gerenciamento das cinzas, só que se refere aos rejeitos secundários da incineração. Pela identidade de funções, em muitos casos, estes sistemas podem ser coincidentes ou, na realidade, formar um único sistema.

As interdependências entre o sistema de incineração e os sistemas de gerenciamento das cinzas e de gerenciamento dos rejeitos secundários estão baseadas na qualidade das cinzas e na qualidade dos rejeitos secundários, respectivamente, produzidos pelo sistema incineração. Esta qualidade refere-se às propriedades físico-químicas, principalmente com relação à composição química, aos radionuclídeos presentes e à atividade específica.

A função do sistema meio ambiente, na interface de entrada do sistema incineração, é prover o ar necessário para o processo e, na interface de saída sua função é receber e dispersar os efluentes gasosos provenientes do processo, bem como o calor gerado.

As interdependências dos sistemas meio ambiente e incineração estão relacionadas com a qualidade dos efluentes gasosos em termos da presença de poluentes convencionais e radioativos, com as doses recebidas pelo ambiente (p. e., a irradiação de operadores) e com a capacidade do ambiente de suportar e receber os poluentes e as doses.

Como a incineração é um processo que gera energia na forma de calor, pode-se considerar a possibilidade de realizar uma interface como um processo externo ao sistema e que utiliza calor (p.e., evaporação), de forma a promover um reaproveitamento energético. Esta interface também pode ser realizada internamente

ao sistema, utilizando o calor gerado para pré-aquecer o ar e os rejeitos em início de processamento.

O objetivo principal é a otimização do super sistema gerência de rejeitos, através da maximização da sua eficiência ou, mais especificamente, da sua relação benefício/custo. A maximização da eficiência global do super sistema gerência de rejeitos não corresponde, necessariamente, à maximização da eficiência do sistema incineração. Da mesma forma, a maximização da eficiência de todos os subsistemas, isoladamente, não corresponde à maximização da eficiência global do sistema incineração.

## ESTUDO DA VIABILIDADE

A decisão de realizar um empreendimento para utilizar a incineração como técnica de tratamento de resíduo radioativo, como em qualquer outro empreendimento (capital intensivo) com um significativo investimento e mobilização de recursos, é uma decisão política com base em uma análise custo/benefício onde devem ser avaliados critérios técnicos e econômicos.

Economicamente objetiva-se, se não maximizar, ao menos alcançar uma relação benefício/custo maior que 1, devido à incineração apresentar um elevado fator de redução de volume tornando economicamente atraente quando a demanda de rejeitos a tratar é elevada pois os custos de imobilização, embalagem, transporte e deposição final são reduzidos significativamente.

Tecnicamente visa-se maximizar o benefício em termos de segurança de deposição final, atendendo a requisitos de deposição como a proibição em repositórios de formas combustíveis, química e biologicamente degradáveis, devido a incineração transformar rejeitos orgânicos em cinzas e resíduos radioativos não inflamáveis, quimicamente inertes com maior homogeneidade e forma mais adequada/facilitada para imobilização. Deve-se levar em consideração, também, as restrições legais do local onde será implantada a unidade.

Ainda, considerando os aspectos técnico e econômico, deve-se realizar a comparação da relação benefício/custo da incineração com as de outras técnicas alternativas de tratamento.

Quando é avaliada a opção pelo desenvolvimento autônomo de uma tecnologia de incineração, deve-se levar em consideração o valor estratégico do domínio desta tecnologia. Se o desenvolvimento for para fins comerciais, devem ser avaliados o atual estado das artes, o mercado a que se destina, o prazo para desenvolvimento e o ciclo de vida desta tecnologia de incineração.

É importante salientar que o custo de uma unidade experimental não difere muito do custo de uma unidade industrial, pois, grande parte dos custos estão relacionados com instrumentação e controle que são independentes do porte da instalação e dos equipamentos, podendo ser até mais alto no caso de uma unidade experimental.

Como valores típicos atuais, o custo de uma unidade de incineração está na ordem de 1 a 3 milhões de dólares e os custos finais de processamento na ordem de 30 a 40 dólares por quilograma de cinza.

## REQUISITOS DE PROJETO

**Requisitos Funcionais.** Estes requisitos referem-se às funções que a planta de incineração deve realizar.

**Desempenho.** O incinerador de rejeitos radioativos deve cumprir as funções de redução de volume e estabilização química e biológica dos rejeitos, através de uma combustão adequada e com a eficiência necessária. Os índices para avaliação destes requisitos são o fator de redução de volume e o fator de eficiência de queima.

**Ergonomia.** A interação da planta de incineração com os operadores deve ser adequada, de forma a facilitar a realização das operações de processamento e controle e das operações de manutenção. Devem ser previstos mostruários e painéis de controle, bem como controles automáticos de processo, sempre que necessário. Também devem ser previstos, no arranjo da instalação,

espaços adequados para realização das operações de manutenção. O acesso e o alcance aos equipamentos de controle (p.e., válvulas) devem ser facilitados.

**Segurança Ocupacional e das Instalações.** Os riscos, tanto de natureza radiológica quanto convencional, e suas conseqüências aos operadores e à instalação devem ser avaliados e mantidos dentro de limites aceitáveis ou estabelecidos por normas, leis, códigos ou regulamentos. Devem ser avaliados, bem como previstos, meios e procedimentos de controle ou minimização de condições inseguras, operação anormal e acidentes. Numa planta de incineração os principais riscos, no âmbito da segurança ocupacional e das instalações, estão relacionados a explosões e incêndios. Caso seja necessário, devem ser previstos meios, tais como blindagens, operações telecomandas e ventilação adequada, para manter as doses incorridas pelos operadores dentro dos limites estabelecidos por norma. A operação da planta deve ser uniforme e estável, devendo as flutuações de processo, principalmente a ciclagem de temperatura, estar dentro de faixas aceitáveis para que não ocorram danos aos equipamentos.

**Proteção Ambiental.** Nas plantas de incineração, todas as liberações de poluentes radioativos e convencionais para o meio ambiente, devem estar dentro dos padrões estabelecidos por norma. A planta deve conter um sistema de tratamento de gases de processo e um sistema de tratamento do ar de ventilação, que devem operar em depressão. No sistema de tratamento de gases devem ser utilizados elementos de segurança passiva para a retenção de aerossóis, como filtros HEPA, e para a retenção de voláteis, como filtros adsorvedores sólidos. No sistema de ventilação, caso seja necessário, deve-se utilizar segurança passiva para aerossóis. Todos os sistemas que participam do processamento devem possuir estanqueidade suficiente para que a dispersão de material radioativo para o ambiente não ocorra acima dos limites considerados aceitáveis ou fixados pela autoridade. Os índices que avaliam a eficiência dos sistemas de tratamento de gases são o fator de retenção para os poluentes convencionais e o fator de descontaminação para os poluentes radioativos.

**Requisitos Operacionais.** Estes requisitos referem-se ao uso da planta de incineração.

**Consumo de energia.** A planta de incineração deve apresentar uma máxima eficiência em termos energéticos. Devem ser evitados os desperdícios de energia através de uma adequada seleção das tecnologias de queima e de tratamento de gases e uma adequada especificação dos equipamentos na fase de projeto. Na operação da planta, as perdas de energia são evitadas através de uma adequada programação de processamento.

**Confiabilidade.** O número de falhas por unidade de tempo deve ser minimizado numa planta de incineração, pois cada falha pode constituir uma parada do processo ou mesmo uma condição insegura. Para evitar paradas indesejadas do sistema, os equipamentos vitais, tais como exaustores e bombas, devem possuir redundância. Itens do sistema de controle, essenciais à segurança da planta e dos operadores, também deve ter redundância. O sistema de instrumentação e controle deve monitorar todos os pontos principais do processo e indicar condições anormais ou inseguras de operação. As especificações de sistemas, equipamentos e insumos devem ser adequadas e sua aquisição realizada junto a fornecedores e fabricantes comprovadamente idôneos; devem, também, quando necessário, ser realizados ensaios de recepção.

**Mantenebilidade.** A manutenção de uma planta de incineração deve ser facilitada e planejada já na fase de projeto. No arranjo da instalação devem ser previstos espaços para a remoção e desmontagem de equipamentos, bem como devem ser facilitados os acessos e as desmontagens de componentes de substituição freqüente. Devem ser previstos ferramental e equipamentos de manutenção adequados. A manutenção deve ser planejada e realizada em condições seguras para o pessoal e para os equipamentos, considerando-se tantos os riscos convencionais quanto os radiológicos. Os acessos ao interior dos equipamentos devem ser previstos e facilitados sem perda de segurança.

**Durabilidade.** A vida útil de uma planta de incineração deve ser planejada na fase de projeto e deve ser tal que possibilite ou justifique a recuperação do capital investido. O desgaste dos equipamentos e componentes, excetuando-se os que são de substituição freqüente deve ser compatível com a vida útil da instalação. Para isto devem ser avaliados os principais fatores de desgaste, tais como a corrosão, e realizadas considerações adequadas no projeto ou na especificação dos equipamentos e na seleção dos materiais.

**Inspeccionabilidade.** A possibilidade de inspecionar as operações de processo e as condições apresentadas dentro dos equipamentos é extremamente importante, tanto para controle do processo como para as ações de manutenção da planta. Desta forma, devem ser previstos visores e janelas de inspeção em todos os equipamentos e em pontos chave do processo.

**Requisitos construtivos.** Estes requisitos referem-se às formas construtivas.

Os equipamentos de processo devem ser projetados de forma que as suas partes e peças apresentem dimensões, volume e peso que não dificultem, ou tornem inseguro, o seu manuseio, o seu transporte, a sua montagem e a sua desmontagem, nas operações de instalação e manutenção. O arranjo geral da planta deve prever espaços adequados para todos os equipamentos. As dimensões e a geometria das peças ou partes de equipamentos, que serão contaminados com material radioativo durante as operações da planta, devem ser analisadas em relação ao futuro descomissionamento da instalação, bem como com relação à facilidade para serem tratadas como rejeito. Devem ser utilizadas uniões que mantenham a estanqueidade do sistema conforme seja requerida. Devem ser previstos meios de realizar a segurança física das instalações. Os materiais de construção dos equipamentos e componentes devem ser selecionados de acordo com as condições de processo que estão submetidos.

## LICENCIAMENTO

Ao se planejar o licenciamento de uma planta de incineração deve-se considerar dois conceitos fundamentais:

que um incinerador para tratamento de rejeitos radioativos é uma instalação radiativa, e

que este deve ser licenciado no âmbito do controle dos poluentes radioativos e dos convencionais.

Como instalação radiativa, o licenciamento de uma planta de incineração deve ser regido pela norma CNEN-NE-6.02 - Licenciamento de Instalações Radiativas, onde o processo de licenciamento é realizado em três etapas: aprovação prévia, licença para construção e licença para operação.

A demonstração de que uma planta de incineração para tratamento de rejeitos radioativos é uma instalação radiativa baseia-se na definição de rejeito radioativo da norma CNEN-NE-6.05 - Gerência de rejeitos radioativos em instalações radiativas, definição de instalação radiativa da norma CNEN-NE-3.01 - Diretrizes básicas de radioproteção, e da definição de material nuclear e elemento nuclear da Lei Federal nº 4118/61.

No âmbito do controle de poluentes convencionais, o licenciamento deve ser realizado pelo órgãos de controle ambiental estaduais e municipais do local onde será construída a planta de incineração. Este licenciamento pode requerer a realização de estudo de impacto ambiental e a elaboração e submissão do relatório de impacto no meio ambiente. Estas exigências dependem do porte da instalação, da sua localização e da composição química do material a ser processado.

O licenciamento convencional é necessário devido às emissões de CO, NOx, SOx, metais pesados, dioxinas e furanos, e uma série de outros poluentes convencionais que ocorrem com a incineração de quaisquer materiais.

## CONCLUSÕES

A incineração é uma tecnologia que produz resultados significativos em termos de tratamento de rejeitos radioativos, devido à sua capacidade de processar grande variedade de rejeitos, ao seu elevado fator de redução de volume e à adequação do produto final para etapas posteriores da gerência de rejeitos.

Em termos de projeto e desenvolvimento é um grande desafio tecnológico, devido a sua elevada complexidade técnica decorrente das interrelações e da interdependência entre seus subsistemas e com outros sistemas da gerência de rejeitos.

Em termos de aquisição, necessita passar por um rigoroso processo de seleção para que o sistema adquirido seja o mais adequado.

Em termos econômicos, é uma tecnologia cara cujo investimento é elevado, necessitando de uma economia de escala e tempo para recuperação de capital investido.

Desta forma, a decisão de realizar um empreendimento no sentido de obter a tecnologia de incineração, deve ser preparada, com planejamento e programação adequados, de forma a minimizar o risco de perda dos recursos investidos.

## ABSTRACT

It is presented in this paper the basics of radioactive waste incineration, some requirements for the design, construction, licensing and operation of an incineration plant, and its economic viability. The aim is to set a conceptual background for the design or the evaluation of incineration projects. A systemic approach is used to analyse incineration in the context of the optimization of the radioactive waste management.