

**ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**TATIANA MACIULIS DIP**

**OTIMIZAÇÃO DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE  
PROCESSO VISANDO A MINIMIZAÇÃO DA EMISSÃO DE  
MATERIAL PARTICULADO NA INCINERAÇÃO  
INDUSTRIAL DE RESÍDUOS PERIGOSOS**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração:  
Térmica e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Josmar D. Pagliuso

**SÃO CARLOS  
2004**

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Dip, Tatiana Maciulis

D596o Otimização de condições operacionais de processo visando a  
minimização da emissão de material particulado na incineração industrial de  
resíduos perigosos / Tatiana Maciulis Dip. -- São Carlos, 2004.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos-Universidade de São Paulo, 2004.

Área : Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Josmar D. Pagliuso.

# Parte I

## **Agradecimentos**

Os meus agradecimentos ao amigo Dr. Daniel Ricardo Sindicic, que me convidou para fazer o mestrado e que tanto me apoiou neste meu início de carreira como Engenheira de Otimização de Processos na Clariant.

Agradeço ao Sr. Roberto Tinguely, por além de apoiar meus estudos de mestrado, a me incentivar a prosseguir com o Doutorado.

Ao meu orientador, Josmar D. Pagliuso, por trilhar todo o caminho desde o início até a conclusão deste trabalho.

Agradeço também ao professor e amigo Paulo Seleguim Jr. por me receber tão bem em São Carlos, desde a primeira vez que fui a esta cidade.

Agradeço ao amigo e professor João Vicente de Assunção, que foi importante para os meus estudos referentes à poluição do ar.

Agradeço ao amigo Marcos Gonzales por todas as vezes que me lembrava que devemos ter o objetivo sempre em mente.

Agradeço ao amigo Juarez Bacil Barbato, que me convenceu de uma vez por todas que a abertura da visão e a mudança de mentalidade é muitas vezes o maior e mais eficaz ensinamento.



Agradeço a todo o apoio da equipe do Incinerador da Clariant que ajudou para a realização da parte experimental deste trabalho...

...agradeço a equipe da Clariant:

Wagner Ferreira de Sousa

Francisco Claret Silva

José Carlos Petroski Arruda

Élcio Natal de Moraes

Joelito Silva de Jesus

Gilson Prado

Mitsuo Otsubo Júnior

Nairson Santos Rodrigues

Washington Martins

Almiro José Santana

Celso Francisco de Moraes

Dener Éderson Martins Araújo

Eduardo Ramos Piva

Everson Tavares de Britto

João Silva de Santana

Evandro Deolindo Contiero

Juarez Antônio Torres

Marcelo Vieira

Paulo Donizete Moraes

Reginaldo Pereira de Abreu

Adenilson Guerreiro

Alex Sando da Conceição

Aparecido Alves Viana

Jorge Wilmes da Silva

Luis Carlos Leite

Erinaldo

Sebastião Pagano

Carlos

Lúcio Rodrigues

Mexicano... ... E tantos outros colaboradores da Clariant.

## **Resumo**

Busca-se a minimização da emissão de material particulado em incinerador industrial de resíduos perigosos através do controle operacional de algumas variáveis de processo. Essas variáveis, que afetam diretamente a qualidade da queima, são: intervalo de tempo de alimentação, modo de introdução de pequena quantidade de resíduo líquido no forno rotativo e excesso de oxigênio na saída dos gases de combustão. Todos os testes têm a mesma taxa de resíduos incinerados (kg/h). Na faixa estudada, o controle operacional mostrou resultados expressivos: em todos os casos, para cada variável estudada, a emissão de material particulado na melhor condição foi aproximadamente 2,5 vezes menor o valor da emissão de material particulado, se comparado com a pior condição de operação.

## **Abstract**

The minimization of particulate matter emissions in hazardous industrial waste incinerator was sought through operational control of some specific variables of the process. These variables, which have direct interference in the combustion quality, are: mean time between semi-batch feedings, mode of feeding of small amounts of liquid waste, and oxygen excess in the off-gas. All tests have been performed with the same feeding rate (kg/h). In the range studied, operational control showed expressive results: for each variable tested, the particulate matter emission in the worst operational point was around 2,5 times that obtained within the best condition.



# Capítulo 1

## Introdução e objetivos

### 1.1. Introdução

Estamos no início do século XXI, e passamos um olhar sobre o caminhar da humanidade. Quais são as projeções de melhoria do relacionamento do homem moderno com o meio ambiente? O que há para comemorar? Segundo José Goldemberg, em reportagem de comemoração ao Dia do Meio Ambiente (2002) no jornal O Estado de São Paulo, o que ocorreu nos últimos dez anos foi uma enorme conscientização no Brasil e no mundo sobre a importância da preservação do meio ambiente, preocupação antes considerada um estorvo pelos que desejavam um desenvolvimento a qualquer custo.

Atualmente, são várias as ONG's que buscam um maior respeito ao Meio Ambiente. Na Europa, muitos consumidores querem saber apenas de produtos ecologicamente corretos. No Japão, pesquisa-se o efeito de poluentes na reprodução humana e possíveis impactos ao longo das gerações através de estudos de concentrações de poluentes tóxicos presentes no cordão umbilical de recém nascidos. Na Cidade do México, já ocorreu época em que as pessoas foram obrigadas a andar com máscaras, devido a gases tóxicos nas ruas.

Podemos verificar que estamos mais conscientes não por mero acaso. Os reflexos no planeta devido as agressões da sociedade humana moderna no meio ambiente começaram a aparecer. Caso nada fosse feito neste ritmo desenfreado, de gerar e produzir a qualquer custo, poderia conduzir ao fim da sobrevivência da espécie humana no planeta. Se voltarmos um pouco mais no tempo, e buscarmos a época da Revolução Industrial, sabemos que a base da empresa era gerar lucro. Pouco ou nada se conhecia sobre os impactos ambientais e respectivas conseqüências. Desde a época da Revolução Industrial até hoje, muitas coisas mudaram.

Nos Estados Unidos, as revistas da USEPA (Unites States Environmental Protection Agency) começaram a tratar a necessidade de controle da poluição do ar na década de 60.

O Japão tem atualmente leis rigorosas, sendo exemplo a mais rigorosa lei mundial de emissão de óxidos de nitrogênio. São altos os investimentos em pesquisa devido a desastres ambientais do passado. Muito se investe para aprender os efeitos dos hormônios poluentes ao longo das gerações humanas.

Hoje já se sabe que muitos poluentes, além de se acumularem no organismo ao longo da vida, sendo exemplo o hoje proibido DDT, também passam pela placenta e se acumulam ao longo de gerações. Porém ainda há muito a aprender sobre as reais conseqüências dos poluentes para a espécie humana e meio ambiente como um todo, quem realmente é ou não cancerígeno e para quais espécies, em quais condições. É muito provável que tenhamos vários poluentes globais que ainda não consideramos poluentes, seja por falta de conhecimento da geração destes poluentes, muitas vezes secundários, ou seja, formados por reação de outros elementos presentes na atmosfera; muitas vezes também da falta de conhecimento dos efeitos correlacionados de várias substâncias já conhecidas; seja da falta de conhecimento completo de processos industriais e não industriais. Você saberia dizer se são gerados poluentes durante a virada do Ano-Novo, devido à queima de fogos de artifício? Quais seriam? A qual taxa?

O Brasil também caminha para esta preocupação ambiental com criação e aplicação de novas leis, novos projetos de lei. Além disso, também podemos citar a fiscalização mais rigorosa por órgãos ambientais, sendo exemplo a exigência do monitoramento e controle de Dioxinas e Furanos, até então não realizado, num prazo máximo de 3 anos (a partir de 29 de outubro de 2002, CONAMA nº316) para seu cumprimento em Incineradores de Resíduos Perigosos a nível nacional; dentre várias atuações a serem citadas.

Porém ainda há muito que fazer.

Eis que a sociedade se move. Fundamental a criação e aplicação de leis ambientais cada vez mais rigorosas, que impulsionam o desenvolvimento da tecnologia de equipamentos e processos cada vez mais limpos. Fundamental a política mundial, do país, do Estado, da cidade, dos órgãos ambientais, da empresa, e dos cidadãos, para que o real seja o registrado e divulgado, para que seja abolido o pensamento de meias medidas, as políticas “para inglês ver”; para que toda a sociedade seja beneficiada.

Os colaboradores e a política das indústrias também se mostram cada vez mais conscientes, e são destinados valores cada vez mais altos de verbas e recursos destinados aos aspectos ambientais.

Dentre os vários problemas ambientais, existe o problema do resíduo. O resíduo domiciliar é um tipo de resíduo que deve ser tratado adequadamente. Hoje, na cidade de São Paulo, a prefeitura aplicou lei que cobra a taxa do lixo, visando criar verba própria para destinação do lixo domiciliar. Existe também o lixo hospitalar, infectado, que merece tratamento especial, dentre deles, a incineração em processos específicos para este fim. Da mesma forma, o resíduo industrial perigoso existe e precisa ser disposto de alguma maneira. Dentre as tecnologias existentes, podemos citar principalmente o reuso, a reciclagem, o uso de aterros, o co-processamento e a incineração.

Atualmente, se busca primeiramente evitar a geração do resíduo. Em seguida, se possível, reutilizá-lo. Caso não seja possível, a reciclagem é o caminho a ser seguido. Quando nenhuma destas alternativas é possível, busca-se a incineração ou co-processamento. Ambas as tecnologias podem ser utilizadas, sendo que cada uma tem suas vantagens e desvantagens, além de poderem ser aplicadas ou não de acordo com o tipo de resíduo. Também podem ser utilizados aterros.

A incineração possui as vantagens de minimizar o volume do resíduo, gerar cinzas inertes, produzir material biologicamente inativo. Por outro lado, gera cinzas, efluentes gasosos e em alguns casos também gera efluentes líquidos.

Os efluentes gasosos são críticos, pois uma vez mandados para a atmosfera, não podem ser facilmente capturados. Além disso, quando são poluentes globais, podem percorrer todo o planeta devido principalmente às correntes de ar. São diluídos na atmosfera, minimizando seus efeitos tóxicos. Porém dificilmente são removidos da atmosfera. Estão se acumulando ao longo do tempo e necessitam de baixas concentrações para terem impacto ambiental significativo enquanto presentes na própria atmosfera. Quando removidos pela chuva, podem causar efeitos muito prejudiciais, sendo exemplo a chuva ácida, devido aos poluentes atmosféricos, principalmente óxidos de enxofre e de nitrogênio. Exemplos reais de episódios agudos de poluição do ar podem ser citados em várias partes do mundo: Vale do Meuse – Bélgica, Donora – Pensilvânia (USA), Los Angeles (USA), Poza Rica – México, Londres - Inglaterra, New York – USA, Tóquio – Japão, Bhopal – Índia, Lago Nyos – Camarões - África, Cidade do México - México. No Brasil, ocorreram episódios no estado de São Paulo – São Paulo, Santo André, Cubatão e Bauru.

A contaminação dos poluentes atmosféricos também acabam a vir contaminar o solo. Para efeito de ilustração, podemos citar que hoje são encontradas dioxinas e furanos em casca de ovos de galinha.

## **1.2. Objetivos**

São diversas as variáveis em um processo de incineração de resíduos perigosos. Neste trabalho, estuda-se de maneira sistemática os ganhos ambientais e o aumento da viabilidade econômica que podem ser obtidos atuando-se sobre algumas dessas variáveis do processo de incineração, durante a etapa de minimização de geração de poluentes, tendo como foco principal a emissão de material particulado.

As variáveis estudadas neste trabalho são:

- Intervalo de tempo entre a alimentação das cargas de resíduos no incinerador, mantendo constante a capacidade mássica de alimentação horária e a identidade do resíduo incinerado.
- Forma de introdução de alimentação de pequena porcentagem mássica de resíduo líquido em misturas de resíduos líquido e sólido, podendo ambos estar misturados na mesma barrica, ou o líquido sendo introduzido por lança apropriada.
- Excesso de ar na combustão, através da medição de porcentagem de oxigênio em base seca nos gases de saída, ao final da queima.

Todos os testes são feitos em escala industrial.

Caso as variáveis estudadas sejam significativas no processo, este trabalho de tendência também indica a melhor região de operação para cada uma delas, de acordo com a respectiva faixa pesquisada e da melhor faixa da variável de saída desejada, no caso a mínima emissão de material particulado. Uma boa analogia é o estudo econômico do ponto de máximo lucro de uma empresa: aqui buscamos o ponto ótimo do processo, de acordo com o mínimo impacto ambiental.