



OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE PLASMA TÉRMICO PARA DESTRUIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS TÓXICOS

João Lauro Dorneles Facó
Instituto de Matemática
Departamento de Computação
Universidade Federal do Rio de Janeiro
jldfacó@acd.ufrj.br

Resumo:

O uso da tecnologia de reatores a plasma térmico para destruição de resíduos industriais perigosos classe I ainda é de pouca utilização no Brasil, apesar de ser a melhor solução sob o aspecto ambiental pelos motivos seguintes: (1) não há combustão, portanto não há emissão de gases poluentes para a atmosfera, (2) as altas temperaturas, de até 15.000 °C, obtidas pela tecnologia a arco de plasma, permitem que o processo de pirólise ocorra sem combustão, levando à completa destruição das substâncias tóxicas pelo rompimento de suas ligações químicas, convertendo-os em substâncias inertes e, em muitos casos, úteis (reciclagem). Para atingir um custo operacional competitivo com as tecnologias concorrentes como incineração, fornos de cimento e mesmo aterros sanitários classe I, é preciso desenvolver modelos de sistemas com alta complexidade. O uso intensivo de energia elétrica e as diversas características operacionais de fornos de reatores a arco de plasma implicam na necessidade de um funcionamento praticamente non-stop. Eficientes políticas de estocagem de resíduos, aliadas a logísticas de transporte e uma bem planejada operação do sistema de plasma térmico podem levar à sinergia necessária a um ganho de escala, permitindo uma redução nos custos operacionais. Apresentamos modelos interligados das três fases destacadas utilizando técnicas de Controle Ótimo de sistemas dinâmicos complexos, de Programação Não Linear e de Pesquisa Operacional.

Palavras-chave: plasma térmico, resíduos classe I, otimização de sistemas dinâmicos.

Abstract:

The use of thermal plasma reactors for the destruction of industrial class I hazardous wastes is seldom used in Brazil, even though it has been considered the best solution from the environmental point of view, by the following reasons: (1) there is no combustion, so there is no air pollution by gas emissions, (2) high temperatures, up to 15,000°C, attained by plasma arc technology, allows a pyrolysis process without combustion, implying a complete destruction of the toxic substances by breaking their chemical bonds, converting them into inert substances, and, in many cases, useful (recycling). In order to achieve a competitive operational cost with the concurrent technologies as incineration, cement kilns, and even class I landfills, the development of high complexity models is needed. The intensive use of electrical energy and the plasma arc systems different operational characteristics imply the necessity of non-stop use. Efficient waste inventory policies related to transportation logistics, and a well planned thermal plasma system operation may conduct to the necessary synergy for a scale gain, enabling a reduction in the operational costs. We present linked models for the three phases using Operations Research, Nonlinear Programming and Optimal Control techniques for complex dynamic systems.

Keywords: thermal plasma, class I waste, dynamic systems optimization.

1. Introdução

A tecnologia a arco de plasma não incinera os resíduos, mas destrói os materiais residuais orgânicos dissociando suas ligações químicas ao submeter os resíduos a um campo de plasma de alta energia. O campo de plasma rompe as complexas ligações químicas, permitindo que os íons resultantes se combinem em subprodutos elementares inofensivos, principalmente sais e um gás com baixo BTU (no caso dos PCBs-policlorinated bifenil-, ascarel). Em geral, o sistema do processo de destruição de resíduos converte subprodutos residuais orgânicos perigosos em substâncias benignas e, de preferência, úteis, usando a densidade energética muito alta do plasma de arco elétrico para romper as moléculas tóxicas e perigosas. Como o processo de pirólise depende de alta temperatura sem combustão, praticamente não existem resíduos ou emissões poluentes (FIGURA 1).

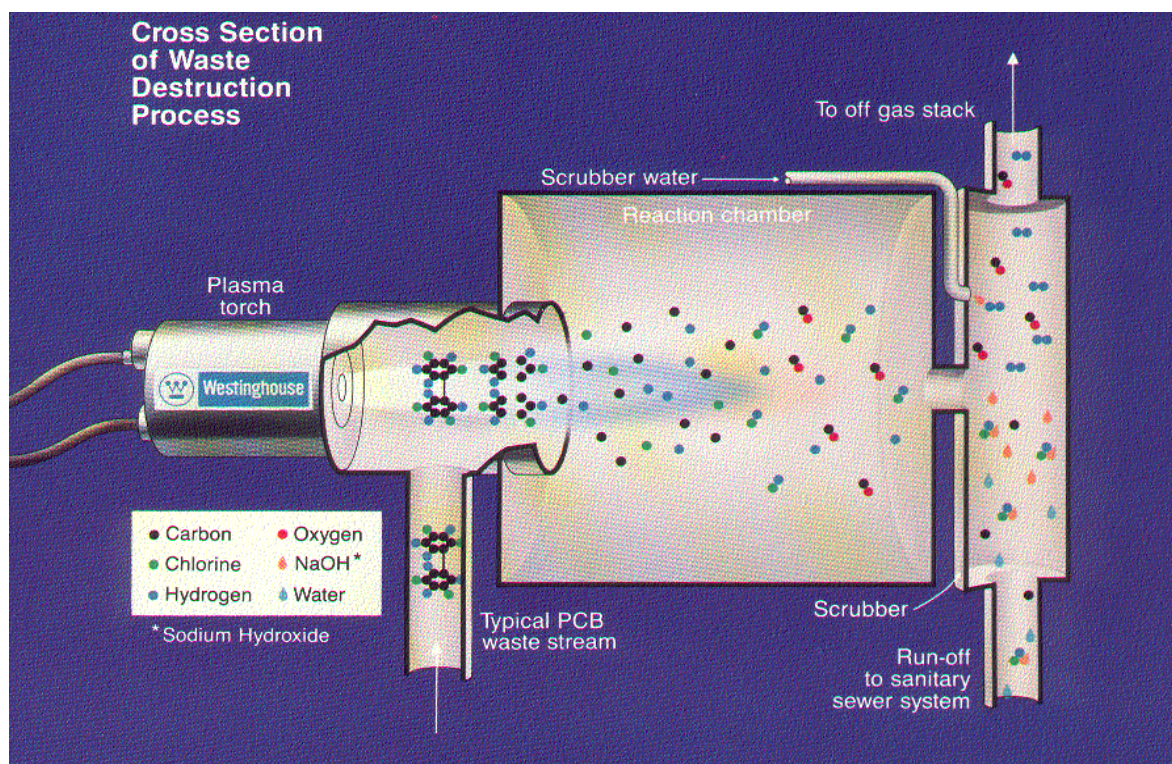


FIGURA 1 - Reações químicas

As pesquisas da tecnologia de plasma começaram na década de 1920, mas seu desenvolvimento ocorreu sobretudo nos anos 60. Desde então, desenvolveram-se muitas aplicações industriais, que incluem soldagem, corte, revestimento de superfícies com plasma transferido a arco, pré-aquecimento do ar para alto-fornos, purificação de metais como titânio e ligas para temperaturas hiper elevadas, metalurgia extrativa e recuperação de pó de aço, produção de fibras ópticas e processos de tratamento de resíduos perigosos.

Resíduos classe I - substâncias perigosas e prejudiciais ao meio ambiente, como PCBs (ascarel, etc.), pesticidas residuais, subprodutos da indústria química, agentes químicos, CFCs, resíduos químicos e petroquímicos, e resíduos metálicos - são uma séria preocupação da comunidade mundial.

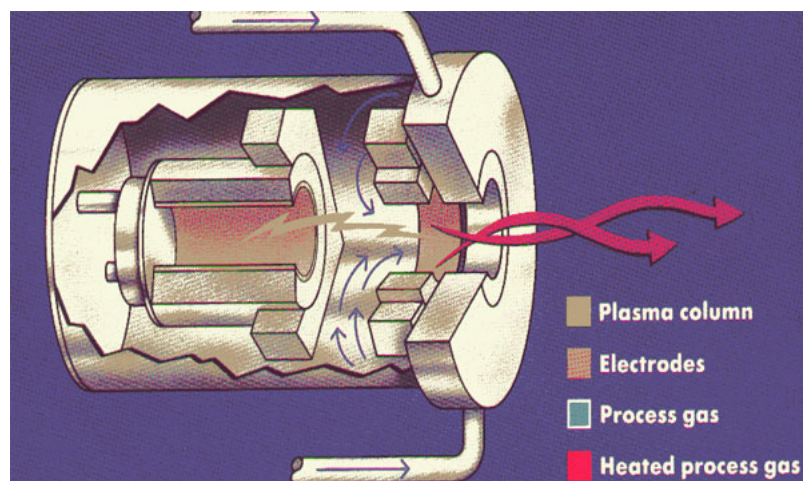


FIGURA 2 - Arco de plasma

A tecnologia de destruição a arco de plasma emprega temperaturas extremamente elevadas (até 15.000°C) resultantes da descarga de uma forte corrente elétrica num gás inerte (FIGURA 2). A nuvem de gás superaquecido - tocha de plasma - converte instantaneamente a substância tóxica numa forma atômica ou iônica. Este sistema também converte os íons descarregados subsequentes num processo de tratamento a jusante onde esses átomos são finalmente transformados em moléculas simples e inócuas para o meio ambiente.

As vantagens mais importantes do sistema de plasma térmico são as emissões muito baixas resultantes da alta eficiência em destruição e eliminação, combinadas com baixas formações de PCI (Produtos de Combustão Incompleta) e com a capacidade de recuperar produtos químicos úteis dos fluxos de resíduos. A tecnologia em si é de natureza pirolítica e não exige grandes volumes de ar como acontece com a combustão. Os volumes mais baixos de gás e, portanto, os volumes menores de água para esfriamento e depuração, prestam-se a um processador pequeno, compacto e de fácil mobilidade. Dado o volume muito baixo de material para processamento na câmara de reação, a qualquer momento, o risco associado à liberação de resíduos tratados parcialmente é insignificante. O processo é controlado por bloqueios que evitam a liberação de resíduos incompletamente tratados no caso de falta de energia ou de outras perturbações do sistema. O nível intrínseco de segurança associado a este sistema permite que a tecnologia de plasma a arco seja introduzida com menos dificuldades ambientais. O sistema de plasma tem a capacidade de ir das condições de desligado e frio, até às condições operacionais na temperatura máxima, num período de tempo muito mais curto do que as outras instalações convencionais de destruição de resíduos, permitindo operações mais flexíveis do sistema.

Lista resumida de vantagens do sistema de plasma térmico:

- Alta taxa de destruição (>99,9999%), independente da carga de gás. O material tratado cumpre e supera as normas ambientais para componentes orgânicos e inorgânicos;
- A tecnologia do plasma foi aprovada pela Environment Protection Agency (EPA) dos Estados Unidos para operações de destruição de resíduos como uma tecnologia de não-incineração. A tecnologia do plasma foi aprovada em sistemas operados com êxito em países como Canadá, Japão, Austrália e Alemanha;
- As emissões atmosféricas superaram a melhor prática mundial. Os particulados no sistema de tratamento de gás de descarga medem 1/200 do limite regulamentado nos Estados Unidos;
- Sistema de controle de segurança contra falhas extremamente rápido;
- Acionamento e desligamento em questão de minutos;
- Processo sem vazamentos no caso eventual de desligamento de emergência;
- O sistema é adequado para fluxos de resíduos gasosos, líquidos, mistos e sólidos.

2. Sistemas e métodos

No Brasil o primeiro sistema de plasma térmico de capacidade industrial foi desenvolvido a partir de um projeto do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) em parceria com a Central Super e empresários chineses (FURTADO, 2000, p.16). A empresa Ecochamas estabelecida inicialmente na cidade de São Paulo-SP para remediação de lodos galvânicos, acabou se instalando na cidade de Resende-RJ, e estava prevista para entrar em operação em 2003 (QUÍMICA E DERIVADOS, 2003, p.20). Outras iniciativas estão sendo realizadas pela empresa TSL Engenharia Ambiental em Macaé-RJ para tratamento de solos contaminados por óleos e recuperação de hidrocarbonetos, e pela empresa Grande Morávia Industrial para inertização de resíduos hospitalares e industriais em São Paulo-SP (GMI, 2004).

Técnicas modernas de Pesquisa Operacional como gerenciamento de cadeias de suprimentos (SHAPIRO, 2001) permitem a gestão integrada de todas as fases de um processo produtivo. No caso específico da gestão de resíduos visando tornar comercialmente competitiva a remediação ambiental por sistemas de plasma térmico, vamos considerar as três fases principais deste processo, o que inclui a estocagem de resíduos pelos diferentes geradores, o transporte até a unidade de remediação e a operação dos sistemas de plasma. Dependendo das características de cada gerador de resíduos a fase de armazenamento local poderá ser simplificada, mas de todo modo será necessário definir a logística de transporte. A armazenagem próxima do sistema de plasma será planejada de forma integrada com a operação do sistema.

Neste trabalho vamos tratar principalmente de modelos de gestão de sistemas de plasma em uma instalação fixa e independente da localização dos geradores de resíduos. Não vamos considerar as possibilidades de utilização de unidades móveis de sistemas de plasma instaladas em barcas, vagões de trem, caminhões, ou mesmo, em containers móveis, pelas enormes dificuldades na obtenção de licenciamentos pelas agências de controle da legislação ambiental em muitos estados brasileiros. A possibilidade de operar próximo (ou mesmo intra-muros) facilitaria muito a elaboração dos modelos de gestão.

2.1. Sistemas de plasma térmico

Embora seja possível utilizar um mesmo sistema para todos os fins, a flexibilidade de sistemas de plasma e a busca de eficiência econômica demonstrou que dois projetos de configuração, um para líquidos/lodos e outro para sólidos, proporcionam um melhor desempenho. Os metais voláteis, como mercúrio ou zinco, podem ser recuperados pelo sistema de tratamento de gás de descarga. Normalmente, os resíduos sólidos introduzidos no sistema não precisam ser previamente acondicionados ou desmanchados. Os resíduos são introduzidos no sistema a granel num silo. Um sistema de acionamento tipo trado (helicoidal), alimentado pelo silo pela ação da gravidade, despeja continuamente o resíduo para dentro da câmara de reação como se pode ver na FIGURA 3.

O material residual é despejado na câmara de reação, onde o sistema de plasma aquece os resíduos a altas temperaturas. O material orgânico é evaporado e destruído. Os gases de descarga passam da câmara de reação para a tubulação de descarga. Os gases de descarga fluem pela tubulação até um sistema de tratamento de gás de descarga (depurador). O sistema de tratamento de gás de descarga remove partículas, gases ácidos e metais volatilizados. O projeto do sistema de tratamento de gás de descarga é capaz de processar vários fluxos de resíduos.

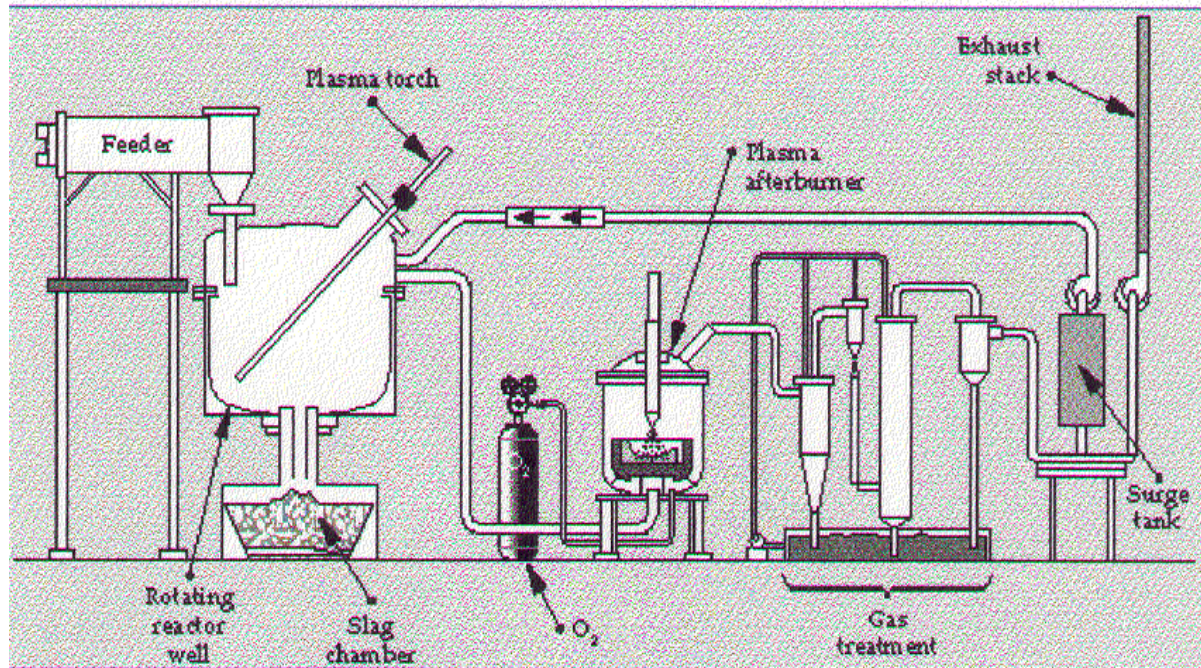


FIGURA 3 - diagrama simplificado do sistema de plasma

O material inorgânico é reduzido a uma fase fundida que é aquecida uniformemente na câmara de reação pela tocha de plasma. Quando o sistema atinge condições e temperaturas operacionais seguras, o material fundido é descarregado na forma de escória vítrea, homogênea e não-drenável, pelo fundo da câmara de reação para dentro de um molde ou tambor na câmara de coleta de escória. Depois de esfriar, o produto resultante é um resíduo vítreo e não-drenável. Os estoques de resíduos com teor relativamente alto de metais produzirão fases de metal líquido separadas que podem permitir a recuperação dos metais diretamente do sistema, para revenda ou reutilização. A experiência tem comprovado a significativa redução em volume desses resíduos sólidos quando processados num sistema de plasma. As demonstrações também têm comprovado que esses fluxos de resíduos compostos basicamente de produtos farmacêuticos, lixo hospitalar, explosivos, tintas, solventes, PCBs, etc., resultarão na produção de poucos sólidos com grande redução em volume.

Em comparação com outros métodos de tratamento, o sistema de remediação de resíduos através de plasma minimiza (ou elimina) a geração de restos residuais, reduzindo, desse modo, os custos e os riscos associados à sua destruição. O tratamento a arco de plasma envolve uma quantidade muito menor de gases de combustão do que a incineração, reduzindo, desta forma, o risco associado à descarga de emissões para a atmosfera e o custo do controle da poluição do ar. Sistemas de plasma térmico apresentam padrões de desempenho ambientais que permitirão a promulgação de normas ambientais mais rigorosas, porém economicamente viáveis.

Um sistema de plasma para tratamento de resíduos requer a operação controlada dos seguintes componentes:

- sistema de alimentação
- reator
- tochas de plasma
- sistema de remoção de subprodutos
- sistema de limpeza de gases
- sistema de purificação de água
- sistema de controle

2.2. Logística de transporte

O transporte de resíduos classe I deve obedecer a uma legislação restritiva implicando em rigorosas exigências de pessoal, veículos e empresas capacitados a exercer esta atividade. Assim o planejamento do transporte dos diversos locais geradores até a planta do sistema de remediação terá de contar com a participação de terceiros. Apesar da logística de transporte ser feita de modo interligado com as outras duas fases e de poder ser estabelecida utilizando técnicas eficientes de roteamento de veículos empregando metaheurísticas como GRASP (FEO e RESENDE, 1989, FEO, RESENDE e SMITH, 1994, PARDALOS, CHAOVALITWONGSE e KIM, 2002, RESENDE e DE SOUSA, 2004)), as limitações citadas acima podem comprometer muitos ganhos comparativos na utilização dos modelos interligados. Assim neste trabalho vamos nos concentrar nas fases de armazenagem e operação.

2.3. Modelos integrados de armazenagem e operação do sistema

A complexidade do planejamento conjunto das políticas de armazenagem dos diferentes resíduos em qualidade e estado (líquidos, lodos, sólidos, etc.) e do controle da operação dos reatores de plasma térmico exige a consideração de modelos de Controle Ótimo de sistemas dinâmicos não lineares, onde conjuntos interligados de equações de diferenças finitas descrevem as diversas fases operacionais do sistema variando no tempo. A necessidade em se considerar relações não lineares, atrasos no tempo e restrições suplementares nas variáveis de estado e de controle conduzem a dificuldades computacionais. A flexibilidade na formulação de modelos matemáticos e a eficiência computacional dos métodos de Programação Não Linear permitem que essas dificuldades sejam incorporadas à modelagem (NOCEDAL e WRIGHT, 1999, e FACÓ, 1995).

Assim consideramos um modelo geral para problemas de controle ótimo de sistemas dinâmicos não lineares com atraso no tempo e limites nas variáveis de estado e de controle, onde queremos maximizar um critério de performance, segundo Facó (2000):

$$\text{Max } J = L(x_0, x_1, \dots, x_T; u_0, u_1, \dots, u_{T-1}), \text{ tal que} \quad (1)$$

$$x_{t+1} = f_t(x_t, x_{t-k_1}, x_{t-k_2}, \dots, x_{t-k_s}; u_t, u_{t-l_1}, u_{t-l_2}, \dots, u_{t-l_r}), \quad (2)$$

$$a_t \leq x_t \leq b_t, \quad t=0,1,\dots,T, \quad (3)$$

$$\alpha_t \leq u_t \leq \beta_t, \quad t=0,1,\dots,T-1, \quad (4)$$

onde $\forall t$,

$x_t \in \mathbf{R}^m$ = vetor de variáveis de estado ,

$u_t \in \mathbf{R}^n$ = vetor de variáveis de controle,

$a_t, b_t \in \mathbf{R}^m$, e $\alpha_t, \beta_t \in \mathbf{R}^n$ são os vetores

formados pelos limites nas variáveis,

L e f_t são funções não lineares diferenciáveis ,

T = número total de períodos, os atrasos no tempo são k_i ($i=1,\dots,s$), l_j ($j=1,\dots,r$).

Este modelo é um problema de Programação Não Linear com restrições, com $(m+n)T+m$ variáveis, mT restrições de igualdade e $(m+n)T$ desigualdades, geralmente de grande porte, a menos que m, n e T sejam muito pequenos.

Um algoritmo do tipo gradiente reduzido generalizado (GRG) que explora a estrutura escalonada da matriz jacobiana das equações (2), bem como os componentes relativos aos atrasos no tempo, poderá ser utilizado, segundo Abadie (1970) e Facó (1977, 2001). O método GRECO (Gradiente Reduzido para o Controle Ótimo) também emprega técnicas de programação não linear de grande porte, como métodos de gradientes conjugados ou quase-Newton a memória limitada, adaptados para incorporar as desigualdades (3) e (4), (NOCEDAL e WRIGHT, 1999, p.224-233).

3. Discussão

As preocupações da sociedade com a poluição decorrente do desenvolvimento industrial motivaram estudos do Banco Mundial, gerando o sistema IPPS (HETTIGE et al., 1994) capaz de identificar os níveis de poluição de um país pelas suas estatísticas de produção econômica. Modelos complexos de tecnologias de gestão de remediação de resíduos foram desenvolvidos por Vaillancourt e Waub (2000), no Canadá.

A tendência moderna das principais empresas de gerenciamento de resíduos é a oferta de serviços de gestão global de resíduos (TWM - total waste management), segundo Furtado (2003). A terceirização completa de serviços de manuseio, acondicionamento, armazenagem, reciclagem e destinação de resíduos, incluindo os perigosos, pode implicar em contratos que pretendem garantir aos geradores de resíduos a responsabilidade do gerenciador por multas e seguro para eventuais acidentes nas suas operações. No Brasil os principais grupos de gerenciamento global se limitam às tecnologias convencionais de tratamento de resíduos como incineração, co-processamento em fornos de cimento e aterros especiais, não oferecendo atualmente serviços de remediação a plasma térmico.

A incineração tem níveis de emissão significativamente mais altos do que os sistemas a plasma. Além disso, o alto volume de gases de combustão necessários para incineração exige unidades de incineração estacionárias em escala cada vez maior. A opinião pública favorável aos incineradores vem declinando. A cinza tóxica gerada pelo processo de incineração ainda precisa ser eliminada. Portanto a incineração não elimina totalmente o resíduo tóxico, sendo necessária a deposição de cinzas tóxicas em aterros.

Os fornos para fabricação de cimento são outra tecnologia existente usada para a destruição de resíduos perigosos classe I. Entretanto, existe a possibilidade de contaminação do cimento com resíduos perigosos.

A armazenagem de resíduos perigosos classe I é uma solução de curto prazo que apenas adia a solução final. O proprietário do resíduo continua sendo responsável pela possibilidade de vazamentos, bem como pelo cumprimento de futuras exigências quanto a prováveis mudanças nas normas ambientais vigentes.

Na verdade, o despejo em aterros aumenta as responsabilidades potenciais do gerador original de resíduos perigosos classe I. O despejo em aterros é susceptível a vazamentos e derramamentos devido a desastres naturais, bem como às técnicas de eliminação inadequadas aplicadas pelo operador do aterro. Em essência, o aterro é uma solução provisória até que se aplique uma solução permanente para o resíduo. Na melhor das hipóteses, a responsabilidade do gerador por futuros derramamentos ou vazamentos no local do aterro é limitada ou compartilhada com o atual operador do aterro.

Neste trabalho introduzimos uma metodologia que permite a construção de modelos matemáticos e computacionais capazes de incorporar as principais fases de tratamento de resíduos tóxicos classe I. Modelos de gestão interligando as três principais fases de tratamento de resíduos - a captação, o

transporte e a armazenagem/operação de sistemas a plasma - poderão, pela economia de escala atingida, viabilizar técnicas mais recomendadas para a preservação do meio ambiente.

4. Conclusão

A complexidade de muitos problemas de decisão pode exigir a formulação de modelos não lineares capazes de considerar de modo mais realista suas propriedades físicas, químicas, biológicas e econômicas. Com a sofisticação moderna das medidas e estruturas de dados, os modelos podem representar os problemas com menor nível de agregação, aumentando suas dimensões por um grande número de variáveis e parâmetros submetidos a muitas restrições, de modo a exibir soluções viáveis para problemas práticos.

Técnicas modernas de gestão e de Pesquisa Operacional, como gerenciamento de cadeias de suprimentos (SHAPIRO, 2001), permitem a utilização de modelos interligados, permitindo a consideração integrada dos vários aspectos de um processo produtivo complexo. O emprego de modelos não lineares e o crescimento da escala dos sistemas de suporte à decisão podem permitir que técnicas mais evoluídas em termos ambientais, como remediação de resíduos industriais perigosos a plasma térmico, atinjam custos competitivos com as tecnologias tradicionais de tratamento, aliados à sua superior capacidade de completa destruição das substâncias tóxicas.

5. Referências

ABADIE, J. "Application of the GRG method to optimal control problems". In: Abadie (ed), Integer and Nonlinear Programming. Amsterdã: North-Holland, 1970.

FACÓ, J.L.D. "Commande optimale des systèmes dynamiques non linéaires à retards avec contraintes d'inégalité sur l'état et la commande: une spécialisation de la méthode GRG". Tese de Dr-Ing, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), jun.1977.

FACÓ, J.L.D. "Nonlinear models for decision support". In: THE THIRD INTERNATIONAL CONGRESS ON INDUSTRIAL AND APPLIED MATHEMATICS - ICIAM 95, Hamburgo, Alemanha, jul.1995, p.277.

FACÓ, J.L.D. "Optimization of nonlinear dynamic systems by large-scale nonlinear programming". In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH PERFORMANCE COMPUTING, Hanoi, Vietnã, mar.2000, p.41.

FACÓ, J.L.D. "Nonlinear programming models for hazardous waste remediation by plasma arc systems". In: INSTITUTE FOR OPERATIONS RESEARCH AND THE MANAGEMENT SCIENCES (INFORMS) INTERNATIONAL MEETING, Maui, USA, jun.2001, p.10.

FEO, T.A.; RESENDE, M.G.C. "A probabilistic heuristics for a computationally difficult set covering problem". Operations Research Letters, v.8, p.67-71, 1989.

FEO, T.A.; RESENDE, M.G.C.; SMITH, S.H. "A greedy randomized adaptative search procedure for maximum independent set". Operations Research, v.42, p.860-878, 1994.

FURTADO, M. "Destino limpo para o lixo industrial". Química e Derivados, n. 387, p.16, out.2000.

FURTADO, M. "Terceirização de serviços e tecnologia melhoram perspectivas do mercado". Química e Derivados, n. 415, mai.2003.

GMI (Grande Morávia Ind.). "Instalação de destruição (inertização) dos resíduos hospitalares e industriais". Disponível em: <<http://www.gmoravia.com.br/downloads.htm>>, 2004.

HETTIGE, H.; MARTIN; P., SINGH, M.; WHEELER, D. "The industrial pollution projection system (IPPS)". Policy Research Working Paper #1431 (part 1 & 2), World Bank, dez. 1994.

NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. "Numerical Optimization". Springer, 1999.

PARDALOS, P.; CHAOVALITWONGSE, W.; KIM, D. "GRASP with a new local search scheme for vehicle routing problems with time windows". J of Combinatorial Optimization, 2002.

RESENDE, M.G.C.; DE SOUSA, J.P. (eds.) "Metaheuristics: Computer Decision-Making", Kluwer, 2004.

SHAPIRO, J.F. "Modeling the Supply Chain". Duxbury, Thomson Learning, 2001. caps.7-8, p.279-390.

VAILLANCOURT, K.; WAAUB, J.P. "Évaluation spatiale et environnementale de technologies de gestion des déchets et construction d'indicateurs globaux d'impacts à intégrer dans le modèle Eugène: Une approche multicritère". Les Cahiers du GERAD. Montréal, Canada, p.1-25, mar.2000.