

O Uso da Modelagem para Predizer a Dispersão de Nuvens Poluentes na Atmosfera

A. P. RAMOS¹, D. C. FREIRE¹, S. B. B. L. VILLAR¹, C. V. L. CHAVES¹, J. J. N. ALVES¹ e J. I. H. TAVATES Neto²

¹ Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química
² Braskem S/A

RESUMO – O vazamento de gases tóxicos pode oferecer risco a saúde ou a vida das pessoas e esse risco está associado à forma como as pessoas podem ser expostas aos poluentes. A concentração e o tempo de exposição aos agentes são fundamentais na determinação dos poluentes sobre a saúde ou a vida das pessoas. O domínio do comportamento das nuvens poluentes tem relevância significativa na gestão da operação das indústrias químicas e petroquímicas. A utilização de modelos matemáticos é um instrumento técnico indispensável para a gestão ambiental e segurança das pessoas. Os modelos matemáticos são capazes de: Descrever e interpretar os dados experimentais; Controlar em tempo real e/ou analisar a qualidade do ar; Administrar as liberações acidentais e avaliar as áreas de risco; Identificar as fontes poluidoras; Avaliar a contribuição de uma única fonte à carga poluidora; Administrar e planejar o território.

1. INTRODUÇÃO

Define-se poluente atmosférico qualquer substância presente no ar que pela sua concentração possa torná-lo impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança. Distingue-se de outros tipos de poluição porque uma vez emitido para atmosfera ocorre um processo irreversível deste poluente. O vazamento de gases tóxicos pode oferecer risco a saúde ou a vida das pessoas e esse risco está associado a forma como as pessoas podem ser expostas aos poluentes. A concentração e o tempo de exposição aos agentes são fundamentais na determinação dos poluentes sobre a saúde ou a vida das pessoas. O domínio do comportamento das nuvens poluentes tem relevância significativa na gestão da operação das indústrias químicas e petroquímicas.

Os processos que governam o transporte e a difusão de poluentes são numerosos e de uma complexidade tal que não é possível descrevê-los sem a utilização de modelos matemáticos, que resultam, então, um instrumento técnico indispensável para a gestão ambiental e segurança das pessoas. Os modelos matemáticos são capazes de:

- ✓ Descrever e interpretar os dados experimentais;
- ✓ Controlar em tempo real e/ou analisar a qualidade do ar;

- ✓ Administrar as liberações acidentais e avaliar as áreas de risco;
- ✓ Identificar as fontes poluidoras;
- ✓ Avaliar a contribuição de uma única fonte à carga poluidora;
- ✓ Administrar e planejar o território.

Existem numerosos modelos matemáticos de difusão de poluentes na atmosfera, também notavelmente diferentes uns dos outros, que podem ser utilizados para descrever os propósitos descritos acima. Atualmente, o fenômeno da difusão turbulenta na atmosfera não é formulado unicamente, no sentido de que não existe ainda um modelo único que explique todos os fenômenos observados.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o uso da modelagem matemática para predição do comportamento da dispersão de nuvens poluentes na atmosfera e prever o comportamento de plumas ou nuvens tóxicas na atmosfera.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A operação de boa parte das indústrias oferece risco de emissão de gases tóxicos

As indústrias estão próximas das comunidades e são operadas por pessoas. A possibilidade de vazamento de produto é uma realidade e em caso de ocorrência pode provocar acidentes graves oferecendo riscos à vida das pessoas.

A previsão dos níveis de concentração de poluentes é um requisito indispensável para determinar possíveis danos a serem provocados por novas fontes ou mesmo por fontes existentes a serem modificadas. Neste âmbito, a modelagem matemática é uma ferramenta importante para a obtenção (cálculo) dessas previsões.

O conhecimento da propagação das plumas tem utilidade no estabelecimento das medidas preventivas e corretivas visando minimizar os efeitos de um eventual acidente (vazamento).

3. CARACTERÍSTICAS TEÓRICAS DOS MODELOS MATEMÁTICOS

A aproximação teórica ao problema é essencialmente subdividida em quatro formulações fundamentais. A aproximação K, onde a difusão é considerada em um ponto fixo no espaço, é proporcional ao gradiente local da concentração do material difundido. Consequentemente, tal aproximação é fundamentalmente Euleriana, considerando-se o movimento do fluido relacionado a um sistema de referência fixo no espaço. Tais modelos são os mais adaptados a enfrentar os problemas complexos, como por exemplo, a dispersão de poluentes sobre topografia complexa ou a difusão de poluentes reativos. Eles se baseiam na resolução numérica sobre uma grade espaço temporal fixa da equação da conservação de massa de uma espécie química poluente.

Entre os modelos Eulerianos, o modelo a box constitui a aproximação matemática mais simples porque ignora a estrutura espacial do fenômeno. Ele assume que os poluentes são distribuídos uniformemente no interior de um paralelepípedo (um box). Do ponto de vista teórico, isto equivale a assumir coeficientes de difusão infinitos que provocam uma propagação instantânea do poluente imerso no box considerado. O poluente presente no box provém da fonte interna, da contribuição externa transportada pelo vento ou flui através do topo em consequência da variação de altura do box, que geralmente coincide com a altura da camada limite.

Os modelos Lagrangeanos se diferenciam dos Eulerianos porque utilizam um sistema de referência que segue o movimento da atmosfera. Inicialmente, com o termo Lagrangeano indicava-se somente o modelo a box com box "móvel", que segue a trajetória do vento médio. Atualmente, são imersos nesta classe todos os modelos que acompanham a nuvem de poluentes em "elementos" discretos, como segmento "puff" ou partículas fictícias. Nos modelos de partículas, a dispersão de um poluente é simulada através do movimento de partículas fictícias (partículas de computador) cujas trajetórias permitem calcular o campo de concentração da substância imersa, a partir da hipótese básica de que a trajetória destas partículas simula o percurso das partículas do ar situado na mesma posição no instante inicial. Os movimentos destas partículas podem ser reproduzidos de modo determinístico e em modo estocástico. O modelo Gaussiano fundamenta o pressuposto teórico na solução exata, mas não real, da equação de transporte e difusão na atmosfera, no caso em que o vento e o coeficiente de difusão turbulenta são constantes com a altura. A solução é forçada a representar situações reais através de parâmetros empíricos, os chamados "sigmas". Podem ser estacionários (independentes do tempo, e considerados "modelos pluma") e os que dependem do tempo (os modelos "puff"). O nome de tais modelos deriva do fato de que a distribuição dos poluentes, ambos vertical e transversalmente à direção do vento, é descrita da famosa curva descoberta pelo físico-matemático Gauss. As várias versões dos modelos Gaussianos se diferenciam essencialmente pela técnica utilizada para calcular o sigma em função da estabilidade atmosférica e da distância da fonte emissora. Podem ser distinguidas duas técnicas fundamentais neste sentido: a primeira faz uso de funções adimensionais construídas com a idéia de medidas disponíveis da intensidade da turbulência; a segunda utiliza funções semi-empíricas para o sigma construído para a classe de estabilidade com que são esquematizados de acordo com o estado da atmosfera.

Os modelos analíticos podem ser considerados intermediários entre o modelo K e o Gaussiano. Do segundo conservam a simplicidade, pois o campo de concentração é descrito através de uma fórmula simples, mas, ao mesmo tempo, são capazes de considerar, de modo teoricamente mais correto, situações em que o vento e o coeficiente de difusão turbulento variam com a altura.

4. CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DOS MODELOS DE DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

A escolha de um modelo está fortemente ligada ao problema a resolver e às características meteorológicas e orográficas do sítio em análise. Os modelos podem ser subdivididos de acordo com a característica da fonte:

- ✓ Fonte pontual;
- ✓ Fonte de volume, área e linear (modelo para auto-estrada) e também considerando a orografia;
- ✓ Terreno plano;
- ✓ Terreno complexo.

Os modelos podem ser subdivididos de acordo com a dimensão do campo que descreve. Temos assim:

- ✓ Modelo em escala local (distância da fonte inferior a 50 km);
- ✓ Modelo a meso-escala (descreve campo de concentração da ordem de centenas de quilômetros);
- ✓ Modelo de circulação continental e planetária.

Finalmente, os modelos podem ser classificados de acordo com a resolução temporal da concentração produzida. Temos assim:

- ✓ Modelo episódico (resolução temporal inferior a uma hora);
- ✓ Modelo de breve intervalo temporal (resolução temporal superior ou igual a uma hora e inferior ou igual a 24 horas);
- ✓ Modelo climatológico (com resolução temporal superior a 24 horas).

5. MODELO OPERACIONAL DE NOVA GERAÇÃO

A maior parte dos modelos operacionais para a estimativa da dispersão de gás e partículas na camada limite atmosférica é baseada na aproximação Gaussiana. Tais modelos baseiam-se na hipótese de que o poluente se dispersa em uma turbulência homogênea. Todavia, devido à presença do terreno, a turbulência geralmente não é homogênea ao longo da direção vertical. Além disso, os "inputs" dos modelos Gaussianos são frequentemente referendados por esquemas simples de turbulência expressos em classes de estabilidade. Toda classe cobre um grande intervalo de condições de estabilidade atmosférica e ela é dependente do lugar em que é avaliada.

Nestes últimos anos, depois dos trabalhos de Holtslag & van Ulden (1983), Weil & Brower (1984), van Ulden & Holtslag (1985), Trombetti et al. (1987), Beljaars & Holtslag (1990) é possível validar os parâmetros fundamentais para a descrição da característica da camada limite superficial e da camada limite atmosférica com medidas nas proximidades do solo. Abre-se, assim, a possibilidade do desenvolvimento de modelos que descrevem a difusão de poluentes e que utilizam como dados meteorológicos de entrada os dados no nível do solo (e então com possibilidade de serem obtidos com uma rede automática). Além disso, estes dados podem representar diretamente a turbulência atmosférica através do valor do comprimento de Monin- Obukhov e da velocidade de atrito, e não através de classes empíricas como as de Pasquill-Gifford.

No âmbito de uma cooperação entre o Brasil e a Itália foram realizados dois projetos que utilizaram modelos matemáticos para previsão da concentração de poluentes: um no Centro Experimental Aramar (CEA), gerenciado pela COPESP, utilizando o modelo SPM (TIRABASSI & RIZZA, 1995), e outro realizado em Candiota (RS) com o modelo M4PUFF (TIARABASSI & RIZZA, 1997). A partir desta colaboração surgiu uma forte interação entre Brasil/Itália no estudo da modelagem matemática da dispersão de poluentes resultando no modelo estacionário ADMM (VILHENA et al., 1998; MOREIRA et al., 1999). Atualmente, o modelo ADMM foi implementado para um modelo não-estacionário considerando também condições de ventos fracos e decaimento radioativo, importante para casos de situações de emergência em Usinas Nucleares. Estes modelos estão de acordo com as características requeridas dos modelos de nova geração.

6. CONFIABILIDADE DOS MODELOS

No Brasil não é definido um procedimento padrão de avaliação da performance dos modelos. É evidente, então, a necessidade de iniciarem ações que contenham a formulação de um procedimento aprovado pela comunidade científica e possível de ser realizado na prática, e que permita expressar um julgamento sobre o desempenho dos modelos. Contemporaneamente, isto deve operar de modo que este procedimento seja aplicado corretamente. Na realidade, uma correta utilização dos modelos de transporte e difusão na atmosfera não podem prescindir de um estudo sobre suas capacidades de representarem corretamente situações reais. Quando possível, deve-se verificar a confiabilidade do modelo utilizado com os dados, cenários topográficos e meteorológicos próprios da área de seu emprego. Por exemplo, modelos considerados seguros nos EUA e aplicados em uma configuração particular no Brasil poderão ter um comportamento não correspondente à expectativa.

Normalmente, uma rede para o controle da qualidade do ar, seja essa relativa a um sítio urbano ou industrial, é concebida com critérios que por si só não fornecem informações em quantidade suficiente para a "validação" de um modelo: o número de pontos e a tipologia da medida dos parâmetros químicos e meteorológicos não permitem, geralmente, uma cobertura mais refinada do território, nem garante a completa informação necessária para a verificação dos modelos, o que é perfeitamente compreensível. Enquanto isto, na concepção de uma rede que deve funcionar estavelmente no território, tende-se a minimizar o número de pontos de medida, que são usualmente fixos, e, como resultado, coloca-se no relevo mais o andamento temporal da concentração que a sua distribuição espacial. Em geral, uma rede de controle pode contribuir na validação de modelos se oportunamente integrada com outros sensores durante uma campanha intensiva das medidas

organizadas com este propósito. Além disso, devemos considerar também o fato de que, quando são usados, os modelos, por serem eles últimos instrumentos bastante sofisticados, que respeitam o atual estado do conhecimento do transporte turbulento na atmosfera, fornecem resultados que possuem uma margem de erro considerável. Isto acontece devido a vários fatores, entre os quais dar uma particular importância à incerteza ligada à variabilidade intrínseca da atmosfera.

7. REDE E MODELOS

Uma rede de controle é concebida como um conjunto de sensores sistematizados em pontos fixos para medir e controlar centralmente. Tal conjunto pode eventualmente, mas não necessariamente, ser integrado a meios móveis, com os quais pode-se efetuar campanhas de medidas e de instrumentação com sensores remotos. São, realmente, os pontos de medida fixos e continuados que ainda hoje constituem o núcleo de uma rede de monitoramento da qualidade do ar.

A atividade de monitoramento de uma rede de controle não resolve de forma isolada o problema duplo do controle e do saneamento da atmosfera. Realmente, o controle da qualidade do ar requer instrumentos interpretativos, capazes de extrapolar no espaço e no tempo os valores medidos na posição dos analisadores.

Os dados fornecidos por uma rede integrada com os resultados dos modelos matemáticos são passíveis de:

- ✓ Fornecerem um quadro cognitivo;
- ✓ Individualizarem a causa dos fenômenos de poluição;
- ✓ Discriminarem a contribuição das várias fontes poluidoras;
- ✓ Fornecerem informações sobre o nível de poluição;
- ✓ Darem previsões rápidas a respeito de situações perigosas;
- ✓ Documentarem a superação do padrão de qualidade do ar;
- ✓ Permitirem a predisposição e verificação dos planos de melhoria.

Os modelos matemáticos de dispersão na atmosfera encontram aplicações também no projeto e/ou reorganização de uma rede. Os elevados custos de pontos de medidas e do sistema de transmissão, elaboração e arquivamento dos dados impõem condições para minimizar o número de pontos de medidas, enquanto a norma vigente requer o conhecimento do estado da qualidade do ar sobre toda a área controlada. Segue, então, a oportunidade de planejar a escolha dos pontos de medida em termos da busca de uma solução otimizada que satisfaça os objetivos estudados. Os modelos matemáticos, juntamente com a caracterização da área a ser controlada, fornecem as informações básicas para o planejamento e/ou reorganização de uma rede de monitoramento.

8. CONCLUSÕES

Os modelos matemáticos podem apontar exatamente a qualidade do ar, correlacionando taxas e a velocidade do vento. Sua utilização é de grande valia para os engenheiros de meio ambiente, uma vez que podem ser utilizados para avaliações de novos projetos ou mudanças no processo.

9. REFERÊNCIAS

BELJAARS, A.C.M. & HOLTSLAG, A.A.M. "A software library for the calculation of surface fluxes over land and sea". Environ. Soft., vol. 5: 60-68, 1990.

HOLTSLAG, A.A.M. & VAN ULDEN A.P. "A simple scheme for daytime estimation of surface fluxes from routine weather data". J. Clim. Appl. Meteor., 22: 517-529, 1983.

MOREIRA, D.M.; DEGRAZIA, G.A.; & VILHENA, M.T. "Dispersion from low sources in a convective boundary layer: an analytical model". Il Nuovo Cimento, 22C, n.5, 685-691, 1999.

TIRABASSI, T. & RIZZA, "A practical model for the dispersion of skewed puffs". J. Appl. Meteor., 34: 989-993, 1995.

TIRABASSI, T. & RIZZA, "Boundary layer parameterization for a non-Gaussian puff model". J. Appl. Meteor., 36: 1031-1037, 1997.

TROMBETTI, F.; TAGLIAZUCCA, M.; TAMPIERI, F. & TIRABASSI, T. "Evaluation of similarity scales in the stratified surface layer using wind speed and temperature gradient". Atmos. Environ., 20: 2465-2471, 1986.

VAN ULDEN, A.P. & HOLTSLAG, A.A.M., "Estimation of atmospheric boundary layer parameters for diffusion applications". J. Clim. Appl. Meteor., 24: 1196-1207, 1985.

VILHENA, M.T.; RIZZA, U.; DEGRAZIA, G.; MANGIA, C.; MOREIRA, D.M.; TRABASSI, T. "An analytical air pollution model: development and evaluation". Contribution to Atmospheric Physics, 315-320, 1998.

WEIL, J.C. & BROWER, R.P. "An update gaussian plume model for tall stacks". JAPCA, 34: 818-827, 1984.