



TRAÇADORES NA MEDIÇÃO E ANÁLISE  
DE POLUIÇÃO EM RIOS

Rubens Martins Moreira  
José Olympio Nardelli Monteiro de Castro

NUCLEBRÁS/CDTN-549

EMPRESAS NUCLEARES BRASILEIRAS S.A. - NUCLEBRÁS  
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR  
DEPARTAMENTO DE RADIOPROTEÇÃO E APOIO AO LICEN-  
CIAMENTO

TRAÇADORES NA MEDIÇÃO E ANÁLISE  
DE POLUIÇÃO EM RIOS

Rubens Martins Moreira

José Olympio Nardelli Monteiro de Castro

NUCLEBRÁS/CDTN-549

Trabalho apresentado no I Congresso Geral  
de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, 17-20  
março de 1986

Belo Horizonte  
1986

## TRAÇADORES NA MEDIÇÃO E ANÁLISE DE POLUIÇÃO EM RIOS

Rubens Martins Moreira  
José Olympio Nardelli Monteiro de Castro

Departamento de Radioproteção e Apoio ao Licenciamento  
NUCLEBRÁS S.A./Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear  
Belo Horizonte - MG

### Resumo

Os poluentes lançados em cursos d'água sofrem dispersão pela ação da advecção e turbulência. Resulta disto uma diluição física, que em alguns casos é reforçada pela inativação do poluente, originando um processo natural de auto-depuração do rio. Esta capacidade assemelhada do corpo receptor tem uma óbvia importância ecológica e econômica. A sua avaliação permite a otimização das estações de tratamento de rejeitos e a observância das normas de qualidade da água. O emprego de traçadores e o uso das informações com eles obtidas, para a calibração de modelos matemáticos, possibilitam a previsão do impacto e o controle adaptativo dos efeitos das descargas de poluentes. Este trabalho classifica os modelos apropriados para as várias situações, discute os métodos de calibração e apresenta uma aplicação destas técnicas a uma situação concreta em um rio de porte médio.

### Abstract

Pollutant matter discharged into streams undergo a process of dispersion caused by turbulence and shear dispersion. A physical dilution ensues, to which in some cases is added the decay of the pollutant. Hence, a natural process of self purification results and this characteristic of the stream has a most important ecological and economical meaning. Its evaluation allows the optimization of effluent treatment works, at the same time ensuring the compliance with established water quality criteria. The use of tracers, together with the calibration of mathematical models and with the information they afford, make possible the impact assessment and the adaptive control of the effects of pollutant disposal into streams. This paper classifies the models appropriate for each discharge type, discusses the calibration methods and presents an application of these techniques to a real situation of a medium size river.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO TEÓRICA AOS MODELOS DE DILUIÇÃO.....	4
2	CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	5
3	APLICAÇÃO.....	5
4	BIBLIOGRAFIA.....	6

## A - INTRODUÇÃO TEÓRICA AOS MODELOS DE DILUIÇÃO

Diferentes situações resultam, dependendo da modalidade do regime de descarga, e da natureza do poluente lançado em um curso d'água com fluxo unidirecional. Estas situações são abaixo classificadas:

Regime da Descarga	Poluente
Contínuo	Conservativo
Intermitente	Não conservativo

Os modelos para a avaliação da poluição resultante nos diversos casos são obtidos por balanços de material, ou pelo princípio da convolução. Obtém-se:

a) Descarga contínua, poluente conservativo:

$$c = \frac{q}{q + Q} C_0 \quad (1)$$

b) Descarga contínua, poluente não conservativo:

$$c(x) = \frac{q}{q + Q} C_0 \int_0^{\infty} h(x, t) \exp(-kt) dt \quad (2)$$

c) Descarga intermitente, poluente conservativo:

$$c(x, t) = \int_0^t C_0(\tau) h(x, t - \tau) d\tau \quad (3)$$

d) Descarga intermitente, poluente não conservativo:

$$c(x, t) = \int_0^t C_0(\tau) h(x, t - \tau) \exp(-k(t - \tau)) d\tau \quad (4)$$

Nestas equações,  $c$  denota a concentração após misturamento completo;  $q$  e  $Q$  as vazões da descarga e do rio, respectivamente;  $C_0$  a concentração na descarga;  $h$  a resposta a uma injeção instantânea;  $k$  a constante de desaparecimento, supondo uma cinética de primeira ordem. As variáveis independentes são a distância  $x$ , o tempo  $t$ , e a variável muda de integração  $\tau$ .

É interessante observar que mesmo no caso de descarga contínua, quando o poluente não é conservativo, torna-se importante determinar o coeficiente de dispersão  $D$ , pois ele está embutido na resposta  $h$  a um impulso. No caso de dispersão unidimensional tem-se:

$$h(x, t) = \frac{u}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp \left[ - \frac{(x - ut)^2}{4Dt} \right] \quad (5)$$

onde  $u$  é a velocidade média do fluxo.

## B - CALIBRAÇÃO DO MODELO

Consiste em determinar os valores dos parâmetros  $u$ ,  $D$  e  $k$ . A constante de decaimento  $k$  é mais precisamente determinada por uma injeção simultânea do poluente e de um traçador conservativo. Isto frequentemente não é possível e  $k$  tem que ser determinada separadamente em laboratório. A velocidade  $u$  pode ser medida pelos métodos hidráulicos convencionais.  $D$  é estimado pelo ajuste do modelo aos dados experimentalmente obtidos com o traçador. Dois métodos comumente usados para o ajuste são:

a) Método dos Momentos.

$$D = \frac{ux^3(\sigma_2^2 - \sigma_1^2)}{2u^2} \quad (6)$$

em que  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são as variâncias da distribuição de concentrações na entrada e na saída do trecho que se quer modelar. É um método simples, porém sofre da imprecisão do cálculo da variância, decorrente da corrupção introduzida pelo ruído nos sinais medidos com os detectores do traçador;

b) Mínimos Quadrados, que trata de escolher, por um processo de tentativa e erro, o valor de  $D$  que minimiza  $\phi$ .

$$\phi = \sum_{i=1}^N \left\{ \bar{C}(x, t_i) - \int_0^{t_i} C(x, \tau) \frac{u \exp \left[ -\frac{[x-u(t_i-\tau)]^2}{4D(t_i-\tau)} \right]}{\sqrt{4\pi D(t_i-\tau)}} d\tau \right\}^2 \quad (7)$$

onde o sinal do traçador medido pelo detector,  $\bar{C}(x, t)$ , foi tornado discreto por  $N$  valores. Observa-se que as equações (6) e (7) admitem um pulso arbitrário de traçador, na entrada do trecho a modelar. Algoritmos especiais [1] podem ser usados para se obter uma convergência rápida deste ajuste por mínimos quadrados não lineares. A convolução implícita na equação (7) é reduzida a um produto pela transformada de Fourier digital, a qual pode ser economicamente implementada pelo algoritmo da transformada rápida de Fourier, FFT [2]. Uma estimativa inicial aproximada de  $D$  pode ser obtida pela maximização da correlação cruzada, entre os sinais de saída  $Y(t)$  e de entrada  $X(t)$

$$R_{XY}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T X(t-\tau) Y(\tau) dt \quad (8)$$

onde  $T$  é a duração máxima do sinal.

## C - APLICAÇÃO

Várias determinações de coeficientes de dispersão têm sido efetuadas pelo CDTN: rios Paraopeba, das Velhas, Serra Azul, Ar

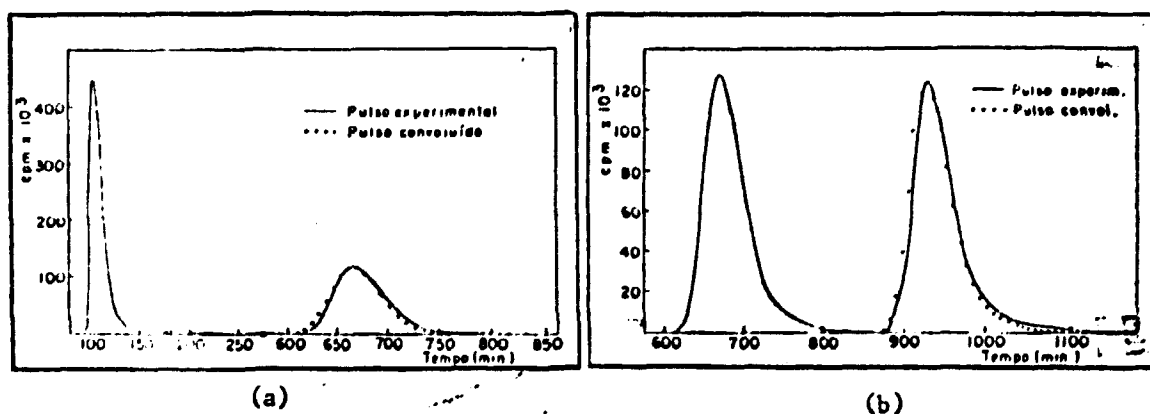
rudas, Sabará, Sergipe, etc., usando a metodologia acima desenvolvida. Para exemplificar serão apresentados resultados obtidos no Rio das Velhas, no trecho entre Itabirito e Rio Acima. Como traçador foi usado o Br-82. As vazões,  $Q$ , foram medidas, como um subproduto dos testes, pelo método da contagem total. Os dados pertinentes constam da Tabela 1, onde  $\bar{t}$  designa o tempo médio de passagem.

Tabela 1 - Dados Experimentais e Parâmetros Calculados

Estação	x (m)	$\bar{t}$ (min)	u (m/s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	D (m <sup>2</sup> /s)
1	3567	115	0,52	7,0	-
2	23200	684	0,57	14,8	10,4 ± 0,2
3	33233	952	0,58	23,9	0,85 ± 0,13

Os ajustes entre os valores medidos e previstos pelo modelo, nas saídas das estações 2 e 3, são mostrados na figura 1.

Figura 1 - Pulsos dos Traçadores: a) Nas Estações 1 e 2;  
b) Nas Estações 2 e 3



#### D - BIBLIOGRAFIA

- [1] HIMMELBLAU, D.M. - Applied nonlinear programming. New York, McGraw-Hill, 1972.
- [2] COOLEY, J.W.; TUCKEY, J.W. - An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. In: Mathematics of Computation, 19: 297-301, Apr. 1965.