

Aerador mecânico superficial: as metodologias para a determinação da performance (*)

Hissashi Kamiyama (1)

Resumo

Dentre os parâmetros que indicam a performance de um Aerador Mecânico Superficial, o de maior relevância para o projeto e operação do reator biológico é a Eficiência de Aeração (E.A. em $\text{kg O}_2 / \text{kW} \times \text{h}$). É inicialmente apresentada a teoria sobre Transferência de Oxigênio. A partir daí são desenvolvidas três metodologias para o cálculo da E. A., sendo a melhor a que usa a equação de transferência em forma exponencial, estimando concomitantemente os parâmetros C, C_v e K_{la}. Apresenta um programa de computador para tal (Anexo I). Este trabalho enumera também uma série de cuidados para o teste de aeração sob condição não estável, na água limpa.

1 Introdução

Os Aeradores Mecânicos Superficiais (AMS) têm seu uso difundido há muito, pelo mundo, para o tratamento biológico dos despejos líquidos. Inicialmente desenvolvidos sem muitos critérios precisos, ofereciam rendimentos bastante inferiores aos difusores de ar.

A partir da década de 60 avolumaram-se as pesquisas sobre este tipo de aerador, resultando em equipamentos de alto rendimento, compatíveis com difusores de bolhas, largamente utilizados nas grandes ETEs. Aliado à facilidade de manutenção e de menor investimento inicial, os AMS têm seu uso cada vez mais ampliado no campo de tratamento de despejos líquidos. No entanto, verifica-se que o atual estágio de desenvolvimento tecnológico no campo de aeradores não é acompanhado por igual evolução no conhecimento técnico a respeito dos aeradores por parte dos usuários. A defasagem no nível de conhecimento técnico cria, necessariamente, uma dependência quase que unilateral dos

usuários em relação aos fabricantes. Isto, no entanto, não quer dizer que os usuários necessariamente se equiparem, no campo de conhecimento técnico específico de aeradores, aos fabricantes, mas o suficiente para proceder a uma escolha racional e econômica do equipamento, sem depender unicamente das informações fornecidas pelos fabricantes.

A assimilação, por parte dos usuários, dos conhecimentos referentes aos aeradores se faz necessária na medida em que desses conhecimentos advém um projeto adequado do reator biológico (dimensão, formato), operação racional e, eventualmente, retorno de subsídios ao desenvolvimento e à melhoria dos equipamentos.

Dentre as características essenciais do aerador, a de maior interesse para o usuário é a Eficiência de Aeração que indica a capacidade de transferência do oxigênio pelo aerador, por unidade de tempo e potência líquida introduzida. Desse parâmetro dependem a satisfação da necessidade de oxigênio do reator biológico e sua operação econômica.

A metodologia para a determinação deste parâmetro compreende algumas variantes de certa complexidade. É dessas metodologias que trataremos no presente trabalho.

2 Realização do ensaio, teoria de transferência de oxigênio e as metodologias para o cálculo da eficiência de aeração

2.1 Realização do ensaio

O ensaio para a determinação da Eficiência de Aeração de que aqui trataremos é sob condição não estável, ou seja, em condição de concentração de oxigênio crescente n'água limpa.

O procedimento, em princípio, é simples: enche-se o Tanque de Teste com água limpa, desoxigena-se a água e aera-se, a seguir, a água do Tanque, utilizando o Aerador em ques-

tão. Colhe-se a amostra d'água em intervalos regulares para medição de oxigênio dissolvido (ou diretamente, utilizando medidores com eletrodos), até atingir o valor próximo da saturação. Obtida a tabela de concentração de O.D. x Tempo, aplica-se uma das metodologias de cálculo, obtendo-se o valor da Eficiência de Aeração. Vamos por etapas:

a) O ensaio pode ser realizado tanto na fábrica, utilizando um Tanque de Ensaio, como no campo, no próprio Tanque de Aeração. Quando realizado na fábrica, as condições do ensaio devem estar mais próximas possíveis das condições operacionais do campo. Um dos parâmetros que deve estar semelhante ao do campo é a Densidade de Potência por Unidade de Área Superficial do Tanque (1), (em HP/m^2 ou kW/m^2). Se possível, a profundidade d'água no Tanque de Ensaio deve ser igual ou próxima às condições operacionais no campo; o sistema de fixação deve ser idêntico ao do campo (isto é, se for aerador do tipo fixo, sobre plataforma, deve assim ser ensaiado no tanque). Como o reator biológico no campo possui geralmente formato retangular ou quadrado, o Tanque de Ensaio também deve possuir esse formato. Afinal, de nada adianta obter bons resultados no ensaio de fábrica, se as condições do ensaio pouco refletem as necessidades operacionais.

b) A qualidade da água para ensaio: a norma da ASCE (julho/84) recomenda a água equivalente à potável. Como normalmente a mesma água é utilizada várias vezes, a impureza n'água vai aumentando. Mesmo assim, a concentração dos Sólidos Totais Dissolvidos não deve ser superior a 1.500 mg/l. Não deve conter óleo nem detergentes.

c) Desoxigenação d'água: para proceder à desoxigenação d'água, usa-se normalmente o sulfito de sódio juntamente com o cloreto de cobalto, este como catalisador da aeração. A reação ocorre de acordo com a seguinte equação: $\text{Na}_2\text{SO}_3 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4$.

(*) Apresentado no 14.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. São Paulo, Set/87.

{1} Engenheiro Civil — Departamento de Projeto do Interior Diretoria do Interior - SABESP.

Estequiometricamente são necessários 7,89 mg de Na_2SO_3 para cada 1 mg de oxigênio; no entanto, devido ao consumo durante o processo de mistura utilizando o próprio aerador, é necessário entre 1,5 e 2 vezes esta quantidade. Recomenda-se que a quantidade de sulfito de sódio seja suficiente para manter durante pelo menos dois minutos o estado de O.D. igual a zero.

Quanto ao catalisador, este deve ser adicionado à água antes do sulfito, numa concentração entre 0,10 e 0,50 mg/l em relação à água do tanque. Deve ser assegurada a boa mistura entre este produto e a água do tanque. Tanto o sulfito quanto o cloreto de cobalto devem ser adicionados ao tanque em forma de solução. A concentração de saturação de sulfito de sódio na água é de 26,7 kg/m³, e do cobalto, cerca de 500 g/l, respectivamente, a 20°C.

Os motores e redutores devem estar funcionando em condições estáveis, tais como a temperatura e a amperagem. Para tanto, é necessário que os aeradores estejam, conforme o caso, ligados pelo menos de 30 a 40 minutos antes do ensaio propriamente dito.

d) Oxigenação e coleta de dados: devem ser vários os pontos de coleta para a determinação de oxigênio dissolvido. Em princípio, recomenda-se que sejam pelo menos quatro pontos no tanque, com um ponto próximo ao fundo, um a meia profundidade e um próximo à superfície. Em planta, estes pontos devem cobrir a superfície do tanque, de tal modo que sejam mais representativos.

Para coleta de amostras nestes pontos, podem ser usados tanto o Batiscaf ou mangueiras com o sistema sifão, quando o desnível assim permitir. No entanto, as extensões dos tubos devem ser iguais, de tal modo que possam coletar todos os pontos ao mesmo tempo. As amostras não devem demorar mais de 15 segundos para percorrer a distância entre o ponto de coleta e o vidro de O.D., e os vidros devem ser enchidos entre 6 e 10 segundos. É claro que poderão ser utilizados sensores de O.D., paralelamente à coleta de amostras. O número mínimo de amostras deve ser superior a, pelo menos, doze dados por ponto de coleta. Dos dados coletados, os valores pertencentes à parte da curva em ascensão e que estejam acima de 85% do valor de saturação de O.D., influenciam a determinação de K_{La} , enquanto a parte estacionária da curva, com valores acima de 90% de saturação, será sen-

sível na determinação de C_s . A faixa de determinação de O.D. deverá, pois, ser tal que o menor valor de O.D. não seja superior a 20% do C_s , nem o valor máximo seja inferior a 98% do C_s .

Os dados devem ser coletados na maior amplitude possível. A duração do teste para um ponto de coleta deve ser tal que a última amostra contenha O.D. superior a 98% do C_s . Na medição de O. D. das amostras, caso seja utilizado o sensor de eletrodos, este deverá ser aferido com antecedência, verificando-se a correlação com o método de Winkler.

e) Outros dados a serem colhidos: juntamente com a coleta de dados sobre O. D. devem ser anotadas, em paralelo, com certo intervalo de tempo:

- * a intensidade da corrente absorvida;
- * a tensão do motor;
- * a temperatura da água;
- * a pressão barométrica;
- * se puder, a potência consumida pelo motor diretamente.

Além destes:

- * o volume total útil de água no Tanque de Teste;
- * o rendimento do motor e do redutor;
- * $\cos \gamma$ do motor.

A partir destes dados deverá ser calculada a potência no eixo, ou potência líquida introduzida na água:

$$P = \text{Pot. lida} \times \frac{\text{rendimento do motor} \times \text{rendimento do redutor}}{\text{rendimento do motor} \times \text{rendimento do redutor}}$$

(se houver leitura direta da potência consumida)

Ou:

$$P = \frac{\sqrt{3} V I \cos \gamma \times \text{rend. motor} \times \text{rend. redutor}}{755}$$

Onde: potência lida, tensão, corrente etc. devem ser os valores médios obtidos durante o ensaio.

2.2 Teoria de transferência de oxigênio ao meio líquido

A teoria mais aceita hoje, sobre a transferência de gás oxigênio à água, é o Modelo de Duplo Filme: existiriam, então, dois filmes, um de líquido e outro de gás, na zona limítrofe de contato entre o gás e o líquido. As espessuras destes filmes seriam correspondentes a alguns diâmetros de moléculas. Para que as moléculas de oxigênio possam atingir a parte líquida, é necessário que estas atravessem dois filmes (ver figura "1").

Cada filme apresenta determinada resistência para a difusão da molécula de gás, que se move do ponto de maior concentração para o de menor concentração. No entanto, a resistência oferecida pelo filme gasoso é bem inferior àquela oferecida pelo filme líquido, podendo, assim, ser considerada apenas a última.

O filme gasoso é inicialmente saturado de moléculas de gás, donde não há variação de sua concentração ao longo desta camada; já o filme líquido, oferecendo resistência bem maior, cria desnível na concentração. Este desnível de concentração tende a reduzir-se ao longo do processo, ao mesmo tempo que se vai reduzindo a quantidade transferida de gás por unidade de tempo. Lewis e Whitman conduziram, então, a seguinte equação básica para transferência de gás ao líquido:

$$dm / dt = K_L \cdot A \cdot (C_1 - C_L) \quad (1)$$

dm/dt = taxa de difusão da massa de gás por unidade de tempo;

A = área da superfície de contato gás-líquido;

C_1 = concentração de gás na superfície do filme líquido em contato com filme gasoso;

C_L = concentração de gás no seio líquido;

K_L = coeficiente de transferência de gás no filme líquido.

Dividindo ambos os lados por V (volume) e fazendo $C_1 = C_s$ e $C_L = C$, temos:

$$1/V \cdot dm/dt = K_L \cdot A/V \cdot (C_s - C) \quad (2)$$

Como não podemos calcular diretamente o valor de A/V , fazendo

$$K_L \cdot A/V = K_{La}, \text{ temos:}$$

$$dc/dt = K_{La} (C_s - C) \quad (3)$$

Onde:

K_{La} = coeficiente global de transferência (tempo⁻¹).

O cálculo da Eficiência de Aeração consiste em determinar, basicamente, este coeficiente, que, para isso, existem algumas metodologias. Disso trataremos a seguir.

2.3 Metodologias para a determinação de K_{La} : forma exponencial com regressão não linear; forma logarítmica (log difference method) com regressão linear simples e "best fit log method"

Tomando a equação "3" e integrando-a, temos:

$$\ln (C_s - C_1) = \ln (C_s - C_0) - K_{La} \cdot (t - t_0) \quad (4)$$

Ou em forma exponencial:

$$C_t = C_s - (C_s - C_0) e^{-K_{1a} (t - t_0)} \quad (5)$$

Utilizando-se a equação "5", podemos obter valores de C_t calc, atribuindo valores iniciais aos parâmetros C_s , C_0 e K_{1a} . Por outro lado, temos os valores de C_t obs. ou seja, os valores de concentração de oxigênio obtidos no ensaio em função do tempo. Se estes dois conjuntos de dados forem tais que o valor da somatória

$$S = \sum_{i=1}^n (C_i \text{ obs} - C_i \text{ calc})^2$$

que forma uma superfície multidimensional, for o menor possível, podemos concluir que os valores atribuídos aos parâmetros C_s , C_0 e K_{1a} para gerar os C_t calc são os melhores possíveis. Este processo exige, evidentemente, o uso de computador, já que é uma regressão não linear, utilizando o método de mínimos quadrados. No anexo I é apresentado um programa para resolução deste problema.

Para a estimação de parâmetros C_s , C_0 e K_{1a} , que não são lineares, para ser aplicado o método de mínimos quadrados, aplica-se um processo de linearização, por uma transformação conveniente da equação. Para isso, o presente programa utiliza a expansão da série de Taylor, onde se transformam em formas lineares os parâmetros. O método de mínimos quadrados é aplicado, então, aos parâmetros assim linearizados. Para tanto, o programa faz, basicamente, as seguintes transformações:

$$C = K_1 - (K_1 - K_2) e^{-K_3 t} \quad (6)$$

Onde:

$$K_1 = C_s; K_2 = C_0; K_3 = K_{1a}$$

As derivadas parciais da eq. 6 em relação aos respectivos parâmetros são:

$$Z_1 = \delta C / \delta K_1 = 1 - e^{-K_3 t}$$

$$Z_2 = \delta C / \delta K_2 = e^{-K_3 t}$$

$$Z_3 = \delta C / \delta K_3 = t (K_1 - K_2) e^{-K_3 t}$$

$$(-K_3 t)$$

A expansão da série de Taylor, tomando a equação 6 em relação aos seus parâmetros, a torna assim:

$$C \text{ obs} = C^\circ \text{ calc} + Z_1 (K_1 - K_1^\circ) + Z_2 (K_2 - K_2^\circ) + Z_3 (K_3 - K_3^\circ) \quad (7)$$

Onde:

C° calc = valores da concentração de O.D. calculado, usando os parâmetros K_1° ; o índice (°) indica os valores dos parâmetros sobre os quais se aplica a expansão de Taylor

Reescrevendo a equação 7, temos:

$$C \text{ obs} - C^\circ \text{ calc} = b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + b_3 Z_3 \quad \text{ou:}$$

$$W^\circ = b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + b_3 Z_3 \quad (8)$$

A equação 6, portanto, está linearizada em relação aos seus parâmetros. Feito isso, devem ser dados os valores iniciais para K° , para que fossem calculados os valores de W° e de Z_i , na equação 8. Como a equação 8 é linear nos seus parâmetros, o método de regressão linear múltiplo é utilizado para estimar os b_i . Obtidos os valores de b_i , chega-se aos valores de K_i pela relação:

$$K_i = b_i + K^\circ; \quad (9)$$

Já que os valores de K_i não são, necessariamente, corretos, várias iterações devem ser feitas, até que os b_i se aproximem de zero, verificando as respectivas convergências.

Os parâmetros da equação 8 devem ser estimados, utilizando-se o método de mínimos quadrados. Sendo assim, temos:

$$S = \sum (W - b_1 Z_1 - b_2 Z_2 - b_3 Z_3)^2 \quad (10)$$

A soma dos quadrados da diferença (residual) S deve ser mínima. Esta minimização de S , relativa aos parâmetros b_i , conduz ao seguinte conjunto de equações normais (omitindo o índice (°)):

$$b_1 \sum Z_1^2 + b_2 \sum Z_1 Z_2 + b_3 \sum Z_1 Z_3 = \sum W Z_1 \quad (11)$$

$$b_1 \sum Z_1 Z_2 + b_2 \sum Z_2^2 + b_3 \sum Z_2 Z_3 = \sum W Z_2 \quad (12)$$

$$b_1 \sum Z_1 Z_3 + b_2 \sum Z_2 Z_3 + b_3 \sum Z_3^2 = \sum W Z_3 \quad (13)$$

Fazendo-se:

$$a_{11} = \sum Z_1^2;$$

$$a_{12} = a_{21} = \sum Z_1 Z_2;$$

$$a_{13} = a_{31} =$$

$$= \sum Z_1 Z_3;$$

$$a_{22} = \sum Z_2^2;$$

$$a_{23} = a_{32} = \sum Z_2 Z_3;$$

$$a_{33} = \sum Z_3^2;$$

$$C_1 = \sum W Z_1; \quad C_2 = \sum W Z_2;$$

$$C_3 = \sum W Z_3$$

As equações 11, 12 e 13 podem ser reescritas sob a forma:

$$a_{11} b_1 + a_{12} b_2 + a_{13} b_3 = C_1 \quad (14)$$

$$a_{21} b_1 + a_{22} b_2 + a_{23} b_3 = C_2 \quad (15)$$

$$a_{31} b_1 + a_{32} b_2 + a_{33} b_3 = C_3 \quad (16)$$

As soluções das equações (14, 15 e 16) para b_i são sucessivamente:

$$b_3 = (d_1 d_2 - d_3 d_3) / (d_1 d_4 - d_3^2) \quad (17)$$

$$b_2 = (d_5 - d_3 b_3) / d_1 \quad (18)$$

$$b_1 = (C_1 - a_{12} b_2 - a_{13} b_3) / a_{11} \quad (19)$$

Onde:

$$d_1 = a_{22} a_{11} -$$

$$a_{12} a_{12}$$

$$d_2 = a_{11} C_3 - a_{13} C_1$$

$$d_3 = a_{11} a_{23} - a_{13} a_{12}$$

$$d_4 = a_{11} a_{33} -$$

$$- a_{13} a_{13}$$

$$d_5 = a_{11} C_2 - a_{12} C_1$$

O programa admite até dez iterações sucessivas até a convergência dos valores.

O consenso entre os pesquisadores é de que o método com a equação na forma exponencial é o mais recomendável entre os existentes e é a metodologia utilizada na Norma da ASCE. Suas vantagens se resumem nos seguintes pontos, segundo Stenstrom (4):

1) Minimiza o erro na concentração de oxigênio, enquanto o método usando a equação sob forma logarítmica diminui o erro da log;

Anexo 1

```

1  PARAME.BAS 11-09-1986
5  CLS KEY OFF:WIDTH LPRINT 132
10 REM -----
30 REM PASSO 01 - IMPRESSAO DE TITULOS
50 REM -----
70 REM
90 LOCATE 10,10:PRINT"VOCE DESEJA UTILIZAR A IMPRESSORA (S/N)";
91 KS=INPUT$(1)
92 IF KS<>"N" AND KS<>"n" AND KS<>"S" AND KS<>"s" GOTO 90
110 CLS
130 PRINT"-----"
150 PRINT"REGRESSAO NAO-LINEAR - INTRODUCAO DE 02 EM AGUA LIMPA"
170 PRINT"-----"
172 PRINT
173 PRINT
174 INPUT"CLIENTE:";C$
176 INPUT"REFERENCIA:";R$
178 INPUT"DATA:";D$
179 PRINT
190 IF KS="n" OR KS="N" GOTO 310
210 LPRINT"-----"
230 LPRINT"REGRESSAO NAO LINEAR P/TESTE DE INTROD. DE 02 EM AGUA LIMPA"
250 LPRINT"-----"
272 LPRINT
273 LPRINT
274 LPRINT"CLIENTE:";C$
276 LPRINT"REFERENCIA:";R$
278 LPRINT"DATA:";D$
279 LPRINT
280 LPRINT
290 LPRINT"OS VALORES SAO TRUNCADOS E NAO ARREDONDADOS."
310 LPRINT"OS VALORES SAO TRUNCADOS E NAO ARREDONDADOS"
320 IF KS="n" OR KS="N" GOTO 370
350 LPRINT
370 PRINT"O PROGRAMA TEM LIMITE MAXIMO DE 30 PONTOS."
390 PRINT
410 INPUT"QUAL O NUMERO DO TESTE:";AS
430 IF KS="n" OR KS="N" GOTO 510
450 LPRINT
470 LPRINT TAB(13)"CONJUNTO DE DADOS PARA O TESTE NUM.:";AS
490 LPRINT TAB(13)"-----"
491 LPRINT
510 DIM C(30),T(30),F(30),R(30),XK1(30),EA(30),K20(30)
530 PRINT
550 PRINT"FORNECA OS DADOS EM PARES DE (TEMPO),(02 DISSOLVIDOS)"
570 INPUT"NUMERO DE PARES DE DADOS:";ND
590 REM #
610 FOR I=1 TO ND:PRINT I;
630 INPUT"TEMPO, CONCENTRACAO, T(I),C(I)";
635 IF T(I)=0 AND C(I)=0 AND I=1 THEN I=I-2
650 NEXT I
670 PRINT
690 INPUT"ASSUMIR C-STAR = 10 PPM OU A MELHOR ESTIMATIVA:";CS
710 REM #
730 INPUT"ASSUMIR C-ZERO = 0 PPM OU A MELHOR ESTIMATIVA:";CO
750 REM #
770 INPUT"ASSUMIR KLA = 4 1/H OU A MELHOR ESTIMATIVA:";XK
790 INPUT"Temperatura d'agua:";TE
791 INPUT"Saturacao de oxigenio a temp.(tabelado):";XCS
792 INPUT"Saturacao de oxigenio a 20C (tabelado):";XCS2
793 INPUT"Fator de correcao da pressao:";FCP
794 INPUT"Potencia liquida:";PL
795 INPUT"volume util do tanque (m3) =:";TAB(50) V
796 INPUT"numero de aeradores:";NE
810 XK=XK/60
830 CLS
850 PRINT TAB(22)"CONJUNTO DE DADOS PARA O TESTE NUM.:";A
870 PRINT TAB(22)"-----"
871 LPRINT"Temperatura d'agua =:";TAB(50) TE
872 LPRINT"Saturacao de oxigenio a temp.(tabelado-mg/L) =:";TAB(50) XCS
873 LPRINT"Saturacao de oxigenio a 20C (tabelado-mg/L) =:";TAB(50) XCS2
874 LPRINT"Fator de correcao da pressao =:";TAB(50) FCP
875 LPRINT"Potencia liquida introduzida(Kw) =:";TAB(50) PL
876 LPRINT"volume util do tanque (m3) =:";TAB(50) V
877 LPRINT"numero de aeradores no tanque =:";TAB(50) NE
890 PRINT
910 PRINT TAB(39)"KLa";
930 PRINT"ITERACAO" TAB(13)"C-STAR" TAB(26)"C-ZERO" TAB(39)"prime" TAB(52)"
930A DOS" TAB(65)"EFICIENCIA DE AERACAO A 20C";
950 PRINT TAB(2)"numero" TAB(14)"mg/l" TAB(27)"mg/l" TAB(39)"1/min" TAB(52)"
950A quadrados" TAB(80)"Kg O2/Kwh";
970 PRINT"-----"
990 PRINT
1010 IF KS="n" OR KS="N" GOTO 1130
1030 LPRINT TAB(47)"KLa";
1050 LPRINT"iteracao" TAB(15)"c-star" TAB(30)"c-zero" TAB(47)"prime" TAB(60)"
1050A soma dos" TAB(75)"EFICIENCIA DE AERACAO A 20C";
1070 LPRINT TAB(2)"numero" TAB(16)"mg/L" TAB(31)"mg/L" TAB(47)"1/min" TAB(60)"
1070A quadrados" TAB(80)"Kg O2/Kwh";
1090 LPRINT"-----"
1110 LPRINT
1130 REM
1150 REM
1170 REM PASSO 02 - CALCULO DAS ITERACOES
1190 REM -----
1210 REM
1230 KX=0
1250 OS=0
1270 FOR I=1 TO ND
1271 S10=XCS/XCS2
1272 K20=CS*(1/(S10*FCP))
1290 F(I)=CS-(CS-CO)*EXP(-XK*T(I))
1291 XK1(I)=XK*(1+K20*V)/(NE*1000*PL)
1292 EA(I)=(XK1(I)*K20*V)/(NE*1000*PL)
1310 R(I)=C(I)-F(I)
1330 OS=OS+R(I)*R(I)
1350 NEXT I
1390 IF KS="n" OR KS="N" GOTO 1430
1410 LPRINT TAB(4) KX TAB(15) CS TAB(30) CO TAB(45) XK TAB(60) OS TAB(80) EA(1)
1420 KX=KX+1
1430 KX=KX+1:JJ=JJ+1
1450 A1=0
1470 A2=0
1490 A3=0
1510 A4=0
1530 A5=0
1550 A6=0
1570 C1=0
1590 C2=0
1610 C3=0
1630 S0=0
1650 REM
1651 REM
1652 REM
1670 REM PASSO 3 - MONTAGEM DAS EQUACOES NORMAIS PARA O MODELO LINEARIZADO
1710 REM USANDO O VALOR CORRENTE DO MENOR QUADRADO
1730 REM
1750 REM
1770 FOR I=1 TO ND
1790 Z2=EXP(-XK*T(I))
1810 Z1=1-Z2
1830 Z3=T(I)*Z2*(CS-CO)
1850 A1=A1+Z1*Z1
1870 A2=A2+Z1*Z2
1890 A3=A3+Z1*Z3
1910 A4=A4+Z2*Z2
1930 A5=A5+Z2*Z3
1950 A6=A6+Z3*Z3
1970 F(I)=CS-(CS-CO)*Z2
1990 R(I)=C(I)-F(I)
2010 C1=C1+R(I)*Z1
2030 C2=C2+R(I)*Z2
2050 C3=C3+R(I)*Z3
2070 NEXT I
2090 REM
2110 REM
2130 REM PASSO 4 - SOLUCAO DAS EQUACOES NORMAIS POR CORRECOES DAS PRIMEIRAS
2150 REM ESTIMATIVAS DOS MENORES QUADRADOS
2170 REM -----
2190 REM
2210 D1=A1*A4-A2*A2
2230 D2=A1*C3-A3*C1
2250 D3=A1*A5-A3*A2
2270 D4=A6*A1-A3*A3
2290 D5=A1*C2-A2*C1
2310 XN=D1*D2-D3*D5
2330 XD=D1*D4-D3*D3
2350 X3=XN/XD
2370 YN=D5-D3*X3
2390 X2=XN/D1
2410 X1=(C1-A2*X2-A3*X3)/A1
2430 REM
2450 REM
2470 REM PASSO 5 - ULTIMAS ESTIMATIVAS, SOMA DE QUADRADOS
2490 REM -----
2510 REM
2530 T1=X1+CS
2550 T2=X2+CO
2570 T3=X3+XK
2590 S10=XCS/XCS2
2595 K20(KX)=T1*(1/(S10*FCP))
2598 F(KX)=T1-(T1-T2)*EXP(-T3*T(KX))
2595 XK1(KX)=T3*60*(1.024*(20-TE))
2596 EA(KX)=(XK1(KX)*K20(KX)*V)/(NE*1000*PL)
2590 FOR I=1 TO ND
2610 F(I)=T1-(T1-T2)*EXP(-T3*T(I))
2630 R(I)=C(I)-F(I)
2650 S0=S0+R(I)*R(I)
2670 NEXT I
2690 REM
2710 REM
2730 REM PASSO 6 - TESTE DE CONVERGENCIA - PARAMETRO: 1/100.000
2750 REM -----
2770 REM
2790 PRINT TAB(4) KX TAB(13) T1 TAB(26) T2 TAB(39) T3 TAB(52) S0
2810 IF KS="n" OR KS="N" GOTO 2850
2830 LPRINT TAB(4) KX-1 TAB(15) T1 TAB(30) T2 TAB(45) T3 TAB(60) S0 TAB(80) EA(K
2)
2850 IF (X1/T1<=.00001) AND (X2/T2<=.00001) AND (X3/T3<=.00001) GOTO 3210
2870 IF (ABS(OS-S0)<=.000001) GOTO 3210
2890 IF (KX) GOTO 3010
2910 CS=T1
2930 CO=T2
2950 XK=T3
2970 OS=S0
2990 GOTO 1430
2991 AT=0
2992 FOR I=1 TO KX
2993 ST=ST+EA(I)
2994 NEXT I
2995 ST=ST/KX
2996 LPRINT TAB(74)"-----"
2998 RETURN
3010 PRINT
3030 PRINT"O SOLUCAO NAO CONVERGE PARA 10 ITERACOES"
3050 PRINT"MUDE OS VALORES NA LINHA 2850 OU TENHA MAIS ITERACOES"
3070 PRINT TAB(4) KX TAB(13) T1 TAB(26) T2 TAB(39) TAB(52) S0
3090 PRINT
3110 IF KS="n" OR KS="N" GOTO 3210
3130 LPRINT"O SOLUCAO NAO CONVERGE PARA 10 ITERACOES"
3150 PRINT"MUDE OS VALORES NA LINHA 2850 OU TENHA MAIS ITERACOES"
3170 LPRINT TAB(4) KX TAB(15) T1 TAB(30) T2 TAB(45) TAB(60) S0
3190 LPRINT
3210 REM
3230 CS=T1
3250 CO=T2
3270 XK=T3
3290 OS=S0
3310 REM
3330 REM
3350 REM PASSO 7 - CALCULO DO DESVIO PADRAO DOS PARAMETROS ESTIMADOS"
3370 REM -----
3390 REM
3410 XF=ND-3
3430 RS=S0/XF
3450 ER=SQR(RS)
3470 PRINT
3471 PRINT"DESVIO PADRAO DOS PARAMETROS ESTIMADOS"
3490 PRINT
3510 IF KS="n" OR KS="N" GOTO 3590
3520 GOSUB 2991
3530 LPRINT
3531 LPRINT TAB(13) "DESVIO PADRAO DOS PARAMETROS ESTIMADOS"
3550 LPRINT TAB(13)"-----"
3570 LPRINT
3590 DP=A1*A4+A6+2*A2*A3*A5
3610 DN=A1*A5+A4*A4*A3+A6*A2*A2
3630 DT=DP-DN
3650 F1=A4*A6-A5*A5
3670 F2=A1*A6-A3*A3
3690 F3=A1*A4-A2*A2
3710 V1=(F1/D1)*RS
3730 V2=(F2/D1)*RS
3750 V3=(F3/D1)*RS
3770 S1=SQR(V1)
3790 S2=SQR(V2)
3810 S3=SQR(V3)
3830 PRINT"ADIMENSIONAIS" TAB(13) S1 TAB(26) S2 TAB(39) S3
3850 IF KS="n" OR KS="N" GOTO 3890
3870 LPRINT"ADIMENSIONAIS" TAB(15) S1 TAB(30) S2 TAB(45) S3
3890 S1=S1/CS*100
3910 S2=S2/CO*100
3930 S3=S3/XK*100
3950 PRINT"X DE LSE" TAB(10) S1 TAB(25) S2 TAB(40) S3
3970 PRINT
3990 PRINT"ESTIMATIVA DO ERRO =" ;ER
4010 IF KS="n" OR KS="N" GOTO 4090
4030 LPRINT"X DE LSE" TAB(14) S1 TAB(29) S2 TAB(44) S3
4050 LPRINT
4070 LPRINT"ESTIMATIVA DO ERRO =" ;ER
4090 REM
4110 REM
4130 REM PASSO 8 - IMPRESSAO DO SUMARIO

```

Continuação do anexo 1

```

4150 REM .....
4170 REM .....
4190 PRINT .....
4191 PRINT .....
4210 PRINT .....
4230 PRINT .....
4250 PRINT .....
4251 PRINT .....
4270 PRINT TAB(26) "O.D." .....
4290 PRINT "DATA" TAB(13) "TEMPO" TAB(26) "CONCENTRACAO" TAB(39) "VALOR AJUSTADO" .....
4310 PRINT "pair" TAB(13) "min" TAB(26) "mg/l" TAB(39) "mg/l" TAB(52) "residual" .....
4330 PRINT .....
4350 IF K5="n" OR K5="N" GOTO 4530
4370 LPRINT .....
4371 LPRINT .....
    
```

SUMARIO DOS RESULTADOS

```

4390 LPRINT .....
4410 LPRINT .....
4430 LPRINT .....
4431 LPRINT .....
4450 LPRINT TAB(30) "O.D." .....
4470 LPRINT "DADO" TAB(15) "TEMPO" TAB(30) "CONCENTRACAO" TAB(45) "VALOR AJUSTADO" .....
4480 LPRINT "RESIDUO" .....
4490 LPRINT "num." TAB(15) "min" TAB(30) "mg/l" TAB(45) "mg/l" .....
4510 LPRINT .....
4530 FOR I=1 TO ND .....
4550 PRINT TAB(2) I TAB(13) T(I) TAB(26) C(I) TAB(39) F(I) TAB(52) R(I) .....
4570 IF K5="n" OR K5="N" GOTO 4610
4590 LPRINT TAB(2) I TAB(15) T(I) TAB(30) C(I) TAB(45) F(I) TAB(60) R(I) .....
4610 NEXT I .....
4630 END .....
    
```

SUMARIO DOS RESULTADOS

2) O residual é mais uniforme que noutros métodos. Na forma logarítmica, o erro torna-se maior quando o valor de C se aproxima de C_s;

3) Não é necessário truncar dados, como é necessário na forma logarítmica, donde boa precisão na estimação de C_s é obtida;

4) Não há erro produzido devido à escolha incorreta nos valores de C, já que é o estimado a partir dos dados levantados nos testes;

5) A precisão nos valores obtidos de C_s e K_{1a} é bem superior à de outros métodos.

A grande desvantagem é a necessidade de uso do computador, mas com o amplo uso de microcomputadores nos dias de hoje, talvez este seja um problema até menor.

A metodologia aqui exposta, usando a forma exponencial (equação 5), tem, também, seus resultados bastante afetados pela adoção da faixa de extensão dos dados. Este fato foi verificado por nós, assim como por Boyle e al. (2). Baseado numa mesma série de dados obtidos através de um teste de um equipamento de aeração, este autor nos relata que a diferença, nos valores finais, da taxa de transferência de O₂, chega a ser de 15% entre o resultado utilizando totalidade dos dados e o resultado utilizando apenas 80% dos dados da série (truncado) sendo este superior àquele. Donde se conclui a importância em observar rigorosamente, ao se proceder ao Teste de Aeração, a duração do teste, assim como os seus valores máximos e mínimos recomendados, para a correta apuração dos resultados.

No entanto, tanto o "Manual of Operation Practices" n.º 5 (MOP 5), quanto os "Standard Methods" não utilizam este método. Tomando a equação 4 na forma logarítmica, temos:

$$1n(C_s - C_t) = 1n(C_s - C_0) - K_{1a} t$$

Onde: C_s = concentração de oxigênio no t_s = 0

Nesta forma, a determinação do parâmetro K_{1a} pode ser feita apenas com o uso de simples regressão linear, já que a equação pode ser escrita sob a forma y = mx + b. Esta metodologia é, ainda hoje, a mais difundida e aplicada, já que o Coeficiente Global de Transferência (K_{1a}) pode ser determinado graficamente, onde a abcissa e a ordenada são, respectivamente 1n(C_s - C_t) x tempo, no qual a tangente da reta é o valor de K_{1a}.

Nesta metodologia, o valor de C_s não terá grande importância, enquanto para a correta obtenção de K_{1a} é vital que haja uma criteriosa escolha de C_s (concentração de saturação). Daí porque existem algumas tentativas distintas para a correta estimação de C_s.

Um dos métodos mais utilizados pelos fabricantes no Brasil, e que é menos recomendado pela Norma da ASCE (denominado "Log Difference Method") é considerar o valor de C_s como sendo já conhecido, adotando-se correntemente aqueles valores tabelados nos manuais, fazendo-se as devidas correções, conforme a pressão local e o tipo de equipamento para aeração. Definida a C_s, elabora-se um gráfico de 1n(C_s - C_t) x tempo, utilizando regressão linear simples, de cuja tangente se determina o parâmetro K_{1a}. Esta metodologia tem como vantagem a rapidez com que o resultado é obtido, porém é suscetível de erros grosseiros, desde que cuidados em mínimos detalhes não fossem adotados. Obtido o parâmetro K_{1a}, calcula-se a Taxa de Transferência sob condições padrão, como segue:

$$TTOCP = K_{1a,20} \times C_{s,20} \times V \times 60/1000 \text{ (kg/h)}$$

Onde:

$$K_{1a,20} = K_{1a} \times 1,024 \quad (20 - T)$$

C_{s,20} = saturação de oxigênio n'água limpa, a 20°C e 1,0 atm
V = volume de água no tanque (m³)

A Eficiência de Aeração será:

$$EA = \frac{TTOCP}{\text{Potência Líquida Introduzida}}$$

Existe uma segunda alternativa para a determinação de K_{1a}, utilizando a mesma equação 4. Nesta, o valor da C_s não é escolhido a priori, mas determinado, utilizando um processo de aproximações sucessivas, por tentativas e erros. Este é o denominado "Best Fit Log Deficit Method" e é a segunda melhor metodologia recomendada para a determinação da Eficiência de Aeração.

Para a aplicação desta metodologia, as seguintes etapas são necessárias:

a) Adota-se um valor de C_s que se imagina mais correto. A partir deste valor calculam-se os valores de 1n(C_s - C_{obs}) e plotam-nos num gráfico, utilizando o processo de regressão linear simples. O valor da tangente da semi-reta obtida é igual a -K_{1a}. Registram-se os valores de C_s e o valor de y quando t = t_s;

b) Calcula-se o novo valor de 1n(C_s - C) da seguinte maneira, para cada instante t_i: 1n(C_s - C_i) calc = y(t = t_s) - K_{1a} x t_i;

c) Finalmente, calcula-se a soma dos quadrados dos valores residuais como segue:

$$S = \sum_{i=1}^n [1n(C_s - C_{obs}) - 1n(C_s - C_i) \text{ calc}]^2$$

d) Um mínimo de três tentativas devem ser repetidas para se chegar ao valor final de C_s, que corresponde ao menor valor da soma dos quadrados dos residuais. O parâmetro K_{1a} correspondente a este C_s será o melhor valor de K_{1a} para o cálculo da Eficiência de Aeração;

e) Para aplicação desta metodologia, os dados de C_{obs} devem ser truncados quando atingem valores próximos ao valor de C_s adotado. Porém, é necessário que o último valor de C_{obs}

seja, pelo menos, 92% do C_s tentado e que haja, pelos mesmos, dois valores de C obs acima de 86,5% do valor do C_s adotado. Cada série de dados deve ter o mesmo número de pares (C obs, t) para serem comparados os valores residuais;

f) Obtido o valor final de $K_{L,20}$, deve-se proceder ao cálculo da Taxa de Transferência de Oxigênio sob condições padrão. Para isso, tanto o valor de $K_{L,20}$ quanto o de C_s devem ser convertidos à temperatura de 20°C, a 760 mm Hg. Calcula-se, então:

$$K_{L,20} = K_{L,t} \times 1,024^{(20-t)} \quad (\text{l/Tempo})$$

$$C_{f,20} = C_s \cdot (1/\delta)^\omega \quad (\text{mg/l})$$

Onde:

$K_{L,20}$ = valor de $K_{L,t}$ corrigido à temperatura de 20°C;

$C_{f,20}$ = valor de C_s corrigido a 20°C e à pressão barométrica de 1,0 atmosfera;

δ = fator de correção de temperatura;

ω = fator de correção da pressão;

T = temperatura d'água durante o teste (°C).

Os valores de δ e ω são determinados como segue:

$$\delta = C_s(T) / C_{s,20}$$

$$\omega = P_b / P_s$$

Onde:

$C_s(T)$ = valor de saturação de O.D. tabelado nos manuais, a temperatura do teste, a pressão barométrica de 1,0 atm e umidade relativa de 100%;

$C_{s,20}$ = valor de saturação de O.D. tabelado nos manuais, a temperatura de 20°C, a pressão barométrica de 1,0 atm e umidade relativa de 100%;

P_b = pressão barométrica local durante o teste;

P_s = pressão barométrica de 1,0 atm.

O valor médio da taxa de transferência de oxigênio sob condições padrão será calculado como segue:

$$\text{TTOCP} = \frac{\sum_{i=1}^n (K_{L,20} \times C_{f,20} \times V \times 60/1000)}{n} \quad (\text{kg/h})$$

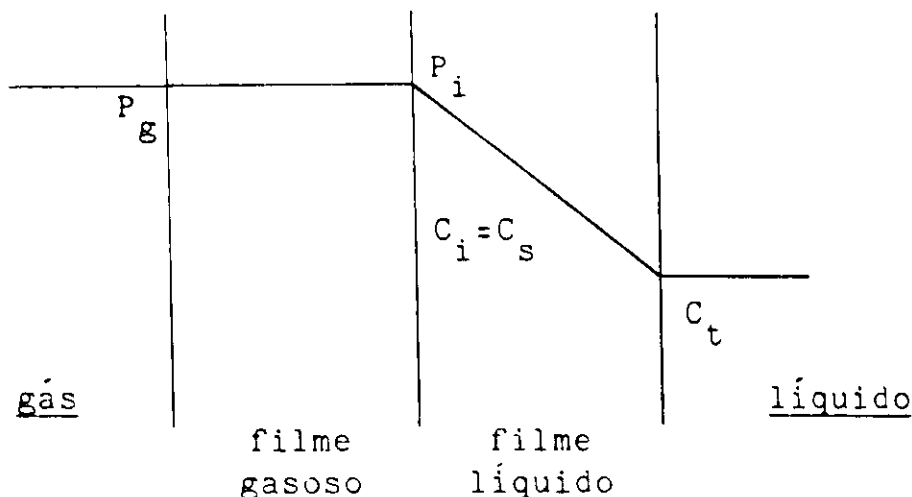


Figura 1

Onde:

V = volume d'água no Tanque de Ensaio (m^3)

n = número de pontos coletados, sendo superior a quatro pontos.

A Eficiência de Aeração sob condições padrão é calculada como segue:

$EA = \text{TTOCP} / \text{Potência líquida introduzida} \quad (\text{kg/kW} \times \text{h ou}$

$\text{kg/HP} \times \text{h})$

Esta metodologia, apesar de ser a segunda melhor alternativa recomendada, é bastante trabalhosa, pois exige várias repetições manualmente. Tem a vantagem de ser necessária apenas uma calculadora programável e não um computador.

3 Conclusão

Foram aqui apresentadas três metodologias distintas para o cálculo da Eficiência de Aeração. Cada uma destas metodologias tem vantagens e desvantagens. Atualmente, a mais recomendada é a utilização sob forma exponencial, por oferecer resultados bem mais precisos em relação às outras metodologias. A metodologia mais utilizada no Brasil ("Log Difference Method") é a menos recomendável, por apresentar resultados discrepantes, se cuidados minuciosos não forem tomados em relação à execução do ensaio e criteriosa escolha de C_s e da faixa de dados.

Onde:

P_g = pressão parcial do gás

P_i = pressão parcial do gás na superfície limite gás-líquido.

C_s = concentração de saturação de gás no líquido, à pressão P_s

C_t = concentração de gás no líquido no tempo t

Referências bibliográficas

- 1) KORMANIK, R. A. e Rooney, T. C. e Pietila, K. A. — "The influence of Tank Geometry on the Oxygen Transfer Capabilities of Mechanical Surface Aerators", 28.ª Conferência — Purdue University, 1973.
- 2) BOYLE, W. C. e Berthonex, P. M. e Rooney, T. C. — "Pitfalls in Parameter Estimation of Oxygen Transfer Data", Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, volume 100, EE 2, abril/74.
- 3) BARNHART, E. L. — "Transfer of Oxygen in Aqueous Solutions" — Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, SA 3, junho/69.
- 4) STENSTRON, M. K. e Brow, L. C. e Hwang, H. J. — "Oxygen Transfer Parameter Estimation" — Journal of the Environmental Engineering Division, EE 2, ASCE, abril/81.
- 5) BROWN, L. C. e Baillord, C. R. — "Modeling and Interpreting Oxygen Transfer Data" — Journal of the Environmental Engineering Division, EE 4, ASCE, agosto/82.
- 6) "A Standard for the Measurement of Oxygen Transfer in Clan Water", ASCE julho/84.
- 7) "Manual of Operation Practice" n.º 5 (MOPS).
- 8) "Standard Method for Examination of Water an Wastewater" — 16.ª edição.
- 9) BARROS, I. A. — Introdução ao Cálculo Numérico, Editora Edgard Blücher Ltda., 1972.
- 10) NONAKA, H. — Processos de Tratamento dos Esgotos e Projetos das Plantas, Edit. Nippon Guessuidow Kyowka, 1970.