

Lagoas de estabilização

José Cleantho Cavalcante Gondim

Apresentamos neste trabalho subsídios ao dimensionamento de lagoas de estabilização.

Este artigo dá continuidade ao apresentado na Revista ano III nº 3 sobre Lagoas de Estabilização. Trata-se de um capítulo integrante de um curso preparado por esse autor para a CETESB Companhia Estadual de Saneamento Básico e Defesa do Meio Ambiente de São Paulo.

Nesta segunda parte, serão desenvolvidos os modelos matemáticos de simulação do comportamento de uma lagoa e apresentado um exemplo numérico de cálculo de alguma de suas dimensões.

5. O PROJETO

5.1 — Considerações Iniciais

Antes da elaboração do projeto de uma lagoa de estabilização é interessante que se obtenha uma série de informações da região, tal como o tipo e características do esgoto a ser tratado, topografia do local onde será implantada a estação, intensidade de luz (radiação solar), hidrologia e meteorologia (evaporação, pluviometria, temperatura, ventos etc.)

De uma maneira geral, estes dados no Brasil são difíceis de serem obtidos em determinadas regiões, principalmente em pequenas comunidades, caso em que se aplica normalmente este tipo de instalação.

5.2 — Lagoas Anaeróbias

5.2.1 — Critério Sul Africano

Dos resultados obtidos em experiências feitas em tanques sépticos, com a temperatura do esgoto influente, a 20° C, chegou-se a expressão abaixo.

$$L_p = \frac{L_o}{Kn \left(\frac{L_p}{L_o} \right)^n R + 1} \quad (8)$$

L_p = DB05 do efluente (mg/l)
 L_o = DB05 do influente (mg/l)
 R = Tempo de detenção, admitindo um sistema que operasse regime de mistura completa (dias)
 n = Expoente experimental (Zâmbia, $n = 4,8$)
 Kn = Coeficiente de projeto.

A tabela a seguir, calculada pela expressão (8), com $n = 4,8$, $Kn = 6$ e temperatura de 22° C mostra que pouco se acrescenta ao rendimento quando o tempo de detenção é superior a 1 dia.

Tempo de Detenção (dias)	DB05 Reduzida (%)
0,12	20
0,40	30
0,71	35
1,3	40
2,4	45
4,7	50
9,4	55

Isto significa que normalmente 30 a 40% de redução da DBO pode obter-se unicamente por sedimentação tal qual um grande decantador primário, embora a matéria orgânica sedimentada venha sofrer alguma forma de decomposição.

5.2.2 — Critério Empírico

Recomenda-se na prática que o tempo de detenção seja entre 2 a 5 dias, período em que acontece a geração dos microorganismos causadores da 2ª fase da digestão anaeróbia, bactérias formadoras de metano.

A temperatura tem uma grande influência na velocidade do processo de decomposição. Em Melbourne (Austrália) verificou-se que no verão com tempos de detenção da ordem de 1,2 dias, chegava-se a obter reduções da ordem de 85-80% na DBO, enquanto no inverno detenções de 5 a 7 dias esta redução caía para 45 a 60%.

De qualquer forma, é comum a utilização de um período de detenção de 5 dias, com o fim de minimizar problemas como mau cheiro e os efeitos ocasionados por baixas temperaturas.

Marais recomenda, que a lagoa anaeróbia seja subdividida em duas ligadas em série com tempo de detenção 2,5 dias cada.

Em Israel, tem sido bastante utilizada a taxa de 0,125Kg DB05/m³ dia, sendo razoáveis valores que estejam compreendidos entre 0,05 a 0,15Kg DB05/m³ dia. O professor Max Lothar Hess sugere ainda que a carga superficial aplicada esteja entre 400 a 2000Kg DB05/ha dia.

5.2.3 — Um Exemplo de Dimensionamento

- População : 10000 habitantes
- Contribuição } 54g DB05/dia
per capita } 180 l/dia
- DB05 intiuente : 300mg/l
- DB05 efluente : 150mg/l
- Km : 6,0

a) Tempo de Detenção

$$R = 4,6 \text{ dias}$$

b) Volume

Admitindo-se para cálculo do volume o tempo de detenção 5 dias prevenindo o aparecimento de problemas citados anteriormente, temos:

$$V = \text{Tempo de detenção} \times \text{população} \times \text{contribuição per capita}$$

$$V = 5 \times 10.000 \times 180 = 9.000m^3$$

c) Área

Adotando-se uma profundidade de 2m.

$$A = \frac{9.000m^3}{2} = 4.500m^2 = 0,45ha$$

Supondo a utilização de dois tanques em paralelo ou em série teríamos uma área de 0,225ha para cada um.

d) Verificação das Taxas Aplicadas

A carga orgânica será de:

$$540 \times 10000 = 540Kg \text{ DB05/dia}$$

A taxa correspondente a carga aplicada com relação ao volume será de:

$$\frac{540Kg}{9000m^3} = 0,06Kg \text{ DB05/m}^3 \text{ dia (razoável)}$$

A taxa correspondente a carga aplicada com relação a área será de:

$$\frac{540Kg}{0,45} = 1200Kg \text{ DB05/ha dia (razoável)}$$

5.3 — Lagoas Facultativas

5.3.1 — Critério Experimental

Baseado em taxas superficiais que têm sido aplicadas em diversas regiões do planeta.

A tabela 2 — a seguir apresenta os valores sugeridos por Gloyna relacionados às condições ambientais.

- a) Estes valores foram calculados supondo que a vazão afluente é igual a efluente.
- b) Contribuição per capita de 50g DB05/dia.
- c) Contribuição de esgoto 100 l/dia.

Complementando, o mesmo autor recomenda as profundidades da Tab. 3, em função também de condições ambientais e do tipo de esgoto.

Tabela 2 — Taxa de aplicação superficial de carga orgânica diária, em condições climáticas distintas.

Carga Superficial Kg DB05/ha. dia (a)	Habitantes (b)	Tempo de Detenção (dias) (c)	Condições Ambientais
10	200	200	Zonas muito frias com cobertura de gelo sazonal. Águas com temperaturas uniformemente baixas e nebulosidade variável.
10-50	200-1000	200-100	Clima frio, com cobertura de gelo sazonal e temperatura de verão temperadas por curtos períodos.
50-150	1000-3000	100-33	Clima entre temperado e sub-tropical, cobertura ocasional de gelo, sem nebulosidade persistente.
150-300	3000-7000	33-17	Clima tropical, sol e temperaturas uniformes sem nebulosidade sazonais.

Tabela 3 — Profundidades recomendadas em lagoas facultativas.

Profundidade (m)	Condições do meio ambiente e tipo de água residuária.
1,0	Temperatura quente uniforme, esgoto presedimentado.
1,0 — 1,5	Temperatura quente uniforme, esgoto bruto.
1,5 — 2,0	Temperatura com flutuações sazonais moderadas, esgoto bruto.
2,0 — 3,0	Temperatura com grandes variações, esgoto bruto, com grande quantidade de areia e sólidos sedimentáveis.

5.3.2 — Critério Racional de Oswald

A taxa superficial de aplicação de alga orgânica em lagoa facultativa, segundo Oswald é dado pela expressão:

$$C_o = 0,28 F.S. \times 0,7 \quad (9)$$

Onde:

- F — Eficiência fotossintética
- S — Valor provável de energia solar visível, função de uma determinada latitude do mês (Langley/dia).
- 0,7 — Coeficiente de segurança

Por sua vez F é determinado pela expressão:

$$F = \frac{F_1 + F_2}{2} + F_3 \quad (10)$$

Onde:

- F₁ = Fator que depende de DBO
- F₂ = Fator que depende da % do tempo que o sol permanece no horizonte.
- F₃ = Função da temperatura média do mês mais frio

A figura 4 e as tabelas 4 e 5 fornecem os dados necessários para a determinação da taxa a ser aplicada.

LATITUDE — SUL		Tabela 4 — Energia solar visível provável em função da latitude, mês. sobre uma superfície horizontal ao nível do mar.											
GRAT	LIMITE	MESES											
		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGC	SET	OUT	NOV	DEZ
0	MAX	228	246	266	268	260	263	265	274	276	268	246	228
	MIN	131	161	205	205	206	203	218	225	212	190	180	100
5	MAX	242	252	266	260	248	250	250	262	275	271	257	242
	MIN	142	166	201	196	194	187	205	209	205	188	186	113
10	MAX	252	258	263	250	232	234	232	251	269	274	267	254
	MIN	152	171	194	183	179	168	186	190	197	185	190	125
15	MAX	264	262	257	239	214	213	212	237	261	175	271	266
	MIN	159	171	185	169	161	148	165	168	186	181	192	136
20	MAX	270	264	249	226	194	189	190	220	251	274	281	276
	MIN	165	172	174	152	141	125	139	144	171	172	192	143
25	MAX	276	264	240	210	175	162	166	202	239	270	286	282
	MIN	170	168	161	134	116	100	107	123	156	164	188	151
30	MAX	278	263	228	194	151	131	142	181	222	264	287	287
	MIN	171	161	145	114	92	73	79	99	137	153	182	158
35	MAX	277	258	216	176	125	99	112	160	204	254	286	289
	MIN	171	152	128	93	65	45	48	76	117	140	172	164

ILUMINAÇÃO DIURNA		DBO APLICADA		TEMPERATURA	
%	F ₂	mg/l	F ₁	°C	F ₃
30	—	10	0,2	4	0,01
33	—	25	0,5	6	0,02
36	—	50	1,2	8	0,23
39	4,8	75	2,1	10	0,49
42	4,5	100	2,6	12	0,70
45	4,1	125	3,1	14	0,82
48	3,9	150	3,6	16	0,91
51	3,7	175	4,0	18	0,96
54	3,5	200	4,3	20	1,00
57	3,4	250	4,8	22	0,99
60	3,3	300	5,1	24	0,96
66	3,1	350	5,3	26	0,92
72	3,0	400	5,4	28	0,87
78	3,0	500	5,0	32	0,73

Tabela 5 — Parâmetros para cálculo da eficiência fotossintética

L_p = DBO efluente
 L_o = DBO afluente
 K_T = Velocidade de decomposição na temperatura T.
 R_T = Tempo de detenção na temperatura T.

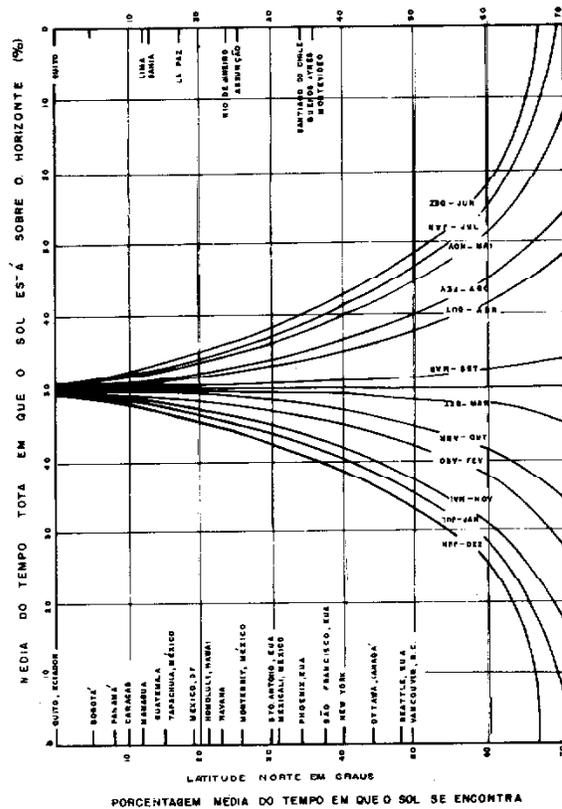


Fig. 4 — % média do tempo em que o sol se encontra no horizonte.

5.3.3 — Critério Teórico

Este critério faz a suposição que o tipo de mistura é completa, sendo a DBO estabilizada por organismos facultativos, e sua redução obedece o modelo matemático a seguir.

$$L_p = \frac{L_o}{K_T R_T + 1} \quad (11)$$

Segundo Duarte os seguintes valores de K_T são obtidos em função da temperatura.

Tabela 6 — Valores de K_T em função da temperatura

Temperatura — T °C	K _T (dia ⁻¹)
5	0,103
10	0,12
15	0,24
20	0,35
25	0,53
30	0,80
35	1,20

Da expressão (11), tira-se:

$$\text{Eficiência (\%)} = \frac{(L_p - L_o)}{L_o} 100 = 1 - \frac{1}{K_T R_T + 1} \times 100$$

$$E (\%) = \frac{100 K_T R_T}{K_T R_T + 1} \quad (12)$$

ou

$$R_T = \frac{E}{(100-E)K_T} \quad (13)$$

A partir de uma eficiência desejada, calcula-se o tempo de detenção.

A Figura 5, apresenta um modo gráfico de resolução de expressão (13).

5.3.4 — Critério de Gloyna

Hermann e Gloyna apresentaram o primeiro modelo técnico do comportamento de lagoas facultativas, estabelecendo que o tempo de detenção para uma redução fixa de 90% a 35°C era de 3,5 dias.

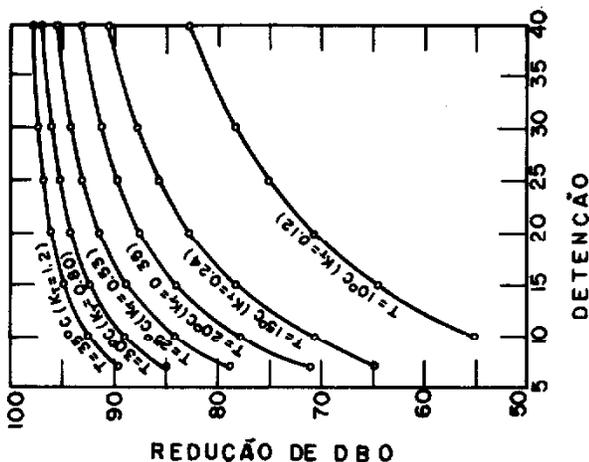


Fig. 5 — Redução ideal da DBO em tanques facultativos.

Em outra temperatura este tempo era dado pela expressão.

$$\frac{R_T}{R_{35}} = \theta^{(35-T)} \quad (14)$$

R_T — Tempo de detenção para 90% de redução de DBO na temperatura T .

R_{35} — Tempo de detenção para 90% de redução de DBO na temperatura de 35°C.

θ — Constante de Arrhenius (1,072)

Partindo da equação (14), desenvolveram um critério de projeto, tomando como base a temperatura média da água no mês mais frio, procurando obter com isto caracterizar uma espécie de média de situações desfavoráveis de funcionamento. Inicialmente, o valor para DBO_5 influente utilizado no cálculo era de 200mg/l, e efluente de 20mg/l (90% de redução). Para outros valores a expressão foi corrigida pela multiplicação do fator $Lo/200$.

Neste método, é feito a suposição que durante o verão a DBO efluente da lagoa é bem menor que no inverno. Tal fato parece nem sempre traduzir a realidade, pois observações experimentais na África do Sul retratam que pequenas variações foram encontradas na DBO efluente, ao longo destas duas estações.

SuwannaKarn em sua tese para a obtenção do título ph.D, trabalhando com 6 lagoas de estabilização em escala piloto, em temperaturas e vazões influentes diferentes, chegou a conclusão que os melhores valores de θ e K_T a 35°C seriam 1,085 e 1,2 respectivamente.

Pela simetria de R_T e K_T podemos escrever:

$$\frac{R_{T_0}}{R_T} = \frac{K_T}{K_{T_0}} = \theta^{-(T_0 - T)} \quad (15)$$

Marais e Shaw's em seu trabalho "A rational theory for the design of sewage stabilization ponds in Central and South Africa", verificaram que para um $R_{T_0} = 1,2$ e $T_0 = 35^\circ C$ com 90% de redução da DBO obteríamos de acordo com a equação (15) um tempo de detenção de 7,5 dias. Por esta razão na expressão atual de Gloyna é usado o valor 7 dias.

$$\begin{aligned} R_T &= R_{35}\theta^{-(35-T)} \\ R_T &= 7 \times 1,085^{(35-T)} \end{aligned} \quad (16)$$

Sendo

$$\begin{aligned} V &= \text{volume} \\ Q &= \text{vazão afluente} \\ R_T &= \frac{V}{Q} \end{aligned}$$

$$V = 7 \times Q(1,085)^{35-T}$$

Para uma DBO_5 diferente de 200mg/l, a expressão passa a ser:

$$V = \frac{7}{200} \times Q L_0 (1,085)^{35-T}$$

Por razões não explicadas pelo autor, a valor da DBO utilizada na sua expressão final é referida ao final do 1º estágio, ficando o volume acrescido de um coeficiente correspondente a relação existente entre L_a e L_0 que na prática se utiliza 1,46. Fica então, finalmente:

$$V = (3,5 \times 10^{-5}) N_C q_a \theta^{(35 - T_m)} \quad (17)$$

V = volume do tanque em m^3
 N_C = n° de pessoas contribuintes
 q = contribuição per capita (l/dia)
 θ = coeficiente de temperatura da reação: 1,085
 L_a = DBO afluente (final de 1º estágio)
 T_m = temperatura média da água no mês mais frio.

A Figura 6, a seguir mostra uma solução gráfica do problema.

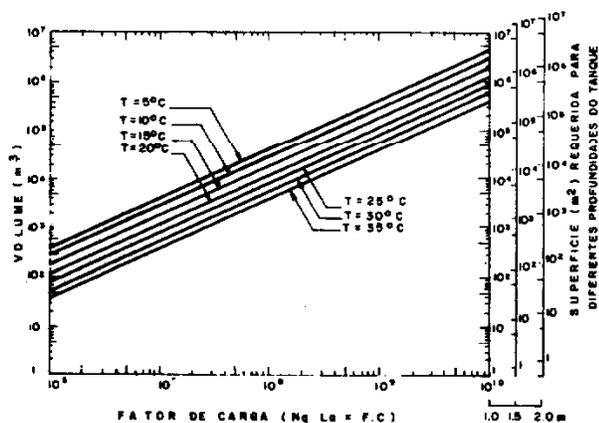
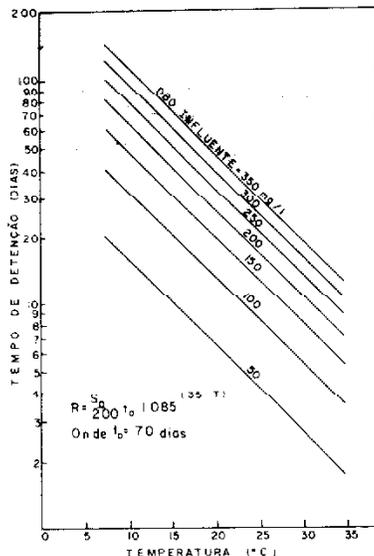


Fig. 6 — Cálculo da Área e Volume de uma lagoa Facultativa.

Segundo Gloyna uma diminuição nas taxas de aplicação de carga orgânica deve ser prevista quando as águas residuárias contiverem mais de 500mg/l de ion SO_4^{2-} e mais de 7mg/l de ion S^{2-} . Um aumento de área deverá também ser considerado para esgotos de baixa degradabilidade ou que possuem substâncias tóxicas para as algas.

Incluindo estes fatores sua expressão passa a ser:

$$V = (3,5 \times 10^{-5}) \times N_q \cdot La \theta^{(35-T)} \times f \times f' \quad (18)$$



A Figura 7, dar uma outra opção de cálculo gráfico da teoria em questão.

Tabela 7 — Concentrações de substâncias tóxicas que reduzem a produção de clorofila em 50%

COMPOSTO	CONCENTRAÇÃO TÓXICA	COMPOSTO	CONCENTRAÇÃO TÓXICA
Ácido Butanoico	340	Octanol	250
Ácido Butenoico	280	Ácido Octanoico	220
Ácido Etanoico	350	Ácido Pentanoico	280
Anídrido Etanoico	360	Ácido Propanoico	250
Etanol	27,200	Ácido 2, Metil Propanoico	345
1, Butanol	8,500	Ácido Propenoico	120
Ácido Heptanoico	180	Ácido Sulfanílico	970
Heptanol	525	Fenol	1,060
Ácido Hexanoico	350	Cresol	800
Ácido Metanoico	220	DDT em Xileno	120
Ácido Metoxietanoico	580		

- 1) Mistura instantânea e completa com o DBO da lagoa igual ao DBO efluente.
- 2) Degradação é uma reação de 1ª ordem com uma constante independente da temperatura e tempo de detenção.
- 3) Não há perda por infiltração.
- 4) Não há redução da DBO influente por sedimentação.

Onde:

f = fator de toxicidade para as algas (1 — esgoto doméstico)
 f' = efeito do ion sulfato (1 para concentrações de $SO_4^{2-} = 4.500 \text{ mg/l}$)

Outros compostos que afetam o conteúdo de clorofila das algas com suas concentrações tóxicas são mostradas na Tabela 7

5.3.5 — Critério Sul Africano

5.3.5.1 — Modelo Cinético

Baseado no fato de que pequenas variações foram observadas na DBO5 efluente das lagoas facultativas ao longo das estações do ano, Marais e Shaw na África do Sul propuseram um modelo cinético baseado num reator de mistura continua com cinéticas de 1ª ordem, cuja constante de reação não dependia da temperatura ($K = 0,17$). Gloyna por sua vez em sua teoria afirmava que durante o verão a DBO5 efluente é bem menor que no inverno. Ambas as teorias são aplicáveis desde que uma escolha adequada do instante seja feita.

Marais, mostrou que as duas teorias são casos particulares de uma teoria mais completa, na qual a redução na flutuação da DBO5 efluente era devido a camada de lodo.

A seguir é mostrado a incorporação do efeito do lodo na teoria cinética e o desenvolvimento de um procedimento de projeto, através de modelos de complexidade crescentes.

Modelo 1

Suposições:

Sendo:

- L_i = DBO5 influente (mg/l)
- L = DBO5 efluente ou da lagoa (mg/l)
- Q_i = Vazão influente (m^3/dia)
- Q_e = Vazão efluente (m^3/dia)
- V = Volume da lagoa (m^3)
- R_i = Tempo de detenção baseado na vazão influente (dia)
- R_e = Tempo de detenção baseado na vazão efluente (dia)
- K = Constante de degradação (dia^{-1})

Marais e Shaw estabeleceram a seguinte equação diferencial.

Em regime de equilíbrio (Steady State), P_i , R_i e R_e constante.

$$\frac{dL}{dt} = 0$$

obtemos:

$$L = \frac{L_i}{KR_i + \frac{R_e}{R_i}} \quad (19)$$

Desprezando fatores como evaporação e infiltração ou seja admitindo que Q_i seja igual a Q_e teremos:

$$R_i = R_e$$

e

$$L = \frac{L_i}{KR_i + 1} \quad (20)$$

Em lagoas em série, onde:

R_n = tempo de detenção da n ésima lagoa

L_n = DBO_5 efluente da n ésima lagoa.

Teremos:

$$L_1 = \frac{L_i}{KR_1 + 1}$$

$$L_2 = \frac{L_1}{KR_2 + 1} = \frac{L_i}{(KR_2 + 1)(KR_1 + 1)}$$

$$L_r = \frac{L_i}{\prod_{n=1}^r (KR_n + 1)} \quad (21)$$

Se os tempos de detenção forem iguais, ou seja:

$$R_1 = R_2 \dots R_n = R$$

$$L_n = \frac{L_i}{(KR + 1)^n} \quad (22)$$

No caso de um tempo de detenção total constante t , ou seja $nR = t$; $R = t/n$, resultará:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} L = L_i e^{-Kt} \quad (23)$$

Modelo 2

Idêntico ao modelo 1, exceto pela suposição 2 que passa a ser.

2) Degradação é uma reação de 1ª ordem cuja constante de reação depende da temperatura, de acordo com a Lei de Arrhenius.

Teremos então:

$$L = L_i$$

$$K_T R + 1$$

sendo,

$$K_T = K_{T_0} \theta^{-(T_0 - T)} \quad (24)$$

Onde obteve-se valores de:

$$\theta = 1,085$$

$$K_{T_0} = 1,2$$

$$T_0 = 35^\circ\text{C}$$

Este modelo estabelece o comportamento cinético da fração líquida da lagoa independente da camada de lodo, integrando as teorias de Hermamm e Gloyna e de Marais e Shaw através da simetria entre R e K .

$$\frac{R_{T_0}}{R_T} = \frac{K_T}{K_{T_0}} \theta^{-(T_0 - T)}$$

que com,

$$K = 1,2$$

$$T_0 = 35^\circ\text{C}$$

e para uma redução de 90% da DBO_5 , obtém-se.

$$R_{35} = 7,5 \text{ dias}$$

Hermamm e Gloyna, como citado anteriormente deram um valor de R_{35} 3,5 dias, sendo que na sua expressão atual o valor usado é de 7 dias.

Modelo 3

Este modelo leva em conta a influência do lodo, incorporando na equação diferencial, uma expressão correspondente a sua degradação.

Suposições.

1) A degradação do lodo é uma reação de 1ª ordem.

2) A DBO deve ser medida para o final do 1º estágio. Embora isto não seja essencial, simplifica por exemplo o cálculo da taxa de demanda de oxigênio. Além do mais a DBO_5 depende da temperatura, havendo portanto, necessidade de uma boa padronização do teste, enquanto a DBO_u é pouco sensível. O problema ficará restrito ao tempo necessário para a realização do teste, que na prática pode ser substituído pela multiplicação de coeficientes determinados experimen-

talmente. No caso de esgotos domésticos a DBO_u é aproximadamente 1,46 DBO_5 .

3) Uma fração, i_p , da DBO_u influente, L_{ui} , é dispersada no líquido enquanto a fração restante i_s , sedimenta como lodo.

4) A mistura é instatânea e completa resultando que, a DBO da lagoa é igual a DBO efluente.

5) As constantes de reação K para o líquido e K_s para o lodo são dependentes da temperatura de acordo com a expressão.

$$K_T = K_{T_0} e^{-c(T_0-T)} \quad (25)$$

onde,

$$\theta = e^c$$

6) Uma fração s_p , proveniente do lodo devido a fermentação retorna ao líquido da lagoa, enquanto que a fração restante s_g , deixa o sistema na forma gasosa.

As equações diferenciais a seguir descrevem o modelo.

a) Taxa de mudança na massa de lodo, S_t .

$$\frac{dS_t}{dt} = -K_s S_t + i_s L_{ui} (\gamma Q) \quad (26)$$

onde,

K_s = constante de reação do lodo

S_t = massa total do lodo em DBO

γ = massa por unidade de volume do líquido a lagoa (1 Kg/m³, 62,4 lb/ft³, 10 lb/Imp gal)

b) Taxa de evolução do gás proveniente do lodo.

$$\frac{dV_g}{dt} = C_v s_g K_s S_t \quad (27)$$

C_v = volume do gás liberado por unidade de massa de DBO destruída.

c) Taxa de mudança de DBO, L_u , na lagoa.

A mudança de DBO no tempo dt é igual:

— a redução devido a ação degradativa na lagoa e perda no efluente;

— ao aumento devido a fração influente, i_p ;

— ao aumento devido a fermentação.

A equação abaixo representa os três fenômenos.

$$\frac{dL_u}{dt} = - \left[K + \frac{Q_e}{V} \right] L_u + i_p \frac{L_{ui} Q_i}{V} + \frac{S_p K_s S_t}{V} \quad (28)$$

lembrando que,

$$s_p + s_g = 1$$

e no equilíbrio,

$$\frac{dS_t}{dt} = 0$$

$$\frac{dL_u}{dt} = 0$$

A equação (23) se reduz a

$$S_t = i_s L_{ui} Q / K_s$$

Com $Q_e = Q_i$ e $R_i = R_e = R$ a equação (28) se reduz.

$$L_u = \frac{L_{ui}}{KR + 1} (i_p + s_p i_p) \quad (29)$$

A equação (29) tem pouco valor prático devido a temperatura flutuar ao longo das estações do ano.

O oxigênio utilizado é dado pela relação.

$$Y = Lu (1 - e^{-Kt}) + K't \quad (30)$$

onde

K' = taxa de consumo de oxigênio pelas algas
 t = tempo em dias

A taxa de utilização de oxigênio, r é dada por.

$$r = \frac{dY}{dt} = Lu K e^{-Kt} + K' \text{ (mg/l dia)} \quad (31)$$

Para $t = 0$, a equação (31) dar a taxa em qualquer tempo zero ou seja no tempo que a amostra foi recolhida.

$$r = (Lu K + K') \text{ mg/l dia}$$

O consumo total de oxigênio na lagoa por dia será:

$$\frac{r V / \gamma}{10^6} \quad \text{(lb ou Kg)}$$

Onde,

V = volume da lagoa em galões ou m³
 γ = peso específico (lb/gal; Kg/m³)

Poucas informações são encontradas na literatura, para i_p, i_s, s_p e s_g . Tomando como base tanques de sedimentação e levando-se em conta os longos períodos de detenção das lagoas um valor de $i_s = 0,6$ parece ser provavelmente aceitável.

Após várias tentativas de obtenção da solução das equações (26) e (27) em um computador os melhores resultados obtidos para s_p e s_g foram 0,4 e 0,6 respectivamente.

Já para K_s e θ - obteve-se os valores de $K_{20} = 0,002$; $c = 0,3$ a 20°C ficando a equação (25), assim.

$$K_s = 0,002 e^{-0,3(20-T)} \quad (32)$$

$$K_s = 0,002 \cdot 1,35(T-20) \quad (33)$$

Para a parte líquida a taxa da degradação pode ser determinada usando os coeficientes $\theta = 1,085$; $K_{35} = 1,2$ e $T = 35^\circ\text{C}$, ficando então.

$$K = 1,2 \times 1,085(T-35) \quad (34)$$

Neste ponto é bom salientar que a respiração das algas tende a tornar obscura a DBO das bactérias. Após uma série de testes foi verificado que, a DBO total incluindo as algas (DBOT), é aproximadamente 3 vezes a DBO devido a poluição, ou em outras palavras 2/3 da DBOT é devido as algas.

Quando a temperatura cai, até 15°C esta relação continua com o valor 3, e para 0°C toma o valor 1. Entre 15 e 0°C , o DBOT é determinada pela expressão.

$$DBOT_T = (DBOT_{15} - DBO) \cos\theta + DBO \quad (35)$$

Bactéria Bactéria

onde,

$$\cos\theta = (15-T) \frac{\pi}{30} \quad (0 \leq T \leq 15) \quad (36)$$

θ - em radiano

5.3.5.2 — Comportamento Dinâmico e Projeto

Embora de grande importância dados como temperatura do líquido e do lodo na lagoa; geralmente não estão diretamente disponíveis.

Qualquer procedimento de projeto deve ser fundamentado em fatores que poderão ser obtidos pelo projetista. Além do mais, eles (projetistas) somente se interessam por métodos simples que lhes assegurem um comportamento adequado da lagoa debaixo de condições críticas.

A seguir é feita uma análise de várias condições assumidas, fazendo-se uma relação dos pontos citados para que se possa obter formas ou processos simplificados de projeto.

Dados meteorológicos do ar, fornecidos por institutos governamentais (no nosso caso o IBGE) geralmente incluem três valores médios mensais, média máxima, média e média mínima.

A temperatura média máxima do ar é aproximadamente a mesma média máxima da superfície da lagoa. Este fato pode ser visto na **Figura 8**.

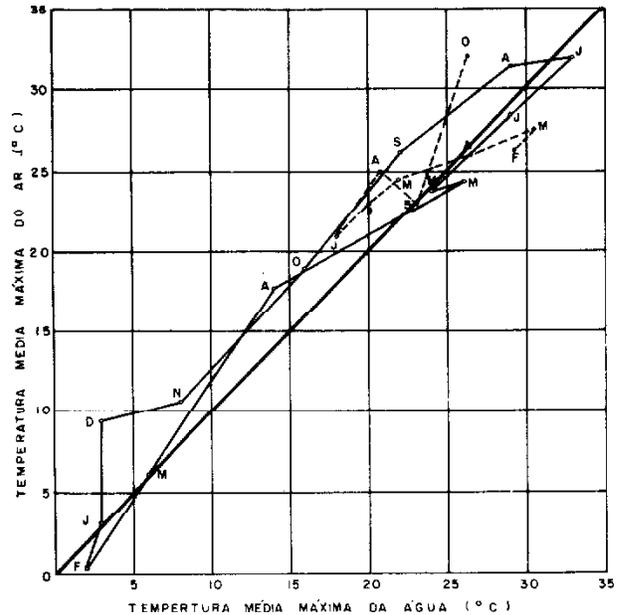


Fig. 8 — Relação entre a temperatura média máxima do ar e a da superfície das lagoas.

Já a temperatura do lodo pode ser obtida através da relação.

$$T_s = 0,777 T_T + 0,89 \quad (37)$$

ou aproximadamente,

$$T_s = 25/32 T_T \quad (38)$$

onde,

T_s = temperatura do lodo ($^\circ\text{C}$)

T_T = temperatura máxima diária da superfície ($^\circ\text{C}$)

Esta equação é evidenciada na **Figura 9** a seguir.

Normalmente a variação da temperatura do ar durante o ano se aproxima de uma senoide, o mesmo acontecendo para a média máxima.

Ora, se os valores mínimos e máximos das médias máximas são conhecidos, podemos traçar a curva obtendo-se com isto a temperatura máxima da superfície e a do lodo em qualquer tempo, e conseqüentemente a temperatura média da lagoa.

As Figuras (10) e (11), ilustram o que foi citado acima.

Após a definição dos parâmetros básicos de trabalho, Marais desenvolveu um programa de computação para determinar o comportamento da lagoa debaixo de diferentes níveis e variações cíclicas de temperatura.

A partir de informações como DBO_5 influente, volume da lagoa, profundidade e temperatura máxima e mínimas das médias máximas

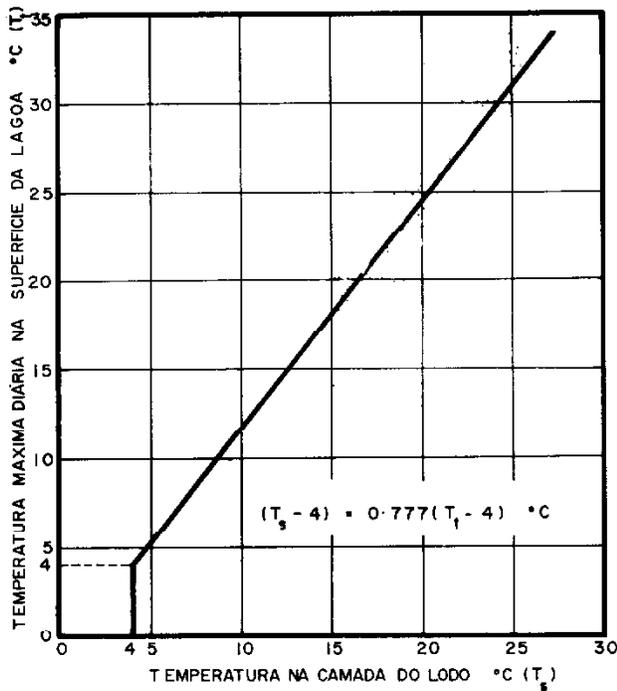


Fig. 9 — Relação entre a temperatura máxima diária da superfície da água e a temperatura média do lodo

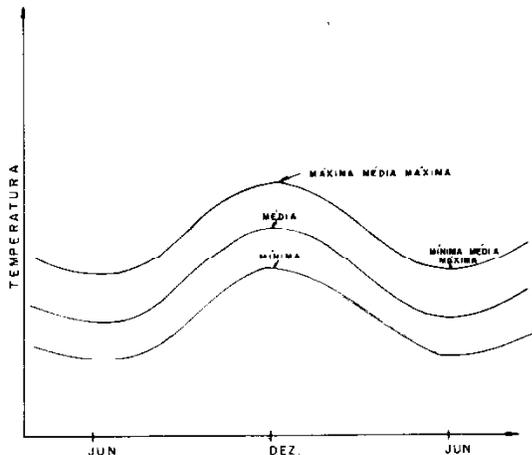


Fig. 10 — Temperaturas fornecidas por institutos governamentais.

Do ar, foram calculadas temperaturas do lodo e da lagoa, taxas de degradação, DBO no líquido e no lodo, e demanda de oxigênio. O programa reproduziu entre outros fatores as várias temperaturas, constantes de degradação, DBO5 bacteriológico proveniente da fração influente que se destina diretamente ao líquido e a da realimentação do lodo, DBO5 total (algas e bactérias).

Como pode ser visto na Fig. 12, o equilíbrio é alcançado após alguns anos, (2 a 20) dependendo da temperatura. Segundo Marais este fato serve como aviso, contra a prática de serem feitos testes num comportamento de uma lagoa, após sua inauguração, pequenos períodos de funcionamento ou mesmo após uma mudança na sua carga influente.

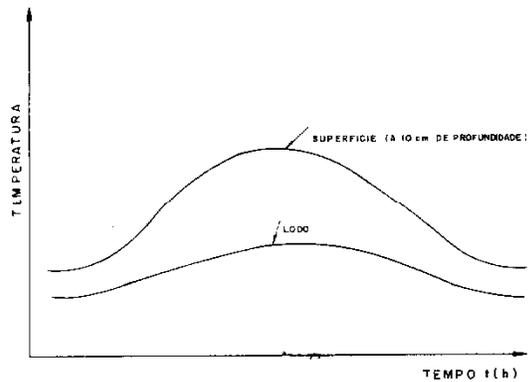


Fig. 11 — Temperatura máxima média da superfície (profundidade 10cm), e do lodo.

A seguir é apresentado de uma forma simplificada, o procedimento de projeto recomendado por Marais.

$$|R = \left(\frac{|L_o}{|L_m} - 1 \right) / |K \quad (39)$$

L_m = máximo DBO5 (mg/l)

L_o = DBO5 influente (mg/l)

K = constante de degradação equivalente (dia⁻¹)

O problema agora resume-se em decidir, a que nível a lagoa pode ser carregada, sem se tornar anaeróbica. Marais e Shaw, propuseram que a DBOT máximo não excede a:

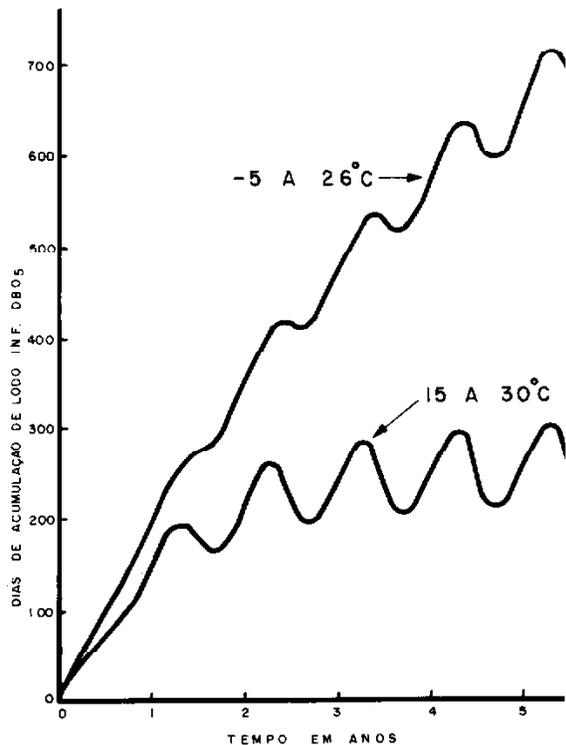
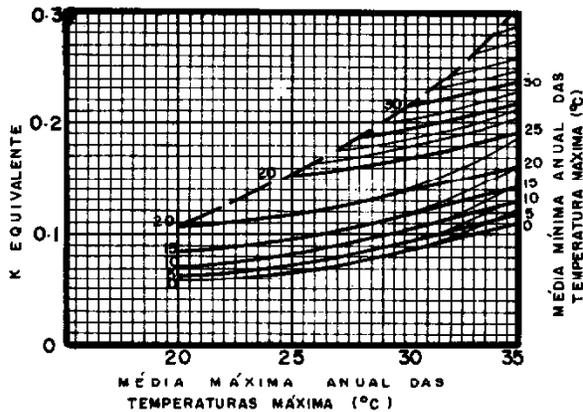


Figura 12 — Crescimento da Massa do Lodo numa lagoa de estabilização.



A Figura 13, apresenta um gráfico que nos permite o cálculo da constante equivalente. Como valor genérico é utilizado $K_e = 0,17 \text{ dia}^{-1}$.

onde,

d = profundidade da lagoa em metros

$$L_m = \frac{700}{2d + 8} \quad (40)$$

Alguns autores como Meiring, Drews, Van Eck e Stander recomendam a expressão:

$$L_m = \frac{600}{2d + 8} \quad (41)$$

5.3.6 — Um Exemplo

Dados:

- População: 10.000 habitantes
- Contribuição per capita 54g/dia, 180 l/dia
- DBO₅ influente — 300mg/l
- Temperatura média da água no mês mais frio: 24°C
- Temperatura média do ar no mês mais frio: 22°C
- Média das temperaturas máximas no mês mais frio: 28°C
- Média das temperaturas máximas no mês mais quente: 30°C
- Latitude do local: 10°

5.3.6.1 — Critério Experimental

Consiste como vimos, na aplicação de uma taxa experimental. Valor normal para o centro e norte do Brasil, 150 — 300 Kg DBO₅/ha. dia.

Utilizaremos: 225Kg DBO₅/ha.dia

— Carga aplicada

$$54 \times 10.000 = 540.000 = 540 \text{Kg DBO}_5/\text{dia}$$

— Área da lagoa

$$\frac{540}{225} = 2,4 \text{ha.}$$

— Profundidade

usual — 1,5 a 2,0m
utilizaremos — 1,7m

— Volume

$$24.000 \times 1,7 = 40.800 \text{m}^3$$

— Tempo de detenção

$$\frac{40.800}{0,18 \times 10.000} = 22,7 \text{ dias}$$

5.3.6.2 — Critério Racional de Oswald

Temos que:

- DBO₅ = 300mg/l
- Carga aplicada = 540Kg/dia
- % do sol no horizonte no mês mais desfavorável = 48% (obtida da Figura 4)
- S₁ valor provável da energia solar visível mínima — 168 langley (obtida da Tabela 4)
- F₁ = 3,9
- F₂ = 5,1
- F₃ = 0,99
- $F = \frac{F_1 + F_2 \times F_3}{2}$

Valores obtidos da Tabela 5

$$F = \frac{3,9 + 5,1 \times 0,99}{2} = 4,46$$

— Co = 0,196 FS

$$C_o = 196 \times 4,46 \times 168 = 146,8 \text{Kg DBO}_5/\text{ha.dia}$$

— Área necessária

$$\frac{540}{146,8} = 3,68 \text{ha}$$

— Profundidade

utilizaremos: 1,7m

— Volume

$$36.800 \times 1,7 = 63.560 \text{m}^3$$

— Tempo de detenção

$$\frac{63.560}{0,18 \times 10.000} = 34,8 \text{ dias}$$

— Taxa de aplicação superficial

$$\frac{540}{3,68} = 146,7 \text{Kg DBO}_5/\text{ha}$$

5.3.6.3 — Critério Racional Teórico

Estabelecendo-se uma eficiência de 90% teremos:

$$R_T = \frac{E}{(100-E) K_T}$$

$$K_T = 0,49 \text{ (24°C)}$$

$$R_T = \frac{90}{(100-90) \times 0,49} = 18,4 \text{ dias}$$

— Volume

$$18,4 \times 0,18 \times 10.000 = 33.120 \text{m}^3$$

— Área

$$\begin{aligned} &\text{Profundidade} = 1,7\text{m} \\ &\frac{33.120}{1,7} = 1,95\text{ha} \end{aligned}$$

— Taxa de aplicação superficial

$$\frac{540}{1,95} = 277 \text{Kg DBO}_5/\text{ha}$$

5.3.6.4 — Critério de Gloyna

$$V = (3,5 \times 10^{-5}) N_q L_a \theta^{-(35-T_m)}$$

$$N = 10.000 \text{hab.}$$

$$q = 180 \text{ l/dia}$$

$$L_a (\text{DBO}_{11}) = 300 \times 1,46 = 438 \text{mg/l}$$

$$\theta = 1,085$$

$$T_m = 24^\circ\text{C}$$

$$V = (3,5 \times 10^{-5}) \times 10.000 \times 180 \times 438 \times 1,085^{35-24}$$

$$V = 67.693 \text{m}^3$$

— Área

$$\begin{aligned} &\text{Profundidade} = 1,7\text{m} \\ &\frac{67.693}{1,7} = 3,98\text{ha} \end{aligned}$$

— Tempo de detenção

$$\frac{67.693}{1.500} = 37,6 \text{ dias}$$

— Taxa superficial aplicada

$$\frac{540}{3,98} = 135,7 \text{Kg/DBO}_5.\text{ha}$$

5.3.6.5 — Critério Sul Africano

$$L_m = \frac{600}{2d + 8}$$

$$L_m = \frac{600}{2 \times 1,7 + 8} = 52,4 \text{mg/l}$$

$K = 0,195 \text{ dia}^{-1}$ (condições aproximadas no nordeste)

$$R = \left(\frac{L_0}{L_m} - 1 \right) / K$$

$$R = \left(\frac{300 - 1}{52,4} \right) / 0,195 = 24,2 \text{ dias}$$

— Volume

$$1.800 \times 24,2 = 43.560 \text{m}^3$$

— Área

$$\begin{aligned} &\text{Profundidade} = 1,70\text{m} \\ &\frac{43.560}{1,7} = 2,56\text{ha} \end{aligned}$$

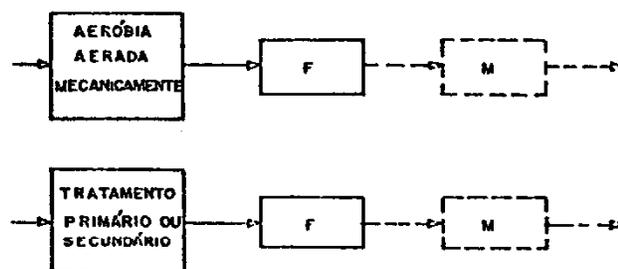
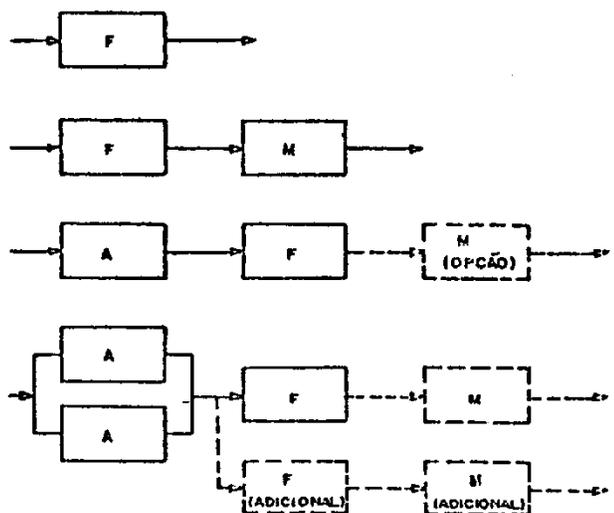
— Taxa de aplicação superficial

$$\frac{540}{2,56} = 211 \text{Kg DBO}_5/\text{ha}$$

5.3.6.6 — Comparação Entre os Processos

A Tabela 8, a seguir apresenta um resumo dos resultados obtidos.

Tabela 8 — Taxas e tempos de detenção obtidos em diversos processos.		
Processo	Tempo de Detenção (dias)	Taxa de Aplicação Superficial Kg DBO ₅ /ha.dia
Experimental	22,7	225
Racional de Oswald	34,8	146,7
Racional Teórico	18,4	277
Gloyna	37,6	135,7
Sul Africano	24,2	211



A = LAGOA ANAERÓBICA
 F = LAGOA FACULTATIVA
 M = LAGOA DE MATURAÇÃO

Fig. 14 — Arranjos típicos de lagoas de estabilização

O processo Sul Africano parece ser o mais racional. Além do mais como foi citado anteriormente existente uma grande semelhança entre as condições climáticas do Brasil e as do País onde foram feitas as pesquisas que originaram a formulação teórica do referido processo.

De qualquer forma no dimensionamento é interessante que seja feita uma comparação entre os diversos critérios conhecidos.

5.4 — Lagoas de Maturação

As lagoas de maturação têm como finalidade principal purificar os efluentes secundários no sentido de se obter uma grande redução bacteriológica

Tem como parâmetros de dimensionamento usual.

Tempo de detenção: 7 dias
 Profundidade: 1 m

No caso do exemplo anterior.

Teríamos:

— Volume — $V = 1.800 \times 7 = 12.600 \text{m}^3$
 — Área — $\frac{12.600}{1} = 12.600 \text{m}^2 = 1,26 \text{ha}$

No item 6 a seguir é feito um estudo geral, mais apurado sobre a redução bacteriológica em lagoas de estabilização.

5.5 — Considerações Complementares

5.5.1 — Arranjos típicos

Em muitos casos é interessante a utilização de mais de um tipo de lagoa. Na Fig. 14, Gloyne apresenta os seguintes arranjos tipos, para tratamento com a utilização de lagoas de estabilização.

O conjunto em série de lagoas anaeróbicas e facultativas é conhecida entre nós como sistema Australiano.

5.5.2 — Projetos Complementares

Em todas as situações é recomendável o uso do tratamento preliminar composto de:

— Grade;

— Caixa de retenção de areia, associada a um medidor de vazão.

O medidor de vazão é imprescindível para que se possa realizar trabalho de pesquisa visando a obtenção de parâmetros para utilização em projetos.

Não serão apresentados aqui detalhes destas unidades por se tratarem de dispositivos largamente empregados em outros tipos de tratamentos.

O dispositivo de entrada deve ficar o mais distante possível do de saída, para que se minimize o problema de curto-circuito.

A tubulação de entrada preferivelmente deverá ser área apoiada sobre pilares.

Por sua vez a caixa de saída, deverá possuir vertedor ajustável, com a finalidade de regular o nível do líquido da lagoa. A descarga de fundo deverá ser feita através de comportas, não sendo aconselhável a utilização de registros. Neste mesmo dispositivo deve ser colocada uma cortina retentora para os materiais sobrenadantes.

Detalhes do tratamento preliminar, dispositivos de entrada e saída, acessórios de limpeza, são apresentados no relatório de inspeção e avaliação de desempenho realizado em quatro lagoas do Interior do Estado de São Paulo, onde este autor participou juntamente com o técnico da CETESB, João Eudócio Farias.