
MEMORIAL DE CÁLCULO

2

CONTROLE INTERNO	Data	Nov/13					Notas
	Nº Folhas	31					
	Folhas Rev.						
	Responsável	Maíra					
	Verificação	Maíra					
	Aprovação	Francisco H.					
	Edição	0	1	2	3	4	

2 MEMORIAL DE CÁLCULO

O tratamento dos esgotos na ETE Catalão será feito por meio das seguintes unidades principais: gradeamento grosso, gradeamento fino, remoção de areia, reatores anaeróbios de fluxo ascendente, lagoas facultativas e desinfecção final.

As vazões e cargas orgânicas consideradas para o dimensionamento das unidades de ampliação e melhoria da ETE são apresentadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Vazões e cargas afluentes à ETE Catalão.

ANO	VAZÃO MÍNIMA (L/s)	VAZÃO MÉDIA (L/s)	VAZÃO MÁX. DIÁRIA (L/s)	VAZÃO MÁX. HORÁRIA (L/s)	CARGA ORGÂNICA (kg DBO/dia)
2012	59,5	96,1	110,8	155,5	2.250
2022	125,3	202,4	233,7	327,5	4.680
2032	146,0	236,7	273,2	382,9	5.371
2042	155,3	256,1	296,8	418,5	5.920

2.1 TRATAMENTO PRELIMINAR

Nos cálculos apresentados a seguir foram utilizadas as seguintes vazões de projeto:

- Vazão mínima afluente de 2012 = 59,5 L/s;
- Vazão média afluente de 2022 = 202,4 L/s;
- Vazão máxima horária afluente de 2042 = 418,5 L/s.

2.1.1 Calha Parshall

Foi utilizada Calha Parshall com garganta de 45,7 cm (1 ½'), a qual possui capacidade para vazões de 4,2 a 696,6 L/s.

2.1.1.1 Lâminas d'água máxima, média e mínima

O cálculo das lâminas d'água na seção de medição foi efetuado pela seguinte equação:

$$H = \sqrt[n]{\frac{Q}{K}}$$

Em que:

- H = Altura da lâmina d'água (m);
- Q = Vazão afluyente (m^3/s);
- K = Coeficiente em função da garganta da calha;
- n = Expoente adimensional (função da garganta da calha).

Para calha Parshall com largura da garganta de 45,7 cm, tem-se os seguintes valores de K e n :

- $K = 1,054$;
- $n = 1,538$.

Assim, foram obtidas as alturas das lâminas d'água:

- H_{\min} : Altura mínima da lâmina d'água = 0,15 m;
- $H_{\text{méd}}$: Altura média da lâmina d'água = 0,34 m;
- H_{\max} : Altura máxima da lâmina d'água = 0,55 m.

2.1.1.2 Rebaixamento da Calha Parshall

Entre o fundo da caixa de areia e o fundo da calha Parshall foi previsto um rebaixo, com a função de assegurar variações pequenas de velocidade do escoamento em função da vazão afluyente. Este rebaixamento foi calculado pela equação apresentada a seguir:

$$Z = \frac{(Q_{\max} \cdot H_{\min}) - (Q_{\min} \cdot H_{\max})}{Q_{\max} - Q_{\min}}$$

Em que:

- Z = Rebaixo da calha Parshall (m);
- Q = Vazão afluyente (m^3/s);
- H = Altura da lâmina d'água (m).

Portanto, o rebaixamento necessário para implantação da calha Parshall é:

- $Z = 0,09$ m.

2.1.1.3 Lâminas d'água no canal de acesso à calha Parshall

A lâmina d'água no canal de acesso à calha Parshall foi calculada pela seguinte expressão:

$$h_{canal} = H - Z$$

Em que:

- h_{canal} = Altura da lâmina d'água no canal de acesso à calha Parshall (m);
- H = Altura da lâmina d'água na seção de medição da calha Parshall (m);
- Z = Rebaixo da calha Parshall (m).

As alturas calculadas e os níveis d'água correspondentes ($N_{fundo} = 794,25$ m) são:

- $h_{min} = 0,07$ m \rightarrow $NA_{min} = 795,72$ m;
- $h_{med} = 0,25$ m \rightarrow $NA_{med} = 795,90$ m;
- $h_{max} = 0,46$ m \rightarrow $NA_{max} = 796,11$ m.

2.1.2 Caixa de Areia

Foram previstas duas caixas de areia retangulares paralelas, aeradas, do tipo ponte rolante, com remoção de areia por meio de sistema de *air lift*.

2.1.2.1 Parâmetros de Projeto

O dimensionamento das caixas de areia foi feito seguindo parâmetros recomendados por Metcalf & Eddy (2003), quais sejam:

- Tempo de detenção: 2 a 5 minutos (para vazão máxima afluyente);
- Relação comprimento/largura: 2,5:1 a 5:1;
- Relação largura/profundidade: 1:1 a 5:1.

2.1.2.2 Dimensionamento das Caixas de Areia

Inicialmente, adotou-se profundidade útil de 2,65 m. A partir deste valor e seguindo os parâmetros de projeto foram determinadas as demais dimensões, conforme apresentado a seguir:

- Profundidade útil = 2,65 m;
- Relação largura/profundidade adotada = 1,3/1,0;
- Largura calculada = 3,45 m → **Largura adotada = 3,50 m**;
- Relação comprimento largura adotada = 2,80:1,0;
- Comprimento calculado = 9,80 m → **Comprimento adotado = 9,80 m**.

Definido o dimensional das caixas, verificaram-se os tempos de detenção resultantes em duas situações: operação normal e operação sobrecarregada (com uma única caixa de areia em funcionamento). Para tanto, inicialmente estimou-se o volume útil de cada caixa de areia, conforme apresentado a seguir:

- Volume útil:
 - Volume da seção retangular = $9,80 \times 3,50 \times 0,55 = 18,87 \text{ m}^3$;
 - Volume da seção tronco-piramidal:
$$V_{pir} = \frac{h}{3} \cdot (A_B + \sqrt{A_B \cdot A_b} + A_b)$$
 - $AB = 3,50 \times 9,80 = 34,30 \text{ m}^2$;
 - $Ab = 0,40 \times 7,60 = 3,04 \text{ m}^2$;
 - $V_{pir} = \frac{2,10}{3} \cdot (34,30 + \sqrt{34,30 \cdot 3,04} + 3,04) = 33,29 \text{ m}^3$
 - Volume útil total = $18,87 + 33,29 = 52,16 \text{ m}^3$
- Operação Normal:
 - Número de caixas de areia em operação = 2 unidades;
 - Vazão máxima afluente a cada caixa de areia = 209,25 L/s;
 - Tempo de detenção = 4,2 minutos.
- Operação Sobrecarregada:
 - Número de caixas de areia em operação = 1 unidade;
 - Vazão máxima afluente a cada caixa de areia = 418,50 L/s;
 - Tempo de detenção = 2,1 minutos.

Como se vê, os tempos de detenção, tanto para operação normal, quanto para operação sobrecarregada, estão dentro da faixa recomendada.

2.1.2.3 Dimensionamento do Sistema de Aeração

Para aeração das caixas de areia foram previstos difusores de bolha grossa, instalados a uma altura de 0,60 m do fundo das caixas. Adotou-se taxa de ar de 0,45 m³/min.m, recomendada por Jordão & Pessoa (2005).

- Taxa de ar = 0,45 m³/min.m = 7,50 L/s.m;
- Comprimento da caixa de areia = 9,80 m;
- Vazão de ar necessária para uma caixa de areia = 73,50 L/s.

2.1.2.4 Lâminas D'água

Na saída das caixas de areia foram previstos vertedores retangulares. A lâmina sobre o vertedor é dada por:

$$Q = 1,838.L.h^{3/2}$$

Em que:

- Q = Vazão afluyente a uma caixa de areia (m³/s);
- L = Largura do vertedor (m);
- h = Altura da lâmina d'água (m).

Sabendo-se que a largura de cada vertedor é de 3,50 m, e que este se encontra na cota 796,20 m, tem-se:

- $h_{\min} = 0,03 \text{ m} \rightarrow NA_{\min} = 796,23 \text{ m};$
- $h_{\text{méd}} = 0,06 \text{ m} \rightarrow NA_{\text{méd}} = 796,26 \text{ m};$
- $h_{\max} = 0,10 \text{ m} \rightarrow NA_{\max} = 796,30 \text{ m}.$

2.1.3 Peneira

Foram previstas duas peneiras mecanizadas, do tipo *Step Screen*, sendo uma em cada canal de acesso às caixas de areia. A seguir são relacionadas suas principais características:

- Abertura = 6 mm;
- Ângulo de instalação = 60°;
- Perda de carga máxima (segundo o fornecedor): 0,20 m.

Somando-se o nível d'água no canal à jusante da peneira com a perda de carga do equipamento, tem-se a lâmina a montante do mesmo:

- $NA_{\min} = 796,43 \text{ m};$
- $NA_{\text{méd}} = 796,46 \text{ m};$
- $NA_{\max} = 796,50 \text{ m}.$

2.1.4 Grade Grossa

Serão implantadas duas grades grossas em paralelo, tendo-se adotado a utilização de grades de limpeza manual, com as seguintes características:

- Seção das barras da grade (s) = 3/8" x 2";
- Espessura das barras (l) = 9,53 mm;
- Espaçamento entre barras (d) = 50 mm;
- Inclinação das barras (a) = 60°.

Adotou-se largura de 0,65 m para cada canal em que as grades serão instaladas.

2.1.4.1 Número de Barras

O número de barras das grades foi estimado por meio da seguinte equação:

$$N = \frac{b - d}{l + d}$$

Em que:

- N = Número de barras na grade;
- b = Largura do canal de acesso à grade (mm);
- l = Espessura das barras (mm);
- d = Espaçamento entre barras (mm).

Adotando-se largura do canal de 0,65 m, tem-se:

- N = 10,08 barras;
- Adotado N = 10 barras.

2.1.4.2 Eficiência da Grade

A "eficiência da grade" é dada pela seguinte expressão:

$$E = \frac{d}{d + l}$$

Calculou-se a eficiência para a grade limpa e para a grade 50% obstruída.

- Grade limpa: E = 0,84;
- Grade 50% obstruída (d = 25 mm): E = 0,72.

2.1.4.3 Perda de Carga

A perda de carga pode ser calculada considerando-se o comportamento hidráulico equivalente ao do escoamento através de orifício. Assim, a fórmula simplificada é apresentada a seguir:

$$h_f = 1,43 \cdot \frac{V_g^2 - V_0^2}{2 \cdot g}$$

Em que:

- h_f = perda de carga (m);
- V_g = velocidade através da grade (m/s);
- V_0 = velocidade imediatamente a montante da grade (m/s);
- g = aceleração da gravidade (m/s²).

A velocidade através da grade foi calculada pela seguinte expressão:

$$V_g = \frac{Q}{b \cdot h_0 \cdot E}$$

Em que:

- V_g = velocidade através da grade (m/s);
- b = largura do canal da grade;
- h_0 = altura da lâmina d'água a montante da grade (m/s);
- E = eficiência da grade.

Já a velocidade a montante da grade foi calculada a partir dos dados do canal:

$$V_0 = \frac{Q}{b \cdot h_0}$$

Em que:

- V_0 = velocidade imediatamente a montante da grade (m/s);
- b = largura do canal da grade (m);
- h_0 = altura da lâmina d'água a montante da grade (m/s).

Para se determinar V_0 , V_g e h_f recorreu-se a uma iteração. Primeiramente foi adotado um valor para h_0 (como ponto de partida considerou-se a mesma altura que se tem a jusante da grade) e, a partir deste valor, calcularam-se V_0 , V_g e h_f . Em seguida, somou-se h_f com a altura a jusante e foi verificado se o valor resultou igual ao de h_0 adotado. No caso de os valores não serem idênticos, utilizou-se o valor resultante de h_0 e repetiu-se o processo, até que o valor de h_0 adotado fosse igual ao calculado. Tem-se que:

- $b = 0,65 \text{ m}$;
- $h_{\text{jusante}} = NA_{\text{montante da peneira}} - NA_{\text{fundo}} = 796,50 - 796,20 = 0,30 \text{ m}$.

— Grade limpa:

Inicialmente os cálculos foram feitos para a operação com grade limpa e vazão máxima.

Quadro 2.2 – Resultados das iterações para grade limpa.

h_0 (adot.) (m)	V_0 (m/s)	V_g (m/s)	h_f (m)	h_0 (calc.) (m)
0,302	1,07	1,27	0,03	0,336
0,336	0,96	1,14	0,03	0,330
0,330	0,98	1,16	0,03	0,331
0,331	0,97	1,16	0,03	0,331

Verifica-se a que a velocidade através da grade resulta menor que o limite de 1,20 m/s estabelecido por Norma.

– Grade suja:

Para grades de limpeza manual as recomendações de Norma são:

- Calcular a perda de carga para 50% de obstrução da grade;
- Adotar perda de carga mínima de 0,15 m.

O Quadro 2.2 apresenta os resultados obtidos considerando-se a grade 50% obstruída trabalhando com a vazão máxima:

Quadro 2.3 – Resultados das iterações para grade suja.

h_0 (adot.) (m)	V_0 (m/s)	V_g (m/s)	h_f (m)	h_0 (calc.) (m)
0,302	1,07	1,47	0,08	0,377
0,377	0,85	1,18	0,05	0,350
0,350	0,92	1,27	0,06	0,358
0,358	0,90	1,24	0,05	0,355
0,355	0,91	1,25	0,05	0,356
0,356	0,90	1,25	0,05	0,356

Como a perda de carga calculada resultou inferior a 0,15 m, foi considerada igual a este valor. A seguir são verificadas as velocidades para esta perda:

Quadro 2.4 – Velocidades resultantes para a perda de carga adotada.

h_0 (adot.) (m)	V_0 (m/s)	V_g (m/s)
0,45	0,71	0,98

2.2 ESTAÇÃO ELEVATÓRIA FINAL

2.2.1 Dados básicos

- Nível mínimo no poço de sucção: 794,34 m;
- Nível máximo no poço de sucção: 795,34 m;
- Cota do fundo da caixa de lançamento da linha de recalque: 810,30 m;
- Nível d'água na caixa de lançamento da linha de recalque: 811,19 m;
- Desnível geométrico máximo de recalque: $811,19 - 794,34 = 16,85$ m;
- Vazão de dimensionamento: 418,50 L/s.

2.2.2 Critérios e parâmetros de cálculo

a) Poço de sucção:

- Altura da faixa de operação: 1,00 m;
- Forma retangular;
- Tempo de detenção máximo igual a 30 minutos.

b) Equipamentos de recalque:

- Tipo das bombas: rotativas de deslocamento positivo;
- Quantidade em primeira etapa: 4 conjuntos de recalque, mais reserva instalada;
- Quantidade em final de plano: 5 conjuntos de recalque, mais reserva instalada.

c) Linha de recalque e barrilete:

Velocidades de escoamento limites para dimensionamento dos condutos definidas de acordo com a ABNT NBR 12.208, ou seja:

- Na sucção: $0,6 \text{ m/s} \leq v \leq 1,5 \text{ m/s}$;
- No recalque: $0,6 \text{ m/s} \leq v \leq 3,0 \text{ m/s}$.

Cálculo das perdas de carga localizadas com base no coeficiente “K” de cada peça, segundo a equação:

$$\Delta h_{loc} = \frac{K_{total} \cdot v^2}{2 \cdot g} = \frac{K_{total} \cdot Q^2}{2 \cdot g \cdot A^2}$$

Em que:

- Δh_{loc} = perda de carga localizada (mca);
- K_{total} = somatório dos coeficientes de perda de carga localizada de cada peça (adimensional);
- v = velocidade (m/s);
- g = aceleração da gravidade (m/s²);
- Q = vazão (m³/s);
- A = área da seção do tubo (m²).

Cálculo das perdas de carga distribuídas, empregando a Fórmula Universal:

$$\Delta h = 0,0827 \cdot f \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5}$$

Em que:

- Δh = perda de carga (mca);
- f = coeficiente da perda de carga (adimensional);
- L = comprimento (m);
- D = diâmetro hidráulico (m);
- Q = vazão (m³/s).

2.2.3 Dimensionamento

a) Alturas Extremas de Recalque:

- $H_{g_{\min}} = 811,19 - 795,34 = 15,85 \text{ m};$
- $H_{g_{\max}} = 811,19 - 794,34 = 16,85 \text{ m}.$

b) Verificação das Velocidades nas Tubulações de Sucção, Barrilete e Recalque:

O Quadro 2.5 apresenta as velocidades obtidas nas tubulações, para os diâmetros adotados:

Quadro 2.5 – Velocidades na sucção, barrilete e recalque.

Tubulação	Diâmetro (mm)	Velocidade (m/s)
Sucção	300	1,18
Barrilete	300	1,18
Barrilete	400	0,67
Barrilete	400	1,33
Barrilete	400	2,00
Recalque	600	1,48

Nota-se que as velocidades estão dentro das faixas recomendadas pela Norma.

c) Perdas de Carga na Sucção:

- Perdas de carga localizadas na sucção

A fórmula para o cálculo das perdas de carga localizadas na sucção foi ajustada para a consideração da fração de vazão veiculada. Assim, foi utilizada a seguinte expressão:

$$h_{f_{loc}} = \frac{K_{total} \cdot Q^2}{2 \cdot g \cdot A^2} = \frac{K_{total}}{2 \cdot g \cdot A^2} \cdot \left(\frac{Q}{5}\right)^2 = \frac{K_{total} \cdot Q^2}{50 \cdot g \cdot A^2}$$

A relação de peças previstas na sucção é apresentada no Quadro 2.6.

Quadro 2.6 - Relação de peças da sucção.

Peça	DN (mm)	Quantidade	K _{parcial}	K _{total}
Entrada	300	1	0,50	0,50
Curva 90º		2	0,40	0,80
Curva 45º		1	0,20	0,20
Total				1,50

Portanto, $h_L = 0,61 \cdot Q^2$

- Perdas de carga distribuídas na sucção

Quadro 2.7 – Perdas de carga distribuídas na sucção.

K = 0,1 mm	K = 0,2 mm
Q = 83,70 L/s	Q = 83,70 L/s
D = 300 mm → V = 1,18 m/s	D = 300 mm → V = 1,18 m/s
Reynolds = 355.234	Reynolds = 355.234
f = 0,0170	f = 0,0190
L = 9,61 m	L = 9,61 m
$\Delta h = 0,0827 \cdot f \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5}$	$\Delta h = 0,0827 \cdot f \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5}$
$\Delta h = 0,22 \cdot Q^2$	$\Delta h = 0,25 \cdot Q^2$

- Perdas de carga totais na sucção:

Para K = 0,1 mm ⇒ $h_f = 0,61 Q^2 + 0,22 Q^2 = 0,83 Q^2$

Para K = 0,2 mm ⇒ $h_f = 0,61 Q^2 + 0,25 Q^2 = 0,86 Q^2$

d) Perdas de Carga no Barrilete:

O cálculo das perdas de carga no barrilete foi realizado para três trechos distintos, em função do diâmetro da linha e da vazão veiculada.

- Perdas de carga localizadas no barrilete

As fórmulas para o cálculo das perdas de carga localizadas de cada trecho foram ajustadas para a consideração da fração de vazão veiculada. Assim, foram usadas as seguintes expressões:

Trechos 1 e 2: $h_{f_{loc}} = \frac{K_{total} \cdot Q^2}{2 \cdot g \cdot A^2} = \frac{K_{total}}{2 \cdot g \cdot A^2} \cdot \left(\frac{Q}{5}\right)^2 = \frac{K_{total} \cdot Q^2}{50 \cdot g \cdot A^2}$

Trecho 3: $h_{f_{loc}} = \frac{K_{total} \cdot Q^2}{2 \cdot g \cdot A^2} = \frac{K_{total}}{2 \cdot g \cdot A^2} \cdot \left(\frac{2}{5} \cdot Q\right)^2 = \frac{4 \cdot K_{total} \cdot Q^2}{50 \cdot g \cdot A^2}$

Trecho 4: $h_{f_{loc}} = \frac{K_{total} \cdot Q^2}{2 \cdot g \cdot A^2} = \frac{K_{total}}{2 \cdot g \cdot A^2} \cdot \left(\frac{3}{5} \cdot Q\right)^2 = \frac{9 \cdot K_{total} \cdot Q^2}{50 \cdot g \cdot A^2}$

Quadro 2.8 - Relação de peças do barrilete.

Peça	DN (mm)	Quantidade	K _{parcial}	K _{total}
Válv. de retenção	300	1	2,50	2,50
Reg. de gaveta aberto		1	0,20	0,20
Curva 90º		1	0,40	0,40
Subtotal				3,10
Tê, saída de lado	400	1	1,30	1,30
Subtotal				1,30
Tê, passagem direta	400	1	0,60	0,60
Subtotal				0,60
Tê, passagem direta	400	1	0,60	0,60
Curva 90º		1	0,40	0,40
Ampliação gradual		1	0,30	0,30
Subtotal				1,30
Total				6,30

Portanto, $h_L = 3,25 \cdot Q^2$

- Perdas de carga distribuídas no barrilete

Assim como realizado no cálculo das perdas de carga localizadas, para as perdas de carga distribuídas as fórmulas utilizadas também foram ajustadas para a consideração da vazão veiculada em cada trecho do barrilete de recalque. As expressões utilizadas são apresentadas nos Quadros 2.9 a 2.11, segundo cada trecho do barrilete.

Quadro 2.9 – Perdas de carga distribuídas no barrilete – Trecho 1.

K = 0,1 mm	K = 0,2 mm
Q = 83,70 L/s	Q = 83,70 L/s
D = 300 mm → V = 1,18 m/s	D = 300 mm → V = 1,18 m/s
Reynolds = 355.234	Reynolds = 355.234
f = 0,0170	f = 0,0190
L = 2,40 m	L = 2,40 m
$\Delta h = 0,0827 \cdot f \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5} = \frac{0,0827 \cdot f \cdot L}{D^5} \cdot \left(\frac{Q}{5}\right)^2$	$\Delta h = 0,0827 \cdot f \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5} = \frac{0,0827 \cdot f \cdot L}{D^5} \cdot \left(\frac{Q}{5}\right)^2$
$\Delta h = 0,06 \cdot Q^2$	$\Delta h = 0,06 \cdot Q^2$

Quadro 2.10 – Perdas de carga distribuídas no barrilete – Trecho 2.

K = 0,1 mm	K = 0,2 mm
Q = 83,70 L/s	Q = 83,70 L/s
D = 400 mm → V = 0,67 m/s	D = 400 mm → V = 0,67 m/s
Reynolds = 266.425	Reynolds = 266.425
f = 0,0169	f = 0,0185
L = 2,90 m	L = 2,90 m
$\Delta h = 0,0827 \cdot f \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5} = \frac{0,0827 \cdot f \cdot L}{D^5} \cdot \left(\frac{Q}{5}\right)^2$	$\Delta h = 0,0827 \cdot f \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5} = \frac{0,0827 \cdot f \cdot L}{D^5} \cdot \left(\frac{Q}{5}\right)^2$
$\Delta h = 0,02 \cdot Q^2$	$\Delta h = 0,02 \cdot Q^2$

Quadro 2.11 – Perdas de carga distribuídas no barrilete – Trecho 3.

K = 0,1 mm	K = 0,2 mm
Q = 167,40 L/s	Q = 83,70 L/s
D = 400 mm → V = 1,33 m/s	D = 400 mm → V = 1,33 m/s
Reynolds = 532.851	Reynolds = 532.851
f = 0,0159	f = 0,0177
L = 2,70 m	L = 2,70 m
$\Delta h = 0,0827 \cdot f \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5} = \frac{0,0827 \cdot f \cdot L}{D^5} \cdot \left(\frac{2 \cdot Q}{5}\right)^2$	$\Delta h = 0,0827 \cdot f \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5} = \frac{0,0827 \cdot f \cdot L}{D^5} \cdot \left(\frac{2 \cdot Q}{5}\right)^2$
$\Delta h = 0,06 \cdot Q^2$	$\Delta h = 0,06 \cdot Q^2$

Quadro 2.12 – Perdas de carga distribuídas no barrilete – Trecho 4.

K = 0,1 mm	K = 0,2 mm
Q = 251,10 L/s	Q = 251,10 L/s
D = 400 mm → V = 2,00 m/s	D = 400 mm → V = 2,00 m/s
Reynolds = 799.276	Reynolds = 799.276
f = 0,0155	f = 0,0174
L = 27,10 m	L = 27,10 m
$\Delta h = 0,0827 \cdot f \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5} = \frac{0,0827 \cdot f \cdot L}{D^5} \cdot \left(\frac{3 \cdot Q}{5}\right)^2$	$\Delta h = 0,0827 \cdot f \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5} = \frac{0,0827 \cdot f \cdot L}{D^5} \cdot \left(\frac{3 \cdot Q}{5}\right)^2$
$\Delta h = 1,22 \cdot Q^2$	$\Delta h = 1,37 \cdot Q^2$

Portanto, as perdas de carga distribuídas totais no barrilete de recalque são:

$$\text{Para } K = 0,1 \text{ mm} \Rightarrow h_D = 0,06 Q^2 + 0,02 Q^2 + 0,06 Q^2 + 1,22 Q^2 = 1,36 Q^2$$

$$\text{Para } K = 0,2 \text{ mm} \Rightarrow h_D = 0,06 Q^2 + 0,02 Q^2 + 0,06 Q^2 + 1,37 Q^2 = 1,51 Q^2$$

- Perdas de carga totais no barrilete

$$\text{Para } K = 0,1 \text{ mm} \Rightarrow h_f = 3,25 Q^2 + 1,36 Q^2 = 4,61 Q^2$$

$$\text{Para } K = 0,2 \text{ mm} \Rightarrow h_f = 3,25 Q^2 + 1,51 Q^2 = 4,76 Q^2$$

e) Perdas de Carga no Recalque:

- Perdas de carga localizadas no recalque

A relação das peças previstas no recalque é apresentada no Quadro 2.13.

Quadro 2.13 - Relação de peças do recalque.

Peça	DN (mm)	Quantidade	K _{parcial}	K _{total}
Tê, passagem direta	600	1	0,60	0,60
Curva 45º		2	0,20	0,40
Curva 11º15'		1	0,05	0,05
Curva 90º		1	0,40	0,40
Saída		1	1,00	1,00
Total				2,45

$$\text{Portanto, } h_L = 1,56 \cdot Q^2$$

- Perdas de carga distribuídas no recalque

Quadro 2.14 – Perdas de carga distribuídas na linha de recalque.

K = 0,1 mm	K = 0,2 mm
Q = 418,50 l/s	Q = 418,50 l/s
D = 600 mm → V = 1,48 m/s	D = 600 mm → V = 1,48 m/s
Reynolds = 888.085	Reynolds = 888.085
f = 0,0145	f = 0,0161
L = 300 m	L = 300 m
$\Delta h = 0,0827 \cdot f \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5}$	$\Delta h = 0,0827 \cdot f \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5}$
$\Delta h = 4,63 \cdot Q^2$	$\Delta h = 5,14 \cdot Q^2$

- Perdas de carga totais no recalque

Para K = 0,1 mm ⇒ $h_f = 1,56 Q^2 + 4,63 Q^2 = 6,19 Q^2$

Para K = 0,2 mm ⇒ $h_f = 1,56 Q^2 + 5,14 Q^2 = 6,70 Q^2$

f) Perdas de Carga Totais no Sistema

$$H_{Total} = h_{f_{suc}} + h_{f_{bar}} + h_{f_{rec}}$$

Para K = 0,1 mm ⇒ $H_{Total} = 0,83 Q^2 + 4,61 Q^2 + 6,19 Q^2 = 11,63 Q^2$

Para K = 0,2 mm ⇒ $H_{Total} = 0,86 Q^2 + 4,76 Q^2 + 6,70 Q^2 = 12,32 Q^2$

g) Altura Manométrica Total:

$$AMT = H_g + H_{Total}$$

Para K = 0,1 mm ⇒ $AMT_{mín.} = 15,85 + 11,63 Q^2$

Para K = 0,2 mm ⇒ $AMT_{máx.} = 16,85 + 12,32 Q^2$

Quadro 2.15 – Vazão x Altura manométrica total.

Q (l/s)	AMT mín (mca)	AMT méd (mca)	AMT máx (mca)
0,0	15,9	16,4	16,9
20,0	15,9	16,4	16,9
40,0	15,9	16,4	16,9
60,0	15,9	16,4	16,9
80,0	15,9	16,4	16,9
83,7	15,9	16,4	16,9
100,0	16,0	16,5	17,0
120,0	16,0	16,5	17,0
140,0	16,1	16,6	17,1
160,0	16,1	16,7	17,2
167,4	16,2	16,7	17,2
180,0	16,2	16,7	17,2
200,0	16,3	16,8	17,3
220,0	16,4	16,9	17,4
240,0	16,5	17,0	17,6
251,1	16,6	17,1	17,6
260,0	16,6	17,2	17,7
280,0	16,8	17,3	17,8
300,0	16,9	17,4	18,0
320,0	17,0	17,6	18,1
334,8	17,2	17,7	18,2
340,0	17,2	17,7	18,3
360,0	17,4	17,9	18,4
380,0	17,5	18,1	18,6
400,0	17,7	18,3	18,8
418,5	17,9	18,5	19,0
420,0	17,9	18,5	19,0

h) Dados Básicos para Especificação:

- Quantidade de bombas a serem instaladas: 1ª etapa = 5 unidades (4 + 1 reserva instalada);
2ª etapa = 6 unidades (5 + 1 reserva instalada);
- Vazão de cada bomba = 83,7 L/s = 301,3 m³/h;
- AMT máx = 19,0 mca;
- Altura de sucção = 4,2 m.

i) Equipamento Considerado para Efeito de Projeto:

Bomba:

- Tipo: rotativa de deslocamento positivo;
- Modelo de referência: bomba “Nemo” Modelo NM180SY01L04Z.

Motor:

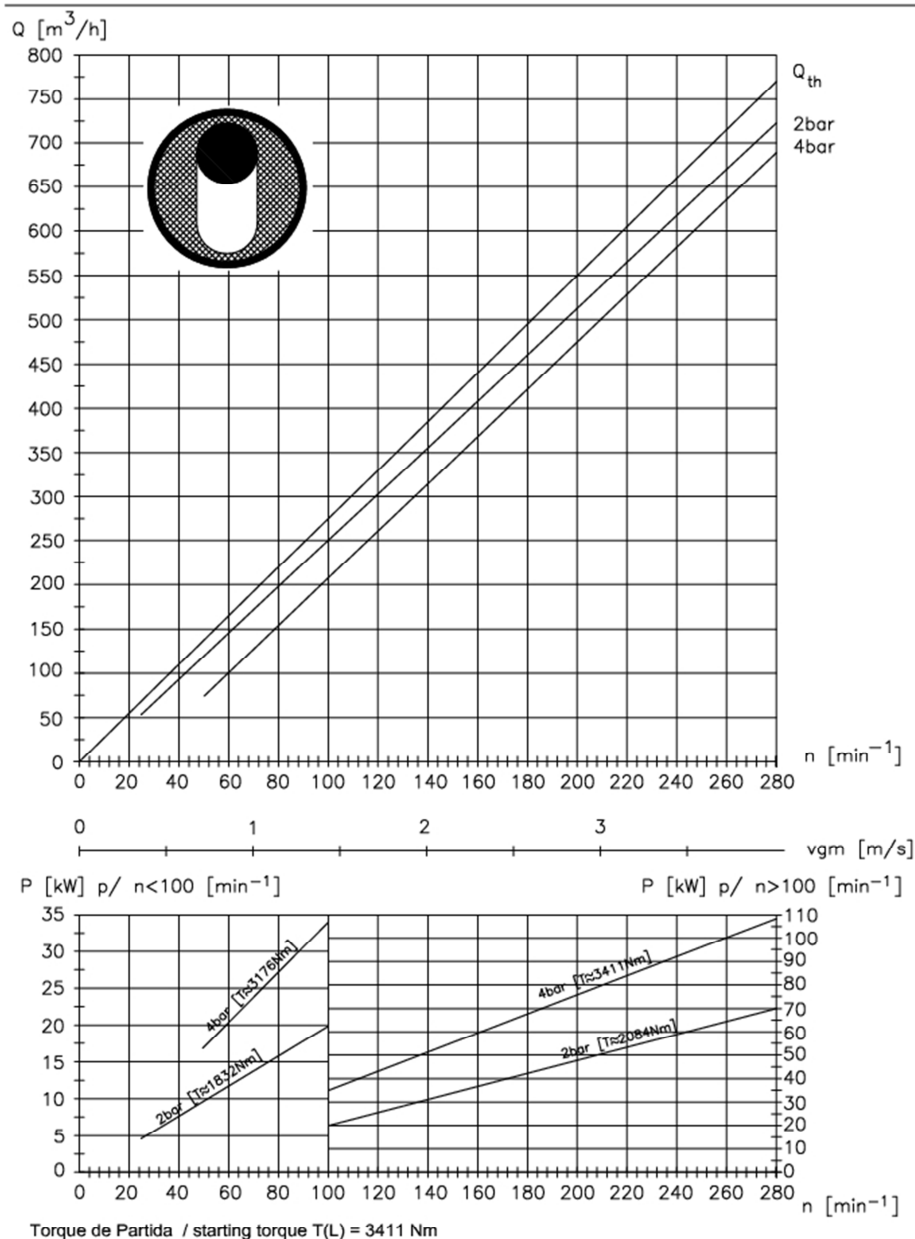
- Potência: 37 kW;
- Tensão: 380 V.

Curva característica:

NM180--01L

Curva Característica / Performance Curve
Material do Estator / elastomer quality: standard

NETZSCH



Valores válidos para Água (1 cP) a 20°C. Tolerância conforme VDMA 24284 (+10%/-5%).
Valid for water (1 cP) at 20°. Tolerances are in accordance with VDMA 24284 (+10%/-5%).

Rev.: 01/2011 Alterações Técnicas Reservadas / Technical changes reserved



www.netzsch.com.br

Figura 2.1 – Curva da bomba de referência.

j) Funcionamento do Sistema de Recalque:

	Vazão		A.M.T	Velocidade
1 bomba:	83,7 L/s =	5,02 m ³ /min ⇒	16,9 mca	0,3 m/s
2 bombas:	167,4 L/s =	10,04 m ³ /min ⇒	17,2 mca	0,6 m/s
3 bombas:	251,1 L/s =	15,07 m ³ /min ⇒	17,6 mca	0,9 m/s
4 bombas:	334,8 L/s =	20,09 m ³ /min ⇒	18,2 mca	1,2 m/s
5 bombas:	418,5 L/s =	25,11 m ³ /min ⇒	19,0 mca	1,5 m/s

Como a velocidade no tubo DN 600 para o funcionamento de uma bomba não atende ao valor mínimo especificado por norma, a operação deverá ser feita sempre com o mínimo de duas bombas em atividade.

k) Poço de Sucção:

- Volume Útil Mínimo (Vu_{\min}):

O volume útil é aquele compreendido entre os níveis máximo e mínimo de operação das bombas.

$$Vu_{\min} = \frac{Q \cdot t}{4}$$

Em que:

- Q = vazão mínima de recalque = 83,7 L/s = 5,02 m³/min (1 bomba ligada)
- t = tempo mínimo entre duas partidas = 10 min.

Assim, chega-se a:

$$Vu_{\min} = 12,56 \text{ m}^3.$$

- Volume Efetivo Máximo (Ve_{\max}):

O volume efetivo é aquele compreendido entre o fundo do poço de sucção e o nível médio de operação.

$$Ve_{m\acute{a}x} = Q_m \cdot t_d$$

Em que:

- Q_m = Vazão média afluyente (início de plano) = 96,10 L/s = 5,77 m³/min
- t_d = Tempo de detenção máxima de esgotos = 30 min.

Assim, chega-se a:

$$Ve_{m\acute{a}x} = 173,10 \text{ m}^3.$$

- Dimensões e Cotas do Poço de Sucção:
 - Nível de fundo: 793,53 m;
 - Nível d'água mínimo na elevatória: 794,34 m;
 - Nível d'água máximo na elevatória: 795,34 m;
 - Forma do poço: retangular;
 - Dimensões adotadas: 4,25 x 5,60 m;
 - Volume útil: 23,80 m³
 - Volume efetivo: 62,36 m³.

- Verificação do Tempo Máximo de Detenção (t_d):

$$t_d = \frac{Ve}{Q}$$

Em que:

- Ve = Volume efetivo (m³)
- Q = Vazão afluyente (m³/min).

Quadro 2.16 - Tempo Máximo de Detenção.

ANO	Q mínima		Q média		Q máxima	
	Q (m³/min)	td (min)	Q (m³/min)	td (min)	Q (m³/min)	td (min)
2012	3,57	17,47	5,77	10,81	9,33	6,68
2022	7,52	8,29	12,14	5,13	19,65	3,17
2032	8,76	7,12	14,20	4,39	22,97	2,71
2042	9,32	6,69	15,37	4,06	25,11	2,48

l) Verificação do NPSH:

$$NPSH_{disponível} = \pm H + \frac{Pa - Pv}{\gamma} \cdot 10 - h_f$$

Em que:

- +H = carga ou altura de água na sucção (entrada afogada) (m)
- -H = altura de aspiração (m)
- Pa = pressão atmosférica = 0,91 kg/cm²
- Pv = pressão de vapor = 0,02383 kg/cm² a 20° C
- γ = peso específico da água = 1 kg/dm³
- h_f = soma de todas as perdas de carga na sucção (mca) = 0,86 x Q²
- Q = vazão máxima = 0,4185 m³/s.

$$NPSH_{disponível} = - 4,20 + \frac{0,91 - 0,02383}{1,0} \cdot 10 - (0,86 \cdot 0,4185^2)$$

$$NPSH_{disponível} = 4,51 \text{ mca}$$

$$NPSH_{requerido} = 3,00 \text{ mca (bomba de referência).}$$

m) Verificação da necessidade de dispositivo antigolpe:

- Celeridade:

$$C = \frac{9.900}{\sqrt{48,3 + K \cdot \left(\frac{D}{e}\right)}}$$

Em que:

- D = diâmetro da adutora (m)
- e = espessura do tubo (m)
- K = Coeficiente baseado no módulo de elasticidade do material do tubo:
K = 1,0 para FºFº
K = 18,0 para tubos plásticos.

- Sobrepressão Máxima:

$$ha = \frac{C \cdot V}{g}$$

Em que:

- ha = aumento da pressão (mca);
- C = celeridade (m/s);
- V = velocidade média da água (m/s);
- g = aceleração da gravidade (9,81 m/s²).

Sobrepressão = **ha + hg < PM**, em que:

- hg = desnível geométrico máximo (mca);
- PM = pressão máxima admissível do tubo:
PM = 100 mca para PRFV – PN 10.

Vazão máxima recalçada (5 bombas em final de plano): 418,5 L/s = 25,11 m³/min;

Quadro 2.17 - Verificação de sobrepressão na linha de recalque.

Material	DN (mm)	e (mm)	K	C (m/s)	V (m/s)	hg (mca)	ha (mca)	Sobrepressão máx. (mca)
PRFV	600	13	18	334	1,48	16,85	50,38	67,23

Conforme apresentado no Quadro 2.17 vê-se que a sobrepressão máxima fica dentro da faixa de pressão máxima admissível para a tubulação em PRFV 600 mm.

2.3 REATORES ANAERÓBIOS

Foi prevista a implantação, em primeira etapa, de três módulos de reatores anaeróbios de fluxo ascendente (RAFA ou UASB), sendo cada módulo composto por dois reatores com volume de 1.000 m³ cada. Em final de plano deverá ser implantado mais um módulo, totalizando quatro módulos, ou oito reatores.

Para o dimensionamento do reator anaeróbio foram observados os seguintes parâmetros recomendados pelo PROSAB:

Quadro 2.18 – Parâmetros de dimensionamento do reator.

Critério / Parâmetro	Faixa de Valores (em função da vazão)		
	Para Q _{med}	Para Q _{max}	Para Q _{pico} ^(*)
Carga hidráulica volumétrica (m ³ /m ³ .d)	< 4,0	< 6,0	< 7
Tempo de detenção hidráulica (h)**	6-9	4-6	> 3,5- 4
Velocidade superficial do fluxo (m/h)	0,5- 0,7	0,9- 1,1	< 1,5
Velocidade das aberturas para o decantador (m/h)	< 2,0- 2,3	< 4,0- 4,2	< 5,5- 6,0
Taxas de aplicação superficial no decantador (m/h)	0,6- 0,8	< 1,2	< 1,6
Tempo de detenção hidráulica no decantador (h)	1,5- 2,0	> 1,0	> 0,6

Notas:(*) Picos de vazão com duração entre 2 e 4 horas. (**) Para temperatura do esgoto entre 20 e 26°C.

A seguir é apresentado o dimensionamento dos reatores para final de plano:

Número de reatores	8
Formato do reator	retangular
População total atendida	109.626 habitantes
Vazão média afluente (Q _{med})	22.127 m ³ /dia
Vazão máxima afluente (Q _{máx})	36.158 m ³ /dia
Carga orgânica diária (C)	5.920 kg DBO/dia
Tempo de detenção para a vazão média (T _{med})	8 horas (adotado)
Tempo de detenção para a vazão máxima (T _{max})	5 horas (adotado)

Volume de um reator para Qmed	921,96 m ³ /dia (= Q.Tmed)
Volume de um reator para Qmax	941,63 m ³ /dia (= Q.Tmax)
Volume útil adotado (V)	1.000 m ³
Altura líquida do reator (h)	4,50 m (adotado)
Altura livre adicional interna	0,20 m (adotado)
Altura interna total do reator	4,70 m
Área interna do reator (A)	222,22 m ² (A=V/h = 1000/4,5)
Comprimento interno do reator (c)	17,20 m (adotado)
Largura interna (L)	13,40 m (largura mínima =A/c)
Volume útil real (V _{real})	1.037,16 m ³ (h.c.L)
Carga orgânica volumétrica	0,71 kg DBO/ m ³ .dia (= [C/(8.V _{real})])
Área de influência por tubo de alimentação	2,50 m ² (adotado)
Número mínimo de tubos de alimentação	92,2 (= A/ área de influência)
Número mínimo de tubos adotado	96
DBO afluente ao reator (DBOar)	267,54 mg/L
Eficiência em termos de remoção de DBO (Er)	70 % (adotado)
DBO efluente do reator (DBOer)	80,26 mg/L (= DBOar.(1-Er))
Velocidade ascendente	0,50 m/h (= [Qmed / (8.A)]/24)
Número de coifas internas	4 (adotado)
Número de aberturas dos decantadores	8 (adotado)
Dimensão das aberturas dos decantadores	0,40 m (adotado)
Área total das aberturas dos decantadores (Aa)	55,04 m ²
Velocidade na abertura do decantador	2,09 m/h (= [Qmed / (8.Aa)]/24)
Área superficial dos decantadores (Ad)	167,18 m ²
Taxa de aplicação nos decantadores	0,69 m/h (= [Qmed / (8.Ad)]/24)
Tempo de detenção hidráulica no decantador	2,0 horas
Volume diário de biogás produzido por reator	217,4 m ³ /dia

2.4 LAGOAS FACULTATIVAS

Para verificação das capacidades de atendimento das lagoas facultativas existentes, foram verificados os tempos de detenção, as taxas de aplicação e as eficiências de remoção de DBO para as vazões médias de primeira etapa.

- Lagoa Facultativa 1:

- Largura média = 120 m;
- Comprimento = 255 m;
- Profundidade = 1,64 m;
- Área na altura da lâmina líquida (A1) = 30.600 m²;
- Área no fundo (A2) - adotando talude 1:2 = 28.183 m²;
- Volume útil (*) = 48.189 m³.

* Volume útil = $(H/3) \times (A1+A2+(A1.A2)^{0,5})$

- Lagoa Facultativa 2:

- Largura média = 115 m;
- Comprimento = 323 m;
- Profundidade = 1,87 m;
- Área na altura da lâmina líquida (A1) = 37.145 m²;
- Área no fundo (A2) - adotando talude 1:2 = 33.925 m²;
- Volume útil = 66.427 m³.

Considerou-se divisão de vazão proporcional à área de cada lagoa. Assim, para a Lagoa 1 considerou-se 45% da vazão total e, para a Lagoa 2, 55%.

Quadro 2.19 – Tempos de detenção e taxas de aplicação para o ano 2032 com duas lagoas.

Lagoa	Vazão Média Afluente (m³/dia)	Tempo de Detenção (dia)	Taxa de Aplicação (kgDBO/ha.dia)	Efic. Remoção de DBO (%)
Facultativa 1	9.203	5,2	237	61
Facultativa 2	11.248	5,9	239	64

Em seguida, a mesma verificação foi feita considerando vazão de segunda etapa (2042) e a implantação das duas lagoas facultativas futuras.

- Lagoa Facultativa 3:

- Largura média = 58 m;
- Comprimento = 291 m;
- Profundidade = 2,5 m;
- Área na altura da lâmina líquida (A1) = 16.878 m²;
- Área no fundo (A2) - adotando talude 1:2 = 13.488 m²;
- Volume útil = 37.878 m³.

- Lagoa Facultativa 4:

- Largura média = 90 m;
- Comprimento = 262 m;
- Profundidade = 2,5 m;
- Área na altura da lâmina líquida (A1) = 23.580 m²;
- Área no fundo (A2) - adotando talude 1:2 = 20.160 m²;
- Volume útil = 54.619 m³.

Neste caso também considerou-se divisão de vazão proporcional à área de cada lagoa. Assim, para a Lagoa 1 considerou-se 28% da vazão total, para a Lagoa 2 foi considerado 34% e para as Lagoas 3 e 4, considerou-se 16 e 22%, respectivamente.

Quadro 2.20 – Tempos de detenção e taxas de aplicação para o ano 2042 com quatro lagoas.

Lagoa	Vazão Média Afluente (m ³ /dia)	Tempo de Detenção (dia)	Taxa de Aplicação (kgDBO/ha.dia)	Efic. Remoção de DBO (%)
Facultativa 1	6.196	7,8	163	70
Facultativa 2	7.523	8,8	163	73
Facultativa 3	3.540	10,7	168	76
Facultativa 4	4.868	11,2	166	77

Como se vê, para todo o período de planejamento os tempos de detenção ficaram relativamente baixos. Entretanto, as taxas de aplicação resultaram dentro da faixa recomendada (100 a 350 kgDBO/ha.dia, segundo Jordão & Pessoa, 2005), garantindo eficiências de remoção de DBO maiores que 60%. As eficiências globais do sistema (reatores anaeróbios + lagoas facultativas) ficarão em torno de 90% em todo o horizonte de projeto.

2.5 LEITOS DE SECAGEM DE LODO

O lodo produzido nos reatores anaeróbios será encaminhado para desidratação nos leitos de secagem. Segundo Jordão & Pessoa (2005), o lodo em condições normais de secagem poderá ser removido do leito após um período de 12 a 20 dias.

- Produção de lodo:

Quadro 2.21 – Volume diário de lodo gerado

Ano	1ª Etapa - 2032	2ª Etapa - 2042
Carga de DBO (kg/dia)	5.370	5.920
Carga de DQO (kg/dia) - 1,85.DBO	9.935	10.952
Produção de sólidos totais (kg/dia) - 0,15 kgST/kgDBO	1.490,32	1.642,75
Concentração de sólidos no lodo	5%	5%
Densidade do lodo (kg/m³)	1.020	1.020
Volume diário de lodo (m³)	29,22	32,21

- Dimensionamento dos leitos de secagem:

Quadro 2.22 – Dimensionamento dos leitos de secagem.

Ano	1ª Etapa - 2032	2ª Etapa - 2042
Intervalo de descarga, secagem e remoção do lodo	15 dias	15 dias
Volume de lodo a ser descarregado por vez (m³)	438,33	483,16
Altura líquida no leito (m)	0,30	0,30
Área necessária de leitos (m²)	1.461,09	1.610,54
Área de cada leito (m²)	42	42
Número necessário de leitos de secagem (unidades)	35	39
Número de leitos de secagem adotado (unidades)	40	40

As camadas de preenchimento do leito de secagem serão em número de 4, assim distribuídas:

- Brita ¾ “ a 2” com h mínimo = 20 cm

- Brita ¼ “a 7/8” com $h = 5$ cm
- Brita 1/16 “a 1/4” com $h = 7,5$ cm
- Areia grossa com $h = 5$ cm
- Tijolos assentados sobre a areia com $h=5$ cm.

O líquido drenado dos leitos de secagem será encaminhado por gravidade para um PV da linha afluyente à caixa divisora de vazão das lagoas facultativas (CDG1).

2.6 DESINFECÇÃO

A desinfecção do efluente final será feita com aplicação de solução de hipoclorito de sódio (NaOCl) na saída de cada lagoa facultativa.

2.6.1 Cálculo de Consumo

Dados gerais:

- Dosagem estimada de cloro = 8mg/L (PROSAB – Efluente de lagoas);
- Concentração de cloro no hipoclorito comercial = 12%;
- Densidade do hipoclorito de sódio = 1,16 g/cm³;

Por meio dos dados gerais e considerando-se as vazões médias de projeto, chega-se aos consumos apresentados no Quadro 2.23.

Quadro 2.23 – Consumo diário da solução de hipoclorito de sódio.

Ano	Vazão média da ETE (L/s)	Consumo diário (kg/dia)	Consumo diário (L/dia)
2012	96,1	553,54	477,19
2022	202,4	1.165,82	1.005,02
2032	236,7	1.363,39	1.175,34
2042	256,1	1.475,14	1.271,67

Para armazenamento da solução de hipoclorito foram previstos dois tanques de 10.000 L cada. O quadro a seguir apresenta os períodos de atendimento obtidos.

Quadro 2.24 – Período de atendimento do sistema previsto.

Ano	Período de Atendimento (dias)
2012	41,91
2022	19,90
2032	17,02
2042	15,73

2.6.2 Bombas Dosadoras

Previu-se a utilização de uma bomba dosadora para cada ponto de aplicação (saída de cada lagoa facultativa). Dessa forma, totalizaram-se três bombas dosadoras, sendo uma reserva. Suas características gerais são apresentadas a seguir:

- Número de bombas: 03 (2+1);
- Tipo de bomba: peristáltica;
- Vazão por bomba: 7 a 43 L/h.