

I-016 - ÁREA REQUERIDA PELAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS

Lyda Patricia Sabogal-Paz⁽¹⁾

Professora Doutora do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - SHS/EESC/USP, São Carlos/SP. Brasil.

Jorge Iván Sabogal-Paz

Engenheiro de Materiais e Licenciado em Eletricidade e Eletrônica pela *Universidad del Valle* (Cali Colômbia). Especialista em Docência Universitária e Mestrando em Educação Superior pela *Universidad Santiago de Cali* (Cali, Colômbia). Professor da *Universidad Antonio Nariño* (Cali, Colômbia).

Endereço⁽¹⁾: Av. Trabalhador São-Carlense, 400; CEP: 13566-590. São Carlos /SP. Brasil. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – EESC/USP. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Tel.: (55)(16) 33739548; Fax: (55) (16) 33739550. e-mail: lysaboga@sc.usp.br

RESUMO

A correta seleção de estações de tratamento de água - ETAs envolve inúmeros fatores; neste contexto, o presente artigo aborda a escolha dos sistemas considerando a importância dos recursos locais, mais especificamente, os aspectos relacionados aos requerimentos de área das tecnologias comumente utilizadas no Brasil. As ETAs de ciclo completo, filtração direta descendente, filtração direta ascendente, dupla filtração, floto-filtração e filtração em múltiplas etapas foram avaliadas conjuntamente com três técnicas de tratamento dos resíduos: i) tanque de clarificação/adensamento e leitos de drenagem; ii) lagoa de lodo; e iii) tanque de regularização de vazão. A pesquisa desenvolveu várias fórmulas matemáticas que permitem estimar os requerimentos de área de ETAs, com vazões de projeto entre 10 e 40L/s, considerando o tratamento dos resíduos gerados. Deste modo, o engenheiro projetista pode analisar a área requerida pelo sistema sem necessidade de realizar o pré-dimensionamento. Destaca-se que as equações apresentadas somente são válidas para sistemas que possuam os mesmos critérios de projeto indicados neste artigo. A ferramenta metodológica desenvolvida considera as particularidades (projeto e construção) vigentes no Brasil. Caso o engenheiro projetista pretenda aplicar a ferramenta em outro país, cuidados devem ser tomados – os resultados devem ser analisados para verificar sua conveniência no novo contexto.

PALAVRAS-CHAVE: estações de tratamento de água - ETAs, resíduos de ETAs, requerimentos de área, seleção de tecnologia.

INTRODUÇÃO

Atualmente o engenheiro projetista brasileiro não dispõe de uma ferramenta metodológica (modelo) que permita estimar a área necessária para a implantação de estações de tratamento de água - ETA, considerando o tratamento dos resíduos gerados, sem a necessidade de fazer o pré-dimensionamento dos sistemas. Neste contexto, o presente artigo coloca à disposição dos engenheiros equações simples, válidas para ETAs com vazões de projeto entre 10 a 40L/s, que permitem estimar a área necessária em cada tipo de estação, considerando três técnicas de tratamento dos resíduos: i) tanque de clarificação/adensamento e leitos de drenagem; ii) lagoa de lodo; e iii) tanque de regularização de vazão.

METODOLOGIA

Na pesquisa foram avaliadas as ETAs indicadas na Tabela 1 e as estações de tratamento do resíduo - ETRs apresentadas na Tabela 2. A elaboração da ferramenta metodológica (modelo) precisou do estudo dos seguintes fatores: a) características das comunidades, analisando: população objetivo, consumo *per capita* incluindo perdas e número de horas de funcionamento das ETAs; b) particularidades das ETAs e ETRs, analisando: vazão de projeto, qualidade da água bruta, volume diário de resíduos, critérios de projeto, aspectos construtivos e elaboração de projetos "padrão", em AUTOCAD, para quantificação das áreas.

Tabela 1. Tecnologias de Tratamento de Água Avaliadas (Sabogal Paz, 2007; 2010)

ETA	Variações da Tecnologia	Processos e operações de tratamento
Ciclo Completo	CC ₁	MRHVR + FHCEH + DAT + FRDC + DES + FLU
	CC ₂	MRHVR + FMEVTI + DAT + FRDC + DES + FLU
Filtração Direta Ascendente	FDA ₁	MRHIM + FRAAGC + DES + FLU
Filtração Direta Descendente	FDD ₁	MRHIM + FRDC + DES + FLU
Dupla Filtração	DF ₁	MRHIM + FAP + FRDC + DES + FLU
Floto-Filtração	FF ₁	MRHVR + FMEVTI + FAD + FRDC + DES + FLU
Filtração em Múltiplas Etapas	FiME ₁	PFD + FLA + DES + FLU
	FiME ₂	PFD + PFVAC + FLA + DES + FLU

MRHVR: mistura rápida hidráulica com vertedor retangular.

MRHIM: mistura rápida hidráulica com injetor e malha de fios.

FHCEH: flocculador hidráulico de chicanas de escoamento horizontal.

FMEVTI: flocculador mecânico de eixo vertical de turbina com paletas inclinadas

DAT: decantador de alta taxa de placas.

FAD: flotação por ar dissolvido com pressurização da recirculação

FRDC: filtração rápida descendente em areia a taxa constante.

FRAAGC: filtração ascendente em areia grossa a taxa constante.

FAP: filtração ascendente em pedregulho a taxa constante.

FLA: filtro lento em areia a taxa constante.

PFD: pré-filtro dinâmico em pedregulho a taxa constante.

PFVAC: pré-filtro vertical ascendente em camadas a taxa constante.

DES: desinfecção com hipoclorito de sódio.

FLU: fluoreação com ácido fluorsilícico.

FiME₁, FiME₂: opções da tecnologia de filtração em múltiplas etapas

CC₁, CC₂: deferentes opções da tecnologia de ciclo completo.

FDA₁: opção da tecnologia de filtração direta ascendente

FDD₁: opção da tecnologia de filtração direta descendente

DF₁: opção da tecnologia de dupla filtração

FF₁: opção da tecnologia de floto-filtração

Tabela 2. Técnicas de Tratamento dos Resíduos Avaliadas (Sabogal Paz, 2007; 2010)

Tecnologia	Unidades
ETR ₁	TCA + DLD
ETR ₂	DLL
ETR ₃	TER

ETR₁, ETR₂, ETR₃: opções das estações de tratamento dos resíduos das ETAs

DLD: desaguamento por leito de drenagem

DLL: desaguamento por lagoa de lodo.

TCA: Tanque de clarificação / adensamento por gravidade

TER: tanque de regularização de vazão

As atividades desenvolvidas para avaliar os fatores foram orientadas conforme CINARA (2001) e SABOGAL PAZ (2007; 2010) e tiveram as seguintes etapas: i) revisão de literatura e legislação; ii) realização de visitas em 26 ETAs em escala real, no Brasil e na Colômbia (Tabelas 3 e 4); iii) consultas com peritos em projetos de ETAs; iv) elaboração dos projetos "padrão" das ETAs, em AUTOCAD; e v) fixação dos requisitos de domínio da ferramenta metodológica (modelo).

RESULTADOS

Na pesquisa foram avaliadas populações brasileiras entre 5000 e 20000 habitantes com consumo *per capita* de 150 L/hab.dia e 24 horas de funcionamento das ETAs. Em relação às particularidades das ETAs, as vazões de projeto dos sistemas fixaram-se entre 10 e 40 L/s; isto gerou um volume de resíduos, para cada tipo de ETA, em função da operação "padrão" indicada pela ferramenta metodológica (modelo), conforme Tabela 5.

Tabela 3. Características das ETAs de Filtração em Múltiplas Etapas Visitadas na Colômbia em 2004 (Sabogal Paz, 2007; 2010)

ETA	População abastecida	Vazão da ETA (L/s)	Tratamento Resíduo da ETA	Pré-tratamento						Filtro Lento		
				Tipo	Número de unidades	Área total (m²)	Taxa de Filtração (m/d)	Meio Filtrante		Número de unidades	Área total (m²)	Taxa de filtração (m³/m².dia)
								Tamanho dos grãos (mm)	Espessura (m)			
Retiro, Cali	7000	20(15,1)	Não	PFD	3	39,2	43,2 (33,6)	25 – 6	0,6	4	540,0	3,60 (3,12)
				PFVAC	5	100,0	16,8 (12,0)	25 – 3	0,95			
Cañas Gordas, Cali	700	10,5 (8,9)	Não	PFD	2	37,0	36,0 (36,0)	25 – 6	0,6	3	275,0	3,36 (2,88)
				PFVAS ₂	2	46,0	19,2 (16,8)	25 – 3	2,0			
Shaloom, Cali	1170	1,0 (1,0)	Não	PFD	1	2,40	36,0 (36,0)	25 – 6	0,6	2	24,0	3,60 (3,60)
				PFVAC	1	6,00	14,4 (14,4)	25 – 3	1,5			
Colombo, Cali	1170	1,0 (0,6)	Não	PFD	1	2,40	36,0 (21,6)	25 – 6	0,6	2	27,0	3,12 (1,92)
				PFVAC	1	4,70	19,2 (12,0)	25 – 3	1,3			
Mondomo	3800	18,0 (9,0)	Não	PFD	4	5,40	72,0 (36,0)	25 – 3	0,60	4	100,0	3,88 (3,20)
				PFVAC	4	21,83	17,8 (8,9)	25 – 1,5	1,20			

PFD: Pré-filtro dinâmico de pedregulho
 PFVAC: Pré-filtro vertical ascendente de pedregulho em camadas
 PFVAS₂: Pré-filtro vertical ascendente de pedregulho em série de duas etapas
 (): condições de operação.

Tabela 4. Características das ETAs Visitadas no Brasil em 2004 (Sabogal Paz, 2007; 2010)

Cidade/Estado	Tipo de ETA	Vazão projeto da ETA (L/s)	Processos e Operações de Tratamento de Água	Tipo de Coagulante
Franca/SP	CC	650	pOX _{cl} (1) + MRHCP (1) + FM _p (14) + D _c (5) + FRD _d (9) + DES _{cl} (1) + FLU (1) + A _{pH} (1)	Sulfato férrico ou cloreto férrico
Santa Rosa do Viterbo/SP		80	pOX _{cl} (1) + MRHCP (1) + FM _p (8) + D _c (2) + FRD _c (4) + DES _{cl} (1) + FLU (1) + A _{pH} (1)	Sulfato de alumínio
Pedregulho/SP		50	pOX _{cl} (1) + MRH _a (1) + FHCEV (2) + D _a (4) + FRD _c (8) + DES _{cl} (1) + FLU (1) + A _{pH} (1)	Sulfato de alumínio
Icém/SP		25	pOX _{cl} (1) + MRH _a (1) + FM _p (1) + D _c (2) + FRD _c (4) + DES _{cl} (1) + FLU (1) + A _{pH} (1)	Sulfato de alumínio
Cássia dos Coqueiros/SP		10	pOX _{cl} (1) + MRH _a (1) + FHCEV (1) + D _a (1) + FRD _c (2) + DES _{cl} (1) + FLU (1) + A _{pH} (1)	Sulfato de alumínio
Colômbia/SP		25	pOX _{cl} (1) + MRH _a (1) + FHCEV (1) + D _a (2) + FRD _c (4) + DES _{cl} (1) + FLU (1) + A _{pH} (1)	Sulfato de alumínio
São Carlos/SP	FDA	500	MRHCP (1) + FM _p (8) + D _c (3) + FRD _d (7) + DES _{cl} (1) + FLU (1) + A _{pH} (1)	Sulfato de alumínio
Sacramento/MG		45	MRH _i (1) + FRA _d (4) + DES _{hc} (1) + FLU _{iss} (1) + A _{pH} (1)	Sulfato de alumínio
Descalvado/SP	FF	120	MRHCP (1) + FRA _d (6) + DES _{hc} (1) + FLU (1) + A _{pH} (1)	Sulfato de alumínio
Caraguatuba/SP		600	pOX _{cl} (1) + MRHCP (1) + FM _p (12) + FL (3) + FRD _c (3) + DES _{cl} (1) + FLU (1) + A _{pH} (1)	Sulfato de alumínio
Jaú/SP	FTC	180	MRHCP (1) + FM _p (12) + FL (3) + FRD _c (3) + DES _{cl} (1) + FLU (1) + A _{pH} (1)	Sulfato férrico
Mairiporã/SP		27	pOX _{cl} (1) + MRH _i (1) + FM _p (1) + FL (1) + FRD _c (2) + DES _{cl} (1) + FLU (1) + A _{pH} (1)	Sulfato férrico
Terra Preta-Mairiporã/SP		50	pOX _{cl} (1) + MRH _i (1) + FM _p (2) + FL (2) + FRD _c (4) + DES _{cl} (1) + FLU (1) + A _{pH} (1)	Hidroxí-cloreto de alumínio

CC: tecnologia de ciclo completo

MRHCP: mistura rápida hidráulica com calha Parshall

FMp: floculador mecânico de paletas

DC: decantador convencional

FRDd: filtro rápido descendente, a taxa declinante

DEScl: desinfecção com cloro gasoso

ApH: ajuste de pH

FF: tecnologia de floto-filtração

MRHi: mistura rápida por injetor

FRA_d: filtro rápido ascendente a taxa declinante

DEShs: desinfecção com hipoclorito de sódio

FLU: floração com ácido fluossilícico

ETR: estação de tratamento do resíduo (clarificação / adensamento por gravidade)

pOXcl: pré-oxidação com cloro gasoso

MRHa: mistura rápida na adutora de água bruta

FHCEV: floculador hidráulico de chicanas de escoamento vertical

Da: decantador alta taxa de placas

FRDc: filtro rápido descendente, a taxa constante

FLU: floração com ácido fluossilícico

FDA: tecnologia de filtração direta ascendente

FTC: ETAs com flotação e filtração em unidades separadas

FL: flotação por ar dissolvido

DEShc: desinfecção com hipoclorito de cálcio

FLUiss: floração com flúor silicato de sódio

(): número de unidades dos processos ou das operações de tratamento de água.

Tabela 4. Características das ETAs Visitadas no Brasil em 2004 (Sabogal Paz, 2007; 2010) – Cont.

Cidade/Estado	Tipo de ETA	Vazão projeto da ETA (L/s)	Processos e Operações de Tratamento de Água	Tipo de Coagulante
Cachoeira Dourada/MG	DF	15	pOX _{hs} (1) + MRH _i (1) + FAP (1) + FRD _c (1) DES _{hs} (1) + FLU(1) + A _{pH} (1)	Sulfato de alumínio
São Carlos/SP		50	MRH _i (1) + FRAAG (3) + FRD _c (3) + DES _{hs} (1) + FLU(1) + A _{pH} (1)	Sulfato de alumínio
Caraguatatuba/SP	FDD	150	pOX _{cl} (1) + MRH _i (1) + FRDP _c (6) + DES _{cl} (1) + FLU(1) + A _{pH} (1)	Sulfato de alumínio
Ubatuba/SP		400	pOX _{cl} (1) + MRH _i (1) + FRD _c (8) + DES _{cl} (1) + FLU(1) + A _{pH} (1)	Sulfato de alumínio
Ilha Bela/SP		50	pOX _{cl} (1) + MRH _i (1) + FRDP _c (2) + DES _{cl} (1) + FLU(1) + A _{pH} (1)	Sulfato de alumínio
Juquehy/SP		50	pOX _{cl} (1) + MRH _i (1) + FRDP _c (2) + DES _{cl} (1) + FLU(1) + A _{pH} (1)	Sulfato de alumínio
São Francisco/SP		100	pOX _{cl} (1) + MRH _i (1) + FRDP _c (3) + DES _{cl} (1) + FLU(1) + A _{pH} (1)	Sulfato de alumínio
Corumbataí/SP	FiME	10	PFD (2) + PFVAC (2) + FLA (2)	Não precisa

FDD: tecnologia de filtração direta descendente
DF: tecnologia de dupla filtração
MRH_i: mistura rápida por injetor
FRAAG: filtro rápido ascendente em areia grossa a taxa declinante
FRDP_c: filtro rápido descendente a pressão
DES_{cl}: desinfecção com cloro gasoso
A_{pH}: ajuste de pH
PFVAC: Pré-filtro vertical ascendente de pedregulho em camadas
pOX_{hs}: pré-oxidação com hipoclorito de sódio

FiME: tecnologia de filtração em múltiplas etapas
pOX_{cl}: pré-oxidação com cloro gasoso
FAP: filtro ascendente em pedregulho a taxa constante
FRD_c: filtro rápido descendente a taxa constante
DES_{hs}: desinfecção com hipoclorito de sódio
FLU: fluoração com ácido fluossilícico
PFD: Pré-filtro dinâmico de pedregulho
FLA: filtro lento em areia
(): número de unidades dos processos ou das operações de tratamento de água.

Tabela 5. Operação "padrão" das ETAs para avaliar o volume de resíduos - (Sabogal Paz, 2007; 2010)

Tecnologia	Tipo de filtro	Duração da carreira de filtração	Períodos para descargas de fundo intermediárias - DFIs	Tempo aproximado de lavagem do filtro e/ou das DFIs
Operação dos filtros				
Ciclo completo	Filtro rápido descendente	24h	(-)	10 min para lavagem do filtro
Floto-filtração	Filtro rápido descendente	24 h	(-)	
Filtração direta descendente	Filtro rápido descendente	24 h	(-)	
Filtração direta ascendente	Filtro ascendente em areia grossa	36 h	12 h	10 min para lavagem do filtro e 1 min para DFIs
Dupla Filtração	Filtro ascendente em pedregulho	1 semana	6 h, 12 h e 24h (em função da turbidez)	5 min para lavagem do filtro e 2 min para DFIs
	Filtro rápido descendente	24 horas	(-)	10 min para lavagem do filtro.
Filtração em múltiplas etapas	Pré-filtro dinâmico	1 semana	24 h	3 min para DFIs e 10 min para lavagem do filtro
	Pré-filtro vertical ascendente em pedregulho	1 mês	1 semana	5 min para DFIs e 30 min para lavagem do filtro.
	Filtro lento em areia	2 meses	(-)	Somente foi considerado o tempo para limpeza da areia raspada, que oscilava entre 2,6 e 3,5 horas por filtro, em função do volume de areia retirada.
Operação dos decantadores				
Descarga do decantador, em função da concentração de sólidos suspensos totais na água bruta e do volume do poço de lodos da unidade				Tempo aproximado da descarga
Ciclo completo	Cada 2, 4 e 8 horas (para vazão da ETA de 10 L/s)			< 1 min
	Cada 3, 6 e 11 horas (para vazão da ETA de 20 L/s)			
	Cada 4, 8 e 15 horas (para vazão da ETA de 40 L/s)			
Operação dos flotadores				
Foto-filtração	Raspagem contínua do lodo com dispositivo rotativo que funciona 24 horas por dia com velocidade de deslocamento de 1 m/min.			
(-): não aplica				

As características da água bruta para os projetos "padrão" das ETAs estão na Tabela 6. Os critérios de projeto, apresentados na Tabela 7, adotaram-se conforme a análise das experiências obtidas nas ETAs visitadas (Tabelas 3 e 4) e a consulta de peritos brasileiros especialistas no dimensionamento de ETAs.

Tabela 6. Qualidade da água bruta para os projetos "padrão", em AUTOCAD, das ETAs avaliadas (Sabogal Paz, 2007; 2010)

Variáveis	Água Tipo 1			Água Tipo 2			
	FDD ₁	FDA ₁	FiME ₁	DF ₁	FiME ₂	FF ₁	CC ₁ , CC ₂
Taxa média de filtração (m³/m²/dia)	FRD: 180	FRA: 180	PFD: 24; FLA: 3	FAP: 120; FRD: 180	PFD: 24; PFVA: 18; FLA: 3	FRD:180; TR: 10%	FRD:180
Turbidez (uT)	100% ≤ 25; 95% ≤ 15; 90% ≤ 10			100% ≤ 100; 95% ≤ 50; 90% ≤ 30			
Cor verdadeira (uH)	100% ≤ 20; 95% ≤ 15; 90% ≤ 10			100% ≤ 20; 95% ≤ 15; 90% ≤ 10			
Ferro total (mg/L)	100% ≤ 2; 95% ≤ 1,5; 90% ≤ 1			100% ≤ 5; 95% ≤ 4; 90% ≤ 2			
Manganês total (mg/L)	100% ≤ 0,7; 95% ≤ 0,5; 90% ≤ 0,2			100% ≤ 1,0; 95% ≤ 0,6; 90% ≤ 0,3			
Coliformes totais (NMP/100mL)	100% ≤ 2500; 95% ≤ 1500; 90% ≤1000			100% ≤ 5000; 95% ≤ 2500; 90% ≤ 1500			
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100mL)	100% ≤ 1000; 95% ≤ 750; 90% ≤ 500			100% ≤ 1500; 95% ≤ 1000; 90% ≤ 500			
FDD: filtração direta descendente FDA: filtração direta ascendente FiME: filtração em múltiplas etapas FF: floto-filtração CC: ciclo completo				FLA: filtro lento em areia PFVA: pré-filtro vertical ascendente em camadas TR: taxa de recirculação de água pressurizada. FRD: filtro rápido descendente, FRA: filtro rápido ascendente PFD: pré-filtro dinâmico			

Tabela 7. Critérios de projeto das ETAs avaliadas (Sabogal Paz, 2007; 2010)

ETAs de filtração direta descendente - FDD	
Mistura rápida	
- Gradiente de velocidade médio obtido em Jarteste (s ⁻¹)	1000
- Tempo de mistura obtido em Jarteste (s)	10
Filtro Rápido Descendente	
- Taxa média de filtração (m³/m².d)	180
- Carga hidráulica disponível (m)	2
- Meio filtrante	
Espessura do meio filtrante (m)	1
Tamanho dos grãos (mm)	0,84 a 1,68
Tamanho efetivo - D ₁₀ (mm)	1
Coeficiente de desuniformidade - CD	1,25
- Camada suporte	
Espessura da camada suporte (m)	0,45
Número de subcamadas	7
Tamanho dos grãos (mm)	2,0 – 38,0
ETAs de Filtração direta ascendente - FDA	
Mistura rápida	
- Gradiente de velocidade médio obtido em Jarteste (s ⁻¹)	1000
- Tempo de mistura obtido em Jarteste (s)	10
Filtro Rápido Ascendente	
- Taxa média de filtração (m³/m².d)	180
- Carga hidráulica disponível (m)	2
- Meio filtrante	
Espessura do meio filtrante (m)	1,9
Tamanho dos grãos (mm)	0,59 – 2,00
Tamanho efetivo - D ₁₀ (mm)	0,84
Coeficiente de desuniformidade - CD	1,68
- Camada suporte	
Espessura da camada suporte (m)	0,70
Número de subcamadas	7
Tamanho dos grãos (mm)	2,4 – 38,0
ETAs de Dupla Filtração - DF	
Mistura rápida	
- Gradiente de velocidade médio obtido em Jarteste (s ⁻¹)	1000
- Tempo de mistura obtido em Jarteste	10
Filtro Ascendente em Pedregulho	
- Taxa média de filtração (m³/m².d)	120
Carga hidráulica disponível (m)	1,0
Taxa inicial de descarga na lavagem (m/min)	0,55
- Meio filtrante	
Espessura do meio filtrante (m)	1,3
Número de subcamadas	5
Topo (m;mm)	0,6; 2,38 a 4,8
Subcamada intermediária (m;mm)	0,3; 4,8 a 9,6
Subcamada intermediária (m;mm)	0,2; 9,6 a 15,9
Subcamada intermediária (m;mm)	0,1; 15,9 a 25,4
Fundo (m;mm)	0,1; 25,4 a 31,0
Filtro Rápido Descendente	
- Taxa média de filtração (m³/m².d)	180
- Carga hidráulica disponível (m)	2
- Meio filtrante	
Espessura do meio filtrante (m)	0,6
Tamanho dos grãos (mm)	0,3 a 1,41
Tamanho efetivo - D ₁₀ (mm)	0,42
Coeficiente de desuniformidade - CD	1,7
- Camada suporte	
Espessura da camada suporte (m)	0,45
Número de subcamadas	7
Tamanho dos grãos (mm)	2,0 – 38,0

Tabela 7. Critérios de Projeto das ETAs (Sabogal Paz, 2007; 2010)- Cont.

ETAs de Ciclo Completo - CC	
Mistura rápida	
- Gradiente de velocidade médio obtido em Jarreste (s^{-1})	1000
- Tempo de mistura obtido em Jarreste (s)	30
Floculação	
- Gradiente de velocidade médio obtido em Jarreste (s^{-1})	30 a 40
- Tempo de mistura obtido em Jarreste (min)	20
Decantação	
- Velocidade de sedimentação obtida em Jarreste (cm/min)	2
- Velocidade de sedimentação de projeto (cm/min)	1,5
- Comprimento necessário das placas (m)	1,0
- Velocidade média de escoamento nas placas (cm/min)	15
Filtro Rápido Descendente	
- Taxa média de filtração ($m^3/m^2.d$)	180
- Carga hidráulica disponível (m)	2
- Meio filtrante	
Espessura do meio filtrante (m)	0,7
Tamanho dos grãos (mm)	0,42 – 1,41
Tamanho efetivo - D_{10} (mm)	0,45
Coeficiente de desuniformidade - CD	1,6
- Camada suporte	
Espessura da camada suporte (m)	0,45
Número de subcamadas	7
Tamanho dos grãos (mm)	2,0 – 38,0
ETAs de floto-filtração - FF	
Mistura rápida	
- Gradiente de velocidade médio obtido em Jarreste (s^{-1})	1000
- Tempo de mistura obtido em Jarreste (s)	30
Floculação	
- Gradiente de velocidade médio obtido em Jarreste (s^{-1})	30 a 40
- Tempo de mistura obtido em Jarreste (min)	20
Flotação	
Velocidade ascensional (cm/min) - obtida em laboratório	15
Taxa de flotação adotada na operação ($m^3/m^2.d$)	180
Fator de recirculação obtido em laboratório (%)	10
Fator de recirculação de projeto (%)	12
Câmara de saturação	
Pressão absoluta no interior da câmara de saturação (atm)	5
Taxa de escoamento superficial na câmara de saturação ($m^3/m^2.d$)	825
Filtro Rápido Descendente	
- Taxa média de filtração ($m^3/m^2.d$)	180
- Meio filtrante	
Espessura do meio filtrante (m)	0,7
Tamanho dos grãos (mm)	0,42 – 1,41
Tamanho efetivo - D_{10} (mm)	0,45
Coeficiente de desuniformidade - CD	1,6
- Camada suporte	
Espessura da camada suporte (m)	0,45
Número de subcamadas	7
Tamanho dos grãos (mm)	2,0 – 38,0

Tabela 7. Critérios de Projeto das ETAs (Sabogal Paz, 2007; 2010) - Cont.

ETAs de Filtração em Múltiplas Etapas - FiME	
Pré-filtro dinâmico em pedregulho	
- Taxa média de filtração ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$)	24
- Taxa inicial de descarga para limpeza ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$)	> 200
- Meio filtrante	
Número de subcamadas	3
Fundo (m;mm)	0,4; 19,0 a 25,4
Subcamada intermediária (m;mm)	0,3; 9,6 a 15,9
Topo (m;mm)	0,3; 4,8 a 9,6
Pré-filtro vertical ascendente em pedregulho, em camadas	
- Taxa média de filtração ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$)	18
- Carga hidráulica para retenção de impurezas (m)	0,6
- Taxa inicial de descarga para limpeza ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$)	> 200
- Meio filtrante	
Número de subcamadas	4
Fundo (m;mm)	0,3; 12,7 a 19,0
Subcamada intermediária (m;mm)	0,3; 6,4 a 12,7
Subcamada intermediária (m;mm)	0,3; 3,2 a 6,4
Topo (m;mm)	0,3; 1,6 a 3,2
Filtro Lento em Areia	
- Perda de carga final (m)	1,0
- Nível de água mínimo acima do topo do meio filtrante (m)	0,15
- Taxa média de filtração ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$)	3
- Meio filtrante	
Altura do meio filtrante (m)	0,9
Tamanho da areia (mm)	0,08 a 1,0
Tamanho efetivo – D_{10} (mm)	0,21
Coefficiente de desuniformidade (m)	3,4
- Características da camada suporte	
Número de subcamadas	5
Subcamada superior (m;mm)	0,15; 1,41 a 3,20
Subcamada intermediária (m;mm)	0,075; 3,2 a 6,4
Subcamada intermediária (m;mm)	0,075; 6,4 a 12,7
Subcamada intermediária (m;mm)	0,075; 12,7 a 19,0
Subcamada inferior (m;mm)	0,075; 19,0 a 31,0

Os cálculos das áreas precisaram do dimensionamento, em AUTOCAD, de 72 ETAs, em função da combinação das vazões de projeto "padrão" avaliadas (10, 20 e 40 L/s), tratamentos dos resíduos (ETR_1 , ETR_2 e ETR_3) e tipos de ETAs. A Figura 1 mostra exemplos típicos das ETAs "padrão" projetadas. A Tabela 8 indica as equações desenvolvidas que permitem estimar os requerimentos de áreas das ETAs, com vazões de projeto entre 10 e 40 L/s, envolvendo, conjuntamente o tratamento dos resíduos gerados. As equações foram obtidas após *plotar*, por tecnologia, os dados de vazão (10 L/s, 20 L/s e 40L/s) e suas respectivas áreas (m^2). As equações que apresentavam o melhor ajuste aos dados, por sistema (ETA + ETR), foram selecionadas e alocadas na Tabela 8. Observa-se que, segundo os dados obtidos, foram geradas funções polinomiais do segundo grau.

Como exemplo de aplicação das equações da Tabela 8 apresenta-se, na Figura 2, as áreas necessárias para cada sistema (ETA + ETR) considerando vazões de projeto de 10, 20 e 40 L/s. Verifica-se que FiME_1 e FiME_2 , para qualquer ETR, precisam de maior área de implantação, quando comparadas aos outros sistemas. Este fato acontece porque essas tecnologias possuem baixas taxas de filtração, assim, como consequência, são maiores os requerimentos de área dos filtros. Constata-se, também, que as ETAs de filtração direta (FDD_1 , FDA_1 e DF_1), para qualquer ETR, requerem menor área. No caso de existir limitação de espaço na área de estudo, o sistema FDD_1 com ETR_3 seria o mais apropriado, evidentemente, sempre que tecnologia seja sustentável após avaliar aspectos técnicos, econômicos, ambientais, socioculturais e de recursos locais.

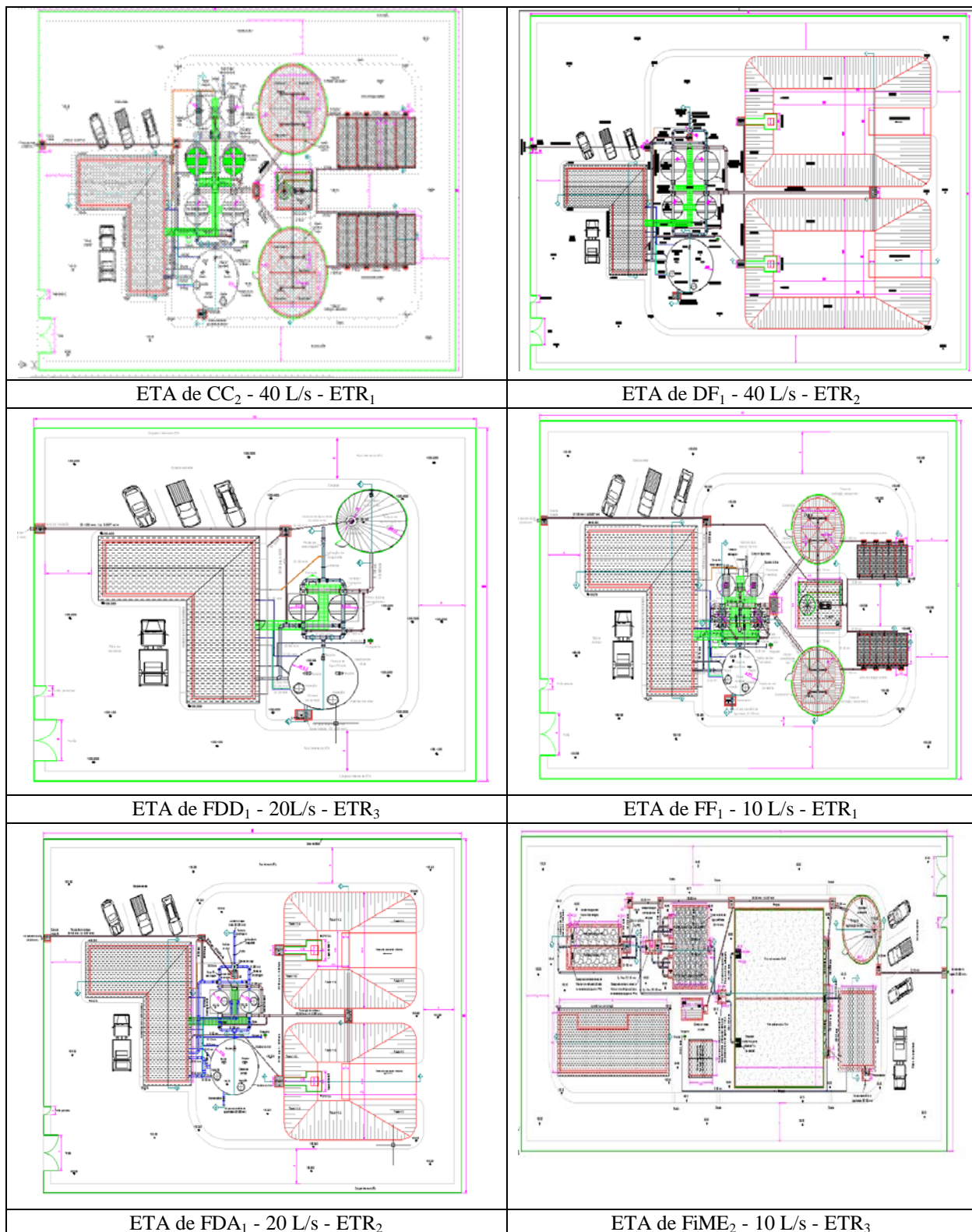


Figura 1. Exemplos das ETAs "padrão" projetadas (Sabogal Paz, 2007; 2010)

Tabela 8. Equações que permitem estimar os requerimentos de área das ETAs, com vazões de projeto entre 10 e 40 L/s, considerando o tratamento dos resíduos (Sabogal Paz, 2007; 2010)

Área (ETA + ETR) → A = m ²		
Filtração Direta Descendente - FDD		
FDD ₁ - ETR ₁	FDD ₁ -ETR ₂	FDD ₁ - ETR ₃
$A = 0,51Q^2 - 3Q + 1624$	$A = 0,34Q^2 + 13,1Q + 1722$	$A = 0,35Q^2 - 3,7Q + 1226$
Filtração Direta Ascendente - FDA		
FDA ₁ - ETR ₁	FDA ₁ -ETR ₂	FDA ₁ - ETR ₃
$A = 0,04Q^2 + 18Q + 1496$	$A = 0,4633Q^2 + 5,7Q + 1820,7$	$A = 0,0933Q^2 + 4,2Q + 1278,7$
Dupla Filtração - DF		
DF ₁ - ETR ₁	DF ₁ -ETR ₂	DF ₁ - ETR ₃
$A = 0,21 Q^2 + 16,8Q + 1596$	$A = 0,0267Q^2 + 49,6Q + 1895,3$	$A = 0,3867Q^2 - 0,4Q + 1333,3$
Ciclo completo - CC ₁ e CC ₂		
CC ₁ - ETR ₁	CC ₁ -ETR ₂	CC ₁ - ETR ₃
$A = -0,09Q^2 + 33,2Q + 1462$	$A = 0,08Q^2 + 54,9Q + 1894$	$A = -0,1633Q^2 + 28,9Q + 1121,3$
CC ₂ - ETR ₁	CC ₂ -ETR ₂	CC ₂ - ETR ₃
$A = 0,015Q^2 + 29,65Q + 1436$	$A = 0,08Q^2 + 54,9Q + 1894$	$A = 0,2417Q^2 + 3,85Q + 1331,3$
Floto-filtração - FF		
FF ₁ - ETR ₁	FF ₁ -ETR ₂	FF ₁ - ETR ₃
$A = -0,065Q^2 + 36,05Q + 1414$	$A = 0,0783Q^2 + 55,45Q + 1931,7$	$A = 0,0067Q^2 + 22,4Q + 1029,3$
Filtração em Múltiplas Etapas - FIME ₁ e FIME ₂		
FIME ₁ - ETR ₁	FIME ₁ -ETR ₂	FIME ₁ - ETR ₃
$A = -0,38Q^2 + 120Q + 1568$	$A = -1,225Q^2 + 190,85Q + 1814$	$A = -1,17Q^2 + 160,9Q + 748$
FIME ₂ - ETR ₁	FIME ₂ -ETR ₂	FIME ₂ - ETR ₃
$A = 0,3433Q^2 + 113Q + 1970,7$	$A = -0,1517Q^2 + 185,45Q + 2906,7$	$A = -0,5133Q^2 + 153,2Q + 1093,3$

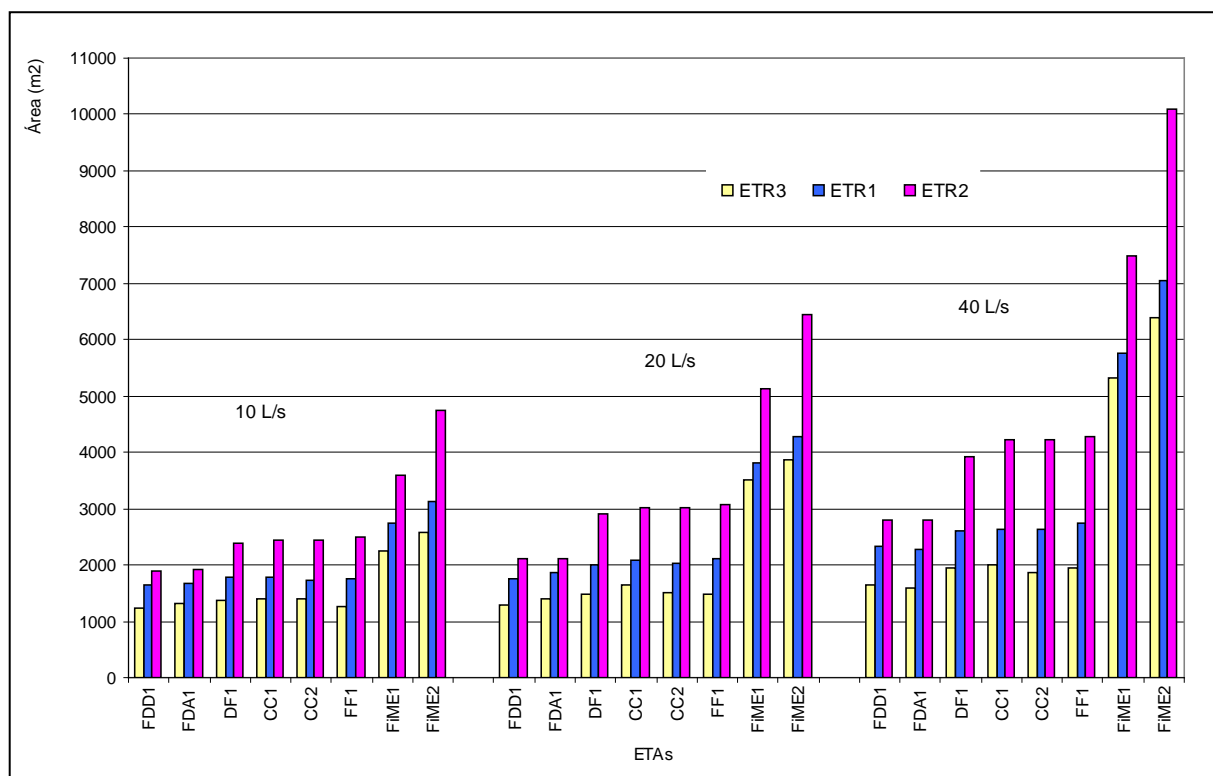


Figura 2. Área de implantação dos sistemas (ETA + ETR) (Sabogal Paz, 2007; 2010)

CONCLUSÕES

Uma estimativa das áreas requeridas pelas ETAs, com ETRs, pode ser obtida pelas equações desenvolvidas (Tabela 8), sem que o engenheiro projetista precise fazer o pré-dimensionamento dos sistemas. Esta afirmação é válida sempre que sejam respeitados os requisitos de domínio da ferramenta metodológica, associados aos critérios de projeto de cada unidade, por tecnologia.

Os resultados obtidos, após aplicar a Tabela 8, dificilmente podem ser comparados com sistemas existentes porque, evidentemente, existem variações nos critérios de projeto e de construção dos sistemas (ETAs + ETRs). Enfatiza-se que o engenheiro responsável precisa sempre avaliar os resultados obtidos, após aplicar as equações desenvolvidas, considerando sua conveniência em função das particularidades da área de estudo.

As equações foram desenvolvidas considerando os critérios de projeto e de construção vigentes no Brasil. Caso o engenheiro projetista pretenda aplicar essas fórmulas em outro país, cuidados devem ser tomados - os resultados devem ser avaliados, verificando sua conveniência no novo contexto.

AGRADECIMENTOS

A autora principal agradece a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelas bolsas de doutorado e pós-doutorado concedidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CINARA (2001). *Modelo Conceptual Para la Selección de Tecnología en Sistemas de Potabilización de Agua*. Proyecto de Selección de Tecnología y Análisis de Costos en Sistemas de Potabilización de Agua, Fase III. Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia. Cali. Colombia.
2. SABOGAL PAZ. L. P (2007) *Modelo Conceitual de Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água para Abastecimento de Comunidades de Pequeno Porte*. 509 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. Brasil.
3. SABOGAL PAZ. L. P (2010). *Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água para Abastecimento de Comunidades de Pequeno e Médio Porte*. Pesquisa de Pós-Doutorado. Informe Científico Final. FAPESP. São Paulo/SP. Fevereiro.