

I-073 - ASPECTOS AMBIENTAIS NA SELEÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA POR CICLO COMPLETO E FLOTO-FILTRAÇÃO

Jaqueline Akiko Sakamoto⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Estadual Paulista (FCT/UNESP). Mestranda em Engenharia Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

Lyda Patricia Sabogal Paz⁽²⁾

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.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Trabalhador São-carlense, 400 - Parque Arnold Schmidt - São Carlos - SP - CEP: 13566-590 - Brasil – Tel: (16) 3373-9548 – e-mail: jaquesakamoto@usp.br ou lysaboga@sc.usp.br

RESUMO

Os impactos ambientais negativos causados pelas estações de tratamento de água – ETAs normalmente são esquecidos e quando considerados são focados nos resíduos gerados no tratamento. Neste contexto, o artigo avaliou os aspectos ambientais na seleção de ETAs dos tipos ciclo completo (CC) e floto-filtração (FF) com vazão de projeto de 40L/s. As ETAs estudadas consideraram um tipo de estação de tratamento dos resíduos – ETR constituída por dois tanques de clarificação/adensamento e oito leitos de drenagem. Os aspectos ambientais foram avaliados conforme o método de Sabogal Paz & Gandini (2011). Na determinação dos indicadores ambientais foram consideradas variáveis ambientais relacionadas à construção (requerimentos de área, concreto e chapa de aço) e ao funcionamento (energia elétrica, consumo de produtos químicos, consumo de água para lavagem e geração de resíduos). Verificou-se que o ciclo completo com floculadores tipo chicanas (CC1) teve maior requerimento de materiais de construção. A floto-filtração foi considerada a tecnologia mais impactante em relação ao requerimento energético. Quando comparadas as ETAs avaliadas, pelo método Sabogal Paz & Gandini (2011), a tecnologia CC1 teve o impacto ambiental mínimo.

PALAVRAS-CHAVE: Impacto ambiental, tratamento de água, seleção de tecnologia.

INTRODUÇÃO

As ETAs são fundamentais para melhorar o saneamento de um país, pois quanto maior a cobertura de água com qualidade e quantidade, as condições e expectativas de vida da população tendem a aumentar. Na América latina é comum o baixo desempenho das ETAs implantadas. Segundo Sabogal Paz & Gandini (2011) e Di Bernardo & Sabogal Paz (2008), esse problema é devido, principalmente, às falhas na seleção das tecnologias que consideram apenas a abordagem de engenharia tradicional ou de tendência (sistema “padrão”) ignorando, na maioria dos casos, aspectos ambientais, financeiros e sociais relevantes.

A implantação de ETAs gera benefícios à sociedade, porém, os impactos ambientais causados pela infraestrutura muitas vezes são esquecidos. As ETAs, como qualquer outro empreendimento, acarretam mudanças no meio ambiente decorrentes basicamente das atividades de construção e operação. Os impactos associados aos resíduos gerados no tratamento vêm sendo relatados em diversos trabalhos científicos, porém ainda são escassos os estudos que analisam todas as atividades envolvidas nas ETAs que acarretam deterioração dos recursos naturais visando seleção da alternativa com impacto ambiental mínimo.

Neste contexto, o artigo analisou a aplicabilidade do método de seleção proposto por Sabogal Paz & Gandini (2011), o qual foi uma adaptação do método indicado por Gandini e Galvis (2000) – que envolveu o conceito de impacto ambiental mínimo na escolha de ETAs. O modelo avaliado considerou apenas os impactos ambientais negativos, uma vez que os positivos independem da técnica adotada para proporcionar benefícios à população, ou seja, são considerados irrelevantes no processo de seleção.

MATERIAIS E MÉTODOS

As tecnologias estudadas foram ciclo completo e floto-filtração com uma estação de tratamento de resíduos, segundo Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Tecnologias de tratamento de água estudadas

Tecnologias	Tipo	Processos e operações de tratamento
Ciclo completo (CC)	CC1	MRHVR (1) + FHCEH (1)+ DAT (2)+ FRDC (2) + DES (1) + FLU (1)
	CC2	MRHVR (1) + FMEVTI (2)+ DAT (2) + FRDC (2) + DES (1) + FLU (1)
Floto-filtração (FF)	FF	MRHVR (1) + FMEVTI (2)+ FAD (2) + FRDC (2)+ DES (1) + FLU (1)

CC1, CC2: opções da tecnologia de ciclo completo.

FF: opção da tecnologia de floto-filtração.

MRHVR: mistura rápida hidráulica com vertedor retangular.

FHCEH: floculador hidráulico de chicanas de escoamento horizontal.

DAT: decantador de alta taxa de placas.

FRDC: filtração rápida descendente em areia, a taxa constante.

DES: desinfecção com hipoclorito de sódio.

FMEVTI: floculador mecânico de eixo vertical de turbina com paletas inclinadas.

FLU: fluoração com ácido fluorsilícico.

FAD: flotação por ar dissolvido com pressurização da recirculação.

(): número de unidades de cada processo ou operação de tratamento de água.

Tabela 2 – Tecnologia de tratamento de resíduos avaliada

Tecnologia	Processos e operações de tratamento
ETR	TCA (2) + DLD (8)

DLD: desagumamento por leito de drenagem.

TCA: tanque de clarificação / adensamento por gravidade.

(): número de unidades de tratamento.

As variáveis ambientais consideradas nas ETAs na fase de construção foram: i) área requerida; e ii) consumo de chapa de aço e de concreto. Na fase de operação, as variáveis estudadas foram: i) consumo de energia elétrica; ii) consumo de produtos químicos; e iii) consumo de água para limpeza das unidades. No caso da ETR, foram estudados os requerimentos de concreto na fase de construção e a geração de resíduos na operação.

Através do memorial de cálculo e dos desenhos (plantas e cortes) elaborados por Sabogal Paz (2010), foram extraídos os quantitativos de construção e de funcionamento das tecnologias, conforme Tabelas 4 a 8. As características da água bruta utilizada na elaboração dos projetos são indicadas na Tabela 9.

Tabela 4. Quantitativos de construção e funcionamento da ETA de CC1 – para ETAs com vazões de projeto entre 10 L/s e 40L/s

Variável ambiental	Descrição	Unidade	Etapas do Tratamento	Modelo de Quantitativo Equações extraídas de Sabogal Paz (2010)
1. Construção				
Área requerida	Não aplica	m²	Não aplica	C= -0,09Q² + 33,2Q + 1462
Chapa de aço	Chapa de aço 6,30 mm	kg	Caixa de chegada de água bruta	C = 0,7667Q² + 12Q + 453,33
	Chapa de aço 6,30 mm	kg	Mistura rápida (vertedor retangular)	C = -1,25Q² + 87,5Q + 100
	Chapa de aço 6,30 mm	kg	Floculador de chicanas	C = -Q² + 180Q + 800
	Chapa de aço 4,75 mm	kg	Decantador de alta taxa	C = -0,5Q² + 245Q + 400
	Chapa de aço 6,30 mm	kg	Filtro rápido descendente e passarela	C = -0,4Q² + 44Q + 80
	Chapa de aço 4,75 mm			C = -5,8333Q² + 415Q - 1566,7
	Chapa de aço 6,30 mm	kg	Tanque de água filtrada e câmara de contato	C = -1,12Q² + 96,6Q + 196
	Chapa de aço 4,75 mm			C = -3,3Q² + 289Q + 740
Concreto	Concreto de 25 MPa para fundação	m³	Floculador de chicanas	C = -0,0017Q² + 0,15Q + 3,6667
	Concreto de 25 MPa para pilares			C = 0,0017Q² + 0,15Q + 3,3333
	Concreto de 25 MPa para laje			C = 0,0017Q² + 0,15Q + 3,3333
	Concreto de 25 MPa para fundação	m³	Decantador de alta taxa	C = 0,0025Q² + 0,025Q + 8
	Concreto de 25 MPa para fundação	m³	Filtro rápido descendente	C = 0,005Q² + 0,15Q + 4
	Concreto de 25 MPa para fundação	m³	Tanque de água filtrada e câmara de contato	C = -0,015Q² + 1,15Q - 2
	Concreto para fundação tipo radier – 25 MPa	m³	Casa de química	C = 40,0
	Concreto de 25 MPa para laje			C = 12,0
	Concreto para fundação (tipo radier – 25 MPa)	m³	Casa de bombas	C= 5
	Concreto para parede de arrimo – 25 MPa			C = -0,0083Q² + 0,75Q + 23,333
	Concreto para piso 25 MPa			C= 1
	Concreto para laje 20 MPa			C = 1,82
2. Operação				
Energia elétrica	Equipamentos (mensal)	kWh	Diferentes etapas da ETA	C = 5,4945Q + 557,21
Produtos químicos	Ácido fluorsilícico (mensal)	kg	Fluoretação	C= -0,1Q² + 21Q - 20
	Hipoclorito de sódio (mensal)	kg	Desinfecção	C= 66Q
	Cloreto férrico (mensal)	L	Coagulação	C= 72Q+60
	Sulfato de alumínio (mensal)	L	Coagulação	C= 90Q
Água de lavagem	Volume de água para limpeza das unidades (mensal)	m³	Diferentes etapas da ETA	C = -0,6833Q² + 202,9Q - 174,67

Notas: C= Quantitativo, Q = vazão de projeto (L/s)

O modelo de quantitativo é uma equação matemática que relacionam a vazão da ETA (L/s) com cada variável ambiental.

Tabela 5. Quantitativos de construção e funcionamento da ETA de CC2 – para ETAs com vazões de projeto entre 10 L/s e 40L/s

Variável ambiental	Descrição	Unidade	Etapas do Tratamento	Modelo de Quantitativo Equações extraídas de Sabogal Paz (2010)
1. Construção				
Área requerida	Não aplica	m²	Não aplica	C= -0,09Q² + 33,2Q + 1462
Chapa de aço	Chapa de aço 6,30 mm	kg	Caixa de chegada de água bruta	C = -0,1167Q² + 12,5Q + 16,667
	Chapa de aço 6,30 mm	kg	Mistura rápida (vertedor retangular)	C = -0,1Q² + 14Q + 50
	Chapa de aço 6,30 mm	kg	Floculador mecânico	C = -1,1667Q² + 105Q + 266,67
	Chapa de aço 4,75 mm			C = -Q² + 130Q + 500
	Chapa de aço 4,75 mm	kg	Decantador de alta taxa	C = -0,5Q² + 245Q + 400
	Chapa de aço 6,30 mm	kg	Filtro rápido descendente	C = -0,4Q² + 44Q + 80
	Chapa de aço 4,75 mm			C = -5,8333Q² + 415Q - 1566,7
	Chapa de aço 6,30 mm	kg	Tanque de água filtrada e câmara de contato	C = -1,12Q² + 96,6Q + 196
	Chapa de aço 4,75 mm	kg		C = -3,3Q² + 289Q + 740
Concreto	Concreto de 25 MPa para fundação	m³	Floculador mecânico	C = -0,0033Q² + 0,3Q - 0,6667
	Concreto de 25 MPa para pilares			C = 0,0008Q² - 0,025Q + 2,1667
	Concreto de 25 MPa para laje			C = -0,0033Q² + 0,3Q - 0,6667
	Concreto de 25 MPa para fundação	m³	Decantador de alta taxa	C = 0,0025Q² + 0,025Q + 8
	Concreto de 25 MPa para fundação	m³	Filtro rápido descendente	C = 0,005Q² + 0,15Q + 4
	Concreto de 25 MPa para fundação	m³	Tanque de água filtrada e câmara de contato	C = -0,015Q² + 1,15Q - 2
	Concreto para fundação tipo radier – 25 MPa	m³	Casa de química	C = 40,0
	Concreto de 25 MPa para laje			C = 12,0
	Concreto para fundação tipo radier – 25 MPa	m³	Casa de bombas	C = 5
	Concreto para parede de arrimo – 25 MPa			C = -0,0083Q² + 0,75Q + 23,333
	Concreto para piso 25 MPa			C= 1
	Concreto para laje 20 MPa			C= 1,82
2. Operação				
Energia elétrica	Equipamentos (mensal)	kWh	Diferentes etapas da ETA	C = 5,4945Q + 917,21
Produtos químicos	Hipoclorito de sódio (mensal)	kg	Fluoretação	C= 66Q
	Sulfato de alumínio (mensal)	L	Desinfecção	C= 90Q
	Cloreto férrico (mensal)	L	Coagulação	C= 72Q+60
	Ácido fluorsilícico (mensal)	kg	Coagulação	C= -0,1Q² + 21Q - 20
Água de lavagem	Volume de água para limpeza das unidades (mensal)	m³	Diferentes etapas da ETA	C = -0,46Q² + 196,1Q - 128

Notas:

C= Quantitativo, Q = vazão de projeto (L/s)

O modelo de quantitativo é uma equação matemática que relacionam a vazão da ETA (L/s) com cada variável ambiental.

Tabela 6. Quantitativos de construção e funcionamento da ETA de FF – para ETAs com vazões de projeto entre 10 L/s e 40L/s

Variável ambiental	Descrição	Unidade	Etapa do Tratamento	Modelo de Quantitativo Equações extraídas de Sabogal Paz (2010)
1. Construção				
Área requerida	Não aplica	m²	Não aplica	C = -0,065Q² + 36,05Q + 1414
Chapa de aço	Chapa de aço 6,30 mm	kg	Caixa de chegada de água bruta	C = -0,1167Q² + 12,5Q + 16,667
	Chapa de aço 6,30 mm	kg	Mistura rápida (vertedor retangular)	C = -0,1Q² + 14Q + 50
	Chapa de aço 6,30 mm	kg	Floculador mecânico	C = -1,1667Q² + 105Q + 266,67
	Chapa de aço 4,75 mm			C = -Q² + 130Q + 500
	Chapa de aço 6,30 mm	kg	Floto-filtro	C = -0,3333Q² + 70Q + 33,333
	Chapa de aço 4,75 mm			C = 0,1667Q² + 85Q + 333,3
Chapa de aço	Chapa de aço 6,30 mm	kg	Tanque de água filtrada e câmara de contato	C = -0,7417Q² + 85,25Q + 271,67
	Chapa de aço 4,75 mm			C = -2,625Q² + 268,75Q + 1175
Concreto	Concreto de 25 MPa para fundação	m³	Floculador mecânico	C = -0,0167Q² + Q + 14,667
	Concreto de 25 MPa para fundação	m³	Floto-filtro	C = 0,0017Q² + 0,35Q + 2,3333
	Concreto de 25 MPa para fundação	m³	Tanque de água filtrada e câmara de contato	C = -0,0117Q² + 1,05Q - 1,3333
	Concreto para fundação tipo radier – 25 MPa	m³	Casa de química	C = 40,0
	Concreto de 25 MPa para laje			C = 12,0
	Concreto para fundação tipo radier – 25 MPa	m³	Casa de bombas	C = 5
	Concreto para parede de arrimo – 25 MPa			C = -0,0067Q² + 0,7Q + 21,667
	Concreto para piso 25 MPa			C= 1
Concreto para laje 20 MPa	C= 1,82			
2. Operação				
Energia elétrica	Equipamentos (mensal)	kWh	Diferentes etapas da ETA	C = 0,6Q² - 3,8655Q + 1922,8
Produtos químicos	Hipoclorito de sódio (mensal)	kg	Fluoretação	C= 66Q
	Sulfato de alumínio (mensal)	L	Desinfecção	C= 90Q
	Cloreto férrico (mensal)	L	Coagulação	C= 72Q + 60
	Ácido fluorsilícico (mensal)	kg	Coagulação	C= -0,1Q² + 21Q - 20
Água de lavagem	Volume de água para limpeza das unidades (mensal)	m³	Diferentes etapas da ETA	C = -0,2133Q² + 172,2Q - 138,67

Notas:

C= Quantitativo, Q = vazão de projeto (L/s)

O modelo de quantitativo é uma equação matemática que relacionam a vazão da ETA (L/s) com cada variável ambiental.

Tabela 7. Quantitativos de construção e funcionamento da ETR para CC1 e CC2 – para ETAs com vazões de projeto entre 10 L/s e 40L/s

Valores de Projeto entre 10 L/s e 40 L/s				
Variável ambiental	Descrição	Unidade	Etapa do Tratamento	Modelo de Quantitativo Equações extraídas de Sabogal Paz (2010)
1. Construção				
Concreto	Concreto para fundação tipo radier – 25 MPa	m³	Tanques de clarificação / adensamento	C = 0,015Q² + 0,65Q + 18
	Concreto de 25 MPa paredes			C = -0,0167Q² + 1,1Q + 7,6667
	Concreto para fundação tipo radier – 25 Mpa	m³	Leitos de drenagem	C = -0,0033Q² + Q + 0,3333
	Concreto de 20 Mpa paredes			C = -0,0017Q² + 0,25Q + 3,6667
2. Operação				
Resíduos gerados	Volume anual de resíduos	m³	Leitos de drenagem	C = 12,41Q - 1,21

Notas:

C= Quantitativo, Q = vazão de projeto (L/s)

O modelo de quantitativo é uma equação matemática que relacionam a vazão da ETA (L/s) com cada variável ambiental.

Tabela 8. Quantitativos de construção e funcionamento da ETR para FF – para ETAs com vazões de projeto entre 10 L/s e 40L/s

Variável ambiental	Descrição	Unidade	Etapa do Tratamento	Modelo de Quantitativo Equações extraídas de Sabogal Paz (2010)
1. Construção				
Concreto	Concreto para fundação tipo radier – 25 MPa	m³	Tanques de clarificação / adensamento	C = 0,0083Q² + 1,05Q + 13,667
	Concreto de 25 MPa paredes			C = 0,0133Q² - 0,3Q + 16,667
	Concreto para fundação tipo radier – 25 Mpa	m³	Leitos de drenagem	C = -0,0033Q² + Q + 0,3333
	Concreto de 20 Mpa paredes			C = -0,0017Q² + 0,25Q + 3,6667
2. Operação				
Resíduos gerados	Volume anual de resíduos	m³	Leitos de drenagem	C = 12,41Q - 1,21

Notas:

C= Quantitativo, Q = vazão de projeto (L/s)

O modelo de quantitativo é uma equação matemática que relacionam a vazão da ETA (L/s) com cada variável ambiental.

Tabela 9. Características gerais da água bruta dos projetos avaliados por Sabogal Paz (2010)

Frequência de ocorrência do parâmetro	Turbidez (uT)	Cor Verdadeira (uH)	Ferro Total (mg/L)	Manganês Total (mg/L)	Coliformes Totais (NMP/100mL)	<i>Escherichia coli</i> (NMP/100mL)
100%	≤ 100	≤ 20	≤ 5	≤ 1,0	≤ 5000	≤ 1500
95 %	≤ 50	≤ 15	≤ 4	≤ 0,6	≤ 2500	≤ 1000

O método proposto por Sabogal Paz & Gandini (2011) foi utilizado para definir os indicadores ambientais de cada uma das variáveis ambientais geradoras de impactos negativos em ETAs. A Tabela 10 apresenta as variáveis consideradas na determinação dos indicadores ambientais.

Tabela 10. Variáveis e indicadores ambientais segundo modelo de Sabogal Paz & Gandini (2011)

Variáveis		Indicadores
Construção	Área construída- ETA + ETR	$IA_{\text{área}} = \frac{\text{Área da tecnologia avaliada (m}^2\text{)}}{\text{m}^2 \text{ da tecnologia com maior requerimento de área}}$
	Chapa de aço	$IA_{\text{chapa}} = \frac{\text{quantidade de chapa de aço para tecnologia avaliada (kg)}}{\text{kg da tecnologia com maior requerimento de chapa de aço}}$
	Concreto	$IA_{\text{concreto}} = \frac{\text{Volume de concreto para tecnologia avaliada (m}^3\text{)}}{\text{m}^3 \text{ da tecnologia com maior requerimento de concreto}}$
Operação	Requerimento de produtos químicos	$IA_{\text{produtosquim.}} = \frac{\text{Consumo de produtos químicos pela tecnologia avaliada (kg ou L)}}{\text{kg ou L da tecnologia com maior consumo de produtos químicos}}$
	Requerimento energético	$IA_{\text{energia}} = \frac{\text{Consumo de energia elétrica pela tecnologia avaliada (kWh)}}{\text{kWh da tecnologia com maior consumo de energia elétrica}}$
	Água de lavagem na ETA	$IA_{\text{águalavagem}} = \frac{\text{Água para lavagem requerida pela tecnologia avaliada (m}^3\text{)}}{\text{m}^3 \text{ da tecnologia com maior consumo de água para lavagem}}$
	Resíduos sólidos – ETR	$IA_{\text{resíduoETR}} = \frac{\text{Resíduos gerados pela tecnologia avaliada (m}^3\text{)}}{\text{m}^3 \text{ da tecnologia com maior geração de resíduos}}$

Com a quantificação do indicador de cada variável considerada, o método possibilitou estabelecer um único indicador ambiental total (IAT) que permite estimar o impacto ambiental gerado por cada uma das tecnologias consideradas. O IAT correspondeu à soma de 8 indicadores ambientais da Tabela 10, conforme Equação 1:

$$IAT = IA_{\text{área}} + IA_{\text{chapa}} + IA_{\text{concretoETA}} + IA_{\text{concretoETR}} + IA_{\text{produtosquim.}} + IA_{\text{energia}} + IA_{\text{águalavagem}} + IA_{\text{resíduoETR}}$$

Equação 1

Pelo fato de algumas variáveis ambientais serem mais significativas que outras, Sabogal Paz & Gandini (2011) consideraram o acréscimo de coeficientes, com pesos, para o indicador ambiental de cada variável de forma a representar a importância relativa. Os pesos adotados devem atender à condição da Equação 2:

$$a + b + c + d + e + f + g + h = 1,0$$

Equação 2

Em que

- a: coeficiente da área construída ETA+ETR;
- b: coeficiente da chapa de aço;
- c: coeficiente do concreto para ETA;
- d: coeficiente do concreto para ETR;
- e: coeficiente de requerimento de produtos químicos;
- f: coeficiente do requerimento energético;
- g: coeficiente da água de lavagem;
- h: coeficiente de resíduos sólidos ETR.

Quando um dos coeficientes estiver próximo de 1,0 representa que a variável ambiental é significativa, da mesma forma, quando tender a zero é interpretado como uma variável ambiental não muito relevante. Na pesquisa, pela dificuldade de quantificar os coeficientes sem cair na subjetividade, como primeira aproximação, considerou-se que todos os coeficientes possuíam o mesmo valor (peso = 0,125).

Conjugando as Equações 1 e 2, o indicador ambiental total (IAT) foi calculado utilizando a Equação 3.

$$IAT = aIA_{\text{área}} + bIA_{\text{chapa}} + cIA_{\text{concretoETA}} + dIA_{\text{concretoETR}} + eIA_{\text{produtosquim.}} + fIA_{\text{energia}} + gIA_{\text{águalavagem}} + hIA_{\text{resíduoETR}}$$

Equação 3

Os valores do IAT podem variar entre 0 e 1,0. Neste caso, quando uma tecnologia apresenta um IAT próximo de 1,0 significa que ela ocasionará o maior impacto dentre as tecnologias analisadas. Caso contrário os seus efeitos ambientais serão menores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 1 e 2 apresentam os quantitativos de cada variável ambiental estudada nas fases de construção e operação das ETAs e ETR avaliadas para vazão de projeto de 40L/s, segundo os modelos de quantitativos extraídos de Sabogal Paz (2010).

Fase de construção

a) Área construída – ETA+ETR

A floto-filtração, dentre as tecnologias avaliadas, exigiu maior área de implantação para as unidades de tratamento de água e resíduos (total de 2752 m²), 3,85% a mais que os sistemas de ciclo completo considerados (CC1 e CC2) que obtiveram o mesmo valor (2646 m²), conforme Figura 1a.

b) Materiais de construção

Nos quantitativos de chapa de aço e de concreto necessários para a etapa de construção das ETA, a tecnologia CC1 teve o maior requerimento de materiais (Figuras 1b e 1c, respectivamente). Tal resultado pode ser explicado pela adoção dos floculadores tipo chicanas horizontais. Segundo Sabogal Paz (2010), pelo fato dos floculadores apresentarem pouca profundidade do canal, para realizar a mistura foi necessária, consequentemente, uma maior área em planta.

Segundo a Figura 1d, a quantidade de concreto para a construção da unidade de floto-filtro foi 19,1 m³; porém, o volume de concreto para a construção dos decantadores e filtros nas tecnologias de ciclo completo (CC1 e CC2) foi de 31 m³, ou seja, 38,8% a mais de material.

O consumo de concreto, na ETR considerada, foi igual para as tecnologias de CC (138,9 m³) conforme a Figura 2^a; entretanto, a FF precisou de 140,9 m³ a mais devido às configurações adotadas no sistema.

Fase de operação

a) Consumo de produtos químicos

Conforme a Tabela 11, os consumos mensais de hipoclorito de sódio (desinfecção) e de ácido fluorsilícico (fluoretação) foram de 660,0 kg e 2640,0 kg, respectivamente para CC1, CC2 e FF. A dosagem não variou de uma tecnologia para outra. Em relação ao cloreto férrico e sulfato de alumínio, ambos os coagulantes, apresentaram os mesmos comportamentos, com requerimentos mensais de 2940L de cloreto férrico e 3600L de sulfato de alumínio para as três ETAs avaliadas. Tais resultados se devem ao fato que a água bruta considerada nos projetos apresentou as mesmas características para as duas tecnologias (CC e FF), segundo Tabela 9.

b) Consumo de energia elétrica

Conforme a Figura 1e, o consumo de energia elétrica foi significativamente maior na FF, ou seja, 3,5 vezes mais quando comparada a CC1 e 2,4 vezes mais quando comparada a CC2. Tal resultado era esperado, pois na floto-filtração, além dos floculadores mecânicos (também presentes no CC₂), outros equipamentos são necessários no sistema recirculação de água pressurizada.

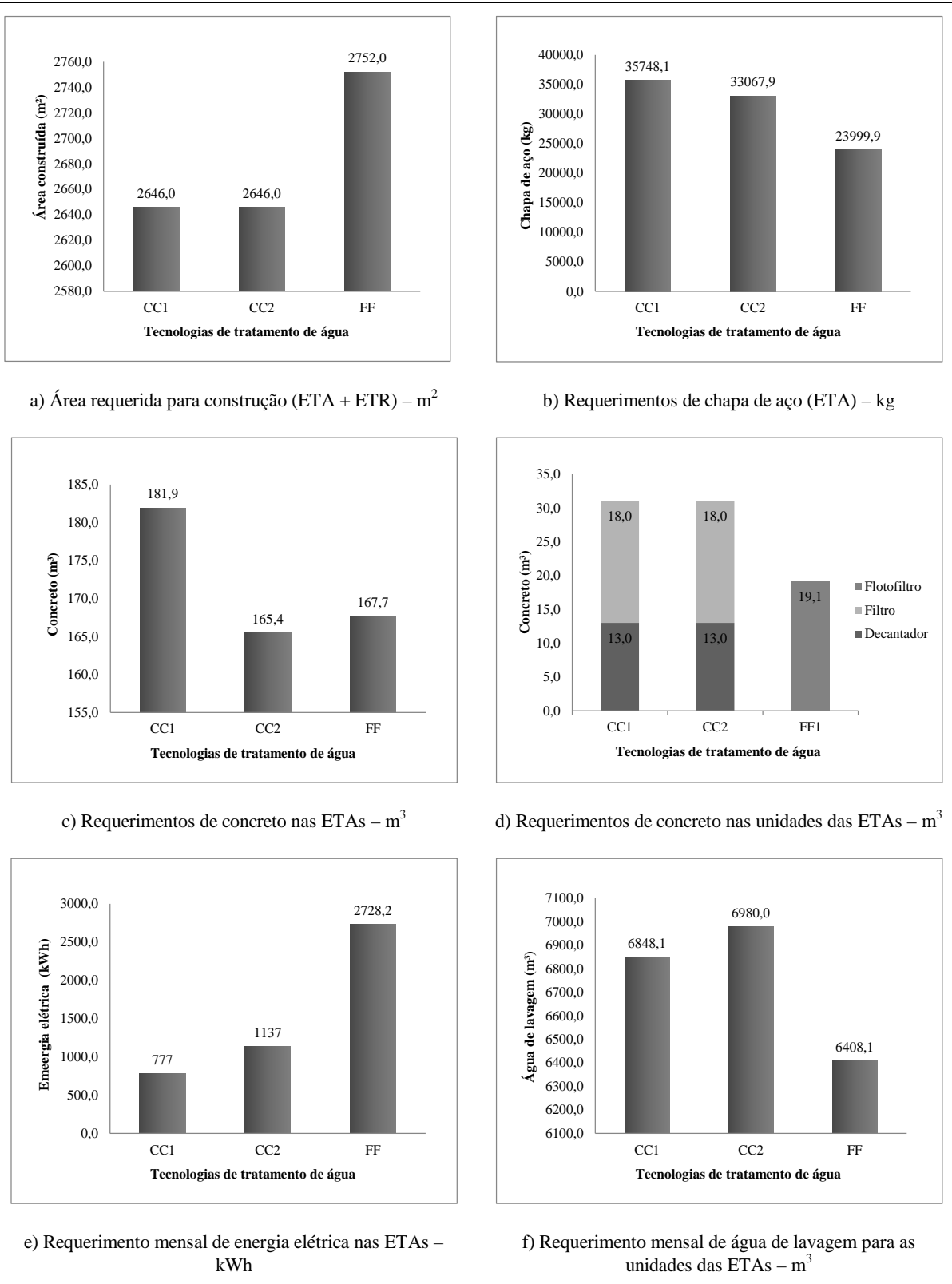


Figura 1. Quantitativos de construção e funcionamento segundo aplicação dos modelos de quantitativos extraídos de Sabogal Paz (2010) – ETAs com vazão de projeto de 40L/s.

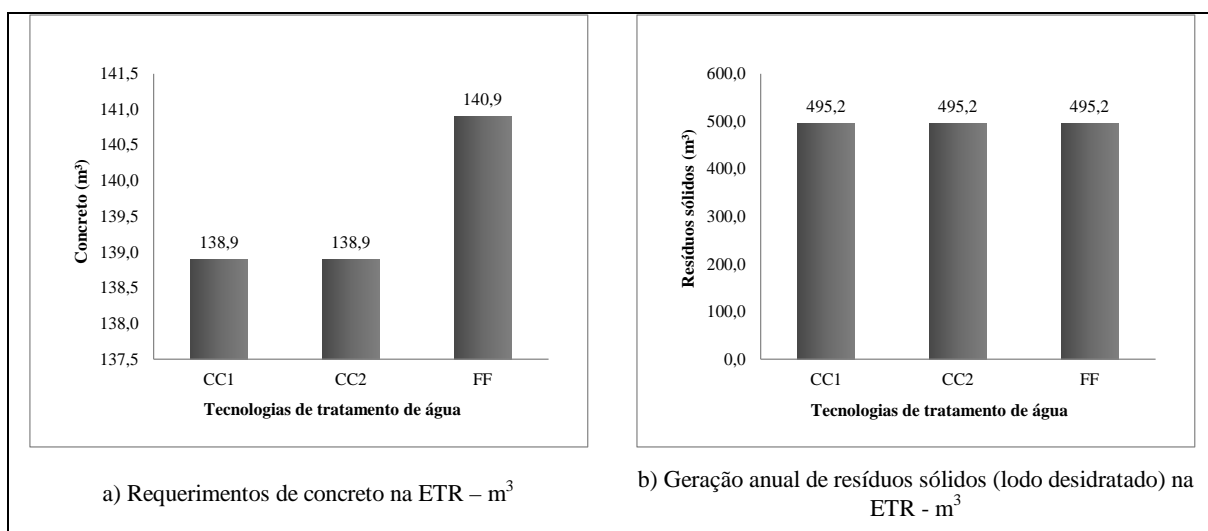


Figura 2. Quantitativos de construção e funcionamento segundo aplicação dos modelos de quantitativos extraídos de Sabogal Paz (2010) – ETRs.

Tabela 11. Quantitativo do consumo mensal de produtos químicos segundo aplicação dos modelos de quantitativos extraídos de Sabogal Paz (2010) – ETAs com vazão de projeto de 40L/s.

Produtos químicos	Tecnologias de tratamento de água		
	CC1	CC2	FF
Ácido fluorsilícico (kg)	660	660	660
Hipoclorito de sódio (kg)	2640	2640	2640
Cloreto férrico (L)	2940	2940	2940
Sulfato de alumínio (L)	3600	3600	3600

c) Água de lavagem das unidades

A tecnologia mais impactante em relação ao consumo de água para lavagem foi o ciclo completo, aproximadamente 570 m³/mês a mais do que a FF, o que se deve ao maior número de unidades que precisam de limpeza (Figura 1f). A pequena diferença encontrada entre os sistemas de CC1 e CC2 é provavelmente devido às dimensões adotadas em suas unidades.

e) Resíduos sólidos (após tratamento do lodo na ETR)

Com a limpeza das unidades, os resíduos líquidos foram encaminhados a ETR. Após o tratamento destes nos tanques de clarificação/adensamento e leitos de drenagem, o volume anual de resíduos gerados (lodo desidratado) foi de 495,2 m³/ano para as três tecnologias segundo a Figura 2b. Tais resultados se devem ao fato que a água bruta considerada apresentou as mesmas características para as duas tecnologias (CC e FF), segundo Tabela 9.

Determinação dos indicadores ambientais

A Tabela 12 apresenta os indicadores, conforme método de Sabogal Paz & Gandini (2011). Observa-se que o indicador ambiental $IA_{\text{produtosquim}}$ (produtos químicos) apresentou o mesmo valor, ou seja, igual impacto ambiental para as tecnologias. O fato aconteceu porque as ETAs avaliadas operaram com o mesmo tipo de água bruta. Em relação à demanda de energia elétrica a FF teve o valor de 1,0 por seu elevado requerimento de energia na operação.

Tabela 12 - Determinação dos indicadores ambientais para as variáveis consideradas na fase de construção e operação – ETAs com vazão de projeto de 40 L/s e ETR

Fases	Indicadores	Tecnologias		
		CC1 + ETR	CC2 + ETR	FF1+ ETR
Construção	IA _{área}	0,96	0,96	1,0
	IA _{chapa}	1,0	0,91	0,81
	IA _{concretoETA}	1,0	0,96	0,97
	IA _{concretoETR}	0,99	0,99	1,0
Operação	IA _{energia}	0,28	0,42	1,0
	IA _{produtosquim.}	1,0	1,0	1,0
	IA _{águalavagem}	0,98	1,0	0,92
	IA _{resíduoETR}	1,0	1,0	1,0

A Tabela 13 apresenta os IATs calculados, segundo o método de Sabogal Paz & Gandini (2011). Levando em consideração as 8 variáveis ambientais, a floto-filtração foi a tecnologia que mais se aproximou de 1,0; ou seja, é a ETA que ocasionará maior impacto ambiental negativo.

Tabela 13 - Determinação do Indicador Ambiental Total – ETAs com vazão de projeto de 40 L/s e ETR

Tecnologias	Indicador Ambiental Total (IAT)
CC1 + ETR	0,90
CC2 + ETR	0,91
FF + ETR	0,96

Pode-se dizer que tal resultado condiz com os trabalhos relacionados. No caso, Vince, *et al.* (2008) e Bonton *et al.* (2011) constataram que o consumo de energia pela ETA é a principal fonte de impacto.

CONCLUSÕES

O sistema CC1, dentre as tecnologias avaliadas, possui impacto ambiental mínimo. A floto-filtração, devido ao maior consumo de energia elétrica foi considerada a mais impactante, condizente com outros estudos que constataram que tal variável é a principal fonte de impacto dentre todas as fases envolvidas nos sistemas de tratamento.

Os quantitativos das ETAs e ETR, que indicam a magnitude das variáveis ambientais, dependem muito dos critérios adotados no projeto; ou seja, o impacto ambiental está relacionado à concepção feita pelo engenheiro.

O método proposto por Sabogal Paz e Gandini (2011) foi fácil de aplicar e a interpretação dos indicadores permite orientar a seleção de ETAs considerando aspectos ambientais. Tal ferramenta representa o primeiro passo para a avaliação sistemática da componente ambiental em sistemas de tratamento de água, mudando assim, a abordagem normalmente adotada na seleção das tecnologias em que se ignora a realidade da área de estudo e principalmente, o meio ambiente.

O aprimoramento do método de Sabogal Paz e Gandini (2011) contribuirá para a tomada de decisão na seleção de ETAs com ETRs envolvendo a componente ambiental na escolha da tecnologia. Destaca-se que é importante envolver outras variáveis ambientais no processo de escolha das tecnologias, tais como: consumo de meios filtrantes, remoção de solo (escavação) e geração de ruídos.

No contexto de soluções sustentáveis, na escolha da tecnologia, além dos aspectos ambientais, devem ser avaliados os critérios sociais, culturais, institucionais, de recursos locais, econômicos e financeiros do problema em questão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BONTON, A.; BOUCHARD, C.; BARBEAU, B.; JEDRZEJAK, S. (2011). Comparative life cycle assessment of water treatment plants. *Desalination*, v.35, p. 1-13.
2. DI BERNARDO, L; SABOGAL PAZ, L. P (2008). Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água. Editora LDiBe. v 1 e v.2. p.1560.
3. GANDINI, M. A; GALVIS, A. (2000). La Dimensión Ambiental en la Selección de Tecnología de Agua Potable. Seminario Taller de Selección de Tecnología para el Mejoramiento de la Calidad del Agua. Octubre. Santiago de Cali. Colombia.
4. SABOGAL PAZ, L P (2010). Modelo Conceitual de Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água para Abastecimento de Comunidades de Pequeno e Médio Porte. Relatório Pós-doutorado. FAPESP. São Paulo/SP.
5. SABOGAL PAZ, L. P; GANDINI, A. M. A (2011). Technology selection for water drinking treatment how to take into account environmental aspects?. In: BILIBIO, C., HENSEL, O., SELBACH, J. Editora e co-editoras: Fundação Universidade Federal do Pampa, Unikassel, PGCult/UFMA. (Org.). Sustainable water management in the tropics and subtropics - and case studies in Brazil. PGCult/UFMA: Fundação Universidade Federal do Pampa, Unikassel, PGCult/UFMA, 2011, v. Vol 4, p. 583-604.
6. WIECHETECK, G. K. ; CORDEIRO, J. S. (2002). Gestão ambiental de sistemas de tratamento de água. In: Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 28., 2002, Cancún. Anais. Cancún: Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – AIDIS.
7. VINCE, F.; Aoustin, E.; BREANT, P.; MARECHAL, F. (2008). LCA tool for the environmental evaluation of potable water production. *Desalination*, Amsterdam, v.220, n.1-3, pp.37-56, March 2008, ISSN: 0011-9164.