CHRISTINE MIRANDA DIAS

**Modelos para a tomada de decisão quanto ao tipo de sistema predial de água
não potável**

São Paulo
2017

CHRISTINE MIRANDA DIAS

**Modelos para a tomada de decisão quanto ao tipo de sistema predial de água
não potável**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Orientador:
Profa. Dra. Lúcia Helena de Oliveira

São Paulo
2017

CHRISTINE MIRANDA DIAS

**Modelos para a tomada de decisão quanto ao tipo de sistema predial de água
não potável**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Área de Concentração:
Engenharia de Construção Civil

Orientadora:
Profa. Dra. Lúcia Helena de Oliveira

São Paulo
2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Dias, Christine Miranda

Modelos para a tomada de decisão quanto ao tipo de sistema predial de água não potável / C. M. Dias -- versão corr. -- São Paulo, 2017.
221 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Sistemas prediais 2.Água não potável 3.Tomada de decisão 4.Pesquisa Operacional 5.Programação Linear I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Lúcia Helena de Oliveira e ao Prof. Dr. Fernando Akira Kurokawa, por todos os ensinamentos e conselhos. Obrigada pela confiança.

Ao Prof. Dr. Orestes Marraccini Gonçalves, pelo encorajamento, contribuições no exame de qualificação e presença durante a defesa.

À Edwiges Ribeiro e à TESIS, por todo o apoio e compreensão.

A cada um dos meus amigos e amigas, pelas palavras de incentivo e torcida.

À Bruna, pela amizade sincera. Sua presença na defesa alegrou o meu coração.

Aos meus pais, Cristina e Rui, pelo amor incondicional, pela paciência e por acreditarem em mim mais do que eu mesma. Obrigada pelas palavras certas em todos os momentos. Eu amo vocês.

E a Deus, Minha Âncora da Alma, por sua graça e misericórdia.

Tudo o que fizerem, façam de todo o coração, como para o Senhor, e não para os homens, sabendo que receberão do Senhor a recompensa da herança. É a Cristo, o Senhor, que vocês estão servindo.

Colossenses 3:23-24

RESUMO

Os sistemas prediais de água não potável podem ser do tipo centralizado, quando os efluentes oriundos de diversas edificações são coletados e transportados para um único local de tratamento e redistribuídos para um conjunto de residências; ou descentralizado, quando a coleta, o tratamento e o transporte dos efluentes ocorrem próximos ao local de produção. Porém, tanto o sistema centralizado quanto o descentralizado possui particularidades que os fazem interessantes ou não em aspectos sociais, econômicos e ambientais. Desta forma, o objetivo principal desta pesquisa foi formular modelos matemáticos que permitissem comparar o sistema centralizado com o descentralizado. Para o desenvolvimento do estudo realizou-se uma revisão bibliográfica com o intuito de coletar informações sobre as principais variáveis que interferem na tomada de decisão de cada tipo de sistema. A partir dos princípios da Programação Linear Inteira foram formulados três modelos que permitiram encontrar qual tipo de sistema apresenta o menor custo total acumulado, quanto é o valor desse custo ao longo do tempo e quantos sistemas são necessários instalar para atender a uma demanda específica. Com base nos dados da literatura consultada, o sistema centralizado apresentou-se mais vantajoso do que os sistemas descentralizados quanto aos custos de implantação, de manutenção e de operação considerando uma vida útil de 20 anos. Todavia, verificou-se que a escolha do sistema mais viável não deve se concentrar apenas nos custos, mas também devem ser consideradas variáveis qualitativas. Deste modo, as formulações gerais dos modelos permitem a inserção de outras variáveis de decisão e restrições para aprimorar a tomada de decisão quanto ao tipo de sistema predial de água não potável a ser implantado.

Palavras-chave: sistema predial de água não potável. Tomada de decisão. Sistema centralizado. Sistema descentralizado. Programação linear inteira.

ABSTRACT

Non-potable water systems may be of the centralized type when effluents from several buildings are collected and transported to a single treatment site and redistributed to a set of residences; or decentralized, when the collection, treatment and transportation of the effluent occurs near the place of production. However, both the centralized and decentralized systems have particularities that make them interesting or not in social, economic and environmental aspects. In this way, the main objective of this research was to formulate mathematical models that allowed to compare the centralized system with the decentralized one. For the development of the study a bibliographic review was carried out in order to collect information on the main variables that interfere in the decision making of each type of system. From the principles of Linear Programming, three models were formulated that allowed to find out which type of system has the lowest cumulative total cost, what is the value of this cost over time and how many systems are needed to meet a specific demand. Based on the data of the literature, the centralized system was more advantageous than the decentralized systems in terms of the implantation, maintenance and operation costs considering a useful life of 20 years. However, it has been found that the choice of the most viable system should not only focus on costs but should also be considered as qualitative variables. In this way, the general models formulations allow the insertion of other decision variables and constraints to improve the decision making regarding the type of non-potable water system to be implanted.

Keywords: non-potable water system. Decision making. Centralized system. Decentralized system. Linear Programming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	– Estruturação do sistema predial de água não potável	26
Figura 2.2	– Aspectos importantes na seleção de sistemas de tratamento de esgotos	38
Figura 2.3	– Sistema centralizado de água não potável	43
Figura 2.4	– Sistemas descentralizados individuais de água não potável	44
Figura 2.5	– Sistemas descentralizados em grupo de água não potável	44
Figura 4.1	– Fluxograma com as etapas da pesquisa	67
Figura 4.2	– Tarifa de energia elétrica utilizada para o cálculo do custo de operação	71
Figura 5.1	– Inserção dos dados do modelo no <i>software</i> LINDO™ (edifício comercial)	91
Figura 5.2	– Solução do modelo no <i>software</i> LINDO™ (edifício comercial)	91
Figura 5.3	– Relatório dos resultados do modelo fornecido pelo <i>software</i> LINDO™ (edifício comercial)	92
Figura 5.4	– <i>Reduced cost</i> fornecido pelo <i>software</i> LINDO™ (edifício comercial)	96
Figura 5.5	– Custo de implantação e de manutenção acumulado durante a vida útil dos sistemas detalhados em Hastenreiter (2013) para uma edificação comercial com 156 habitantes	97
Figura 5.6	– Custo total acumulado durante a vida útil dos sistemas detalhados em Hastenreiter (2013) para uma edificação com 156 habitantes	103
Figura 5.7	– Custo total acumulado durante a vida útil dos sistemas, considerando um reajuste anual de 3% para o custo de manutenção Sistema 1 (DBR)	107
Figura 5.8	– Opção 1 com dez sistemas prediais descentralizados individuais	112
Figura 5.9	– Opção 2 com cinco sistemas prediais descentralizados em grupo	113
Figura 5.10	– Opção 3 com um sistema predial centralizado	113
Figura 5.11	– Inserção dos dados do modelo no <i>software</i> LINDO™ (condomínio residencial)	116
Figura 5.12	– Solução do modelo no <i>software</i> LINDO™ (condomínio residencial)	117
Figura 5.13	– Relatório dos resultados do modelo fornecido pelo <i>software</i> LINDO™ (condomínio residencial)	117
Figura 5.14	– Inserção dos dados do modelo no <i>software</i> LINDO™ (condomínio residencial)	119
Figura 5.15	– Relatório dos resultados do modelo fornecido pelo <i>software</i> LINDO™ (condomínio residencial)	120

Figura 5.16	–	Custo total acumulado durante a vida útil das opções disponíveis para o condomínio com 1.700 habitantes	127
Figura 5.17	–	Custo total acumulado, com o efeito escala, durante a vida útil das opções disponíveis para o condomínio com 1.700 habitantes	134
Figura 5.18	–	Opção 1 com sete sistemas descentralizados individuais	139
Figura 5.19	–	Opção 2 com três sistemas descentralizados em grupo	139
Figura 5.20	–	Opção 3 com um sistema centralizado	140
Figura 5.21	–	Inserção dos dados do modelo no <i>software</i> LINDO™ (cidade)	143
Figura 5.22	–	Solução do modelo no <i>software</i> LINDO™ (cidade)	144
Figura 5.23	–	Relatório dos resultados do modelo fornecido pelo <i>software</i> LINDO™ (cidade)	144
Figura 5.24	–	Inserção dos dados do modelo no <i>software</i> LINDO™ (cidade)	146
Figura 5.25	–	Relatório dos resultados do modelo fornecido pelo <i>software</i> LINDO™ (cidade)	146
Figura 5.26	–	Custo total acumulado durante a vida útil das opções disponíveis para a cidade com 29.400 habitantes	154
Figura 5.27	–	Custo total acumulado, com o efeito escala, durante a vida útil das opções disponíveis para a cidade com 29.400 habitantes	163
Figura 5.28	–	Custos de manutenção e de operação acumulados, com o efeito escala, durante a vida útil das opções disponíveis para a cidade com 29.400 habitantes	164
Figura A.1	–	Resultados do modelo formulado considerando os custos de implantação e de manutenção dos sistemas (quinto ano de operação)	176
Figura A.2	–	Resultados do modelo formulado considerando os custos de implantação e de manutenção dos sistemas (décimo ano de operação)	177
Figura A.3	–	Resultados do modelo formulado considerando os custos de implantação e de manutenção dos sistemas (décimo quinto ano de operação)	177
Figura A.4	–	Resultados do modelo formulado considerando os custos de implantação e de manutenção dos sistemas (vigésimo ano de operação)	178
Figura A.5	–	Resultados do modelo formulado considerando os custos de implantação, de manutenção e de operação dos sistemas (primeiro ano de operação)	178
Figura A.6	–	Resultados do modelo formulado considerando os custos de implantação, de manutenção e de operação dos sistemas (quinto ano de operação)	179

Figura A.7	– Resultados do modelo formulado considerando os custos de implantação, de manutenção e de operação dos sistemas (décimo ano de operação)	179
Figura A.8	– Resultados do modelo formulado considerando os custos de implantação, de manutenção e de operação dos sistemas (décimo quinto ano de operação)	180
Figura A.9	– Resultados do modelo formulado considerando os custos de implantação, de manutenção e de operação dos sistemas (vigésimo ano de operação)	180
Figura A.10	– Resultados do modelo formulado considerando taxa de reajuste no custo de manutenção do Sistema 1 (DBR) igual a 2% ao ano (quinto ano de operação)	181
Figura A.11	– Resultados do modelo formulado considerando taxa de reajuste no custo de manutenção do Sistema 1 (DBR) igual a 2% ao ano (décimo ano de operação)	181
Figura A.12	– Resultados do modelo formulado considerando taxa de reajuste no custo de manutenção do Sistema 1 (DBR) igual a 2% ao ano (décimo quinto ano de operação)	182
Figura A.13	– Resultados do modelo formulado considerando taxa de reajuste no custo de manutenção do Sistema 1 (DBR) igual a 2% ao ano (vigésimo ano de operação)	182
Figura A.14	– Resultados do modelo formulado considerando taxa de reajuste no custo de manutenção do Sistema 1 (DBR) igual a 3% ao ano (quinto ano de operação)	183
Figura A.15	– Resultados do modelo formulado considerando taxa de reajuste no custo de manutenção do Sistema 1 (DBR) igual a 3% ao ano (décimo ano de operação)	183
Figura A.16	– Resultados do modelo formulado considerando taxa de reajuste no custo de manutenção do Sistema 1 (DBR) igual a 3% ao ano (décimo quinto ano de operação)	184
Figura A.17	– Resultados do modelo formulado considerando taxa de reajuste no custo de manutenção do Sistema 1 (DBR) igual a 3% ao ano (vigésimo ano de operação)	184
Figura A.18	– Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para o condomínio (primeiro ano de operação)	185
Figura A.19	– Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para o condomínio (quinto ano de operação)	185
Figura A.20	– Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para o condomínio (décimo ano de operação)	186
Figura A.21	– Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para o condomínio (décimo quinto ano de operação)	186

Figura A.22	– Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para o condomínio (vigésimo ano de operação)	187
Figura A.23	– Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala no custo de manutenção das opções para o condomínio (primeiro ano de operação)	187
Figura A.24	– Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala no custo de manutenção das opções para o condomínio (quinto ano de operação)	188
Figura A.25	– Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala no custo de manutenção das opções para o condomínio (décimo ano de operação)	188
Figura A.26	– Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala no custo de manutenção das opções para o condomínio (décimo quinto ano de operação)	189
Figura A.27	– Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala no custo de manutenção das opções para o condomínio (vigésimo ano de operação)	189
Figura A.28	– Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para a cidade (primeiro ano de operação)	190
Figura A.29	– Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para a cidade (quinto ano de operação)	190
Figura A.30	– Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para a cidade (décimo ano de operação)	191
Figura A.31	– Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para a cidade (décimo quinto ano de operação)	191
Figura A.32	– Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para a cidade (vigésimo ano de operação)	192
Figura A.33	– Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala nos custos das opções para a cidade (primeiro ano de operação)	192
Figura A.34	– Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala nos custos das opções para a cidade (quinto ano de operação)	193
Figura A.35	– Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala nos custos das opções para a cidade (décimo ano de operação)	193
Figura A.36	– Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala nos custos das opções para a cidade (décimo quinto ano de operação)	194
Figura A.37	– Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala nos custos das opções para a cidade (vigésimo ano de operação)	194

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1	–	Conceitos básicos relativos à água potável e não potável	30
Quadro 2.2	–	Principais tipos de tratamento em nível secundário e terciário	52
Quadro 3.1	–	Considerações implícitas em um modelo de Programação Linear . .	62
Quadro A.1	–	Descrição, vantagens e desvantagens dos principais tipos de tratamentos encontrados na literatura nacional	208

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	– Média anual da cotação do dólar para atualização dos custos fornecidos pelas referências consultadas	69
Tabela 5.1	– Características dos sistemas descentralizados individuais fornecidos por Hastenreiter (2013) para uma edificação comercial com 156 habitantes	88
Tabela 5.2	– Custos em dólar dos sistemas descentralizados individuais para uma edificação comercial com 156 habitantes	88
Tabela 5.3	– Custos de manutenção acumulados dos sistemas para os respectivos anos de análise	93
Tabela 5.4	– Síntese dos resultados obtidos por meio do <i>software</i> LINDO™ . . .	95
Tabela 5.5	– Custos de operação acumulados dos sistemas para os respectivos anos de análise	99
Tabela 5.6	– Síntese dos resultados obtidos por meio do <i>software</i> LINDO™	102
Tabela 5.7	– Custos de manutenção acumulados do Sistema 1 considerando diferentes taxas de reajuste anual	105
Tabela 5.8	– Síntese dos resultados obtidos por meio do <i>software</i> LINDO™, considerando uma taxa de reajuste anual de 2% para o custo de manutenção Sistema 1 (DBR)	106
Tabela 5.9	– Síntese dos resultados obtidos por meio do <i>software</i> LINDO™, considerando uma taxa de reajuste anual de 3% para o custo de manutenção Sistema 1 (DBR)	106
Tabela 5.10	– População, custos e consumo de energia de cada sistema indicado na literatura	109
Tabela 5.11	– Custos em dólar de cada sistema indicado na literatura.	110
Tabela 5.12	– Custos de operação acumulados dos sistemas para os respectivos anos de análise	110
Tabela 5.13	– Custos de manutenção acumulados dos sistemas para os respectivos anos de análise	111
Tabela 5.14	– Custos de cada opção no primeiro ano de operação	121
Tabela 5.15	– Custos de manutenção acumulados das opções para os quinquênios de análise	121
Tabela 5.16	– Custos de operação acumulados das opções para os quinquênios de análise	122
Tabela 5.17	– Síntese dos resultados obtidos por meio do <i>software</i> LINDO™	126
Tabela 5.18	– Efeito escala no custo de manutenção de sistemas descentralizados	129

Tabela 5.19	– Custos de manutenção unitários dos sistemas considerando o efeito escala	130
Tabela 5.20	– Custos de manutenção acumulados considerando o efeito escala .	130
Tabela 5.21	– Síntese dos resultados obtidos por meio do <i>software</i> LINDO™	133
Tabela 5.22	– População, custos e consumo de energia de cada sistema indicado na literatura	136
Tabela 5.23	– Custos em dólar de cada sistema indicado na literatura	137
Tabela 5.24	– Custos de manutenção acumulados dos sistemas para os respectivos anos de análise	137
Tabela 5.25	– Custos de operação acumulados dos sistemas para os respectivos anos de análise	138
Tabela 5.26	– Custos de cada opção no primeiro ano de operação	148
Tabela 5.27	– Custos de manutenção acumulados das opções para os quinquênios de análise	148
Tabela 5.28	– Custos de operação acumulados das opções para os quinquênios de análise	149
Tabela 5.29	– Síntese dos resultados obtidos por meio do <i>software</i> LINDO™	153
Tabela 5.30	– População, custos e consumo de energia de cada sistema indicado na literatura	155
Tabela 5.31	– Custos em dólar de cada sistema indicado na literatura	156
Tabela 5.32	– Custos de manutenção unitários dos sistemas considerando o efeito escala	157
Tabela 5.33	– Custos de cada opção no primeiro ano de operação	158
Tabela 5.34	– Custos de manutenção acumulados das opções para os quinquênios de análise	158
Tabela 5.35	– Custos de operação acumulados das opções para os quinquênios de análise	159
Tabela 5.36	– Síntese dos resultados obtidos por meio do <i>software</i> LINDO™	162
Tabela B.1	– <i>Reduced cost</i> e custo acumulado dos sistemas (custos de implantação e de manutenção)	195
Tabela B.2	– <i>Reduced cost</i> e custo total acumulado dos sistemas (custos de implantação, de manutenção e de operação)	196
Tabela B.3	– <i>Reduced cost</i> e custo total acumulado dos sistemas (taxa de reajuste do custo de manutenção do Sistema 1 igual a 3% ao ano)	197
Tabela B.4	– <i>Reduced cost</i> e custo total acumulado das opções do condomínio .	199
Tabela B.5	– <i>Reduced cost</i> e custo total acumulado das opções do condomínio (com efeito escala no custo de manutenção dos sistemas)	200

Tabela B.6	–	<i>Reduced cost</i> e custo total acumulado das opções da cidade	201
Tabela B.7	–	<i>Reduced cost</i> e custo total acumulado das opções da cidade (com efeito escala nos custos de manutenção e de operação dos sistemas)	202

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS	24
2	SISTEMA PREDIAL DE ÁGUA NÃO POTÁVEL	25
2.1	CONCEITUAÇÃO BÁSICA	30
2.2	MOTIVAÇÕES PARA UTILIZAR ÁGUA NÃO POTÁVEL EM EDIFICAÇÕES	32
2.3	AS CARACTERÍSTICAS E PROBLEMÁTICAS DA ÁGUA NÃO POTÁVEL	34
2.3.1	Composição das águas cinzas	34
2.3.2	Os problemas que envolvem o uso de água não potável em edificações	35
2.4	EXPERIÊNCIAS COM O USO DE ÁGUA NÃO POTÁVEL	39
2.4.1	Experiências internacionais	39
2.4.2	Experiências nacionais	42
2.5	SISTEMAS CENTRALIZADOS E DESCENTRALIZADOS	43
2.5.1	A escala do sistema descentralizado	45
2.5.2	Vantagens e desvantagens dos sistemas centralizados e dos sistemas descentralizados	46
2.6	VARIÁVEIS PARA A TOMADA DE DECISÃO QUANTO AO TIPO DE SISTEMA	49
2.6.1	Demanda e oferta	51
2.6.2	Tipos de tratamentos	51
2.6.3	Custos de implantação, operação e manutenção do sistema	54
2.6.4	Monitoramento do sistema	56
2.6.5	Consumo de energia elétrica	56
2.6.6	Emissão de gases de efeito estufa	58
3	PESQUISA OPERACIONAL	60
3.1	PROGRAMAÇÃO LINEAR	61
3.1.1	Formulação geral do problema de PL	64
3.2	PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA	65
3.2.1	Formulação geral do problema de PLI	65

4	MATERIAIS E MÉTODOS	67
4.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	68
4.2	LEVANTAMENTO DE DADOS	68
4.2.1	Variáveis utilizadas na formulação dos modelos	68
4.2.2	Cálculo dos custos em dólar	69
4.2.3	Cálculo do consumo de energia	70
4.2.4	Taxa de reajuste da energia elétrica	72
4.2.5	Vida útil de sistemas hidrossanitários	72
4.3	FORMULAÇÃO DOS MODELOS	73
4.3.1	Formulação geral do modelo A	74
4.3.2	Formulação geral do modelo B	77
4.3.3	Formulação geral do modelo C	81
4.3.4	Software LINDO™	85
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	86
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
5.1	ESTUDO DE CASO 1: TIPO DE TRATAMENTO A SER INSTALADO EM UM EDIFÍCIO COMERCIAL	87
5.1.1	Características dos sistemas utilizados no estudo de caso 1	87
5.1.2	Formulação do modelo considerando o custo de implantação e de manutenção	89
5.1.3	Formulação do modelo considerando o custo de implantação, de manutenção e de operação	98
5.1.4	Formulação do modelo considerando taxas variáveis para o custo de manutenção	104
5.2	ESTUDO DE CASO 2: TIPO DE SISTEMA A SER INSTALADO EM UM CONDOMÍNIO RESIDENCIAL	109
5.2.1	Características dos sistemas utilizados no estudo de caso 2	109
5.2.2	Características do condomínio residencial hipotético	111
5.2.3	Formulação do modelo	114
5.2.4	Verificação do modelo formulado	120
5.2.5	Interferência do efeito escala nos resultados	128

5.3	ESTUDO DE CASO 3: TIPO DE SISTEMA A SER INSTALADO EM UMA CIDADE	135
5.3.1	Características dos sistemas utilizados no estudo de caso 3	135
5.3.2	Características da cidade hipotética	138
5.3.3	Formulação do modelo	140
5.3.4	Verificação do modelo formulado	147
5.3.5	Interferência do efeito escala nos resultados	155
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	165
	REFERÊNCIAS	168
	APÊNDICE A – RESOLUÇÕES DOS MODELOS NO SOFTWARE LINDO™	176
	APÊNDICE B – RESULTADOS DA COLUNA <i>REDUCED COST</i>	195
	ANEXO A – DESCRIÇÃO, VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS TIPOS DE TRATAMENTOS	204

1 INTRODUÇÃO

O aumento gradativo da população e da urbanização, a infraestrutura precária dos sistemas de abastecimento de água, a poluição dos mananciais, a crescente degradação dos biomas, bem como as mudanças climáticas, com a consequente redução dos índices pluviométricos e dos níveis dos reservatórios, são alguns dos fatores que indicam que a escassez de água não pode mais ser considerada um atributo exclusivo de regiões áridas e semiáridas (SAUTCHÚK *et al.*, 2005; TUNDISI, 2008; ALMEIDA e BENASSI, 2015). Um exemplo que fundamenta esta afirmação é a crise hídrica vivenciada pela região sudeste brasileira, em 2015, a qual, segundo Haubert (2015), foi a maior registrada desde 1930.

É neste cenário de baixa disponibilidade hídrica, que Sautchúk *et al.* (2005) sugerem a necessidade de investimentos, públicos e privados, em soluções que ampliem a oferta e reduzam a demanda de água, pois a responsabilidade pelo gerenciamento adequado da água disponível deve ser compartilhada entre as instituições governamentais, as concessionárias e os usuários finais.

Dentre as opções para restabelecer o equilíbrio entre a oferta e a demanda de água encontram-se: a gestão do consumo através de práticas conservacionistas e de conscientização dos usuários, a redução das perdas físicas das redes de abastecimento e dos sistemas prediais, juntamente com o uso de fontes alternativas de água (SAUTCHÚK *et al.*, 2005).

Destaca-se que apesar de se apresentar como um tema atual, o incentivo em âmbito mundial à utilização de fontes alternativas não é uma abordagem recente. Por exemplo, em 1992, na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, conhecida como Rio-92, o desenvolvimento de novas fontes e alternativas de abastecimento de água foi tratado como atividade primordial para melhorar o manejo dos recursos hídricos.

A Agenda 21 Global, documento assinado por 179 países durante a Rio-92, aponta a dessalinização da água do mar; o aproveitamento de águas residuais; a reposição artificial de águas subterrâneas; o reúso de água de baixa qualidade; e a reciclagem da água como possibilidades para a substituição do consumo intensivo de água potável (BRASIL, 1995).

Diante do panorama de escassez hídrica e sabendo que em torno de um terço da água consumida em um edifício é destinada a atividades que não requerem água potável, as soluções que preservam a quantidade e a qualidade da água devem considerar também o aproveitamento não potável em edificações residenciais (PERTEL, 2009). Assim, segundo Peixoto (2008), a implantação de um sistema de abastecimento duplo, um de água potável e outro de água não potável, apresenta-se como uma das possíveis formas de garantir a conservação da água.

Existem diferentes fontes alternativas, sendo que as mais utilizadas são: a captação de águas subterrâneas, o aproveitamento de águas pluviais e o uso de água recuperada, tema central desta pesquisa. Tundisi (2005)¹ *apud* Almeida e Benassi (2015) defende que com o avanço tecnológico é possível tratar água de qualquer qualidade para produzir água própria ao consumo humano, apesar da elevada dependência tecnológica dos custos de produção envolvidos nesta prática.

No entanto, salienta-se que o uso incorreto dessas fontes pode colocar em risco as atividades a serem desenvolvidas e a saúde do usuário devido à utilização de água que não atende aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011). Assim, ao utilizar fontes alternativas, o “produtor de água” torna-se inteiramente responsável pelo produto gerado, devendo realizar a constante gestão qualitativa e quantitativa do insumo, bem como estar vigilante aos perigos de contaminações ou de falhas no sistema.

No que diz respeito ao uso de água não potável em sistemas prediais, a tomada de decisão deve englobar todos os riscos que envolvem sua adoção. Tão importante quanto considerar os custos de aquisição e de implantação dos sistemas, devem ser analisadas as despesas associadas com sua operação e manutenção ao longo do tempo. Além disso, é fundamental ponderar as consequências da descontinuidade do fornecimento da água recuperada, a fim de assegurar a qualidade final da água a ser utilizada e resguardar a saúde dos usuários.

O Brasil enfrenta atualmente carência de legislações que estabeleçam, com base nas distintas aplicações da água não potável em edifícios, qual é a qualidade apropriada para as atividades das edificações e que especifiquem critérios de

¹ TUNDISI, J. G. **Água no Século XXI: enfrentando a escassez**. 3ª ed. São Carlos: RiMa, IIE, 2005.

projeto, execução e operação de tais sistemas. O que existem, principalmente, são pesquisas acadêmicas, que auxiliam no entendimento do sistema, contudo não possuem valor normativo e nem jurídico.

Além disso, são verificados alguns decretos isolados em diferentes municípios, um item destinado ao reúso apresentado na NBR 13.969 (ABNT, 1997), voltada para tanques sépticos, e um manual de “Conservação e reúso de água em edificações” (SAUTCHÚK *et al.*, 2005).

De acordo com Anecchini (2005), para que a propagação do uso de água não potável se torne socialmente aceita é importante elaborar normas que estabeleçam requisitos e critérios relativos às características da água produzida, à implantação e ao gerenciamento de sistemas prediais de água não potável. Todavia, a autora complementa que a existência de um órgão público responsável por aprovar e fiscalizar a implantação e operação dos sistemas prediais de água não potável também é fundamental para diminuir os riscos de contaminações dos usuários e aumentar a confiabilidade no efluente produzido.

Tendo em vista os custos, os riscos à saúde dos usuários e as responsabilidades de gestão que envolvem a utilização de um sistema predial de água não potável, surge a seguinte questão: em termos econômicos, ambientais e sociais, não seria mais viável um sistema centralizado capaz de atender a um grupo de edifícios e gerido por uma equipe capacitada ao invés de um conjunto de sistemas descentralizados, cujos gestores de cada condomínio devam buscar especialização ou então contratar diversas equipes terceirizadas?

Percebe-se que as pesquisas atuais relacionadas ao uso de água não potável em edificações se concentram especialmente na verificação da qualidade da água não potável ofertada e na viabilidade econômica no primeiro ano de operação dos sistemas descentralizados individuais. No entanto, conforme apresentam os questionamentos anteriores, existem outras variáveis importantes a serem consideradas no momento de tomada de decisão quanto ao tipo de sistema predial de água não potável a ser empregado.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é formular modelos matemáticos que permitam otimizar a tomada de decisão por meio das principais variáveis envolvidas na implantação, manutenção e operação de sistemas de tratamento de efluentes, bem como possibilitar a comparação de sistemas descentralizados, individual e em grupo, com o sistema centralizado.

Enquanto que o objetivo específico é avaliar qualitativamente as principais variáveis para a tomada de decisão em relação ao tipo de sistema predial de água não potável e coletar dados quantitativos referentes a essas variáveis, que permitam prover os modelos formulados.

2 SISTEMA PREDIAL DE ÁGUA NÃO POTÁVEL

Neste capítulo estão apresentados os principais temas relacionados ao escopo da pesquisa, obtidos por meio da revisão bibliográfica. Dentre eles, o detalhamento do sistema predial de água não potável e a exposição de alguns requisitos de projeto, execução, operação, manutenção, monitoramento e gerenciamento necessários durante o ciclo de vida do sistema.

São abordados também os conceitos básicos acerca do uso de água não potável, as experiências internacionais e nacionais, as características inerentes aos sistemas centralizado e descentralizado, os diferentes tipos de tratamento de efluentes, bem como as variáveis mais relevantes a serem analisadas para a tomada de decisão quanto ao tipo de sistema mais adequado.

De acordo com Peixoto (2008), o sistema predial convencional equivale àquele cuja única fonte de abastecimento é a água fornecida pela concessionária e cujo único sistema de coleta é o do esgoto sanitário conduzido para a rede pública.

No que diz respeito ao sistema predial de água não potável ele possui dois sistemas de distribuição: o potável suprido pela rede pública e o não potável originado de água residuária, pluvial, subterrânea ou clara. Quanto à coleta, o sistema predial de água não potável pode ter até quatro tipos de coleta: água residuária, água pluvial, água subterrânea ou água clara (PEIXOTO, 2008).

A Figura 2.1 apresenta a estruturação de um sistema predial que utiliza água não potável, conforme Marques e Oliveira (2014).

Figura 2.1 - Estruturação do sistema predial de água não potável

Fonte: Marques e Oliveira (2014)

Peixoto (2008) detalha que o subsistema de coleta de água residuária em uma edificação é composto pela separação das águas cinzas e das águas negras. As águas cinzas são captadas em lavatórios, chuveiros, banheiras, máquinas de lavar roupas e tanques, que são conduzidas para a estação de tratamento de águas cinzas (ETAC). Enquanto que as águas negras são produzidas nas bacias sanitárias e pias de cozinha, direcionadas diretamente para a rede pública de coleta de esgoto.

No subsistema de distribuição de água, a concessionária fornece a água potável a ser distribuída para o lavatório, chuveiro, pia, tanque e máquina de lavar. Ao passo em que a ETAC instalada no edifício distribui a água não potável originada das águas cinzas tratadas para as descargas de bacias sanitárias e torneiras que fornecem água para irrigação e lavagem de áreas externas (PEIXOTO, 2008).

Segundo o estudo desenvolvido por Pertel (2009), em uma edificação multifamiliar com sistema de reúso, cerca de 32% da água cinza produzida pode ser aproveitada, porém o volume de água não potável utilizado em descargas de bacias sanitárias, limpeza e regas de áreas permeáveis representa, em torno de 22% do consumo

total de água no edifício. Presume-se então que, a produção de água cinza em uma residência excede a sua demanda.

Blum (2002) sugere que a adequabilidade do projeto, instalação e operação são medidas de segurança necessárias a um sistema predial de água não potável. Little (1999)² *apud* Gonçalves *et al.* (2006) complementa que um sistema de reúso de águas cinzas não pode permitir o retorno de efluente não potável para a rede pública de abastecimento e para os sistemas de drenagem pluvial. Além disso, de acordo com Gonçalves *et al.* (2006), o sistema de água não potável deve sempre impedir o contato direto de humanos e animais com a água tratada.

Dessa maneira, para a sua adequada operação, o sistema predial de água não potável deve atender aos requisitos de desempenho considerando todas as etapas que envolvem sua concepção, de modo a preservar a saúde dos usuários (BONI, 2009). Segundo a autora, as premissas a se considerarem durante a elaboração do projeto, e principalmente durante a execução, a operação, a manutenção e a gestão do sistema são as seguintes:

- análise dos possíveis riscos de contaminação no sistema predial de água potável;
- levantamento dos parâmetros de qualidade da água a ser consumida e produzida pelo sistema para a definição do tratamento mais conveniente;
- diferenciação visual entre o sistema predial de água não potável e o de água potável, de modo que seja realizada a rápida identificação pelos usuários;
- garantia de abastecimento do sistema de água não potável, mesmo se houver alguma interrupção, mediante complementação com água potável;
- separação física absoluta entre os sistemas prediais de água potável e não potável, com o propósito de evitar a contaminação da rede pública e dos usuários da edificação;
- desenvolvimento de estratégias de gestão para garantir a conformidade na operação e manutenção do sistema de água não potável, além de controlar continuamente a qualidade da água produzida pela estação de tratamento.

² LITTLE, V.L. **Graywater Guidelines**. Water Conservation Alliance of Southern Arizona, 28 p., 1999.

A fase de projeto permite a concepção do sistema predial de água não potável ponderando as necessidades dos usuários quanto à qualidade da água, desempenho e custos do sistema. É através do detalhamento construtivo das tubulações, equipamentos e componentes, de forma clara para o executor, que os riscos de infecções na operação podem ser minimizados e o processo de manutenção simplificado (BONI, 2009). Assim, a cautela na formulação do projeto é determinante para a operação adequada do sistema de água não potável.

Durante a execução, todas as especificações previstas em projeto devem ser atendidas para que de fato ocorra a redução das falhas do sistema e dos riscos de contaminação. Nesta fase, há maior chance de se realizarem conexões cruzadas, ou seja, interligações inadequadas entre as tubulações do sistema predial de água potável e não potável, facilitando a entrada de águas cinzas nos ramais de água potável. De modo a evitar tal erro e garantir a credibilidade do sistema, a literatura sugere algumas técnicas construtivas (PEIXOTO, 2008; U.S.EPA, 2012):

- separação atmosférica entre as tubulações do sistema de água potável e do sistema de água não potável, ou seja, a tubulação que transporta água com maior qualidade deve ser instalada em nível superior à tubulação que transporta água com menor qualidade;
- instalação obrigatória de uma válvula de segurança que impeça o refluxo de água não potável pela tubulação de abastecimento de água potável quando houver a redução da pressão da rede pública;
- se possível, os dois sistemas devem ter pressões diferenciadas, sendo a maior pressão referente à rede de água potável;
- executar os sistemas prediais com tubulações de materiais diferentes, por exemplo, cobre e PVC. Porém, caso se utilize o mesmo material, as tubulações devem ter cores distintas. Esta diferenciação também se aplica aos reservatórios de armazenamento;
- se optar pela pintura, é preferível que esta ocorra antes da instalação das tubulações, pois além de facilitar o serviço dos instaladores devido à indicação visual, minimiza ainda mais a possibilidade de equívocos durante a montagem;

- apresentar indicações claras do tipo de água transportado, através de etiquetas ou placas instaladas nas tubulações ou próximas aos componentes hidráulicos;
- visando alertar os usuários de que aquele insumo possui qualidade inferior, a água não potável pode ser pigmentada com substâncias coloridas que não manchem as louças sanitárias nem sejam prejudiciais à saúde, como é o caso do azul de metileno.

Salienta-se que, tão importante quanto diferenciar visualmente as tubulações dos sistemas de água não potável e de água potável, é impedir a intercambiabilidade das tubulações, ou seja, estas devem apresentar diâmetros distintos, com o intuito de impossibilitar a interconexão de ramais dos diferentes sistemas (U.S.EPA, 2012).

No que se refere à operação e manutenção do sistema, Boni (2009) detalha que os profissionais responsáveis por essas atividades devem ser capacitados para:

- analisar se os equipamentos estão operando conforme especificado em projeto;
- garantir a não contaminação do sistema de água potável, prestando atenção em possíveis conexões cruzadas;
- quando necessário, limpar o sistema de reúso, inclusive os reservatórios de armazenamento, ou contratar uma empresa terceirizada competente;
- controlar os valores dos parâmetros monitorados de modo a garantir a qualidade da água desejada para as atividades a serem desenvolvidas;
- assegurar que o acesso às tubulações de água não potável seja feito somente pelos responsáveis;
- manusear o sistema sempre usando equipamentos de proteção individual para resguardar a sua própria saúde e a dos outros usuários.

Sautchúk (2004) destaca que para o sistema predial de água não potável operar de maneira correta e não se tornar um originador de patologias, é fundamental garantir seu contínuo gerenciamento por meio do monitoramento e controle quantitativo e qualitativo da água produzida. Entretanto, Castilho (2015), em visita a diferentes edificações que utilizam água não potável, observou grande negligência no acompanhamento das etapas de operação e manutenção, e constatou que raramente as tarefas citadas acima são cumpridas.

Deste modo, mesmo com um projeto bem elaborado e a melhor execução possível, sem o acompanhamento permanente e adequado da equipe de gerenciamento, com o passar do tempo, os riscos de contaminação dos usuários e as chances do sistema se tornar ineficiente são muito elevados, desvalorizando a importância do uso de água não potável em edificações.

2.1 CONCEITUAÇÃO BÁSICA

Os agentes envolvidos na implantação, operação, manutenção e gestão de sistemas prediais de água não potável abrangem instituições governamentais, pesquisadores, projetistas, instaladores, gestores e usuários finais. Assim, visando facilitar a comunicação entre os intervenientes e orientar o escopo desta pesquisa, torna-se fundamental padronizar os termos e conceitos básicos encontrados na literatura, conforme apresentado no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Conceitos básicos relativos à água potável e não potável

Nomenclatura	Conceito
Água potável	Água própria para o consumo humano que não oferece riscos à saúde dos usuários. Seus parâmetros físicos, microbiológicos, químicos e radioativos devem atender ao padrão de potabilidade proposto pelo Ministério da Saúde através da Portaria 2.914.
Água não potável	Qualquer água que não atende ao padrão de potabilidade, não sendo própria para o consumo humano. No entanto, pode ser usada em outras atividades que não demandam alto nível de potabilidade por não entrar em contato direto com os usuários.
Água tratada	Água de qualquer natureza submetida a tratamentos físicos e/ou químicos com objetivo de atender ao padrão de potabilidade do Ministério da Saúde. É considerada sinônimo de água potável.
Água residuária	É o efluente gerado por edificações residenciais, comerciais e industriais após o uso da água, a qual usualmente é lançada na rede de esgoto ou em corpos hídricos receptores, porém que pode receber tratamentos a fim de ser reutilizada.
Água servida	Sinônimo de água residuária.

Continua

Nomenclatura	Conceito
Água de reúso	Água não potável submetida a um processo de tratamento para que a sua qualidade seja adequada a determinados usos, por exemplo, irrigação, limpeza e descarga de bacias sanitárias.
Água recuperada	Sinônimo de água de reúso.
Água reciclada	Água originária exclusivamente de um sistema industrial de ciclo fechado, que recebe tratamento e é reutilizada no mesmo sistema, antes de ser direcionada para a rede coletora.
Água cinza	<p>Água residuária proveniente dos diversos pontos de consumo de água presentes numa edificação, exceto a água oriunda das bacias sanitárias. Pode ser dividida em:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Água cinza clara: efluentes gerados por lavatório, chuveiro, banheira, máquina de lavar roupa e tanque. • Água cinza escura: água cinza clara somada aos efluentes da pia de cozinha e máquina de lavar louça.
Água negra	Água procedente das bacias sanitárias e mictórios, que apresenta quantidade considerável de coliformes termotolerantes presentes em urina, fezes e papel higiênico.
Água amarela	Água gerada em mictórios ou em bacias sanitárias que separam a urina das fezes. A água amarela pode ser coletada sem tratamento a fim de ser utilizada como fonte de nitrogênio na agricultura.
Água clara ou branca	Água resultante de sistemas industriais e equipamentos, por exemplo, sistemas de resfriamento, destilação, vaporização e condensação, bem como bomba a vácuo, autoclave e deionizador.
Sistema predial de água não potável recuperada (SPANP-R)	Conjunto de tubulações, reservatórios, equipamentos e outros componentes destinados a coletar, armazenar, tratar e distribuir a água cinza ou negra. Reduz a demanda de água potável e o volume de esgoto sanitário destinado ao sistema de coleta.
Sistema predial de água não potável pluvial (SPANP-P)	Conjunto de tubulações, reservatórios, equipamentos e outros componentes destinados a coletar, armazenar, tratar e distribuir a água pluvial. Possibilita a redução da demanda de água potável, além de amortecer as vazões no sistema de drenagem urbana.

Nomenclatura	Conceito
Sistema predial de água não potável subterrânea (SPANP-S)	Conjunto de tubulações, reservatórios, equipamentos e outros componentes destinados a coletar, armazenar, tratar e distribuir a água subterrânea. Atua na redução da demanda de água potável.
Sistema predial de água não potável clara (SPANP-C)	Conjunto de tubulações, reservatórios, equipamentos e outros componentes destinados a coletar, armazenar, tratar e distribuir a água clara. Tem como foco reduzir a demanda de água potável.

Fonte: Marques e Oliveira (2014)

Com base nos conceitos apresentados, os próximos itens englobam temáticas que envolvem a água de reúso, juntamente com as características e consequências da implantação de sistemas prediais de água não potável, a fim de realizar atividades que demandam água com qualidade inferior ao padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011), do Ministério da Saúde.

2.2 MOTIVAÇÕES PARA UTILIZAR ÁGUA NÃO POTÁVEL EM EDIFICAÇÕES

De modo a compreender a necessidade de reutilização de água, torna-se importante destacar que a água tem dois fins distintos, conforme destaca Dimitriadis (2005): usos potáveis destinados ao consumo humano, a saber, ingestão, higiene pessoal e preparação de alimentos, e usos não potáveis, que segundo Eriksson *et al.* (2002), Dimitriadis (2005) e Metcalf & Eddy (2007) podem ser empregados em:

- processos industriais;
- irrigação de parques, campos esportivos, plantações e pastagens;
- lavagem de ruas, pisos e veículos;
- uso emergencial em combate a incêndios;
- supressão de poeira;
- aquicultura (cultivo de organismos aquáticos);
- recarga de aquíferos;
- preparo de concreto na construção civil.

Considerando-se que parte do abastecimento de água poderia ser feito por fontes alternativas a fim de suprir a demanda de uma habitação, entende-se que o principal benefício com o uso de água não potável é a redução do consumo de água potável. Desta forma, com a introdução de um sistema de fornecimento de água que possua uma rede de água potável oferecida pela concessionária e outra de água não potável gerada pela própria edificação, tanto a conservação da água quanto a economia para o consumidor final seriam garantidas (PEIXOTO, 2008).

Sabendo que a maior fração da água consumida nas moradias se transforma em efluentes a serem descartados, percebe-se que a redução do volume de esgoto sanitário é outra consequência positiva do reúso de água (SANTOS, 2013). Isto se deve à parte dos efluentes gerados pelos usuários em atividades rotineiras se tornar uma das fontes de abastecimento da edificação, ou seja, o esgoto que seria depositado nas redes coletoras, passa a ser a matéria-prima para a produção da água a ser reutilizada pelos próprios usuários.

Portanto, acrescentam-se às vantagens do uso de água não potável (BONI, 2009):

- o auxílio no combate à escassez hídrica;
- a preservação dos mananciais com a redução da quantidade de água captada e do lançamento de esgoto sanitário sem qualquer processo de tratamento;
- a melhoria dos aspectos relacionados à saúde pública e à segurança alimentar, pois o efluente deixa de contaminar os solos e corpos d'água;
- o desenvolvimento de um planejamento mais adequado quanto ao manejo dos recursos hídricos existentes.

Cabe salientar que a água residuária pode ser tratada até obter características compatíveis com qualquer tipo de reúso, inclusive o potável próprio para consumo humano. Todavia, devido às restrições técnico-financeiras decorrentes do alto nível de sofisticação e eficiência necessários ao sistema de tratamento, é recomendado que somente se o abastecimento da concessionária for altamente deficiente deve-se usar a água recuperada para fins potáveis. Gonçalves *et al.* (2006) destaca que a maior parte das estações de tratamento descentralizadas disponíveis atualmente tem capacidade de produzir água somente para uso não potável sem comprometer a saúde do usuário.

2.3 AS CARACTERÍSTICAS E PROBLEMÁTICAS DA ÁGUA NÃO POTÁVEL

Nolde e Dott (1991)³ *apud* Matos *et al.* (2014) defendem que as águas cinzas a serem utilizadas como fonte de água não potável devem cumprir quatro critérios principais, a saber: segurança higiênica, estética agradável ao usuário, tolerância ambiental, bem como permitir tratamentos viáveis técnica e economicamente.

2.3.1 Composição das águas cinzas

Segundo Boni (2009), conhecer as características do tipo de água disponível é importante para a avaliação tanto das possibilidades de reúso quanto do tratamento que mais se adequa ao padrão de qualidade exigido para a destinação final. Assim, Ericksson *et al.* (2002) afirmam que a água não potável em termos de quantidade e de composição depende de fatores tais como: horários de maior consumo; localização da residência; faixa etária, estilo de vida, classe social e hábitos dos moradores; uso de medicamentos, cosméticos, produtos químicos e de limpeza; além da qualidade da água de abastecimento para a produção da água não potável.

Em estado bruto, as águas cinzas apresentam elevada turbidez e concentração de sólidos, como resíduos de sabão, sabonetes, cabelos e fibras de tecidos, concedendo um aspecto desagradável à água. Em sua constituição, conforme Dixon *et al.* (1999), também estão compostos orgânicos rapidamente biodegradáveis que favorecem a formação de mau odor após algumas horas de armazenamento.

Diferentes estudos reconhecem que a água cinza escura, originada na cozinha, apresenta um complicador constituído pela presença de elevados teores de óleos, gorduras e matérias orgânicas em sua composição, pois essas são substâncias que demandam maior complexidade no tratamento da água servida a ser reutilizada em outras atividades na edificação (CHRISTOVA-BOAL *et al.*, 1996; NOLDE, 1999; DIMITRIADIS, 2005; MARQUES e OLIVEIRA, 2014).

Apesar de não receber contribuição dos efluentes de bacias sanitárias, de onde provém maior parte dos microrganismos patogênicos, Gonçalves *et al.* (2006)

³ Nolde E, Dott W. Verhalten von hygienischbakterien und Grauwasser-Einfluss der UV-Desinfektion and Wiederverkeimung. **Gwf WasserAbwasser**, v. 132, n. 3, p. 108–114, 1991.

destacam que as águas cinzas apresentam quantidades consideráveis de coliformes termotolerantes, bactérias, parasitas e vírus, responsáveis por causar doenças como disenterias, verminoses e infecções gastrointestinais. Isto ocorre devido à contaminação da água com substâncias fecais por meio da limpeza das mãos após o uso do sanitário, lavagem de roupas, de alimentos infectados ou durante o banho.

O nível de contaminação das águas cinzas é inferior ao do esgoto sanitário, porém não é um valor desprezível, podendo causar riscos à saúde humana se for tratado com indiferença tanto pelos gestores dos sistemas prediais de água não potável quanto pelos consumidores (GONÇALVES *et al.*, 2006). Assim, percebe-se a necessidade de um processo apropriado de tratamento e desinfecção da água não potável nas edificações, de acordo com as atividades a serem realizadas, especialmente se houver o contato direto do insumo com os usuários.

2.3.2 Os problemas que envolvem o uso de água não potável em edificações

Sem tratamento adequado, há diversos problemas relacionados com o reúso de água em edificações, dentre os quais se destaca o perigo de propagação de doenças devido à exposição a microrganismos patogênicos, uma vez que o contato com a água recuperada pode ocorrer por respingos ao se acionar a descarga e por contato físico direto (ERIKSSON *et al.*, 2002). Assim, o ponto de partida de qualquer projeto de sistemas prediais de água não potável é a segurança à saúde dos usuários, qualquer que seja a atividade fim.

Boni (2009) reforça que o reúso da água é tecnicamente viável, porém devido aos riscos de contaminação, cuidados adicionais devem ser tomados durante a implantação do sistema, no modo de armazenamento e de utilização do insumo. A autora ressalta a possibilidade de a água recuperada ser empregada para fins inadequados, não por imprudência dos usuários, mas por falta de detalhamento do projeto ou pela má execução das tubulações por meio da ligação negligente do sistema de água não potável com o sistema de água potável.

Esta ligação é chamada de conexão cruzada, a qual, segundo a NBR 5.626 (ABNT, 1998), refere-se a “qualquer ligação física através de peça, dispositivo ou outro

arranjo que conecte duas tubulações das quais uma conduz água potável e a outra água de qualidade desconhecida ou não potável”.

Desta forma, pode-se afirmar que a água potável em um sistema de água não potável está muito mais vulnerável a um risco de contaminação do que em um sistema convencional de água potável, especialmente devido ao elevado risco de incidência de conexões cruzadas entre os dois sistemas prediais, como observado em estudos realizados por Schee (2004) e Castilho (2015).

Quanto à utilização de água de reúso no interior das residências, um mínimo defeito que ocorra no sistema pode colocar em risco a saúde de todos os usuários. Peixoto (2008) explica que para garantir a segurança, a estação de tratamento de água não potável deve dispor de sistema automatizado que interrompa imediatamente o abastecimento de água não potável, caso ocorra qualquer falha na estação. Além disso, o fornecimento da água recuperada deve ser substituído pela água potável, sem impedir o uso rotineiro dos equipamentos que são abastecidos pelo sistema predial de água não potável.

A inspeção do sistema antes do início de sua operação; a realização de testes de pigmentação da água não potável para verificar a presença de conexões cruzadas; a instrução adequada do gestor, dos moradores e das equipes de profissionais do condomínio, através de treinamentos, são atividades fundamentais a serem desenvolvidas junto com o processo de implantação do sistema. Porém, essas atividades têm sido desprezadas pelos envolvidos na execução e posterior operação dos sistemas prediais de água não potável (CASTILHO, 2015).

A responsabilidade pela gestão do sistema de água não potável e atendimento aos padrões mínimos de qualidade da água para cada uso é transferida da concessionária ao gestor do condomínio, que deve: atender às normas vigentes, à legislação de consentimento para uso, se responsabilizar pela implantação de um sistema de gestão e monitoramento contínuo da qualidade e quantidade da água não potável produzida, bem como capacitar e conscientizar os usuários, por meio do fornecimento de manuais (SAUTCHÚK, 2004).

Entretanto, em pesquisa conduzida na cidade de São Paulo, Castilho (2015) constatou que a maioria dos gestores não apresenta capacitação técnica nem

treinamento adequados para assegurar o atendimento aos padrões mínimos da qualidade da água não potável aplicada em diferentes usos. Segundo a autora, “gestores, operadores e usuários não dispõem de manual com informações técnicas que apresentem os riscos inerentes ao sistema e que recomendem as práticas apropriadas de operação e manutenção”.

Complementando, Peixoto (2008) destaca outras problemáticas relacionadas ao uso de água não potável:

- a falta de profissionais capacitados para projetar, executar e operar o sistema;
- a falta de profissionais capacitados para gerenciar o sistema;
- a carência de legislação nacional adequada e específica, especialmente no que se refere ao projeto e execução dos sistemas;
- desconhecimento das tecnologias existentes por parte dos usuários;
- a inexistência de órgãos públicos preparados para aprovar, avaliar e fiscalizar a implantação e a operação dos sistemas;
- a inexistência de instituições públicas responsáveis por exigir análises periódicas da qualidade da água tratada, manutenção e monitoramento dos sistemas de água não potável implantados.

No Brasil o uso de água não potável é crescente, porém, conforme verificado por Castilho (2015), a execução, operação e manutenção de sistemas prediais de água não potável têm ocorrido sem embasamentos teóricos, técnicos e tecnológicos adequados. Portanto, de acordo com Sautchúk *et al.* (2005), é necessário que haja transparência no processo de tomada de decisão para a implantação desse tipo de sistema, seja por parte dos órgãos públicos ou dos próprios gestores, expondo para a população tanto os benefícios quanto os riscos de contaminações existentes.

Percebe-se que a questão da qualidade final da água é de extrema importância e se associa à aplicação pretendida para o insumo. Neste cenário, apresentam-se dois pontos antagônicos, mas relevantes no que se refere aos sistemas de água não potável em edificações: qualidade *versus* riscos e custos *versus* riscos (JORDÃO, 2006). Ou seja, existe a necessidade da proteção à saúde pública e ao meio

ambiente, porém os custos desembolsados no tratamento adequado de águas residuárias para posterior utilização da água não potável devem ser aceitáveis.

De acordo com Jordão (2006), a *International Water Association* (IWA) enfatiza que a implantação de sistemas de água não potável apresenta riscos de saúde pública e ambientais, compatíveis com a qualidade final do insumo e com os custos praticados. Todavia, o autor ressalta que a temática do reúso de água passa também por decisões econômicas e políticas, no sentido de que os países desenvolvidos praticam padrões de qualidade extremamente exigentes, com altos custos e baixíssimos riscos, enquanto os países em desenvolvimento implementam tecnologias simples, com baixo custo e riscos controlados.

A Figura 2.2 destaca uma comparação, realizada por Von Sperling (2005), entre aspectos considerados importantes na escolha de sistemas de tratamento de efluentes do ponto de vista de países desenvolvidos e em desenvolvimento. De acordo com o autor, os resultados não devem ser entendidos como verdade absoluta, pois as condições variam de região para região.

Figura 2.2 – Aspectos importantes na seleção de sistemas de tratamento de esgotos

Fonte: Von Sperling (2005)

Assim, de acordo com a Figura 2.2, percebe-se que em países desenvolvidos, aspectos como eficiência, confiabilidade, disposição de lodo e requisitos de área são considerados críticos para a escolha do tipo de sistema. Ao passo que custos de operação, custos de manutenção, sustentabilidade e simplicidade são as variáveis mais importantes na visão de países em desenvolvimento.

Essa situação foi identificada por meio do grande enfoque dado pelas referências nacionais aos custos envolvidos na instalação dos sistemas, ao consumo de energia e à economia de água. Todavia, notou-se em referências internacionais maior preocupação com as emissões de gases do efeito estufa e com as características geográficas mais adequadas para a implantação de uma estação de tratamento (GUO e ENGLEHARDT, 2015; HENDRICKSON *et al.*, 2015).

2.4 EXPERIÊNCIAS COM O USO DE ÁGUA NÃO POTÁVEL

2.4.1 Experiências internacionais

No cenário global, os Estados Unidos e a Austrália abriram o caminho para a prática do uso de água não potável. De acordo com Domènech e Saurí (2010), moradores australianos e do oeste americano começaram a utilizar água não potável para irrigação de jardins em resposta à seca das regiões. As autoridades dos países se viram forçadas a legalizar esta prática e desenvolver diretrizes, visando garantir o reúso adequado das águas cinzas para minimizar os riscos à saúde dos usuários e ao meio ambiente.

Com o aumento populacional e a preocupação com a conservação dos recursos hídricos, a Austrália permitiu a ampliação do reúso de águas cinzas para descarga de bacias sanitárias, por acreditarem na redução do potencial de água potável para esta atividade aliada à rega de jardins e gramados (JEPPESEN, 1996). No entanto, Domènech e Saurí (2010) explicam que somente a partir de janeiro de 2009 o governo australiano passou a promover o reúso em larga escala, anunciando descontos de até 500 dólares australianos a todos os domicílios que implantassem o sistema predial de água não potável recuperada.

O Japão também possui ampla tradição no uso de água não potável devido à pequena área territorial em comparação com a elevada densidade populacional (AL-

JAYYOUSI, 2003). Segundo o autor, o uso de água recuperada em descargas sanitárias é incentivado pelas autoridades japonesas, sendo aplicado um volume anual de aproximadamente 970 mil m³ para esse fim. Além disso, Hanson (1997)⁴ *apud* CSBE (2003) ressaltam que, em Tóquio, os sistemas prediais de água não potável são obrigatórios para edificações com área superior a 30.000 m² ou com potencial de reúso de 100 m³ por dia.

Na Alemanha e no Reino Unido, onde a escassez de água é menos crítica, mas a conservação ambiental é uma preocupação, as instituições têm o objetivo de pesquisar novas tecnologias a serem instaladas em edifícios que usam água não potável; verificar as implicações à saúde e ao ambiente decorrente de sua utilização, bem como ampliar a aceitação dos usuários para os sistemas de reúso nas residências (DOMÈNECH e SAURÍ, 2010). Conforme Hildebrand (1999)⁵ *apud* Al-Jayyousi (2003), os principais destinos para as águas cinzas na Alemanha referem-se às descargas em bacias sanitárias e à irrigação de jardins.

A Holanda, no início da década de 2000, iniciou um projeto financiado pelo governo para o suprimento de água a um conjunto habitacional de 30.000 casas. Apesar de terem sido tomadas diversas precauções durante a etapa de projeto, alguns erros foram cometidos durante a execução ocasionando a contaminação da água potável distribuída para 1.000 residências devido a uma conexão cruzada entre os sistemas prediais de água potável e não potável (SCHEE, 2004). Do mesmo modo, de acordo com SoPHE News (2012)⁶ *apud* CEM (2013), em 2010, famílias residentes no leste da Inglaterra passaram a ingerir água contaminada também em virtude de uma conexão cruzada nas tubulações de abastecimento de água potável e do sistema de captação de água pluvial.

Na Espanha, segundo Domènech e Saurí (2010), o uso de água recuperada ocorre, mas ainda tem muito para evoluir. Ao contrário de países onde as práticas de reúso tiveram que ser legalizadas para atender à demanda, os regulamentos espanhóis

⁴ Hanson, L. **Environmentally Friendly Systems and Products**. Water Saving Devices. Bracknell: BSRIA, Department of Environment, Transport and the Regions. 1997.

⁵ HILDEBRAND, R. Sedimentationsanlage Hildebrand. **Grauwasser Recycling**, Schriftenreihe fbr, 5, p. 51-60, 1999.

⁶ SoPHE News (2012). Available at: www.cibse.org/content/AAA_Julie_Uploads/sophe%20Winter%202012%20for%20web.pdf

foram estabelecidos antes da conscientização pública. Desta forma, a partir de 2002, diversas regiões promulgaram políticas e diretrizes para promover a instalação de sistemas prediais de água não potável em edifícios em fase de projeto ou execução. De acordo com os autores, o primeiro município a aprovar essa lei foi *Sant Cugat del Vallès*, situado na área metropolitana de Barcelona, seguido pelas regiões da Catalunha, Galiza e Andaluzia.

Na Itália, os sistemas de água não potável são implementados, não somente, nas regiões áridas e semiáridas do sul do país, como também no norte, onde os recursos hídricos disponíveis geralmente atendem à demanda. Assim, a utilização de água recuperada é voltada para irrigação agrícola, de jardins, proteção contra incêndio e para finalidades industriais (BARBAGALLO *et al.*, 2001). Kellis *et al.* (2013) destacam ainda que um novo conjunto de regulamentos referentes ao reúso tem sido adotado desde 2003 e as águas residuárias são reguladas por um decreto legislativo de 2006.

Em Portugal, segundo Matos *et al.* (2014), foram publicadas diretrizes para o uso de água não potável na irrigação (NP 4434:2005), fornecendo informações sobre a aplicação de água residuária urbana tratada para irrigação agrícola e irrigação paisagística. De acordo com os autores, é o primeiro documento no país que apresenta não somente os critérios de qualidade para águas servidas, mas que fornece orientações sobre como garantir a segurança na escolha dos equipamentos e métodos de irrigação. Além disso, fornece diretrizes para a proteção do meio ambiente e inclui procedimentos de monitoramento do impacto ambiental em áreas irrigadas com água residuária urbana tratada.

No Canadá, segundo Schaefer *et al.* (2004) o reúso de água é praticado em uma escala relativamente pequena e varia regionalmente, dependendo da disponibilidade de abastecimento e da flexibilidade das legislações existentes. Exemplos incluem o uso de água não potável para irrigação de culturas agrícolas não alimentares, parques urbanos, paisagismo e campos de golfe. Os autores acrescentam que as águas claras são empregadas em alguns setores industriais enquanto as águas cinzas têm sido testadas experimentalmente em residências unifamiliares para irrigação de jardins e de descargas em bacias sanitárias.

Os países em situação de escassez hídrica constante, a exemplo da Arábia Saudita, Chipre, Jordânia, Turquia, Síria, Líbano, Marrocos e Líbia encontraram na água recuperada uma fonte para otimizar o uso da água, especialmente em atividades de irrigação (AL-JAYYOUSI, 2003; KELLIS, 2013). Entretanto, normas e diretrizes relacionadas ao emprego adequado de água não potável ainda estão sendo estudadas pelas autoridades dessas regiões.

2.4.2 Experiências nacionais

No Brasil a utilização de água residuária para fins não potáveis é recente e ainda não se aplica em larga escala. Apesar de não haver regulamentações específicas voltadas ao uso de águas recuperadas em sistemas prediais e ambientes urbanos, algumas prefeituras as empregam para a limpeza de vias públicas, pátios e veículos, irrigação de áreas verdes e desobstrução da rede de esgotos.

Além disso, desde 2012, o país possui o maior empreendimento da América do Sul para a produção de água não potável para fins industriais, o Aquapolo, que está apto a tratar 1.000 litros/segundo de esgoto, gerando uma economia aproximada de 2,58 bilhões de litros por mês de água potável (AQUAPOLO, 2015).

Em relação aos sistemas prediais de água não potável, com base nas literaturas brasileiras, percebe-se que sua implantação se concentra em edifícios recentes de alto padrão e englobam especialmente o uso de águas subterrâneas, pluviais e recuperadas (ALVES *et al.*, 2009; BOZAN, 2011; CASTILHO, 2015). No entanto, conforme apresentado por Castilho (2015), também são verificadas irregularidades tanto nas etapas de projeto e de execução, relatando-se problemas com conexões cruzadas, quanto no processo de operação, de manutenção e de gerenciamento.

Deste modo, constata-se que cada país tem um nível de desenvolvimento no que se refere ao uso de água não potável em sistemas prediais. Em alguns locais, como nos Estados Unidos, Austrália e Japão, esta prática está consolidada e amparada por legislações bem definidas. Enquanto que em outras regiões, a exemplo do Brasil, ainda existe um caminho considerável a se percorrer até que a utilização de água não potável, estabelecida em normas técnicas, se torne prática recorrente em edificações multifamiliares.

2.5 SISTEMAS CENTRALIZADOS E DESCENTRALIZADOS

Em se tratando de sistemas centralizados de água não potável, ilustrados na Figura 2.3, os efluentes originários de diversas edificações são coletados e transportados para um único local, a saber, a estação de tratamento de água residuária (ETAR), com o propósito de receberem tratamento e serem distribuídos às edificações onde se desenvolvem atividades utilizando água não potável. Segundo Lima (2008), este sistema necessita de uma extensa rede de tubulações que abastecem a estação de tratamento, usualmente situada longe dos pontos de coleta, onde são realizados processos para tratar grandes volumes de efluentes e redistribuí-los à população.

Figura 2.3 – Sistema centralizado de água não potável

Fonte: adaptado de Oliveira *et al.* (2014)

Em contrapartida, tem-se um sistema descentralizado quando a coleta, o tratamento e o transporte dos efluentes gerados pela população ocorrem próximo ao local de produção, não ultrapassando a distância de microbacias hidrográficas (LIMA, 2008). Metcalf & Eddy (2007) ressaltam ainda que o grau de descentralização é variável, servindo desde uma moradia, um edifício ou até um bairro inteiro.

Conforme a U.S.EPA (2004), as alternativas para o tratamento descentralizado são “*on-site*” ou em “*clusters*”. No sistema “*on-site*” (no local) todo o processo de coleta, transporte, tratamento e reutilização da água não potável ocorre em uma única residência ou edifício, conforme ilustrado na Figura 2.4. No âmbito dessa pesquisa, os sistemas “*on-site*” são denominados sistemas descentralizados individuais.

Figura 2.4 – Sistemas descentralizados individuais de água não potável

Fonte: adaptado de Oliveira *et al.* (2014)

Nos sistemas em “clusters”, a coleta das águas residuárias acontece em mais de uma edificação ou uma comunidade, sendo direcionadas a um local de tratamento adequado, para então retornar à população como água não potável (U.S.EPA, 2004). No decorrer da pesquisa, os sistemas em “clusters” são denominados sistemas descentralizados em grupo e estão apresentados na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Sistemas descentralizados em grupo de água não potável

Fonte: adaptado de Oliveira *et al.* (2014)

Metcalf & Eddy (2007) afirmam que “quanto menor a demanda, mais adaptável à variações de carga e mais potente deve ser o sistema implantado, de modo a necessitar pouca operação e manutenção”. Além disso, conforme Guo e Englehardt (2015), a decisão do tamanho do sistema a ser implantado depende de fatores como

o tipo de solo, a topografia e a densidade demográfica da região. Por estes motivos, a subdivisão dos sistemas descentralizados, individual e em grupo, é relevante.

Ressalta-se que os sistemas centralizados possuem um único gestor ou uma equipe de profissionais responsáveis pela operação, monitoramento e manutenção da estação de tratamento. No sistema descentralizado em grupo, cada estação dispõe de uma equipe de gestão para controlar essas atividades. Sendo que, nesses dois tipos de sistemas, o gerenciamento da produção de água não potável ocorre externamente ao conjunto de edifícios. Enquanto que no sistema descentralizado individual, cada edificação deveria possuir um profissional responsável pela gestão e pelo monitoramento do processo de tratamento.

2.5.1 A escala do sistema descentralizado

Quanto ao tamanho que determina se um sistema é centralizado ou descentralizado, não existe um número exato estabelecido na literatura nacional e internacional. No Brasil, a Resolução CONAMA nº 377 (BRASIL, 2006), que dispõe acerca do licenciamento ambiental simplificado de sistema de esgotamento sanitário, apresenta as seguintes considerações:

- unidades de tratamento de esgoto de pequeno porte são estações de tratamento de esgoto com vazão nominal de projeto menor ou igual a 50 L/s ou com capacidade para atendimento de até 30.000 habitantes;
- unidades de tratamento de esgoto de médio porte são estações de tratamento de esgoto com vazão nominal de projeto maior que 50 L/s e menor ou igual a 400 L/s ou com capacidade para atendimento superior a 30.000 e inferior a 250.000 habitantes.

Libralato *et al.* (2012) alegam que o sistema descentralizado não tem tamanho específico, pois em determinados locais pequenas estações de tratamento atuam de maneira centralizada, enquanto em outras regiões sistemas descentralizados não podem ser considerados pequenos. Neste sentido, Gikas e Tchobanoglous (2009) completam expondo que a descentralização não deve ser associada ao tamanho das estações de tratamento nem a um limite de vazão pré-definido, pois este é um

conceito que definitivamente envolve uma questão de escala na geografia em que o sistema se insere.

Em países europeus, sistemas descentralizados são discutidos para residências, condomínios ou pequenos povoados que variam de cinco até 500 habitantes (HOFFMANN *et al.*, 1996⁷ *apud* HOFFMANN *et al.*, 2004). Entretanto, tendo como referência a realidade dos centros urbanos nacionais, onde a população cresce exponencialmente e os sistemas de abastecimento de água, tratamento e coleta de esgoto não acompanham a demanda, Hoffmann *et al.* (2004) sugerem que, considerando as características no Brasil, os sistemas descentralizados podem atender entre cinco e dez mil habitantes, desde uma habitação a um conjunto de edificações e, até mesmo, um bairro ou pequenos municípios.

2.5.2 Vantagens e desvantagens dos sistemas centralizados e dos sistemas descentralizados

Os sistemas tradicionais de abastecimento de água e de coleta de esgoto sanitário adotam por princípio a centralização. Assim, os sistemas são projetados para captar água dos mananciais, tratá-la em uma estação de tratamento (ETA) e distribuí-la aos consumidores através da rede pública, após passar por estações elevatórias responsáveis pelo recalque e bombeamento da água. Enquanto que o esgoto sanitário gerado é coletado pela rede que o transporta até a estação de tratamento (ETE), onde é tratado e, posteriormente, lançado em um corpo hídrico receptor.

Por apresentar tecnologias de tratamento consolidadas para solucionar a problemática dos esgotos sanitários, os sistemas centralizados, também denominados distritais, são utilizados na maior parte dos países desenvolvidos e em desenvolvimento (SANTOS, 2013). A autora acrescenta que são sistemas caros no que se refere à implantação, operação e manutenção das redes distribuidoras e estações de tratamento, não sendo recomendados para comunidades pequenas. Shehabi *et al.* (2012) adicionam que o investimento para a construção de toda a infraestrutura necessária ao sistema centralizado torna os sistemas descentralizados mais atrativos aos países em desenvolvimento.

⁷ Hoffmann, H.; Tränckner, J.; Eckstädt, H. Einfache Abwasserbehandlungs-verfahren in ländlichen Gebieten. Rostocker Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Beiträge Heft 5/1996, **Universiteit Rostock**, v.5, p.121 - 136, 1996.

Como se localiza próximo da fonte produtora de esgoto sanitário, mesmo o sistema descentralizado em grupo permite reduzir a infraestrutura de implantação e distâncias de transporte, bem como há menor complexidade em sua operação e manutenção por ter um tamanho inferior aos sistemas centralizados. Apesar de menores, as estações de tratamento descentralizadas podem utilizar tecnologias que variam desde processos físico-químicos ou biológicos simplificados até sistemas de filtração em membranas de última geração que permitem o reúso do efluente após o tratamento (SHEHABI *et al.*, 2012).

Segundo Dimitriadis (2005), Afferden *et al.* (2010), Shehabi *et al.* (2012) e Santos (2013), dentre as outras vantagens dos sistemas descentralizados estão:

- maior controle do risco de contaminação da água potável devido à sua escala reduzida;
- menores vazões de efluentes permitem a utilização de tubulações com diâmetros inferiores e estações de tratamento com profundidades mais rasas;
- vários sistemas descentralizados ocasionam menor impacto urbano do que um único sistema centralizado por não necessitarem de extensas adutoras;
- ciclo de depreciação do esgoto mais curto, pois o consumo do efluente tratado ocorre rapidamente;
- facilidade de expansão, maior adaptabilidade às mudanças de demanda;
- a falha em um componente não ocasiona a paralização do conjunto de sistemas.

Hendrickson *et al.* (2015) salientam que em áreas urbanas densamente povoadas, existem entraves geográficos e socioeconômicos desafiadores para os sistemas centralizados. Segundo os autores, esse tipo de sistema se depara com dificuldades relacionadas às restrições espaciais, o que impede a expansão das instalações com o crescimento da demanda, além de exigir redes de distribuição diferenciadas para a água potável e não potável.

No entanto, os sistemas descentralizados são mais trabalhosos de serem controlados, mantidos e monitorados, pois segundo Lima (2008), exigem uma operação muito estável, sem grandes variações de perda de carga, e devem ter a mesma eficiência que os sistemas centralizados. Isso, consequentemente, pode

acarretar em maior consumo energético e em gastos com a gestão da qualidade para tratar o mesmo volume de águas residuárias, se comparado aos centralizados. Ademais, quando instalados em edificações ocupam considerável espaço da área térrea ou de garagem, as quais são naturalmente limitadas.

Chung *et al.* (2008) ao proporem um modelo de avaliação das vantagens da descentralização, concluíram que esta se adequa principalmente a territórios com relevos diversificados e centros urbanos dispersos. Comparando a estação de tratamento de águas residuárias centralizada a uma série de estações descentralizadas, para uma comunidade de 1,2 milhões de habitantes, os autores observaram que a economia de escala obtida favorece a centralização, exceto quando a região apresenta grandes variações nas altitudes do relevo, o que faria do sistema descentralizado a melhor escolha.

De acordo com a Environment Agency (2011) do Reino Unido, em comparação com os descentralizados, os sistemas centralizados oferecem melhor equilíbrio entre a oferta e a demanda de insumos; são capazes de produzir água não potável com padrão de qualidade confiável, uma vez que seu processo de tratamento é bastante conhecido, o que facilita a manutenção do sistema em caso de eventuais problemas. Permitem, ainda, maior escala de redução do consumo de energia com a instalação de bombas mais eficientes e a utilização de processos de tratamento conforme as características da água não potável a ser consumida.

Gonçalves e Pinto (2000)⁸ *apud* Cohim *et al.* (2009) destacam também o fato dos sistemas descentralizados se ligarem estritamente à evolução tecnológica de estações de tratamento mais compactas e eficientes, que possuem capacidade para se adequar a vazões de efluentes variáveis, tanto do ponto de vista das vazões tratadas como da qualidade da água não potável produzida. Logo, a constante inovação tecnológica dos equipamentos, componentes e *softwares* para controlar a qualidade da água e melhorar a gestão do sistema também tem papel relevante na obtenção de avanços na área de reúso de águas cinzas em residências.

⁸ GONÇALVES, R. F; PINTO, M. T. Opções tecnológicas do início do século XXI para tratamento de esgotos sanitários das grandes regiões metropolitanas brasileiras. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 9., Porto Seguro. **Anais...** Porto Seguro: 2000.

Outra questão para a eficácia e consolidação do sistema descentralizado envolve a realização de um programa de gerenciamento durante todo o ciclo de operação, que assegure a qualidade da água produzida, a inspeção regular e a manutenção apropriada (SANTOS, 2013). Afferden *et al.* (2010) concluem que, para alcançarem sucesso, os sistemas descentralizados devem ser fiscalizados por uma administração superior. Neste aspecto, Cohim *et al.* (2009) acrescentam que tanto o sistema centralizado quanto o descentralizado devem ser operados por uma autoridade central capacitada, a fim de minimizar os riscos que podem causar à saúde dos usuários e aumentar a credibilidade do uso de água não potável.

Com base no que foi exposto anteriormente, percebe-se que não existe no meio acadêmico um consenso acerca de qual sistema, a saber, centralizado ou descentralizado, é mais interessante. Cada um apresenta vantagens particulares que devem ser avaliadas considerando tanto consequências diretas, por exemplo, infraestrutura e gastos envolvidos, quanto indiretas nos sistemas, como características regionais e impactos ambientais.

Guest *et al.* (2009) e Libralato *et al.* (2012) defendem inclusive a coexistência entre sistemas centralizados e descentralizados, com vários níveis de aplicabilidade em diferentes regiões, sendo que a tomada de decisão a princípio por um tipo de sistema não pode excluir a implantação do outro. Para os autores, essa abordagem seria a mais realista nas condições atuais das cidades, especialmente no caso de grandes conjuntos de edificações, tais como centros comerciais, hospitais, aeroportos ou em novas áreas de desenvolvimento, onde o uso de água não potável pode ser efetivamente planejado.

2.6 VARIÁVEIS PARA A TOMADA DE DECISÃO QUANTO AO TIPO DE SISTEMA

Dimitriadis (2005), Lima (2008), Sella (2011), Santos (2013) e Guo e Englehardt (2015) afirmam que tanto os sistemas centralizados quanto os descentralizados devem preencher os seguintes requisitos:

- baixa dependência energética;
- simplicidade operacional, de manutenção e de controle;
- eficiência no tratamento;

- moderada ocupação física;
- aplicação em pequena escala se a demanda não atingir à prevista em projeto;
- possibilidade de expansões futuras;
- elevado ciclo de vida;
- existência de experiência prática, pois o gerenciamento inadequado tem impacto direto no bem-estar dos usuários.

É interessante notar que os baixos custos de implantação, operação e manutenção são citados pela maioria dos autores como atributos importantes para a escolha da melhor alternativa entre sistemas centralizados e descentralizados. Entretanto, o estudo realizado por Dimitriadis (2005), na Austrália, revelou que a crença de que o sistema de água não potável representa uma opção de abastecimento de baixo custo é um equívoco comum durante sua concepção. A autora assegura que qualquer que seja o sistema provavelmente há um investimento financeiro considerável, ao contrário do que se apresenta em diversas pesquisas.

Hernández *et al.* (2005) complementa que, devido à falta de conhecimento, o desenvolvimento do projeto de sistemas prediais de água não potável usualmente enfoca sua viabilidade a partir dos gastos provenientes da construção do sistema e tratamento do efluente, desconsiderando os custos indiretos com aquisição do terreno, mão de obra, maquinários, infraestrutura, operação, manutenção e paralisação do sistema, o que torna o custo real de produção da água não potável muito superior ao estimado inicialmente. Além disso, Sella (2011) enfatiza que os investimentos realizados são totalmente ligados ao padrão de qualidade da água, conforme as atividades a que se destinam nas edificações.

Para Engin e Demir (2006), existem quatro fatores que influenciam o processo de tomada de decisão acerca da descentralização, especialmente no caso de pequenas comunidades: custos, flexibilidade no uso do território devido à menor ocupação física em comparação aos sistemas centralizados, manutenção e proteção ambiental. Deste modo, na sequência, apresentam-se as principais variáveis que interferem na tomada de decisão quanto ao sistema a ser empregado.

2.6.1 Demanda e oferta

De acordo com Gonçalves *et al.* (2006), os aspectos quantitativos, tanto de demanda de água residuária quanto de produção de água não potável relacionam-se diretamente com o consumo de água e equipamentos sanitários das residências, que variam de acordo com a localização, o clima local e os hábitos da população. Dimitriadis (2005) reforça que ao analisar a capacidade diária de produção de um sistema de água não potável, verifica-se a diminuição do custo do litro da água com o aumento da escala do sistema, o que pode provocar aumentos nos custos de instalação e operação para sistemas descentralizados individuais.

Outro fator importante, segundo Lima (2008), se refere à capacidade do sistema em absorver variações de cargas e sobrecargas hidráulicas quando ocorrem picos de vazão nas estações descentralizadas, o que pode prejudicar o desempenho e a eficiência de sistemas prediais de água não potável com pouca adaptabilidade às oscilações existentes entre oferta e demanda nas edificações.

2.6.2 Tipos de tratamentos

Independentemente de o sistema ser centralizado ou descentralizado, a proteção da saúde pública deve ser o principal foco do projeto desenvolvido, devendo as diversas fontes de água não potável ser compatíveis com as tarefas às quais se destinam e requerendo uma rigorosa avaliação do tipo de tratamento a empregar. Portanto, os custos envolvidos na geração de água não potável são diretamente proporcionais à sua qualidade final, ou seja, quanto maior a necessidade de um insumo com padrão elevado para usos mais específicos, maior é o investimento em equipamentos que possibilitam sua produção (GONÇALVES *et al.*, 2006).

Estão disponibilizados no mercado nacional diversos tipos de tratamentos, cujas características podem ser subdivididas de acordo com os grupos indicados no Quadro 2.2. Destaca-se que uma breve descrição das características, as vantagens e desvantagens de cada tipo de tratamento são apresentadas no Anexo A.

Quadro 2.2 – Principais tipos de tratamento em nível secundário e terciário

Grupo	Tipo de Tratamento
Disposição no Solo	<ul style="list-style-type: none"> • Infiltração lenta no solo • Infiltração rápida no solo • Infiltração subsuperficial no solo • Escoamento superficial no solo • Terras úmidas construídas, banhados artificiais ou ilhas flutuantes (wetlands)
Lagoas de Estabilização	<ul style="list-style-type: none"> • Lagoa facultativa • Lagoa anaeróbia associada à lagoa facultativa • Lagoa aerada facultativa • Lagoa aerada de mistura completa associada à lagoa de decantação • Lagoa associada à lagoa de maturação • Lagoa associada à lagoa de alta taxa
Lodos Ativados	<ul style="list-style-type: none"> • Lodo ativado convencional • Lodo ativado com aeração prolongada • Lodo ativado de fluxo intermitente • Lodo ativado convencional com remoção biológica de nitrogênio • Lodo ativado convencional com remoção biológica de nitrogênio e fósforo
Reatores Aeróbios com Biofilmes	<ul style="list-style-type: none"> • Filtro biológico percolador de baixa carga ou taxa • Filtro biológico percolador de alta carga ou taxa • Filtro biológico aerado submerso ou biofiltro aerado submerso • Biodisco ou disco biológico rotativo (DBR)
Reatores Anaeróbios	<ul style="list-style-type: none"> • Filtro anaeróbio • Reator anaeróbio de fluxo ascendente ou de manta de lodo (RAFA ou UASB) • Reator anaeróbio compartimentado (RAC ou ABR) • Reator UASB ou RAC complementados com pós-tratamento
Membranas	<ul style="list-style-type: none"> • Separação por membranas de filtração (ultrafiltração, microfiltração, nanofiltração ou de osmose inversa) • Biorreator com membrana em módulo submerso (MBR)
Físico-Químico	<ul style="list-style-type: none"> • Filtração seguida de desinfecção por cloração • Filtração seguida de desinfecção por ozonização • Filtração seguida de desinfecção por radiação ultravioleta

Fonte: Aisse *et al.* (2000), Piveli (2004), Von Sperling (2005) e Matangue (2011)

De acordo com Piveli (2004), os reatores anaeróbios possuem baixos custos de implantação e custos de operação bastante competitivos por não ser necessária aeração em seu processo. Além disso, Von Sperling (2005) destaca que a produção de lodo é reduzida em comparação com os reatores aeróbios e lodos ativados, pois estes tratamentos chegam à produção de 35 a 90 litros de lodo por habitante por ano, ao passo que um reator UASB pode produzir em torno de 10 a 55 L/hab.ano, dependendo do pós-tratamento utilizado.

A produção de gases no tratamento de efluentes pode ser considerada um benefício dos reatores anaeróbios, pela possibilidade de purificação e emprego do metano como fonte de energia (PIVELI, 2004). Entretanto, segundo o autor, por esta não ser uma prática viabilizada facilmente na atualidade, o gás sulfídrico (H_2S) resultante do processo anaeróbio apresenta-se como uma considerável limitação operacional deste tipo de tratamento, devido à proliferação de mau odor na região de implantação e riscos de corrosão nas instalações do sistema.

Neste cenário, Pereira *et al.* (2011) afirmam que os reatores anaeróbios compartimentados (RAC) possuem a vantagem de produzir uma quantidade de gases irrisória frente aos reatores UASB. De acordo com o estudo desenvolvido pelos autores, as produções teóricas de biogás dos reatores RAC e UASB foram 20 L/dia e 900 L/dia, respectivamente, enquanto que a produção média real medida no gasômetro de um reator UASB foi equivalente a 520 L/dia e do RAC não houve registro de produção de gases, após oito meses de análise. Todavia, de acordo com Matangue (2011), ambos os reatores, quando não complementados com pós-tratamento, apresentam baixa remoção de nitrogênio e fósforo.

Segundo Peixoto (2008), tratamentos que envolvem o processo físico-químico – que engloba os processos de filtração e desinfecção, removendo os coliformes presentes nas águas cinzas – apresenta-se adequado para sistemas individuais em edifícios por demandar pouca área para instalação. Contudo, Al-Jayyousi (2003) e Piveli (2004) explicam que o tratamento físico-químico, além de possuir elevado custo operacional, resulta em menor eficiência de remoção de matéria orgânica biodegradável frente às outras tecnologias do mercado, não sendo recomendável principalmente para sistemas centralizados.

Outros tratamentos competitivos no que se refere à reduzida área de ocupação, baixa geração de lodo e à elevada qualidade final da água produzida são os que empregam membranas de filtração (MIERZWA, 2009⁹ *apud* RODRIGUES, 2012). Conforme Oliveira (2010), a tecnologia permite remover sólidos em suspensão, matéria orgânica e organismos patogênicos, bem como dessalinizar águas.

No entanto, a principal limitação das membranas, especialmente nos biorreatores com membranas (MBR), relaciona-se aos altos custos de implantação dos sistemas, por não serem utilizados em larga escala no país, de operação, devido ao elevado consumo de energia, e de manutenção, relativos às frequentes limpezas das membranas (SILVA, 2009).

No Brasil, o tratamento feito por meio de biodisco ou disco biológico rotativo (DBR) é muito empregado quando se trata de sistemas descentralizados individuais, isto porque necessita de pouca área para instalação; equipamento mecânico simples, o que consome pouca energia; não há geração de maus odores e nem de ruídos durante a operação, de acordo com Von Sperling (2005). Porém o autor destaca que há considerável produção de lodo, o qual, por necessitar de tratamento completo e disposição final em local adequado, tem impacto direto no custo de manutenção.

Percebe-se que cada tipo de tratamento possui suas vantagens e desvantagens frente às outras tecnologias presentes no mercado. Portanto, o tipo de tratamento da água residuária é uma variável fundamental para a tomada de decisão quanto ao tipo de sistema, centralizado ou descentralizado, a ser implantado.

2.6.3 Custos de implantação, operação e manutenção do sistema

Enquanto a maioria dos tipos de tratamento favorece a escolha de sistemas centralizados, por compreenderem tecnologias mais conhecidas e proporcionarem maior controle do insumo ofertado; o custo de execução da rede de distribuição e coleta favorece a descentralização devido à proximidade do ponto de geração de efluentes, do local de tratamento e do consumo da água não potável (GUO e ENGLEHARDT, 2015).

⁹ MIERZWA, J. C. **Desafios para o tratamento e água de abastecimento e o potencial de aplicação do processo de ultrafiltração**. 2009. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

Desta maneira, a grande demanda por tubulações de diâmetros maiores, o espaço físico para a construção da estação de tratamento e a consequente interferência na infraestrutura urbana são questionamentos constantes acerca da viabilidade do sistema centralizado. Todavia, em se tratando dos sistemas descentralizados individuais ou em grupos, o somatório dos custos para a implantação de diversas estações de tratamento pode ser superior do que o investimento em uma única unidade centralizada, que produz maior volume de água não potável.

Quanto aos custos de operação e manutenção relativos ao consumo de produtos químicos, energia elétrica, funcionários e equipamentos, Hernández *et al.* (2005), os divide em fixos e variáveis. De acordo com os autores, os custos fixos independem do volume de água tratado e reutilizado, ao passo que os custos variáveis são proporcionais à quantidade de efluente gerado, por exemplo, quanto maior for a demanda por água não potável de um edifício, maior será o gasto energético para o tratamento e bombeamento do insumo. Entende-se a importância de aferir os valores despendidos com serviços operacionais e de preservação, pois estes nunca serão nulos durante o ciclo de vida do sistema.

Em relação ao investimento inicial, Hernández *et al.* (2005) afirmam que, em torno de 2% representa a manutenção somente de tubos e de reservatórios do sistema predial de água não potável, 0,5% é despendido para conservação de obras civis e 3% é reservado ao reparo de equipamentos, dos quais 80% precisam ser substituídos a cada 10 anos de operação. Ainda, os autores destacam que o custo do metro cúbico de água diminui conforme aumenta a escala do sistema, isto é, sistemas centralizados têm um custo de produção menor de água não potável do que os descentralizados.

Outras atividades de manutenção importantes são a remoção do lodo produzido e dos resíduos acumulados nos reservatórios, que com o passar do tempo diminuem a qualidade do efluente tratado e da água armazenada. Neste cenário, Peixoto (2008) explica que, caso o sistema de esgotamento do reservatório não tenha sido previsto em projeto, é necessário fazer a remoção do lodo remanescente por meio de bombeamento, com o auxílio de uma empresa terceirizada. Apesar desta não ser uma prática usualmente realizada nas edificações, verifica-se que sistemas descentralizados requerem uma logística de transporte mais complexa do que os

centralizados, pois nestes, o lodo é concentrado em um único lugar, à medida que naqueles, a limpeza ocorre em vários sistemas localizados em centros urbanos.

Além disso, considerando os recursos totais gastos em atividades auxiliares de estações de tratamento centralizadas, Ruiz-Rosa *et al.* (2016) observam que a manutenção consome aproximadamente 36% do custo total dessas tarefas. Isto significa que durante o planejamento de uma estação de tratamento de água não potável é essencial considerar os custos envolvidos em sua manutenção, uma vez que o acúmulo destes em poucos anos pode ultrapassar o valor despendido em sua construção. Aliado a isto, Hernández-Sancho e Sala-Garrido (2009), em pesquisa desenvolvida em 338 estações de tratamento de águas residuárias na Espanha, verificaram que os custos de manutenção e gestão são os fatores mais importantes que evidenciam as diferenças entre as estações em termos de eficiência.

2.6.4 Monitoramento do sistema

O gerenciamento da qualidade da água do sistema predial de água não potável auxilia na redução dos riscos de contaminação dos usuários. Desse modo, em sistemas centralizados a gestão do sistema deve ser realizada em período integral e por profissionais capacitados. Fato que raramente ocorre nos sistemas descentralizados, pois o monitoramento, quando não é efetuado pelo síndico ou zelador da edificação, é subcontratado para alguns dias do mês (PEIXOTO, 2008).

Hernández *et al.* (2005) expõem que o número de profissionais exigidos depende do tamanho, do tipo de tratamento e da automatização do sistema, sendo que os custos despendidos com a mão de obra diminuem conforme se aumenta a produção de água não potável. Portanto, apesar de mais criteriosa, a gestão de um sistema centralizado pode ser mais econômica, pois o custo de contratação de uma equipe capacitada e fixa é menor do que o somatório do custo de diversas equipes terceirizadas para todos os sistemas individuais implantados.

2.6.5 Consumo de energia elétrica

A escolha do tipo de tratamento interfere diretamente no consumo de energia. No entanto, além da verificação dos diferentes processos de tratamento, quando se

tratam de sistemas de água não potável também deve-se considerar a influência do transporte da água (MATOS *et al.*, 2014). Os autores afirmam que o comprimento da rede de distribuição e as elevações a serem vencidas são fatores básicos para analisar a intensidade do bombeamento e seu consequente consumo de energia.

Segundo Silva *et al.* (2009), o consumo de água e de energia devem ser tratados conjuntamente, pois o transporte da água por meio dos sistemas de abastecimento, bem como as perdas por vazamentos, furtos, desperdícios e mau funcionamento dos sistemas dependem diretamente do uso de energia. Por estas razões, a energia elétrica consumida pelo sistema predial de água não potável é uma das variáveis mais importantes para a tomada de decisão entre a escolha de sistemas centralizados e descentralizados, tendo impacto direto na viabilidade econômica de sua implantação em um edifício.

Um balanço realizado no Reino Unido verificou que, de fato, os sistemas de reúso permitem a redução no consumo de água potável, porém ocasionam certo aumento na energia consumida devido à utilização de equipamentos para coletar, tratar e distribuir a água pelo sistema predial individual (WATER UK, 2008). Hendrickson *et al.* (2015) e Ruiz-Rosa *et al.* (2016) indicam que em sistemas centralizados de tratamento de águas residuárias entre 41 e 44% das despesas corresponde ao bombeamento do efluente.

No Brasil, a maior parte dos edifícios apresentam sistemas de suprimento de água do tipo indireto, ou seja, possuem reservatórios de armazenamento inferior e superior. Desta forma, quando se instala um sistema de água não potável a demanda de energia para recalque é necessária tanto para a água potável quanto para a água não potável. Pode-se depreender, então, que maiores volumes de água tratada e reutilizada implicam em maiores gastos energéticos. Entretanto, o consumo de uma quantidade menor de água recuperada implica numa menor redução do consumo de água potável, tornando o reúso pouco atraente.

Esta situação foi identificada por Bozan (2011), cuja pesquisa analisou o consumo de energia associado ao sistema de água não potável em um edifício residencial de alto padrão em Vitória, Espírito Santo. Os resultados apontaram para a inviabilidade econômica do projeto considerando a atual demanda de água não potável pelos

moradores, por volta de 12% do total, pois o benefício gerado pela redução do consumo de água potável não supre os custos de instalação, operação e manutenção, nem os gastos energéticos devido ao acréscimo das bombas para o recalque das águas recuperadas.

Do mesmo modo, o estudo de Shehabi *et al.* (2012) na Califórnia, Estados Unidos, apontou para um consumo de energia de 10,3 kWh/m³ em um sistema descentralizado, enquanto que para o sistema centralizado, o consumo foi de 1,9 kWh/m³, para o mesmo volume de água tratada. Após a equalização dos resultados os autores concluíram que os sistemas descentralizados requerem sete vezes mais energia para operar do que o centralizado.

Assim, quanto à decisão entre sistemas descentralizados ou centralizados com base no consumo de energia, constata-se vantagens e desvantagens em cada um dos sistemas. O somatório do consumo energético para o tratamento dos efluentes de vários sistemas descentralizados pode ser muito superior ao consumo de um sistema centralizado, que atenda ao mesmo conjunto de edificações. Contudo, o consumo com energia elétrica durante a fase de operação de um sistema centralizado também é significativamente alto, em virtude da extensão da rede e da consequente ampliação da capacidade de bombeamento do efluente até o ponto de uso, pois há um acréscimo na perda de carga total a ser vencida pela adutora.

2.6.6 Emissão de gases de efeito estufa

A WATER UK (2008) revela que as emissões de dióxido de carbono (CO₂), gás metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) aumentam em 100% quando se emprega um sistema predial de água não potável ao invés do convencional com água potável. Neste contexto, Shehabi *et al.* (2012) ao compararem o sistema centralizado com o descentralizado concluíram que o primeiro libera menor quantidade de gases do efeito estufa (GEE) devido ao aproveitamento do metano gerado no processo de tratamento para a produção de eletricidade, enquanto que no sistema descentralizado os gases produzidos são emitidos diretamente para a atmosfera.

Um estudo realizado na Califórnia, Estados Unidos, constatou que a estação de tratamento de águas residuárias centralizada libera 97% menos emissões de gases

de efeito estufa e consome 79% menos energia por volume de efluente tratado do que a tecnologia utilizada na estação descentralizada (HENDRICKSON *et al.*, 2015). Todavia, os autores ainda divulgaram que em sistemas centralizados, o processo de tratamento contribui com 18% das emissões de gases de efeito estufa enquanto que os materiais e a construção das tubulações representam 75% das emissões, ressaltando que a execução das redes destinadas ao transporte da água não potável também carrega implicações ambientais significativas.

As emissões de CO₂ no tratamento de águas residuárias dependem diretamente do consumo de energia (MATOS *et al.*, 2014). De acordo com Hendrickson *et al.* (2015), a infraestrutura relacionada ao tratamento de água consome em torno de 3 a 4% da energia nos Estados Unidos, emitindo mais de 45 milhões de toneladas de gases de efeito estufa por ano somente naquele país. Assim, percebe-se que os impactos ambientais ocasionados pelos sistemas não podem ser ignorados e devem ser cuidadosamente aferidos em cada caso.

Enfim, entende-se que a escolha entre um sistema centralizado ou descentralizado requer uma análise mais criteriosa e complexa, visto que a decisão não depende somente de fatores que incidem diretamente e de maneira isolada. Há sempre que se realizar uma observação global das necessidades, intervenções e consequências para encontrar uma forma de correlacionar os impactos sociais, econômicos e ambientais com seus respectivos custos, a fim de ponderar, de maneira precisa, as vantagens e desvantagens inerentes a cada sistema.

A ausência de um mercado consolidado de água não potável no Brasil e a escassez de dados relativos aos sistemas centralizados e descentralizados, torna a avaliação do real impacto de cada variável apresentada anteriormente uma tarefa difícil. Assim sendo, é escopo desta pesquisa analisar as variáveis com valores diretamente mensuráveis, a saber, custos de implantação, de manutenção e de operação, o que engloba o consumo de energia, todavia, sem deixar de considerar os efeitos das variáveis qualitativas em cada decisão tomada.

3 PESQUISA OPERACIONAL

Com o intuito de justificar a escolha pela pesquisa operacional para desenvolver este estudo, apresenta-se neste capítulo o conceito de Pesquisa Operacional (PO), Programação Linear (PL) e Programação Linear Inteira (PLI), bem como a relação desses conceitos com o processo de tomada de decisão.

De acordo com Marins (2011), o ato de decidir significa fazer uma escolha entre opções de soluções mais viáveis de serem aplicadas à determinada situação para o alcance de determinado objetivo. Anderson *et al.* (2003)¹⁰ *apud* Oliveira (2004) complementam que quando um profissional se depara com um obstáculo que apresenta diversas opções, incertezas e riscos futuros, a análise de decisão pode auxiliá-lo a encontrar a melhor estratégia para resolver o problema.

Assim, durante o processo de tomada de decisão, é fundamental identificar todos os objetivos a serem alcançados, além das consequências resultantes das possíveis opções (OLIVEIRA, 2004). Segundo Goldbarg e Luna (2005), precede a essa escolha, normalmente, envolve:

- a representação adequada das variáveis e restrições envolvidas;
- o levantamento das opções viáveis;
- o estabelecimento de critérios para a avaliação dessas opções;
- a comparação de todas as opções disponíveis;
- a análise do impacto da tomada de decisão.

É nesse contexto que se insere a pesquisa operacional com um elenco de temas, modelos e algoritmos que permitem criar um procedimento coerente e consistente para a tomada de decisão de problemas difíceis de serem solucionados, se as opções existentes forem simplesmente comparadas (MARINS, 2011).

Fogliatto (s/d) explica que os problemas de PO são estruturados a partir de uma função objetivo acompanhada de diversas restrições, associadas a este objetivo. As restrições do modelo se referem às limitações intrínsecas ao problema, que podem

¹⁰ ANDERSON, D. R.; SWEENEY, D. J.; WILLIAMS, T. A. **An introduction to management science: quantitative approaches to decision making.** 10 ed., 881 p. Mason: Thomson, 2003.

representar, por exemplo, a disponibilidade de materiais, de equipamentos, de mão de obra, de recursos financeiros, entre outros.

A PO trata da modelagem matemática de fenômenos estáticos ou dinâmicos. Os fenômenos dinâmicos, denominados estocásticos, tratam de problemas compostos por elementos que apresentam a probabilidade de ocorrência numa determinada forma. Enquanto que nos fenômenos estáticos, denominados determinísticos, todos os componentes são inicialmente conhecidos e nenhuma aleatoriedade em sua ocorrência é permitida (FOGLIATTO, s/d). Além disso, os problemas determinísticos são classificados em duas categorias: programação linear, explicada a seguir, e programação não-linear que não é abordada nesta pesquisa.

Destaca-se que o termo modelo em PO representa um objeto abstrato, que tem como objetivo imitar as principais características de um objeto real (ARENALES *et al.*, 2007). De acordo com os autores, para formular um modelo matemático, devem ser feitas simplificações do sistema ou do problema real, porém com detalhamento suficiente para captar os elementos essenciais, a fim de que possa ser solucionado matematicamente. Além disso, a validação do modelo depende de sua solução ser coerente com o contexto original.

No entanto, Arenales *et al.* (2007) salientam ainda que “a solução do modelo apoia o processo de tomada de decisão, mas em geral, diversos outros fatores menos tangíveis, não quantificáveis, também devem ser levados em consideração para a decisão final”. Portanto, ressalta-se que os modelos matemáticos auxiliam no processo de tomada de decisão, porém não substituem os tomadores de decisão.

3.1 PROGRAMAÇÃO LINEAR

A princípio torna-se importante esclarecer que o termo programação deve ser entendido como um sinônimo de planejamento. Santos (2000) define programação linear (PL) como o planejamento de atividades para obter um resultado ótimo que atenda da melhor maneira a um determinado objetivo.

Deste modo, um problema de PL é um problema de otimização, ou seja, é aplicado quando se procura estabelecer quais são as formas mais eficientes de utilizar os recursos disponíveis para atingir determinadas metas, a fim de melhorar o

rendimento ou produtividade do processo (MARINS, 2011). Segundo Fogliatto (s/d), este tipo de problema apresenta os seguintes atributos:

- possui um conjunto de variáveis manipuláveis, chamadas de variáveis de decisão do problema, no procedimento de busca pelo resultado ótimo;
- a função objetivo é uma função linear escrita em termos dessas variáveis de decisão;
- os valores assumidos pelas variáveis de decisão devem satisfazer a um conjunto de restrições, que compõem a região de soluções viáveis do problema.

Marins (2011) afirma que o objetivo da PL é determinar a solução ótima para problemas que sejam representados por uma expressão linear, denominada função objetivo, que será maximizada ou minimizada, respeitando-se um sistema linear de igualdades ou desigualdades, que recebem o nome de restrições do modelo.

As restrições determinam uma região chamada conjunto viável, sendo que a melhor das soluções básicas viáveis existentes, a saber, aquela que maximiza ou minimiza a função objetivo, é a solução ótima (MARINS, 2011). O autor salienta ainda que qualquer desigualdade pode ser transformada numa igualdade, bastando adicionar ou subtrair novas variáveis positivas, denominadas variáveis de folga.

De acordo com Santos (2000), o método mais comum de aplicação da programação linear envolve problemas de distribuição de recursos limitados, da melhor forma possível ou maneira ótima, entre diferentes atividades que competem por estes recursos. No Quadro 3.1 estão apresentadas as considerações que devem estar implícitas em qualquer modelo de PL.

Quadro 3.1 – Considerações implícitas em um modelo de Programação Linear

Propriedade	Definição
Proporcionalidade	Implica em que o nível da contribuição de uma variável de decisão qualquer é sempre proporcional ao seu valor. Por exemplo, uma variável X_1 , cujo lucro unitário é igual a 20. A proporcionalidade determina que a contribuição de X_1 para o lucro total é $20 \cdot X_1$, independentemente se X_1 equivale a 10 ou a 100.000.

Continua

Propriedade	Definição
Aditividade	Considera que não há interação entre as diversas variáveis de decisão do modelo, ou seja, a contribuição do total de variáveis é a soma das contribuições individuais de cada uma das variáveis. Exemplificando: a contribuição para o lucro total da variável X_1 é $20 \cdot X_1$ independentemente se a variável X_2 é igual a 1 ou 10.000. Por sua vez, a contribuição de X_2 para o lucro total é $60 \cdot X_2$ qualquer que seja o valor assumido por X_1 .
Divisibilidade	Quando a solução de um modelo de PL resultar em uma solução ótima com valores fracionários, deve-se considerar o seguinte: se as variáveis representam bens cujo valor é reduzido como, por exemplo, uma mesa, elimina-se a parte fracionária dos valores ótimos. Porém, se as variáveis de decisão representam bens de alto valor como, por exemplo, um avião, acrescentam-se restrições de que as variáveis devem ser inteiras.
Certeza	Esta consideração implica em que todos os parâmetros do sistema são constantes conhecidas não se aceitando incertezas de qualquer tipo. Se algum dos parâmetros tiver qualquer nível de incerteza, a formulação do modelo levará a resultados incorretos.

Fonte: Santos (2000)

Santos (2000) afirma também que se um problema de programação linear possui uma única solução ótima, esta é uma solução básica do sistema de equações lineares formado pelas restrições do modelo acrescidas das suas respectivas variáveis de folga.

Entretanto, é importante ressaltar que uma solução básica do sistema de equações não é necessariamente uma solução ótima, pois no conjunto viável de resultados para determinado sistema de equações podem existir infinitas soluções básicas, que atendem à função objetivo, porém não de forma otimizada (MARINS, 2011).

Caso seja encontrado mais de um valor para a solução ótima, consequentemente existirá um número infinito de soluções. Assim, segundo Lisboa (2002) a solução ótima pode não ocorrer em dois casos: quando não há solução viável, devido a

restrições incompatíveis, ou quando não há máximo ou mínimo, isto é, uma ou mais variáveis tendem ao infinito e as restrições continuam sendo satisfeitas, o que fornece um valor ilimitado para a função objetivo.

3.1.1 Formulação geral do problema de PL

Sendo a função objetivo (Z) minimizada (MIN) ou maximizada (MAX) e sujeita à (s. a) determinadas restrições, tem-se que a forma padrão de um problema de PL é:

$$\begin{array}{ll} \text{(MIN)} & Z = C^T x \\ \text{s. a.} & \begin{cases} Ax \geq b \\ x \geq 0 \end{cases} \end{array} \quad \text{ou} \quad \begin{array}{ll} \text{(MAX)} & Z = C^T x \\ \text{s. a.} & \begin{cases} Ax \leq b \\ x \geq 0 \end{cases} \end{array}$$

A forma canônica, ou seja, simplificada de um problema de PL é representada por:

$$\begin{array}{ll} \text{(MIN)} & Z = C^T x \\ \text{s. a.} & \begin{cases} Ax = b \\ x \geq 0 \end{cases} \end{array} \quad \text{ou} \quad \begin{array}{ll} \text{(MAX)} & Z = C^T x \\ \text{s. a.} & \begin{cases} Ax = b \\ x \geq 0 \end{cases} \end{array}$$

Portanto, para eliminar as desigualdades, a fim de transformar um problema de PL da forma padrão para a forma canônica, é necessário acrescentar ou subtrair variáveis de folga (x_k), conforme se verifica na Equação (3.1).

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i &\rightarrow \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + x_k = b_i, \quad x_k \geq 0 \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i &\rightarrow \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j - x_k = b_i, \quad x_k \geq 0 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Além disso, de acordo com Santos (2000), o modelo geral da programação linear pode ser escrito conforme a Equação (3.2).

$$\begin{aligned}
 & (\text{MAX}) \text{ ou } (\text{MIN}) \quad Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \cdots + C_nX_n \\
 & \text{s. a.} \quad \left\{ \begin{array}{l} A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + \cdots + A_{1n}X_n \leq B_1 \\ A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + \cdots + A_{2n}X_n \leq B_2 \\ \vdots \\ A_{m1}X_1 + A_{m2}X_2 + \cdots + A_{mn}X_n \leq B_m \\ X_i \geq 0 \end{array} \right. \quad (3.2)
 \end{aligned}$$

Em que:

- A_i – são os coeficientes das restrições;
- B_i – são as constantes do lado direito, que representam os valores máximos ou mínimos totais das restrições;
- C_i – são os coeficientes da função objetivo (Z).

3.2 PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA

Os problemas de programação linear inteira (PLI) são semelhantes aos problemas de PL, sendo que a principal diferença entre os modelos é devido a, pelo menos, parte das variáveis da PLI ser igual a números inteiros (COLIN, 2007). Segundo o autor, na programação matemática, há duas classes de números inteiros: os inteiros genéricos (0, 1, 2, 3, ...) e os inteiros 0 e 1, os quais representam respostas do tipo sim e não, presença e ausência ou verdadeiro e falso, por exemplo.

Em PLI, os problemas são classificados da seguinte forma (COLIN, 2007):

- problema de programação inteira pura: todas as variáveis são inteiros genéricos;
- problema de programação inteira mista: parte das variáveis é de inteiros e parte é de variáveis contínuas;
- problema de programação inteira com variáveis 0-1: todas as variáveis assumem valores 0 ou 1.

3.2.1 Formulação geral do problema de PLI

A forma padrão de um problema de PLI é similar à forma padrão de um problema de PL, diferenciando-se apenas pelo acréscimo da restrição que indica que as variáveis

devem ser inteiras. No âmbito desta pesquisa, as variáveis devem ser inteiras e não negativas ($\mathbb{Z}_+$), conforme segue:

$$\begin{array}{ll} \text{(MIN)} & Z = C^T x \\ \text{s. a.} & \left\{ \begin{array}{l} Ax \geq b \\ x \in \{0,1\} \text{ ou } x \in \mathbb{Z}_+ \end{array} \right. \quad \text{ou} \quad \text{s. a.} & \left\{ \begin{array}{l} Ax \leq b \\ x \in \{0,1\} \text{ ou } x \in \mathbb{Z}_+ \end{array} \right. \end{array}$$

A forma canônica, ou seja, simplificada de um problema de PLI é representada por:

$$\begin{array}{ll} \text{(MIN)} & Z = C^T x \\ \text{s. a.} & \left\{ \begin{array}{l} Ax = b \\ x \in \{0,1\} \text{ ou } x \in \mathbb{Z}_+ \end{array} \right. \quad \text{ou} \quad \text{s. a.} & \left\{ \begin{array}{l} Ax = b \\ x \in \{0,1\} \text{ ou } x \in \mathbb{Z}_+ \end{array} \right. \end{array}$$

Do mesmo modo, o modelo geral da programação linear inteira pode ser escrito conforme a Equação (3.3),.

$$\begin{array}{ll} \text{(MAX) ou (MIN)} & Z = C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_n X_n \\ \text{s. a.} & \left\{ \begin{array}{l} A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + \dots + A_{1n}X_n \leq B_1 \\ A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + \dots + A_{2n}X_n \leq B_2 \\ \vdots \\ A_{m1}X_1 + A_{m2}X_2 + \dots + A_{mn}X_n \leq B_m \\ X_i \in \{0,1\} \text{ ou } X_i \in \mathbb{Z}_+ \end{array} \right. \end{array} \quad (3.3)$$

Onde:

- A_i – são os coeficientes das restrições;
- B_i – são as constantes do lado direito, que representam os valores máximos ou mínimos totais das restrições;
- C_i – são os coeficientes da função objetivo (Z).

Portanto, conforme apresentado no Capítulo 2, atualmente não há um consenso a respeito de qual tipo de sistema é o mais viável, uma vez que tanto o centralizado quanto o descentralizado possuem particularidades que os fazem interessantes ou não em determinados aspectos. Deste modo, entende-se que a estruturação de modelos matemáticos para a tomada de decisão irá contribuir para auxiliar a escolha do sistema predial de água não potável mais adequado.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do estudo foi realizada pesquisa bibliográfica, para a coleta de dados que possibilitasse caracterizar e comparar tanto os sistemas centralizados e descentralizados quanto os tipos de tratamentos existentes. Além disso, foi aplicada a pesquisa operacional, que a partir das informações obtidas, permitiu formular modelos matemáticos para tomada de decisão, cuja resolução foi possível com o auxílio do *software* LINDO™. Assim, o estudo foi realizado conforme as etapas indicadas na Figura 4.1 e detalhadas na sequência.

Figura 4.1 – Fluxograma com as etapas da pesquisa

4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o intuito de estabelecer o referencial teórico dos temas estudados inicialmente realizou-se o levantamento bibliográfico apresentado nos Capítulos 2 e 3. Assim, foram pesquisados livros, legislações vigentes, pesquisas acadêmicas, dissertações, teses, artigos de periódicos e eventos, bem como manuais elaborados por instituições nacionais e internacionais.

4.2 LEVANTAMENTO DE DADOS

Nesta etapa reuniram-se dados relativos às variáveis qualitativas e quantitativas que envolvem o processo de tomada de decisão quanto ao tipo de sistema de tratamento de efluentes. Contudo, para o desenvolvimento dos modelos matemáticos, também foi necessário coletar informações referentes às taxas de reajuste em tarifas de energia elétrica, de cotação do dólar, e à vida útil de sistemas hidrossanitários.

4.2.1 Variáveis utilizadas na formulação dos modelos

Por meio das informações disponíveis na literatura nacional e internacional sobre sistemas centralizados e descentralizados, tanto de água cinza quanto de esgoto, os principais dados levantados relacionam-se:

- aos tipos de tratamentos empregados;
- aos custos de implantação, de manutenção e de operação (consumo de energia elétrica do sistema de tratamento);
- à população atendida;
- à área de ocupação dos sistemas.

Os modelos foram formulados considerando somente os valores referentes aos custos de implantação, de manutenção e o custo de operação (que engloba o consumo de energia). Entende-se que estes três custos não podem ser as únicas variáveis estudadas e que não devem ser consideradas as mais importantes no processo de tomada de decisão. Todavia, apresentam-se no mercado nacional como critérios extremamente relevantes na escolha de qualquer sistema.

4.2.2 Cálculo dos custos em dólar

Para a inserção dos valores nos modelos, é necessário que todas as variáveis apresentem a mesma unidade monetária, definida nesta pesquisa, para ser em dólar (US\$), devido à sua constância no mercado financeiro ao longo dos anos. Assim, com o intuito de converter para dólar os custos fornecidos em reais, foi necessário utilizar a média da cotação do dólar, tendo como base o ano informado pela referência consultada. A Tabela 4.1 apresenta a média anual da cotação do dólar comercial para venda, entre 2001 e 2016, fornecida pela Associação Comercial de São Paulo (ACSP, 2016).

Tabela 4.1 – Média anual da cotação do dólar para atualização dos custos fornecidos pelas referências consultadas

Ano	Média anual da cotação do dólar (em R\$)	Ano	Média anual da cotação do dólar (em R\$)
2001	2,3637	2009	1,9974
2002	2,9222	2010	1,7603
2003	3,0780	2011	1,6751
2004	2,9260	2012	1,9547
2005	2,4349	2013	2,1577
2006	2,1783	2014	2,3532
2007	1,9481	2015	3,3310
2008	1,8349	2016	3,4885

Fonte: adaptado de ACSP (2016)

Por exemplo, Hastenreiter (2013) divulgou em Reais (R\$) todos os custos de implantação e de manutenção dos sistemas. Assim, para converter os valores para dólar foram feitos os cálculos apresentados nas Equações (4.1) e (4.2).

$$Custo\ Implantação_{dólar} = \frac{Custo\ Implantação_{reais}}{Média\ anual\ dólar_{2013}} \quad (4.1)$$

$$Custo\ Implantação_{dólar} = \frac{R\$ 78.000}{2,1577} = US\$ 36,150$$

$$Custo\ Manutenção_{dólar/ano} = \frac{Custo\ Manutenção_{reais/ano}}{Média\ anual\ dólar_{2013}} \quad (4.2)$$

$$Custo\ Manutenção_{dólar} = \frac{R\$ 3.238/ano}{2,1577} = US\$ 1,501/ano$$

Destaca-se que o mesmo procedimento foi realizado para a conversão dos valores fornecidos por Reami e Coraucci Filho (2010), Dell'Uomo (2014) e Domingues *et al.* (2016). Entretanto, para os custos extraídos de Aisse *et al.* (2002), o divisor das equações não foi a média anual do dólar, mas sim a cotação mensal em julho de 2001, conforme indicado pelos autores, que equivale a R\$ 2,5538 (ACSP, 2016).

De acordo com Von Sperling (2005), os valores apresentados foram calculados considerando que a média da cotação do dólar para o segundo semestre de 2004 foi equivalente a R\$ 2,70, valor este utilizado como divisor da equação quando necessário. Além disso, o autor apresenta os custos em função da quantidade de habitantes, assim, para obter os respectivos custos de manutenção (CM), em US\$/ano, foi feito o cálculo indicado pela Equação (4.3).

$$CM_{dólar/ano} = \frac{CM_{reais/ano}}{Cotação\ do\ dólar} * Habitantes \quad (4.3)$$

$$CM_{dólar/ano} = \frac{R\$ 12/ano}{2,70} * 4.203 = US\$ 18,680/ano$$

4.2.3 Cálculo do consumo de energia

O consumo de energia dos sistemas foi fornecido em kWh/mês e em kWh/hab.ano. Todavia, como o custo de operação a ser inserido no modelo deve estar em US\$/ano, foi necessário considerar um custo de energia por kWh consumido. Assim, utilizou-se como referência a tarifa de energia elétrica determinada pela AES Eletropaulo, na cidade de São Paulo, para o mês de abril de 2016, como verificado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Tarifa de energia elétrica utilizada para o cálculo do custo de operação

AES Eletropaulo
por onde a vida acontece

Nota fiscal / Conta de energia elétrica

Eletropaulo Metropolitana Eletricidade de São Paulo S.A.
Av. Dr. Marcos Penteadó de Ulhôa Rodrigues, 939, Loja 1 e 2,
Térreo, 1º ao 7º andar - Torre II - Bairro Sítio Tamboré - Barueri/SP - CEP: 06460-040
CNPJ nº 61.695.227/0001-93 - Inscrição Estadual: 206.165.226.110
Regime Especial Proc. Nº 1000635-686924/2005

Nº da instalação	Conta referente a	Data de emissão	Vencimento
0073563129	ABR 2016	18 ABR 2016	12 MAI 2016

Nº Nota Fiscal	Série	Base de cálculo	Alíquota	ICMS	Nº do cliente
004227732	B	77.32	12,00%	9.27	0013201927

CFOP: 5258 (Venda de en. elétrica a não contribuinte)

Discriminação da operação:	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Energia	145.00	0.59761724	86.64
Dedução	0.00	0.00000000	0.00
Outros não tributáveis	0.00	0.00000000	0.00

Dados técnicos da instalação				
Medidor	Fator Multiplicador	Classe/Subclasse	Faturamento	Tipo de Tarifa
11673538	1	Resid/Resid	Bifásico	B1_RESID
Tensão Nominal(V)		Tensão Mínima(V)		Tensão Máxima(V)
127/220 (BT) V		117/202 V		133/231 V

Composição do fornecimento	
Energia	34.44
Distribuição	13.12
Transmissão	2.44
Encargos	14.19
Tributos	13.13

Dados de leitura do medidor					
Anterior	Leitura	Atual	Leitura	Próxima	Entrega
16 MAR	11109	18 ABR	11254	18 MAI	18 ABR

Fonte: a autora (2016)

Conforme destacado na Figura 4.2, para o mês de abril de 2016, a taxa da tarifa da energia foi igual a R\$ 0,59761724/kWh consumido. Optou-se, então, por arredondar o valor para R\$ 0,60/kWh, a fim de facilitar os cálculos. Portanto, pôde-se calcular o custo de operação (CO) dos sistemas, tendo como base o consumo de energia fornecido pelas referências, conforme mostram as Equações (4.4) e (4.5).

$$CO_{\text{dólar/ano}} = \frac{CO_{\text{kWh/mês}} * Tarifa_{\text{R\$/kWh}} * 12 \text{ meses}}{Cotação \text{ do dólar}_{\text{abril/2016}}} \quad (4.4)$$

$$CO_{\text{dólar/ano}} = \frac{200 * 0,60 * 12 \text{ meses}}{3,551} = US\$ 406/\text{ano}$$

$$CO_{\text{dólar/ano}} = \frac{CO_{\text{kWh/ano}} * Habitantes * Tarifa_{\text{R\$/kWh}}}{Cotação \text{ do dólar}_{\text{abril/2016}}} \quad (4.5)$$

$$CO_{\text{dólar/ano}} = \frac{20 * 4.203 * 0,60}{3,551} = US\$ 14,203/\text{ano}$$

4.2.4 Taxa de reajuste da energia elétrica

Para a formulação dos modelos também foi necessário calcular a taxa de reajuste da tarifa de energia elétrica ao longo do tempo. Desta forma, de acordo com Magnabosco (2014), com base em dados divulgados pelo Instituto Brasileiro de Economia e Finanças (Ibecon), no período de dez anos, entre 2004 e 2014, o preço da energia chegou a subir até 167,7%. De acordo com o autor, este valor é referente à CPFL Paulista, que atende cidades do interior do Estado de São Paulo, e representou a maior variação do país no período.

Assim, como a variação da energia é acumulada anualmente, optou-se por utilizar um valor fixo que representasse a taxa de aumento, sabendo que ao final de dez anos haveria uma variação de 167,7% acumulada no custo da energia elétrica. Portanto, foi considerada uma taxa de reajuste de, aproximadamente, 10,35% ano para o custo de operação, que no âmbito dessa pesquisa, representa o consumo de energia dos sistemas em valores monetários.

4.2.5 Vida útil de sistemas hidrossanitários

Para que a tomada de decisão seja feita com base em características semelhantes à realidade das edificações, a análise deve considerar, pelo menos, a vida útil mínima do sistema a ser implementado.

De acordo com a NBR 15.575 (ABNT, 2013), a vida útil é o “período de tempo em que um edifício e/ou seus sistemas, elementos e componentes se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos considerando: o atendimento dos níveis de desempenho previstos na NBR 15.575; e a periodicidade e a correta execução dos processos de manutenção especificados”.

Para os sistemas hidrossanitários, onde se inserem os sistemas prediais de água não potável, a vida útil de projeto estabelecida pela Norma de Desempenho deve ser maior ou igual a 20 anos (ABNT, 2013). Desta forma, foi considerado um período de vida útil equivalente a 20 anos. No entanto, com o intuito de entender melhor o comportamento dos sistemas, a aplicação dos modelos e a análise dos resultados foram realizadas para cada quinquênio, ou seja, para cada cinco anos de operação.

4.3 FORMULAÇÃO DOS MODELOS

Três tipos de modelos foram formulados para tomada de decisão, cujos objetivos são detalhados na sequência.

- Modelo A: encontrar o menor custo total acumulado dentre diferentes tipos de tratamento e verificar qual é o tipo de tratamento que apresenta o menor valor ao longo da vida útil estipulada;
- Modelo B: encontrar o menor custo total acumulado dentre diferentes tipos de sistemas (centralizado, descentralizado individual ou em grupo), bem como verificar quantos sistemas são necessários implantar para suprir a demanda de determinada população;
- Modelo C: encontrar o menor custo total acumulado dentre diferentes tipos de sistemas (centralizado, descentralizado individual ou em grupo). Além disso, verificar qual é a opção que apresenta o menor valor ao longo da vida útil.

Primeiramente, o modelo A foi aplicado ao Estudo de Caso 1, a fim de comparar diferentes tipos de tratamento de água residuária para uma mesma edificação, a partir de valores obtidos em uma mesma referência, a saber, Hastenreiter (2013).

Em seguida, os modelos B e C foram aplicados ao Estudo de Caso 2, para tomada de decisão quanto ao tipo de sistema (centralizado, descentralizado individual ou em grupo) a ser implantado em um condomínio residencial com 1.700 moradores, tendo como referência as informações obtidas em Von Sperling (2005), Reami e Coraucci Filho (2010), Dell'Uomo (2014) e Domingues *et al.* (2016).

E finalmente, com base nos dados fornecidos por Aisse *et al.* (2002) e Von Sperling (2005), os modelos B e C foram aplicados ao Estudo de Caso 3, para tomada de decisão quanto ao tipo de sistema (centralizado, descentralizado individual ou em grupo) a ser implantado em uma cidade de aproximadamente 29.400 habitantes.

Na sequência, são apresentadas as formulações dos três modelos para a tomada de decisão, contendo uma função objetivo associada às restrições, representadas por equações e/ou inequações. Além disso, com o auxílio do *software* LINDO™ (versão 6.1) os modelos formulados foram resolvidos para cada estudo de caso.

4.3.1 Formulação geral do modelo A

Os custos a serem inseridos no modelo A ficam a critério do projetista, pois pode representar o somatório de quaisquer custos desejados, ou seja, pode ser o somatório dos custos de implantação, de manutenção e de operação ou apenas o somatório dos custos de implantação e de manutenção, por exemplo. O aumento dos custos considerados no modelo terá influência direta na quantidade de variáveis de decisão, pois quanto mais custos forem englobados, mais variáveis de decisão serão necessárias.

Definiu-se então que a variável de decisão, X_{ij} representa a possibilidade ou impossibilidade de instalação de um determinado sistema, onde i é o tipo de tratamento ($i = 1, 2, \dots, m$) e j é o tipo de custo relativo àquele tratamento ($j = 1, 2, \dots, n$). É importante destacar que os valores de i e j modificam conforme a quantidade de tipos de tratamentos e de custos considerados para a comparação. Em resumo, no âmbito desta pesquisa, as variáveis de decisão do modelo A representam:

- X_{11} : possibilidade de instalação do sistema que possui o tipo de tratamento 1, considerando seu custo de implantação.
- X_{12} : possibilidade de instalação do sistema que possui o tipo de tratamento 1, considerando seu custo de manutenção.
- X_{13} : possibilidade de instalação do sistema que possui o tipo de tratamento 1, considerando seu custo de operação.
- X_{21} : possibilidade de instalação do sistema que possui o tipo de tratamento 2, considerando seu custo de implantação.
- X_{22} : possibilidade de instalação do sistema que possui o tipo de tratamento 2, considerando seu custo de manutenção.
- X_{23} : possibilidade de instalação do sistema que possui o tipo de tratamento 2, considerando seu custo de operação.
- X_{31} : possibilidade de instalação do sistema que possui o tipo de tratamento 3, considerando seu custo de implantação.
- X_{32} : possibilidade de instalação do sistema que possui o tipo de tratamento 3, considerando seu custo de manutenção.

- X_{33} : possibilidade de instalação do sistema que possui o tipo de tratamento 3, considerando seu custo de operação.
- X_{41} : possibilidade de instalação do sistema que possui o tipo de tratamento 4, considerando seu custo de implantação.
- X_{42} : possibilidade de instalação do sistema que possui o tipo de tratamento 4, considerando seu custo de manutenção.
- X_{43} : possibilidade de instalação do sistema que possui o tipo de tratamento 4, considerando seu custo de operação.

A formulação do modelo A para tomada de decisão é dada pela Equação (4.6):

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & A_1X_{11} + B_1X_{12} + C_1X_{13} + A_2X_{21} + B_2X_{22} + C_2X_{23} + A_3X_{31} \\
 & + B_3X_{32} + C_3X_{33} + A_4X_{41} + B_4X_{42} + C_4X_{43}
 \end{aligned}$$

$$\text{s. a.} \quad \left\{ \begin{array}{l}
 X_{11} + X_{21} + X_{31} + X_{41} = 1 \\
 X_{12} + X_{22} + X_{32} + X_{42} = 1 \\
 X_{13} + X_{23} + X_{33} + X_{43} = 1 \\
 X_{12} - X_{11} \leq 0 \\
 X_{22} - X_{21} \leq 0 \\
 X_{32} - X_{31} \leq 0 \\
 X_{42} - X_{41} \leq 0 \\
 X_{13} - X_{12} \leq 0 \\
 X_{23} - X_{22} \leq 0 \\
 X_{33} - X_{32} \leq 0 \\
 X_{43} - X_{42} \leq 0 \\
 X_{ij} \in \{0, 1\}
 \end{array} \right. \quad (4.6)$$

Sendo que os coeficientes da função objetivo (Z) representam:

- A_i - custo de implantação do tipo de tratamento i ;
- B_i - custo de manutenção do tipo de tratamento i acumulado ao longo do tempo;
- C_i - custo de operação do tipo de tratamento i acumulado ao longo do tempo.

Os coeficientes B_i , referentes aos custos de manutenção acumulados ao longo do tempo de análise, são calculados conforme a Equação (4.7):

$$B_i = P_i + P_i \cdot (1 + t)^1 + P_i \cdot (1 + t)^2 + \dots + P_i \cdot (1 + t)^{n-1} \quad (4.7)$$

Em que:

- P_i - equivale ao custo de manutenção do tipo de tratamento i no primeiro ano de operação, ou seja, é o custo de manutenção informado pela literatura;
- t - equivale à taxa de aumento anual no custo de manutenção definida para cada tipo de tratamento;
- n - é a vida útil, em anos, determinada para realizar a análise.

E, os coeficientes C_i , que representam os custos de operação acumulados ao longo do tempo de análise, são calculados de acordo com a Equação (4.8):

$$C_i = Q_i + Q_i \cdot (1 + s)^1 + Q_i \cdot (1 + s)^2 + \dots + Q_i \cdot (1 + s)^{n-1} \quad (4.8)$$

Na qual:

- Q_i - equivale ao custo de operação do tipo de tratamento i no primeiro ano de operação, ou seja, é o custo de operação, referente ao consumo de energia, informado pela literatura;
- s - equivale à taxa de reajuste anual na tarifa de energia elétrica, que, nesta pesquisa, foi utilizada a taxa de 10,35% ao ano (Item 4.2.4);
- n - é a vida útil, em anos, determinada para realizar a análise.

Na Equação (4.6), a função objetivo (Z) está minimizada, pois se deseja encontrar o menor custo total, e sujeita às (s.a.) restrições, representadas pelas equações e inequações dentro da chave.

As três primeiras restrições (três primeiras equações dentro da chave), na Equação (4.6), representam grupos de alternativas mutuamente exclusivas, ou seja, em cada equação apenas uma variável pode ser igual a um, pois o modelo deve retornar como resultado final a possibilidade de ocorrer somente um custo de implantação, um custo de manutenção e um custo de operação. Deste modo, as variáveis que representam os outros custos deverão ser iguais a zero.

Destaca-se que o modelo A é formulado com base nos princípios do problema de programação inteira com variáveis 0 e 1. Deste modo, uma variável $X_{ij} = 1$ significa a

possibilidade de instalar um dos quatro tipos de tratamento, considerando todos os custos necessários, enquanto que uma variável $X_{ij} = 0$ significa impossibilidade de instalação, pois outro tipo de tratamento apresenta um custo total acumulado menor.

As oito inequações dentro da chave, na Equação (4.6), referem-se às decisões contingentes, que podem ou não ocorrer, mas que dependem dos resultados de decisões anteriores. Estas restrições são necessárias, pois o modelo nunca poderá associar os custos de implantação, e manutenção e de operação de tipos de tratamentos diferentes. Portanto, ao fornecer o resultado, o modelo reúne sempre todos os custos de um mesmo tipo de tratamento.

Por exemplo, X_{12} é igual a um somente se X_{11} for igual a um e, conseqüentemente X_{13} é igual a um somente se X_{12} for igual a um. Caso X_{11} seja igual a zero, X_{12} também é igual a zero e, por consequência, X_{33} é igual a zero. Assim, qualquer que seja a resposta para a variável X_{11} , conseqüentemente as variáveis X_{12} e X_{13} terão os mesmos resultados. Salienta-se que a mesma regra vale para as outras variáveis inseridas no modelo A.

Após calcular todos os coeficientes da função objetivo, com base nas informações extraídas das referências, o modelo descrito na Equação (4.6), foi transcrito no *software* LINDO™ (versão 6.1), para ser solucionado. Assim, o resultado da função objetivo (Z) representa o menor custo total acumulado ao longo do período de análise, enquanto que os resultados das variáveis de decisão indicam a qual tipo de tratamento o menor custo se refere.

4.3.2 Formulação geral do modelo B

Diferentemente do modelo A, que responde qual tipo de tratamento apresenta o menor custo total acumulado ao longo do tempo, o modelo B tem por objetivo responder não somente qual é o menor custo total acumulado dentre diferentes opções de distribuição dos sistemas disponíveis ao projetista, mas também quantos sistemas são necessários implantar para suprir a demanda de uma população, tendo como base os dados obtidos nas referências consultadas.

Como apresentado no Item 4.3.1, os tipos de custos a serem inseridos no modelo ficam a critério do projetista, sendo que o aumento dos custos considerados terá influência direta na quantidade de variáveis de decisão, pois quanto mais custos forem englobados, mais variáveis de decisão são necessárias.

Portanto, determinou-se que a variável de decisão X_{ijk} representa a quantidade de sistema a ser instalada a fim de satisfazer determinada demanda. Sendo que, i representa o sistema com determinado tipo de tratamento ou de sistema ($i = 1, 2, \dots, m$), j é o tipo de custo relativo àquele tipo de tratamento ou sistema ($j = 1, 2, \dots, n$) e k é a opção determinada pelo projetista ($k = 1, 2, \dots, o$). Em resumo, as variáveis do modelo B representam:

- X_{111} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 1, considerando os custos de implantação do tipo de tratamento ou do sistema 1.
- X_{121} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 1, considerando os custos de manutenção do tipo de tratamento ou do sistema 1.
- X_{131} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 1, considerando os custos de operação do tipo de tratamento ou do sistema 1.
- X_{112} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 2, considerando os custos de implantação do tipo de tratamento ou do sistema 1.
- X_{122} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 2, considerando os custos de manutenção do tipo de tratamento ou do sistema 1.
- X_{132} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 2, considerando os custos de operação do tipo de tratamento ou do sistema 1.
- X_{212} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 2, considerando os custos de implantação do tipo de tratamento ou do sistema 2.
- X_{222} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 2, considerando os custos de manutenção do tipo de tratamento ou do sistema 2.
- X_{232} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 2, considerando os custos de operação do tipo de tratamento ou do sistema 2.
- X_{313} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 3, considerando os custos de implantação do tipo de tratamento ou do sistema 3.

- X_{323} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 3, considerando os custos de manutenção do tipo de tratamento ou do sistema 3.
- X_{333} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 3, considerando os custos de operação do tipo de tratamento ou do sistema 3.

A formulação do modelo B para tomada de decisão é dada pela Equação (4.9):

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & A_{11}X_{111} + B_{11}X_{121} + C_{11}X_{131} + A_{12}X_{112} + B_{12}X_{122} \\
 & + C_{12}X_{132} + A_{22}X_{212} + B_{22}X_{222} + C_{22}X_{232} + A_{33}X_{313} \\
 & + B_{33}X_{323} + C_{33}X_{333}
 \end{aligned}$$

$$\text{s. a.} \quad \left\{ \begin{array}{l}
 X_{121} - X_{111} \leq 0 \\
 X_{131} - X_{121} \leq 0 \\
 X_{122} - X_{112} \leq 0 \\
 X_{132} - X_{122} \leq 0 \\
 X_{222} - X_{212} \leq 0 \\
 X_{232} - X_{222} \leq 0 \\
 X_{323} - X_{313} \leq 0 \\
 X_{333} - X_{323} \leq 0 \\
 X_{212} + X_{112} \leq \text{somatório dos sistemas instalados} \\
 X_{222} + X_{122} \leq \text{somatório dos sistemas instalados} \\
 X_{232} + X_{132} \leq \text{somatório dos sistemas instalados} \\
 M_1X_{111} + M_1X_{112} + M_2X_{212} + M_3X_{313} \geq \text{População}_{\text{MIN}} \\
 M_1X_{121} + M_1X_{122} + M_2X_{222} + M_3X_{323} \geq \text{População}_{\text{MIN}} \\
 M_1X_{131} + M_1X_{132} + M_2X_{232} + M_3X_{333} \geq \text{População}_{\text{MIN}} \\
 X_{ijk} \in \mathbb{Z}_+
 \end{array} \right. \quad (4.9)$$

Sendo que os coeficientes da função objetivo (Z) representam:

- A_{ik} - custo de implantação do tipo de tratamento ou do sistema i , sob as condições da opção k ;
- B_{ik} - custo de manutenção do tipo de tratamento ou do sistema i , acumulado ao longo do tempo, sob as condições da opção k ;
- C_{ik} - custo de operação do tipo de tratamento ou do sistema i , acumulado ao longo do tempo, sob as condições da opção k .

Enquanto que os coeficientes das restrições relativas à população, verificados nas três últimas inequações dentro da chave, representam:

- M_i – população máxima atendida pelo tipo de tratamento ou pelo sistema i .

Além disso, os coeficientes B_{ik} , referentes aos custos de manutenção acumulados ao longo do tempo de análise, são calculados conforme a Equação (4.10):

$$B_{ik} = P_{ik} + P_{ik} \cdot (1 + t)^1 + P_{ik} \cdot (1 + t)^2 + \dots + P_{ik} \cdot (1 + t)^{n-1} \quad (4.10)$$

Em que:

- P_{ik} - equivale ao custo de manutenção do tipo de tratamento ou do sistema i no primeiro ano de operação, sob as condições da opção k ;
- t - equivale à taxa de aumento anual no custo de manutenção definida para cada tipo de tratamento ou sistema;
- n - é a vida útil, em anos, determinada para realizar a análise.

E, os coeficientes C_{ik} , que representam os custos de operação acumulados ao longo do tempo de análise, são calculados de acordo com a Equação 4.11:

$$C_{ik} = Q_{ik} + Q_{ik} \cdot (1 + s)^1 + Q_{ik} \cdot (1 + s)^2 + \dots + Q_{ik} \cdot (1 + s)^{n-1} \quad (4.11)$$

Na qual:

- Q_{ik} - equivale ao custo de operação do tipo de tratamento ou do sistema i no primeiro ano de operação, sob as condições da opção k ;
- s - equivale à taxa de reajuste anual na tarifa de energia elétrica, que, nesta pesquisa, foi utilizada a taxa de 10,35% ao ano (Item 4.2.4);
- n - é a vida útil, em anos, determinada para realizar a análise.

Na Equação (4.9), a função objetivo (Z) está minimizada, pois se deseja encontrar o menor custo total, e está sujeita às (s.a.) restrições, representadas pelas inequações dentro da chave.

As oito primeiras inequações dentro da chave, cujos resultados devem ser menores ou iguais a zero são as decisões contingentes, ou seja, que podem ou não ocorrer, mas que dependem dos resultados de decisões anteriores. Assim, qualquer que seja

a resposta para a variável X_{111} , consequentemente as variáveis X_{121} e X_{131} terão os mesmos resultados. O mesmo vale para as demais variáveis inseridas no modelo.

As três inequações cujos resultados devem ser menores ou iguais ao somatório dos sistemas instalados, foram necessárias para associar variáveis com tipos de tratamento diferentes, a fim de serem instaladas conjuntamente para suprir a demanda. Neste caso, as variáveis X_{112} e X_{212} , X_{122} e X_{222} , bem como X_{132} e X_{232} ocorrerão sempre juntas, pois é uma das opções disponíveis ao projetista. Salienta-se, no entanto, que nem todos os modelos necessitam destas restrições, um exemplo disso pode ser observado no Item 5.2.3.

Enquanto que as três últimas inequações representam as restrições relativas tanto à população mínima a ser atendida por todos os sistemas instalados (População_{MIN}) quanto à população máxima capaz de ser atendida por um único sistema (M_i), fornecida pela literatura.

Destaca-se ainda que o modelo B é formulado com base nos princípios do problema de programação inteira pura, pois todas as variáveis são números inteiros genéricos ($X_{ijk} = 0, 1, 2, \dots, n$). Assim, o resultado da função objetivo representa o menor custo total acumulado ao longo do período de análise, enquanto que os resultados das variáveis de decisão indicam quantos sistemas devem ser instalados, considerando o menor custo total acumulado fornecido pela função objetivo.

Após calcular todos os coeficientes da função objetivo, com base nas informações extraídas da literatura, o modelo descrito na Equação (4.9), foi transcrito no *software* LINDO™ (versão 6.1), a fim de ser solucionado.

4.3.3 Formulação geral do modelo C

O modelo C foi desenvolvido com o intuito de verificar o comportamento dos custos totais acumulados quando ocorrem diferentes opções disponíveis. Assim, o modelo C tem por objetivo responder qual é a opção disponível que apresenta menor custo total acumulado e qual é o valor deste custo total acumulado no período de análise.

Os custos a serem inseridos no modelo ficam a critério do projetista, pois pode representar o somatório de quaisquer custos desejados, ou seja, pode ser o

somatório dos custos de implantação, de manutenção e de operação ou apenas o somatório dos custos de implantação e de manutenção, por exemplo. O aumento dos custos considerados no modelo terá influência direta na quantidade de variáveis de decisão, pois quanto mais custos forem englobados, mais variáveis de decisão são necessárias.

Definiu-se então que a variável de decisão X_{kj} representa a possibilidade ou impossibilidade de instalação de uma determinada opção disponível, onde k é a opção ($k = 1, 2, \dots, o$) e j é o tipo de custo relativo àquela opção ($j = 1, 2, \dots, n$). É importante destacar que os valores de k e j modificam conforme a quantidade de opções e de custos considerados para a comparação. No âmbito dessa pesquisa, as variáveis de decisão do modelo C representam:

- X_{11} : possibilidade de instalação da opção 1, considerando o seu custo de implantação.
- X_{12} : possibilidade de instalação da opção 1, considerando o seu custo de manutenção.
- X_{13} : possibilidade de instalação da opção 1, considerando o seu custo de operação.
- X_{21} : possibilidade de instalação da opção 2, considerando o seu custo de implantação.
- X_{22} : possibilidade de instalação da opção 2, considerando o seu custo de manutenção.
- X_{23} : possibilidade de instalação da opção 2, considerando o seu custo de operação.
- X_{31} : possibilidade de instalação da opção 3, considerando o seu custo de implantação.
- X_{32} : possibilidade de instalação da opção 3, considerando o seu custo de manutenção.
- X_{33} : possibilidade de instalação da opção 3, considerando o seu custo de operação.

A formulação do modelo C para tomada de decisão é dada pela Equação (4.12):

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & A_1X_{11} + B_1X_{12} + C_1X_{13} + A_2X_{21} + B_2X_{22} + C_2X_{23} \\
 & + A_3X_{31} + B_3X_{32} + C_3X_{33} \\
 \text{s. a.} \quad & \left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{13} - X_{12} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{23} - X_{22} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{33} - X_{32} \leq 0 \\ X_{kj} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (4.12)
 \end{aligned}$$

Sendo que os coeficientes da função objetivo (Z) representam:

- A_k - custo de implantação da opção k ;
- B_k - custo de manutenção da opção k , acumulado ao longo do tempo;
- C_k - custo de operação da opção k , acumulado ao longo do tempo.

Os coeficientes B_k , referentes aos custos de manutenção acumulados ao longo do tempo de análise, são calculados conforme a Equação (4.13):

$$B_k = P_k \cdot EE_k + P_k \cdot EE_k \cdot (1 + t)^1 + \dots + P_k \cdot EE_k \cdot (1 + t)^{n-1} \quad (4.13)$$

Em que:

- P_k - é custo de manutenção da opção k no primeiro ano de operação, que equivale ao somatório do custo de manutenção de cada tipo de tratamento ou sistema i englobado na opção k ;
- EE_k - equivale ao efeito escala considerando a opção k ;
- t - equivale à taxa de aumento anual no custo de manutenção definida para cada opção k ;
- n - é a vida útil, em anos, determinada para realizar a análise.

E, os coeficientes C_k , que representam os custos de operação acumulados ao longo do tempo de análise, são calculados de acordo com a Equação (4.14):

$$C_k = Q_k + Q_k \cdot (1 + s)^1 + Q_k \cdot (1 + s)^2 + \dots + Q_k \cdot (1 + s)^{n-1} \quad (4.14)$$

Na qual:

- Q_k - é custo de operação da opção k no primeiro ano de operação, igual ao somatório do custo de operação de cada tipo de tratamento ou sistema i englobado na opção k ;
- s - equivale à taxa de reajuste anual na tarifa de energia elétrica, que, nesta pesquisa, foi utilizada a taxa de 10,35% ao ano (Item 4.2.4);
- n - é a vida útil, em anos, determinada para realizar a análise.

Na Equação (4.12), a função objetivo (Z) está minimizada, pois se deseja encontrar o menor custo total, e sujeita às (s.a.) restrições, representadas pelas equações e inequações dentro da chave.

As três primeiras equações dentro da chave, na Equação (4.12), representam grupos de alternativas mutuamente exclusivas, ou seja, em cada equação apenas uma variável pode ser igual a um, pois o modelo deve retornar como resultado final a possibilidade de ocorrer apenas um custo de implantação, um custo de manutenção e um custo de operação. Deste modo, as variáveis que representam os outros custos devem ser iguais a zero.

O modelo C é formulado com base nos princípios do problema de programação inteira com variáveis 0 e 1. Assim, uma variável $X_{kj} = 1$ significa a possibilidade de instalar uma das três opções disponíveis, considerando todos os custos necessários, enquanto que uma variável $X_{kj} = 0$ representa a impossibilidade de instalação devido a outra opção apresentar um custo total acumulado menor.

Destaca-se que, na Equação (4.12), as seis inequações dentro da chave referem-se às decisões contingentes, ou seja, que podem ou não ocorrer, mas que dependem dos resultados de decisões anteriores. Estas restrições são necessárias, pois o modelo nunca poderá associar os custos de implantação, e manutenção e de

operação de tipos de opções diferentes. Portanto, ao fornecer o resultado, o modelo reúne sempre todos os custos de uma mesma opção.

Por exemplo, X_{12} é igual a um somente se X_{11} for igual a um e, conseqüentemente X_{13} é igual a um somente se X_{12} for igual a um. Caso X_{11} seja igual a zero, X_{12} também é igual a zero e, por consequência, X_{33} é igual a zero. Assim, qualquer que seja a resposta para a variável X_{11} , conseqüentemente as variáveis X_{12} e X_{13} terão os mesmos resultados. O mesmo vale para as outras variáveis do modelo C.

Ao calcular todos os coeficientes da função objetivo, com base nas informações da literatura, o modelo descrito na Equação (4.12), foi transcrito no *software* LINDO™, a fim de ser solucionado. Assim, o resultado da função objetivo (Z) representa o menor custo total acumulado ao longo do período de análise, enquanto que os resultados das variáveis de decisão indicam a qual opção o menor custo se refere.

4.3.4 *Software* LINDO™

As resoluções dos modelos foram realizadas por meio do *software* LINDO™ (versão 6.1), desenvolvido pela LINDO Systems Inc. Foi utilizada a versão de demonstração disponível no sítio eletrônico da empresa.

Apesar de existirem no mercado outros programas que solucionem problemas de Programação Linear, o *software* LINDO™ foi escolhido devido à simplicidade de sua interface para a inserção dos dados e agilidade na resolução dos modelos formulados. Além disso, as soluções obtidas são apresentadas pelo *software* de forma organizada e detalhada.

De acordo com Gomes Júnior e Souza (2004) o *software* LINDO™ trata-se de uma ferramenta capaz de resolver problemas de Programação Linear, Linear Inteira e Quadrática. Segundo os autores, um modelo formulado no LINDO (Linear, Interactive, and Discrete Optimizer) deve conter, pelo menos, os seguintes itens:

- A função objetivo (Z) precedida por MAX (maximizar) ou MIN (minimizar).
- O termo subject to (ST), que significa sujeito à, antecedendo as equações de restrição do modelo, que devem ser todas descritas.

- Além do comando END para finalizar a transcrição do modelo.

A interface do LINDO™, o uso dos comandos citados anteriormente, a transcrição dos modelos, bem como outras funções importantes do *software*, que permitiram analisar os resultados de forma mais detalhada, podem ser verificadas no decorrer do Capítulo 5 e no Apêndice A, onde são apresentadas todas as resoluções obtidas.

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No Capítulo 5 são detalhados os três estudos de caso desenvolvidos, os resultados obtidos e as discussões relativas aos casos estudados.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais acerca da formulação dos modelos e dos resultados obtidos a partir dos estudos de caso.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para cada modelo formulado e as respectivas considerações acerca das soluções encontradas. Destaca-se que o capítulo está dividido em três partes: modelo para tomada de decisão quanto ao tipo de tratamento a ser empregado; modelo para tomada de decisão quanto ao tipo de sistema a ser instalado num condomínio residencial; e modelo para tomada de decisão quanto ao tipo de sistema a ser instalado em uma cidade.

5.1 ESTUDO DE CASO 1: TIPO DE TRATAMENTO A SER INSTALADO EM UM EDIFÍCIO COMERCIAL

A fim de compreender quais critérios são importantes para a tomada de decisão, formulou-se um modelo que permite comparar os custos totais de diferentes tipos de tratamentos de água residuária para uma mesma população. Os dados utilizados para a formulação do modelo têm como base as características, custos e consumo de energia elétrica dos sistemas detalhados por Hastenreiter (2013).

5.1.1 Características dos sistemas utilizados no estudo de caso 1

Considerando a implantação de um sistema descentralizado individual numa edificação comercial com dois pavimentos e população aproximada de 156 usuários, a Tabela 5.1 resume as características de quatro tipos de sistemas disponíveis no mercado, de acordo com as informações fornecidas por Hastenreiter (2013).

A área indicada na Tabela 5.1 refere-se ao espaço ocupado pelo equipamento principal para o tratamento da água residuária, ou seja, não contabiliza a área total necessária para os filtros, decantadores, tanques de acúmulo, bombas e tubulações adjacentes. Além disso, arredondaram-se os custos e consumo de energia elétrica a fim de simplificar a montagem do modelo para a tomada de decisão.

Destaca-se ainda que, no âmbito desta pesquisa, o custo de implantação inclui as despesas com a aquisição dos sistemas e as obras civis necessárias para a sua instalação; o custo de manutenção engloba a análise físico-química da água não potável produzida, a reposição de produtos químicos, a remoção do lodo e a limpeza

dos equipamentos, componentes e reservatórios; enquanto que o custo de operação engloba o consumo de energia elétrica para o tratamento da água residuária.

Tabela 5.1 – Características dos sistemas descentralizados individuais fornecidos por Hastenreiter (2013) para uma edificação comercial com 156 habitantes

Sistema	Tipo de Tratamento	Custo de Implantação (R\$)	Custo de Manutenção (R\$/ano)	Consumo de Energia (kWh/mês)	Área de Ocupação (m²)
1	Disco Biológico Rotativo (DBR)	78.000	3.238	200	5,0
2	Ultrafiltração por Membranas	250.000	3.545	350	2,0
3	Físico-Químico	61.740	7.869	165	1,1
4	Filtro Anaeróbio com Filtro Biológico Aerado Submerso	67.400	6.017	60	21,0

Fonte: elaborado a partir de Hastenreiter (2013)

Os custos ao longo do desenvolvimento da pesquisa são apresentados em dólar. Como Hastenreiter (2013) divulga os custos dos sistemas em reais, calcularam-se os valores em dólar tendo como base a média anual da cotação do dólar comercial para o ano de 2013. Além disso, o consumo de energia extraído da literatura está em kWh/mês. Assim, tornou-se necessário converter os valores para unidade monetária, representada por US\$/ano, conforme detalhado no Capítulo 4. A Tabela 5.2 apresenta os custos após a conversão dos valores.

Tabela 5.2 – Custos em dólar dos sistemas descentralizados individuais para uma edificação comercial com 156 habitantes

Sistema	Tipo de Tratamento	Custo de Implantação (US\$)	Custo de Manutenção (US\$/ano)	Custo de Operação (US\$/ano)
1	Disco Biológico Rotativo (DBR)	36,150	1,501	406
2	Ultrafiltração por Membranas	115,866	1,643	709
3	Físico-Químico	28,614	3,647	335
4	Filtro Anaeróbio + Filtro Biológico Aerado Submerso	31,237	2,789	122

Fonte: elaborado a partir de Hastenreiter (2013)

Os valores apresentados na Tabela 5.2 foram inseridos no modelo para a tomada de decisão quanto ao tipo de tratamento a ser empregado em uma edificação comercial com dois pavimentos e população aproximada de 156 usuários. Os passos da formulação e da resolução do modelo estão detalhados na sequência.

5.1.2 Formulação do modelo considerando o custo de implantação e de manutenção

Neste caso, restringiu-se a formulação do modelo às seguintes variáveis: custo de implantação e custo de manutenção anual. Em seguida, definiu-se que a variável de decisão X_{ij} representa a possibilidade ou impossibilidade de instalação de um determinado sistema, onde i é o tipo de tratamento ($i = 1, 2, 3, 4$) e j é o tipo de custo relativo àquele tratamento ($j = 1, 2$). Portanto, as variáveis representam:

- X_{11} : possibilidade de instalação do sistema 1 (tratamento com disco biológico rotativo), considerando seu custo de implantação.
- X_{12} : possibilidade de instalação do sistema 1 (tratamento com disco biológico rotativo), considerando seu custo de manutenção.
- X_{21} : possibilidade de instalação do sistema 2 (tratamento com membranas), considerando seu custo de implantação.
- X_{22} : possibilidade de instalação do sistema 2 (tratamento com membranas), considerando seu custo de manutenção.
- X_{31} : possibilidade de instalação do sistema 3 (tratamento físico-químico), considerando seu custo de implantação.
- X_{32} : possibilidade de instalação do sistema 3 (tratamento físico-químico), considerando seu custo de manutenção.
- X_{41} : possibilidade de instalação do sistema 4 (tratamento com filtro anaeróbio e filtro biológico aerado submerso), considerando seu custo de implantação.
- X_{42} : possibilidade de instalação do sistema 4 (tratamento com filtro anaeróbio e filtro biológico aerado submerso), considerando seu custo de manutenção.

Destaca-se ainda que, o modelo formulado tem por objetivo responder qual é o tipo de tratamento que apresenta menor custo total acumulado e qual é o valor deste custo total acumulado no período de análise.

Conforme detalhado no Item 4.3.1, considerando o primeiro ano de operação dos sistemas, a formulação do modelo deste caso é dada pela Equação (5.1):

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 36,150X_{11} + 1,501X_{12} + 115,866X_{21} + 1,643X_{22} \\
 & + 28,614X_{31} + 3,647X_{32} + 31,237X_{41} + 2,789X_{42}
 \end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} + X_{41} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} + X_{42} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{42} - X_{41} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.1)$$

As duas primeiras equações dentro da chave representam grupos de alternativas mutuamente exclusivas, ou seja, em cada equação apenas uma variável é igual a um. Enquanto que as quatro inequações se referem às decisões contingentes, ou seja, X_{12} é igual a um somente se X_{11} for igual a um, caso contrário, se X_{11} for igual a zero, X_{12} também será igual a zero. A mesma regra vale para as outras variáveis.

Com essas restrições, o modelo não retorna resultados referentes a custos de implantação ou de manutenção de sistemas com tipos de tratamentos diferentes. Por exemplo, o custo de implantação do sistema 2 (membranas) com o custo de manutenção do sistema 3 (físico-químico), porque a coexistência desses custos não seria possível em uma situação real.

Conforme mostra a Figura 5.1, os dados do modelo, verificados na Equação (5.1), foram inseridos no *software* LINDO™.

Figura 5.1 – Inserção dos dados do modelo no *software* LINDO™ (edifício comercial)

Fonte: a autora (2017)

As informações destacadas na Figura 5.2 indicam que foram necessárias cinco iterações para chegar à solução ótima do modelo. Além disso, o resultado da função objetivo foi equivalente a US\$ 32,261. Este valor representa o menor custo de implantação e de manutenção de um dos quatro sistemas detalhados em Hastenreiter (2013).

Todavia, para saber qual dos quatro sistemas descentralizados individuais fornece o menor custo de implantação e de manutenção, tornou-se necessário recorrer à coluna *value* apresentada pela janela de relatório fornecida no *software* LINDO™, conforme se verifica na Figura 5.3.

Figura 5.2 – Solução do modelo no *software* LINDO™ (edifício comercial)

Fonte: a autora (2017)

Figura 5.3 – Relatório dos resultados do modelo fornecido pelo *software* LINDO™ (edifício comercial)

VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
X11	0.000000	5390.000000
X12	0.000000	0.000000
X21	0.000000	85248.000000
X22	0.000000	0.000000
X31	1.000000	0.000000
X32	1.000000	0.000000
X41	0.000000	1765.000000
X42	0.000000	0.000000

Fonte: a autora (2017)

Conforme apresentado na Figura 5.3, os resultados das variáveis X_{11} , X_{12} , X_{21} , X_{22} , X_{41} e X_{42} foram todos iguais a zero, enquanto que os resultados das variáveis X_{31} e X_{32} foram iguais a um. Assim, pode-se afirmar que o sistema 3 (físico-químico) é o que possui o menor custo dentre os sistemas comparados pelo modelo formulado.

É importante salientar que, a análise foi realizada considerando apenas o primeiro ano de operação dos sistemas. No entanto, para que a tomada de decisão seja feita com base em características semelhantes à realidade das edificações, a análise deve considerar, pelo menos, a vida útil mínima do sistema. No âmbito dessa pesquisa, em se tratando de um sistema hidrossanitário, considerou-se um período igual a 20 anos, conforme apresentado no Item 4.2.5.

A princípio foi estipulado que a taxa de aumento no custo de manutenção preventiva anual dos sistemas era equivalente a 1%, começando a ser contabilizada a partir do segundo ano de operação. Além disso, no cálculo dos custos de cada quinquênio foi considerado o custo de manutenção acumulado. Por exemplo, o custo de manutenção inserido no modelo correspondente ao quinto ano de operação era equivalente ao somatório dos custos de manutenção dos cinco primeiros anos de operação e assim por diante.

Na Tabela 5.3 estão apresentados os custos de manutenção acumulados a cada cinco anos de operação dos sistemas indicados por Hastenreiter (2013).

Tabela 5.3 – Custos de manutenção acumulados dos sistemas para os respectivos anos de análise

Sistema	Custo de Manutenção Acumulado (US\$)				
	1º ano	5º ano	10º ano	15º ano	20º ano
1	1,501	7,657	15,704	24,161	33,051
2	1,643	8,381	17,189	26,447	36,177
3	3,647	18,603	38,156	58,705	80,303
4	2,789	14,227	29,179	44,894	61,411

Fonte: elaborado a partir de Hastenreiter (2013)

Para cada quinquênio, formulou-se um modelo matemático para auxiliar a tomada de decisão. O objetivo da formulação de outros quatro modelos foi verificar se, com o passar dos anos o sistema 3 (físico-químico) ainda seria o mais vantajoso, ou seja, o de menor custo, visto que o seu custo de implantação é o menor dentre os quatro sistemas, porém sabendo que seu custo de manutenção possui o maior valor.

A Equação (5.2) detalha o modelo formulado considerando o quinto ano de operação dos sistemas. A função objetivo (Z) e suas restrições são dadas por:

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z &= 36,150X_{11} + 7,657X_{12} + 115,866X_{21} + 8,381X_{22} \\
 &\quad + 28,614X_{31} + 18,603X_{32} + 31,237X_{41} + 14,227X_{42} \\
 s. a. \quad &\left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} + X_{41} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} + X_{42} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{42} - X_{41} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.2)
 \end{aligned}$$

A Equação (5.3) representa o modelo considerando o décimo ano de operação.

$$\begin{aligned}
(\text{MIN}) \quad Z &= 36,150X_{11} + 15,704X_{12} + 115,866X_{21} + 17,189X_{22} \\
&\quad + 28,614X_{31} + 38,156X_{32} + 31,237X_{41} + 29,179X_{42} \\
s.a. \quad &\left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} + X_{41} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} + X_{42} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{42} - X_{41} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.3)
\end{aligned}$$

Enquanto que a Equação (5.4) representa o modelo considerando o décimo quinto ano de operação.

$$\begin{aligned}
(\text{MIN}) \quad Z &= 36,150X_{11} + 24,161X_{12} + 115,866X_{21} + 26,447X_{22} \\
&\quad + 28,614X_{31} + 58,705X_{32} + 31,237X_{41} + 44,894X_{42} \\
s.a. \quad &\left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} + X_{41} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} + X_{42} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{42} - X_{41} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.4)
\end{aligned}$$

E, por fim, a Equação (5.5) representa o modelo considerando o vigésimo ano de operação dos sistemas.

$$\begin{aligned}
(\text{MIN}) \quad Z &= 36,150X_{11} + 33,051X_{12} + 115,866X_{21} + 36,177X_{22} \\
&\quad + 28,614X_{31} + 80,303X_{32} + 31,237X_{41} + 61,411X_{42} \\
s.a. \quad &\left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} + X_{41} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} + X_{42} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{42} - X_{41} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.5)
\end{aligned}$$

A transcrição dos modelos no *software* LINDO™ e as suas soluções estão detalhadas nas Figuras A.1 a A.4, do Apêndice A. Na Tabela 5.4 está apresentada a síntese dos resultados obtidos, incluindo a resolução para o primeiro ano de operação detalhada anteriormente.

Tabela 5.4 – Síntese dos resultados obtidos por meio do *software* LINDO™

Anos de Operação	Resultado da Função Objetivo (US\$)	Sistema	Tipo de Tratamento
01	32,261	3	Físico-Químico
05	43,807	1	Disco Biológico Rotativo (DBR)
10	51,854	1	Disco Biológico Rotativo (DBR)
15	60,311	1	Disco Biológico Rotativo (DBR)
20	69,201	1	Disco Biológico Rotativo (DBR)

Fonte: obtido a partir de Hastenreiter (2013)

Conforme se verifica na Tabela 5.4, os modelos matemáticos formulados a partir do quinto ano de operação, indicam que o sistema 1 (disco biológico rotativo) é o que possui o menor custo dentre os quatro sistemas comparados, tendo como base as informações fornecidas por Hastenreiter (2013).

Com o intuito de entender o comportamento do custo ao longo da vida útil dos sistemas, foi necessário utilizar os resultados fornecidos na coluna *reduced cost* do *software* LINDO™. Esta coluna representa quanto cada sistema deve reduzir em seu respectivo custo para ter um custo total igual ao fornecido pela função objetivo. Deste modo, ao somar o resultado da função objetivo aos valores apresentados na *reduced cost*, tem-se o custo total de cada sistema no ano de operação analisado.

A Figura 5.4 destaca os resultados da coluna *reduced cost* obtidos para o modelo considerando o vigésimo ano de operação dos sistemas.

Figura 5.4 – Reduced cost fornecido pelo software LINDO™ (edifício comercial)

Fonte: a autora (2017)

Por exemplo, para o sistema 2 representado pelas variáveis X_{21} e X_{22} , verificou-se o valor de US\$ 82,842 na coluna *reduced cost*. Assim, ao somar esse custo ao resultado da função objetivo (US\$ 69,201) obtém-se o custo acumulado referente ao sistema 2 para o vigésimo ano de operação, conforme a Equação (5.6).

$$CA_{Sistema\ 2} = 69,201 + 82,842 = US\$ 152,043 \quad (5.6)$$

Quanto ao sistema 4, representado pelas variáveis X_{41} e X_{42} , verificaram-se os valores US\$ 2,623 e US\$ 20,824. Portanto, ao somar esses dois custos ao resultado da função objetivo (US\$ 69,201) obtém-se o custo acumulado do sistema 4 ao final da vida útil de operação, conforme apresentado na Equação (5.7).

$$CA_{Sistema\ 4} = 69,201 + 2,623 + 20,824 = US\$ 92,648 \quad (5.7)$$

O gráfico da Figura 5.5 indica o custo acumulado ao longo da vida útil de cada sistema, representado pelo somatório do custo de implantação e de manutenção, de acordo com os dados iniciais fornecidos por Hastenreiter (2013). Os valores exatos apresentados no gráfico, obtidos por meio do *software* LINDO™, estão detalhados na Tabela B.1 do Apêndice B.

Figura 5.5 – Custo de implantação e de manutenção acumulado durante a vida útil dos sistemas detalhados em Hastenreiter (2013) para uma edificação comercial com 156 habitantes

Fonte: obtido a partir de Hastenreiter (2013)

Verifica-se que é em torno do quarto ano de operação que o sistema 1 (DBR) passa a ter o menor custo dentre os tratamentos comparados por Hastenreiter (2013). Antes deste período, os sistemas 3 (físico-químico) e 4 (filtro anaeróbio com filtro biológico aerado submerso) apresentaram-se mais vantajosos economicamente. No entanto, com decorrer do tempo, seus respectivos custos de manutenção acumulados superam os custos do sistema 1 (DBR).

Assim sendo, percebe-se que a tomada de decisão não deve se concentrar apenas no primeiro ano de operação do sistema, mas no decorrer de sua vida útil. Pois, determinado tipo de tratamento que possui menor custo de implantação, com o decorrer dos anos torna-se menos atrativo, caso tenha um custo de manutenção elevado para manter o bom funcionamento de seus equipamentos e componentes.

5.1.3 Formulação do modelo considerando o custo de implantação, de manutenção e de operação

No modelo anterior, a comparação entre os sistemas foi realizada desconsiderando-se os custos de operação, os quais, no âmbito desta pesquisa, englobam os gastos relacionados ao consumo de energia elétrica de cada sistema. Todavia, de acordo com o que foi apresentado no Item 2.6.5, o tipo de tratamento tem influência direta no consumo de energia (MATOS *et al.*, 2014), e consequentemente, pode interferir na viabilidade do sistema ao longo do tempo.

Portanto, com o intuito de verificar a interferência do consumo de energia elétrica na tomada de decisão quanto ao tipo de tratamento a ser empregado, foram realizadas as mesmas análises descritas no Item 5.1.2, porém incluindo o custo de operação nas restrições dos modelos.

Lembrando que a variável X_{ij} representa a possibilidade ou impossibilidade de instalação de um determinado sistema, onde i é o tipo de tratamento ($i = 1, 2, 3, 4$) e j é o tipo de custo relativo a determinado tratamento ($j = 1, 2, 3$). Neste caso, foram acrescentadas as seguintes variáveis de decisão ao modelo anterior:

- X_{13} : possibilidade de instalação do sistema 1 (tratamento com DBR), considerando seu custo de operação.
- X_{23} : possibilidade de instalação do sistema 2 (tratamento com membranas), considerando seu custo de operação.
- X_{33} : possibilidade de instalação do sistema 3 (tratamento físico-químico), considerando seu custo de operação.
- X_{43} : possibilidade de instalação do sistema 1 (tratamento com filtro anaeróbio e filtro biológico aerado submerso), considerando seu custo de operação.

Além disso, conforme verificado no modelo anterior, para uma correta tomada de decisão quanto ao tipo de sistema a ser empregado, deve-se considerar, pelo menos, o tempo de vida útil mínimo dos sistemas, ou seja, 20 anos. Portanto, foi considerado que o aumento no custo de operação é diretamente proporcional ao aumento na tarifa da energia elétrica. Conforme detalhado no Capítulo 4, estipulou-se uma taxa de aumento equivalente a 10,35% ao ano para o custo de operação.

A Tabela 5.5 apresenta os custos de operação acumulados a cada cinco anos de operação dos sistemas indicados por Hastenreiter (2013).

Tabela 5.5 – Custos de operação acumulados dos sistemas para os respectivos anos de análise

Sistema	Custo de Operação Acumulado (US\$)				
	1º ano	5º ano	10º ano	15º ano	20º ano
1	406	2,496	6,580	13,263	24,198
2	709	4,359	11,491	23,161	42,258
3	335	2,060	5,429	10,944	19,967
4	122	750	1,977	3,985	7,271

Fonte: elaborado a partir de Hastenreiter (2013)

Assim, considerando-se os principais custos que envolvem a implementação de um sistema predial de água não potável, a saber, custo de implantação, de manutenção e operação, para cada ano analisado formulou-se um modelo.

A Equação (5.8) representa o modelo considerando o primeiro ano de operação.

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 36,150X_{11} + 1,501X_{12} + 406X_{13} + 115,866X_{21} \\
 & + 1,643X_{22} + 709X_{23} + 28,614X_{31} + 3,647X_{32} \\
 & + 335X_{33} + 31,237X_{41} + 2,789X_{42} + 122X_{43}
 \end{aligned}$$

$$\text{s. a.} \quad \left\{ \begin{array}{l}
 X_{11} + X_{21} + X_{31} + X_{41} = 1 \\
 X_{12} + X_{22} + X_{32} + X_{42} = 1 \\
 X_{13} + X_{23} + X_{33} + X_{43} = 1 \\
 X_{12} - X_{11} \leq 0 \\
 X_{22} - X_{21} \leq 0 \\
 X_{32} - X_{31} \leq 0 \\
 X_{42} - X_{41} \leq 0 \\
 X_{13} - X_{12} \leq 0 \\
 X_{23} - X_{22} \leq 0 \\
 X_{33} - X_{32} \leq 0 \\
 X_{43} - X_{42} \leq 0 \\
 X_{ij} \in \{0, 1\}
 \end{array} \right. \quad (5.8)$$

A Equação (5.9) representa o modelo considerando o quinto ano de operação.

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 36,150X_{11} + 7,657X_{12} + 2,496X_{13} + 115,866X_{21} \\
 & + 8,381X_{22} + 4,359X_{23} + 28,614X_{31} + 18,603X_{32} \\
 & + 2,060X_{33} + 31,237X_{41} + 14,227X_{42} + 750X_{43}
 \end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l}
 X_{11} + X_{21} + X_{31} + X_{41} = 1 \\
 X_{12} + X_{22} + X_{32} + X_{42} = 1 \\
 X_{13} + X_{23} + X_{33} + X_{43} = 1 \\
 X_{12} - X_{11} \leq 0 \\
 X_{22} - X_{21} \leq 0 \\
 X_{32} - X_{31} \leq 0 \\
 X_{42} - X_{41} \leq 0 \\
 X_{13} - X_{12} \leq 0 \\
 X_{23} - X_{22} \leq 0 \\
 X_{33} - X_{32} \leq 0 \\
 X_{43} - X_{42} \leq 0 \\
 X_{ij} \in \{0, 1\}
 \end{array} \right. \quad (5.9)$$

A Equação (5.10) representa o modelo considerando o décimo ano de operação.

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 36,150X_{11} + 15,704X_{12} + 6,580X_{13} + 115,866X_{21} \\
 & + 17,189X_{22} + 11,491X_{23} + 28,614X_{31} + 38,156X_{32} \\
 & + 5,429X_{33} + 31,237X_{41} + 29,179X_{42} + 1,977X_{43}
 \end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l}
 X_{11} + X_{21} + X_{31} + X_{41} = 1 \\
 X_{12} + X_{22} + X_{32} + X_{42} = 1 \\
 X_{13} + X_{23} + X_{33} + X_{43} = 1 \\
 X_{12} - X_{11} \leq 0 \\
 X_{22} - X_{21} \leq 0 \\
 X_{32} - X_{31} \leq 0 \\
 X_{42} - X_{41} \leq 0 \\
 X_{13} - X_{12} \leq 0 \\
 X_{23} - X_{22} \leq 0 \\
 X_{33} - X_{32} \leq 0 \\
 X_{43} - X_{42} \leq 0 \\
 X_{ij} \in \{0, 1\}
 \end{array} \right. \quad (5.10)$$

Enquanto que a Equação (5.11) representa o modelo considerando o décimo quinto ano de operação.

$$\begin{aligned}
(\text{MIN}) \quad Z = & 36,150X_{11} + 24,161X_{12} + 13,263X_{13} + 115,866X_{21} \\
& + 26,447X_{22} + 23,161X_{23} + 28,614X_{31} + 58,705X_{32} \\
& + 10,944X_{33} + 31,237X_{41} + 44,894X_{42} + 3,985X_{43}
\end{aligned}$$

$$s. a. \left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} + X_{41} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} + X_{42} = 1 \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} + X_{43} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{42} - X_{41} \leq 0 \\ X_{13} - X_{12} \leq 0 \\ X_{23} - X_{22} \leq 0 \\ X_{33} - X_{32} \leq 0 \\ X_{43} - X_{42} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.11)$$

E, por fim, a Equação (5.12) representa o modelo considerando o vigésimo ano de operação dos sistemas.

$$\begin{aligned}
(\text{MIN}) \quad Z = & 36,150X_{11} + 33,051X_{12} + 24,198X_{13} + 115,866X_{21} \\
& + 36,177X_{22} + 42,258X_{23} + 28,614X_{31} + 80,303X_{32} \\
& + 19,967X_{33} + 31,237X_{41} + 61,411X_{42} + 7,271X_{43}
\end{aligned}$$

$$s. a. \left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} + X_{41} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} + X_{42} = 1 \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} + X_{43} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{42} - X_{41} \leq 0 \\ X_{13} - X_{12} \leq 0 \\ X_{23} - X_{22} \leq 0 \\ X_{33} - X_{32} \leq 0 \\ X_{43} - X_{42} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.12)$$

As três primeiras equações dentro da chave representam grupos de alternativas mutuamente exclusivas, ou seja, em cada equação apenas uma variável pode ser igual a um. Enquanto que as oito inequações são referentes às decisões contingentes, ou seja, X_{13} é igual um somente se X_{12} for igual a um, e

consequentemente, X_{12} é igual um somente se X_{11} for igual a um. Caso contrário, se X_{11} for igual a zero, X_{12} e X_{13} também serão iguais a zero. A mesma regra vale para as outras variáveis.

Com essas restrições, o modelo não retorna resultados referentes a custos de implantação, de manutenção ou de operação de sistemas com tipos de tratamentos diferentes. Por exemplo, o custo de implantação do sistema 1 (DBR), com o custo de manutenção do sistema 3 (físico-químico), com o custo de operação do sistema 4 (filtro anaeróbio com filtro biológico aerado submerso), porque a coexistência desses custos não seria possível em uma situação real.

A transcrição dos modelos no LINDO™ e suas soluções estão detalhadas nas Figuras A.5 a A.9, do Apêndice A. A Tabela 5.6 apresenta a síntese dos resultados.

Tabela 5.6 – Síntese dos resultados obtidos por meio do *software* LINDO™

Anos de Operação	Resultado da Função Objetivo (US\$)	Sistema	Tipo de Tratamento
01	32,596	3	Físico-Químico
05	46,214	4	Filtro Anaeróbio com Filtro Biológico Aerado Submerso
10	58,434	1	Disco Biológico Rotativo (DBR)
15	73,574	1	Disco Biológico Rotativo (DBR)
20	93,399	1	Disco Biológico Rotativo (DBR)

Fonte: obtido a partir de Hastenreiter (2013)

Pode-se notar que, para o primeiro ano de operação, o tipo de tratamento que apresentou o menor custo foi novamente o sistema 3 (físico-químico), devido ao seu baixo custo de implantação. No entanto, os outros modelos indicam que no quinto ano de operação, o sistema 4 (filtro anaeróbio com filtro biológico aerado submerso) apresenta-se mais vantajoso, enquanto que, a partir do décimo ano, o sistema 1 (DBR) possui o menor custo total dentre os quatro sistemas comparados.

O gráfico apresentado na Figura 5.6 indica o custo total acumulado de cada sistema, de acordo com os dados iniciais fornecidos por Hastenreiter (2013). Os valores exatos do gráfico, obtidos por meio do *software* LINDO™, estão detalhados na Tabela B.2 do Apêndice B.

Figura 5.6 – Custo total acumulado durante a vida útil dos sistemas detalhados em Hastenreiter (2013) para uma edificação com 156 habitantes

Fonte: obtido a partir de Hastenreiter (2013)

A partir deste gráfico pode-se verificar que, o sistema 3 (físico-químico) permanece com o menor custo total acumulado até em torno do segundo ano de operação, enquanto que o sistema 4 (filtro anaeróbico com filtro biológico aerado submerso) torna-se financeiramente mais atrativo. Porém, após o quinto ano, o sistema 1 (DBR) passa a apresentar o menor custo total, assim como ocorreu no Item 5.1.2.

Ao comparar os resultados apresentados nos gráficos das Figuras 5.5 e 5.6 nota-se que, até por volta do quarto ano de operação dos sistemas, a inserção dos valores referentes ao consumo de energia, não interfere significativamente nos resultados obtidos. No entanto, com o passar do tempo, os custos totais de todos os sistemas sofrem um aumento considerável. Além disso, ao final da vida útil, verifica-se que a diferença entre os custos dos sistemas 1 e 4 diminuiu de US\$ 23,447 para US\$ 6,520 (Tabelas B.1 e B.2, do Apêndice B).

Entende-se, então, que para a tomada de decisão direcionar-se à melhor opção dentre as opções disponíveis, a escolha das variáveis mais adequadas a serem inseridas no modelo é tão fundamental quanto realizar a verificação ao longo da vida útil dos sistemas.

5.1.4 Formulação do modelo considerando taxas variáveis para o custo de manutenção

De acordo com Queiroz (2015), as atividades de manutenção se dividem em ações orientadas para manter as condições de operação (preventiva) e ações que restauram as funcionalidades de um sistema (corretiva). A autora afirma que os serviços de manutenção preventiva, são realizados em intervalos predefinidos a fim de evitar o mau funcionamento dos sistemas e tornar as intervenções mais econômicas e eficazes. Ao passo que a manutenção corretiva só ocorre quando os equipamentos falham ou se desgastam, ou quando os sistemas necessitam de melhorias em suas performances (QUEIROZ, 2015).

Devido à diferente periodicidade das atividades necessárias à conservação e reparo dos sistemas prediais de água não potável, sabe-se que o aumento do custo de manutenção é variável, pois depende tanto do tipo de tratamento utilizado quanto da qualidade dos componentes, acessórios e equipamentos implantados na edificação.

No entanto, não foram encontrados na literatura dados referentes às taxas e frequências reais de reajustes dos diferentes tipos de tratamento de água não potável disponíveis no mercado. Assim, no âmbito desta pesquisa, considerou-se que a taxa de manutenção dos sistemas apresenta um valor constante, que é acumulado anualmente.

Salienta-se que os custos de manutenção apresentados no item anterior são relativos aos gastos com produtos químicos e para as análises físico-químicas do efluente tratado, sem considerar as despesas com mão de obra para manutenção e operação (HASTENREITER, 2013). Além disso, optou-se por acrescentar aos custos de manutenção os gastos, também apresentados pela autora, para a retirada do lodo por empresa especializada em gerenciamento de resíduos, e consequente disposição em locais adequados.

Custos relacionados com as despesas necessárias para lubrificação do conjunto, ajustes e substituição de componentes e acessórios, a exemplo de parafusos e filtros; bem como gastos com treinamentos de funcionários responsáveis pela operação dos sistemas, e com a equipe de monitoramento não foram contabilizados por Hastenreiter (2013) para o cálculo dos custos de manutenção.

No Item 5.1.3, a comparação entre os quatro tipos de tratamentos foi realizada considerando que os custos de manutenção preventiva de todos os sistemas apresentam um aumento de 1% ao ano. Todavia, tendo em vista que a frequência de manutenção pode diferir entre os tipos de tratamentos empregados na edificação, optou-se por verificar se com um possível aumento da taxa de manutenção, o sistema 1 (DBR) ainda teria o menor custo total dentre as quatro opções descritas em Hastenreiter (2013).

Portanto, considerou-se que as taxas de reajuste dos sistemas 2, 3 e 4 se manteriam em 1% ao ano, enquanto que a taxa de reajuste anual do custo de manutenção do sistema 1 seria igual a 2%. Posteriormente, foi feita a mesma análise, porém adotando um aumento de 3% ao ano no custo de manutenção. Assim, a Tabela 5.7 apresenta os custos de manutenção acumulados, considerando 2% e 3% na taxa de reajuste anual do sistema 1.

Tabela 5.7 – Custos de manutenção acumulados do Sistema 1 considerando diferentes taxas de reajuste anual

Taxa de Reajuste ao Ano	Custo de Manutenção Acumulado (US\$)				
	1º ano	5º ano	10º ano	15º ano	20º ano
2%	1,501	7,811	16,436	25,957	36,470
3%	1,501	7,969	17,207	27,917	40,332

Fonte: elaborado a partir de Hastenreiter (2013)

Os valores descritos acima foram inseridos como o coeficiente da variável X_{12} na função objetivo dos modelos para cada ano de operação analisado considerando, primeiramente, a taxa de 2% e, posteriormente, a taxa de 3% ao ano.

A transcrição no *software* LINDO™ dos modelos formulados considerando ambas as taxas de aumento para o sistema 1 e as resoluções estão detalhadas nas Figuras

A.10 a A.17, do Apêndice A. As Tabelas 5.8 e 5.9 apresentam a síntese dos resultados obtidos para o reajuste anual de 2% e de 3%, respectivamente.

Tabela 5.8 – Síntese dos resultados obtidos por meio do *software* LINDO™, considerando uma taxa de reajuste anual de 2% para o custo de manutenção Sistema 1 (DBR)

Anos de Operação	Resultado da Função Objetivo (US\$)	Sistema	Tipo de Tratamento
01	32,596	3	Físico-Químico
05	46,214	4	Filtro Anaeróbio com Filtro Biológico Aerado Submerso
10	59,166	1	Disco Biológico Rotativo (DBR)
15	75,370	1	Disco Biológico Rotativo (DBR)
20	96,818	1	Disco Biológico Rotativo (DBR)

Fonte: obtido a partir de Hastenreiter (2013)

Tabela 5.9 – Síntese dos resultados obtidos por meio do *software* LINDO™, considerando uma taxa de reajuste anual de 3% para o custo de manutenção Sistema 1 (DBR)

Anos de Operação	Resultado da Função Objetivo (US\$)	Sistema	Tipo de Tratamento
01	32,596	3	Físico-Químico
05	46,214	4	Filtro Anaeróbio com Filtro Biológico Aerado Submerso
10	59,937	1	Disco Biológico Rotativo (DBR)
15	77,330	1	Disco Biológico Rotativo (DBR)
20	99,919	4	Filtro Anaeróbio com Filtro Biológico Aerado Submerso

Fonte: obtido a partir de Hastenreiter (2013)

Percebe-se, por meio da Tabela 5.8, que considerando uma taxa de reajuste anual de 2% para o custo de manutenção, o sistema 1 (DBR) ainda possui o menor custo total dentre as opções comparadas, com base nos dados fornecidos por Hastenreiter (2013). Entretanto, de acordo com a Tabela 5.9, ao considerar igual a 3% ao ano a taxa de reajuste do custo de manutenção apenas para o Sistema 1, ao final do vigésimo ano de operação, o sistema 4 (tratamento com filtro anaeróbico e filtro biológico aerado submerso) passa a apresentar o menor custo total.

O gráfico apresentado na Figura 5.7 indica o custo total acumulado ao longo da vida útil de cada sistema, sendo que o aumento anual do custo de manutenção do sistema 1 foi igual a 3% ao ano, enquanto que as taxas de reajustes dos sistemas 2, 3 e 4 permaneceram 1% ao ano, como sugerido inicialmente. Os valores exatos apresentados no gráfico, obtidos por meio do *software* LINDO™, estão detalhados na Tabela B.3 do Apêndice B.

Figura 5.7 – Custo total acumulado durante a vida útil dos sistemas, considerando um reajuste anual de 3% para o custo de manutenção Sistema 1 (DBR)

Fonte: obtido a partir de Hastenreiter (2013)

Conforme verificado, a diferença entre os custos totais acumulados do sistema 1 (DBR) e do sistema 4 (filtro anaeróbico com filtro biológico aerado submerso) é

graficamente imperceptível ao final da vida útil, e equivale a US\$ 761, de acordo com os resultados da *reduced cost* do software LINDO™ (Figura A.17, Apêndice A).

Portanto, visto a diferença irrisória entre os custos totais acumulados no vigésimo ano de operação dos sistemas, não significa que implantar o sistema 4 (filtro anaeróbio com filtro biológico aerado submerso) seja de fato mais viável do que implantar o sistema 1 (DBR). É neste momento em que o conhecimento de todas as vantagens e desvantagens dos tipos de tratamento de água não potável é de extrema importância, devido à necessidade de serem analisadas outras variáveis não inseridas no modelo matemático.

Conforme a Tabela 5.1, a área de ocupação do sistema 1 (DBR) equivale a 5,00 m² enquanto que a do sistema 4 (filtro anaeróbio com filtro biológico aerado submerso) é igual a 21,00 m². Em se tratando de sistemas prediais de água não potável instalados em edificações, quanto menor for a área demandada para a instalação dos equipamentos maior será o espaço utilizado em áreas comuns ou vagas de garagem, por exemplo.

Além disso, de acordo com o que foi exposto no Item 2.6.4, filtros anaeróbios produzem gás sulfídrico (H₂S), o que pode ocasionar a proliferação de mau odor na região de implantação e aumentar os riscos de corrosão nas instalações do sistema (PIVELI, 2004). Ao passo que os discos biológicos rotativos (DBR) além de necessitarem de pouca área para instalação, não produzem maus odores durante o processo de tratamento (VON SPERLING, 2005).

Considerando aspectos relacionados à saúde dos usuários e à disponibilidade de espaço para a implantação, entende-se que o sistema 1 (DBR), mesmo com um custo total US\$ 761 maior, continua sendo mais viável do que o sistema 4 (filtro anaeróbio com filtro biológico aerado submerso), pois possui menor área de ocupação – 16,00 m² a menos – e apresenta reduzida possibilidade de liberar mau odor no ambiente.

Assim, o modelo matemático formulado permitiu comparar os custos totais e analisar seu comportamento ao longo da vida útil dos quatro sistemas descentralizados individuais para uma edificação comercial com dois pavimentos e população aproximada de 156 usuários, conforme Hastenreiter (2013). No entanto, verificou-se

que a tomada de decisão pelo sistema mais adequado não se resume apenas à análise dos custos isoladamente, mas requer sua associação com outras variáveis relacionadas às características de cada tipo de tratamento.

5.2 ESTUDO DE CASO 2: TIPO DE SISTEMA A SER INSTALADO EM UM CONDOMÍNIO RESIDENCIAL

O modelo para a tomada de decisão detalhado na sequência foi formulado a fim de comparar os custos totais de sistemas descentralizados individuais, sistemas descentralizados em grupo e sistemas centralizados com diferentes tipos de tratamentos, que podem ser implantados em um condomínio residencial hipotético com aproximadamente 1.700 habitantes.

5.2.1 Características dos sistemas utilizados no estudo de caso 2

Os dados utilizados para a formulação do modelo baseiam-se nas características dos sistemas detalhados em Reami e Coraucci Filho (2010), Dell'Uomo (2014) e Domingues *et al.* (2016). Além disso, as informações ausentes foram adaptadas de Von Sperling (2005). Na Tabela 5.10 estão detalhados os custos e o consumo de energia elétrica, referentes às populações indicadas em cada literatura. Os valores foram arredondados a fim de simplificar a montagem do modelo.

Tabela 5.10 – População, custos e consumo de energia de cada sistema indicado na literatura

Sistema	Tipo de Tratamento	População Atendida	Custo de Implantação (R\$)	Custo de Manutenção (R\$/ano)	Consumo de Energia (kWh/mês)
1	Disco Biológico Rotativo (DBR) ^[1]	170 ^[1]	85.000 ^[1]	32.800 ^[1]	0 ^[1]
2	Físico-Químico ^[2]	360 ^[2]	142.700 ^[2]	56.061 ^[2]	1.940 ^[2]
3	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso ^[3]	1.719 ^[3]	537.304 ^[3]	20.628 ^[4]	2.865 ^[4]

Fonte: elaborado a partir de ^[1] Domingues *et al.* (2016), ^[2] Dell'Uomo (2014), ^[3] Reami e Coraucci Filho (2010) e ^[4] Von Sperling (2005)

Salienta-se que o consumo de energia de cada sistema apresentado na Tabela 5.10 refere-se apenas ao necessário para a realização do tratamento dos efluentes, conforme obtido nos dados da literatura. Os consumos relacionados à operação das bombas para o recalque da água não potável produzida não foram contabilizados.

Os custos, divulgados em reais, foram calculados em dólar, conforme o Capítulo 4. A Tabela 5.11 apresenta os custos após a conversão dos valores, considerando o primeiro ano de operação dos sistemas.

Tabela 5.11 – Custos em dólar de cada sistema indicado na literatura

Sistema	Tipo de Tratamento	População Máxima Atendida	Custo de Implantação (US\$)	Custo de Manutenção (US\$/ano)	Custo de Operação (US\$/ano)
1	Disco Biológico Rotativo (DBR) ^[1]	170 ^[1]	43,486 ^[1]	16,780 ^[1]	0 ^[1]
2	Físico-Químico ^[2]	360 ^[2]	60,642 ^[2]	23,824 ^[2]	656 ^[2]
3	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso ^[3]	1.719 ^[3]	305,229 ^[3]	7,640 ^[4]	5,809 ^[4]

Fonte: elaborado a partir de ^[1] Domingues *et al.* (2016), ^[2] Dell'Uomo (2014), ^[3] Reami e Coraucci Filho (2010) e ^[4] Von Sperling (2005)

A taxa de reajuste do custo de operação foi considerada diretamente proporcional ao aumento na tarifa de energia elétrica, equivalente a 10,35% ao ano, conforme detalhado no Capítulo 4. Assim, a Tabela 5.12 resume os custos de operação acumulados a cada cinco anos de operação dos três sistemas em questão.

Tabela 5.12 – Custos de operação acumulados dos sistemas para os respectivos anos de análise

Sistema	Custo de Operação Acumulado (US\$)				
	1º ano	5º ano	10º ano	15º ano	20º ano
1	0	0	0	0	0
2	656	4,033	10,632	21,430	39,099
3	5,809	35,712	94,149	189,767	346,228

Fonte: elaborado a partir de Domingues *et al.* (2016), Dell'Uomo (2014), Reami e Coraucci Filho (2010) e Von Sperling (2005)

Os serviços de manutenção preventiva dos sistemas citados anteriormente referem-se a: aquisição de produtos químicos para a desinfecção e coloração do efluente tratado; contrato com empresas especializadas no gerenciamento e manutenção dos sistemas; retirada do lodo quando necessário; juntamente com a limpeza e higienização do tanque de acúmulo (DELL'UOMO, 2014; DOMINGUES *et al.*, 2016).

Salienta-se que despesas relacionadas com lubrificações, ajustes e reposições de componentes e acessórios (parafusos e filtros), bem como com a manutenção corretiva pela substituição de equipamentos (bombas ou máquinas de decantação, por exemplo), não foram contabilizadas no cálculo dos custos de manutenção.

Além disso, como não foram encontrados na literatura dados relativos à taxa real de reajuste dos custos de manutenção dos diferentes tipos de tratamento de água não potável, foi considerado que os custos de manutenção dos três sistemas em análise apresentam um aumento simbólico de 1% ao ano.

Na Tabela 5.13 estão apresentados os custos de manutenção acumulados a cada cinco anos de operação dos sistemas detalhados em Von Sperling (2005), Reami e Coraucci Filho (2010), Dell'Uomo (2014) e Domingues *et al.* (2016).

Tabela 5.13 – Custos de manutenção acumulados dos sistemas para os respectivos anos de análise

Sistema	Custo de Manutenção Acumulado (US\$)				
	1º ano	5º ano	10º ano	15º ano	20º ano
1	16,780	85,578	175,351	269,319	367,482
2	23,824	121,502	248,961	382,375	521,746
3	7,640	38,964	79,838	122,622	167,316

Fonte: elaborado a partir de Domingues *et al.* (2016), Dell'Uomo (2014), Reami e Coraucci Filho (2010) e Von Sperling (2005)

5.2.2 Características do condomínio residencial hipotético

Com o intuito de comparar os sistemas descentralizados em grupo, descentralizados individuais e centralizados, foi estipulado que estes sistemas seriam implantados num condomínio hipotético, que possui dez torres de edifícios residenciais com 14

pavimentos tipo, quatro apartamentos por andar; e com capacidade de abrigar uma população média de 170 pessoas, totalizando ao menos 1.700 moradores.

O projetista do sistema predial de água não potável encontra disponível no mercado os três sistemas apresentados na Tabela 5.11. Deste modo, de acordo com as populações máximas atendidas, o projetista possui as seguintes opções para distribuir os sistemas a fim de satisfazer a demanda do condomínio:

- opção 1: dez sistemas descentralizados individuais, compostos pelo sistema 1, capazes de suprir a demanda de 1.700 habitantes;
- opção 2: cinco sistemas descentralizados em grupo, constituídos pelo sistema 2, capazes de suprir a demanda de 1.800 habitantes;
- opção 3: um sistema centralizado, representado pelo sistema 3, capaz de suprir a demanda de 1.719 habitantes.

As possíveis distribuições dos sistemas em cada uma das opções são observadas nas Figuras 5.8 a 5.10.

Figura 5.8 – Opção 1 com dez sistemas prediais descentralizados individuais

Fonte: a autora (2017)

Figura 5.9 – Opção 2 com cinco sistemas prediais descentralizados em grupo

Fonte: a autora (2017)

Figura 5.10 – Opção 3 com um sistema predial centralizado

Fonte: a autora (2017)

Destaca-se ainda que essas três opções juntamente com os custos de implantação, de operação e de manutenção, indicados nas Tabelas 5.11, 5.12 e 5.13, respectivamente, foram inseridas nas restrições do modelo para tomada de decisão quanto ao tipo de sistema – a saber: centralizado, descentralizado individual ou em grupo – a ser empregado no condomínio residencial hipotético.

5.2.3 Formulação do modelo

Definiu-se que a variável de decisão X_{ijk} representa a quantidade de sistema a ser instalada a fim de satisfazer determinada demanda. Sendo que, i representa o sistema com determinado tipo de tratamento ($i = 1, 2, 3$), j é o tipo de custo relativo àquele sistema ($j = 1, 2, 3$) e k é a opção determinada pelo projetista ($k = 1, 2, 3$). Em resumo, as variáveis do modelo formulado na sequência significam:

- X_{111} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 1 (sistemas descentralizados individuais), considerando os custos de implantação do sistema 1 (DBR).
- X_{121} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 1 (sistemas descentralizados individuais), considerando os custos de manutenção do sistema 1 (DBR).
- X_{131} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 1 (sistemas descentralizados individuais), considerando os custos de operação do sistema 1 (DBR).
- X_{212} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 2 (sistemas descentralizados em grupo), considerando os custos de implantação do sistema 2 (físico-químico).
- X_{222} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 2 (sistemas descentralizados em grupo), considerando os custos de manutenção do sistema 2 (físico-químico).
- X_{232} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 2 (sistemas descentralizados em grupo), considerando os custos de operação do sistema 2 (físico-químico).

- X_{313} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 3 (sistema centralizado), considerando os custos de implantação do sistema 3 (reator UASB com filtro biológico aerado submerso).
- X_{323} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 3 (sistema centralizado), considerando os custos de manutenção do sistema 3 (reator UASB com filtro biológico aerado submerso).
- X_{333} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 3 (sistema centralizado), considerando os custos de operação do sistema 3 (reator UASB com filtro biológico aerado submerso).

Portanto, para o vigésimo ano de operação, formulou-se o modelo, verificado na Equação (5.13). A função objetivo (Z) e suas restrições são dadas por:

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 43,486X_{111} + 367,482X_{121} + 0X_{131} + 60,642X_{212} \\
 & + 521,746X_{222} + 39,099X_{232} + 305,229X_{313} \\
 & + 167,316X_{323} + 346,228X_{333}
 \end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l}
 X_{121} - X_{111} \leq 0 \\
 X_{131} - X_{121} \leq 0 \\
 X_{222} - X_{212} \leq 0 \\
 X_{232} - X_{222} \leq 0 \\
 X_{323} - X_{313} \leq 0 \\
 X_{333} - X_{323} \leq 0 \\
 170X_{111} + 360X_{212} + 1.719X_{313} \geq 1.700 \\
 170X_{121} + 360X_{222} + 1.719X_{323} \geq 1.700 \\
 170X_{131} + 360X_{232} + 1.719X_{333} \geq 1.700 \\
 X_{ijk} \in \mathbb{Z}_+
 \end{array} \right. \quad (5.13)$$

As seis primeiras inequações referem-se às decisões contingentes, que dependem de decisões anteriores, ou seja, independentemente do resultado da variável X_{111} , as variáveis X_{121} e X_{131} terão as mesmas respostas. A mesma regra vale para os demais sistemas.

Ao passo que nas três últimas inequações, os coeficientes referem-se à restrição de população de cada sistema, pois os custos inseridos na função objetivo levaram em

conta o número total de habitantes fornecidos por Reami e Coraucci Filho (2010), Dell'Uomo (2014) e Domingues *et al.* (2016). Como definido no Item 5.2.2, o condomínio abrigará, ao menos, 1.700 pessoas, por este motivo, as inequações devem ser maiores ou iguais à população mínima de projeto.

Diferentemente do modelo formulado no Item 5.1, que respondia qual tipo de tratamento apresenta o menor custo total acumulado ao longo do tempo, o modelo formulado neste item tem por objetivo responder não somente qual é o menor custo total acumulado dentre diferentes opções de distribuição dos sistemas disponíveis ao projetista, mas também quantos sistemas são necessários implantar para suprir a demanda de uma população, tendo como base os dados obtidos nas referências consultadas.

Assim, os dados do modelo, apresentado na Equação (5.13), foi inserido no *software* LINDO™, conforme mostra a Figura 5.11.

Figura 5.11 – Inserção dos dados do modelo no *software* LINDO™ (condomínio residencial)

Fonte: a autora (2017)

As informações destacadas na Figura 5.12 indicam que foram necessárias 11 iterações para chegar à solução ótima do modelo. O resultado da função objetivo foi igual a US\$ 818,773. Este valor representa o menor custo total dentre as opções disponíveis. Todavia, para saber qual opção fornece o menor custo total e quantos sistemas são necessários, recorreu-se à coluna *value* apresentada na janela de relatório fornecida pelo *software* LINDO™, conforme a Figura 5.13.

Figura 5.12 – Solução do modelo no *software* LINDO™ (condomínio residencial)

Fonte: a autora (2017)

Figura 5.13 – Relatório dos resultados do modelo fornecido pelo *software* LINDO™ (condomínio residencial)

Reports Window

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 5
OBJECTIVE VALUE = 809723.125

FIX ALL VARS. (4) WITH RC > 43486.0
SET X323 TO >= 1 AT 1, BND= -0.8149E+06 TWIN=-0.1000E+31 9
SET X333 TO >= 1 AT 2, BND= -0.8188E+06 TWIN=-0.1000E+31 11

NEW INTEGER SOLUTION OF 818773.000 AT BRANCH 2 PIVOT 11
BOUND ON OPTIMUM: 818773.0
DELETE X333 AT LEVEL 2
DELETE X323 AT LEVEL 1
ENUMERATION COMPLETE. BRANCHES= 2 PIVOTS= 11

LAST INTEGER SOLUTION IS THE BEST FOUND
RE-INSTALLING BEST SOLUTION...

OBJECTIVE FUNCTION VALUE

1) 818773.0

VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
X111	0.000000	43486.000000
X121	0.000000	367482.000000
X131	0.000000	0.000000
X212	0.000000	60642.000000
X222	0.000000	521746.000000
X232	0.000000	39099.000000
X313	1.000000	305229.000000
X323	1.000000	167316.000000
X333	1.000000	346228.000000

ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
2)	0.000000	0.000000
3)	0.000000	0.000000
4)	0.000000	0.000000
5)	0.000000	0.000000
6)	0.000000	0.000000
7)	0.000000	0.000000
8)	19.000000	0.000000
9)	19.000000	0.000000
10)	19.000000	0.000000

NO. ITERATIONS= 11
BRANCHES= 2 DETERM.= 1.000E 0

Fonte: a autora (2017)

Conforme se verifica na Figura 5.13, os resultados das variáveis X_{111} , X_{121} , X_{131} , X_{212} , X_{222} e X_{232} foram todos iguais a zero, enquanto que os resultados das variáveis X_{313} , X_{323} e X_{333} foram iguais a um. O que significa que a opção 3, representada pela implantação de um sistema centralizado, apresentou o menor custo total dentre as opções disponíveis.

Além disso, na Figura 5.13 destacou-se também a coluna *slack or surplus* (folga ou excedente), que indica quanto a opção de menor custo total pode superar a demanda mínima. Neste caso, como o modelo mostra que a melhor opção é a instalação de apenas uma unidade do sistema 3, capaz de suprir até 1.719 habitantes (Tabela 5.10), e como a população mínima do condomínio é igual a 1.700 pessoas, tem-se que a demanda mínima pode ser excedida em até 19 habitantes.

No entanto, com o intuito de verificar o comportamento do modelo caso uma opção descentralizada seja a mais viável economicamente, desconsiderou-se a opção 3 (sistema centralizado). Assim, formulou-se o modelo da Equação (5.14).

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z &= 43,486X_{111} + 367,482X_{121} + 0X_{131} + 60,642X_{212} \\
 &\quad + 521,746X_{222} + 39,099X_{232} \\
 \text{s. a.} \quad &\left\{ \begin{array}{l} X_{121} - X_{111} \leq 0 \\ X_{131} - X_{121} \leq 0 \\ X_{222} - X_{212} \leq 0 \\ X_{232} - X_{222} \leq 0 \\ 170X_{111} + 360X_{212} \geq 1.700 \\ 170X_{121} + 360X_{222} \geq 1.700 \\ 170X_{131} + 360X_{232} \geq 1.700 \\ X_{ijk} \in \mathbb{Z}_+ \end{array} \right. \quad (5.14)
 \end{aligned}$$

Os dados do modelo foram inseridos no *software* LINDO™, conforme indica a Figura 5.14, a fim de que pudesse ser solucionado.

Figura 5.14 – Inserção dos dados do modelo no *software* LINDO™ (condomínio residencial)

Fonte: a autora (2017)

Conforme destacam as setas da Figura 5.15, foram feitas 17 iterações até alcançar a solução ótima do modelo, enquanto que o resultado da função objetivo foi igual a US\$ 3,107,435. Este valor representa o menor custo total dentre as opções disponíveis. Além disso, verifica-se que os resultados das variáveis X_{111} , X_{121} e X_{131} foram iguais a zero, enquanto que os resultados das variáveis X_{212} , X_{222} e X_{232} foram iguais a cinco. O que significa que a opção 2, além de apresentar o menor custo total, de fato, necessita de cinco sistemas descentralizados para suprir as necessidades do condomínio, como previsto no Item 5.2.2.

Além disso, a coluna *slack or surplus* (folga ou excedente), destacada na Figura 5.15, indica que, com este resultado, a demanda mínima de 1.700 moradores, pode ser excedida em até 100 habitantes. Isto ocorre, pois, como o sistema 2 tem capacidade de suprir até 360 habitantes (Tabela 5.10), e são necessários cinco sistemas para satisfazer a demanda do condomínio, permitiu-se o abastecimento com água não potável de até 1.800 pessoas.

Figura 5.15 – Relatório dos resultados do modelo fornecido pelo *software* LINDO™ (condomínio residencial)

Reports Window		
LP OPTIMUM FOUND AT STEP 4		
OBJECTIVE VALUE = 2934799.75		
FIX ALL VARS.(1) WITH RC > 0.000000E+00		
NEW INTEGER SOLUTION OF 3107435.00 AT BRANCH 0 PIVOT 17		
BOUND ON OPTIMUM: 3107435.		
ENUMERATION COMPLETE. BRANCHES= 0 PIVOTS= 17		
LAST INTEGER SOLUTION IS THE BEST FOUND		
RE-INSTALLING BEST SOLUTION...		
OBJECTIVE FUNCTION VALUE		
1)	3107435.	←
VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
X111	0.000000	43486.000000
X121	0.000000	367482.000000
X131	0.000000	0.000000
X212	5.000000	60642.000000
X222	5.000000	521746.000000
X232	5.000000	39099.000000
ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
2)	0.000000	0.000000
3)	0.000000	0.000000
4)	0.000000	0.000000
5)	0.000000	0.000000
6)	100.000000	0.000000
7)	100.000000	0.000000
8)	100.000000	0.000000
NO. ITERATIONS=	17	←
BRANCHES=	0 DETERM.= 1.000E	0

Fonte: a autora (2017)

5.2.4 Verificação do modelo formulado

Um novo modelo foi formulado com o intuito de verificar os resultados obtidos no item anterior e entender o comportamento dos custos ao longo do tempo. Desta forma, foi necessário calcular os custos totais referentes à implantação de cada opção para suprir a demanda do condomínio. Quanto às opções 1 e 2, que possuem mais de um sistema, o custo total foi calculado multiplicando-se os custos de um sistema pela quantidade a ser implantada no condomínio.

A Tabela 5.14 apresenta os resultados obtidos para o primeiro ano de operação, considerando as características dos sistemas detalhados em Von Sperling (2005), Reami e Coraucci Filho (2010), Dell'Uomo (2014) e Domingues *et al.* (2016).

Tabela 5.14 – Custos de cada opção no primeiro ano de operação

Opção	Tipo de Sistema	Quantidade de Sistemas	Custo de Implantação (US\$)	Custo de Manutenção (US\$/ano)	Custo de Operação (US\$/ano)
1	Descentralizado Individual	10	434,860	167,800	0
2	Descentralizado em Grupo	5	303,210	119,120	3,280
3	Centralizado	1	305,229	7,640	5,809

Fonte: elaborado a partir de Domingues *et al.* (2016), Dell’Uomo (2014), Reami e Coraucci Filho (2010) e Von Sperling (2005)

Considerando-se que os custos de manutenção dos sistemas têm taxa de reajuste igual a 1% ao ano, na Tabela 5.15 estão apresentados os custos de manutenção acumulados de cada opção em cada quinquênio de análise.

Tabela 5.15 – Custos de manutenção acumulados das opções para os quinquênios de análise

Opção	Custo de Manutenção Acumulado (US\$)				
	1º ano	5º ano	10º ano	15º ano	20º ano
1	167,800	855,780	1,753,510	2,693,190	3,674,820
2	119,120	607,512	1,244,804	1,911,876	2,608,728
3	7,640	38,964	79,838	122,622	167,316

Fonte: elaborado a partir de Domingues *et al.* (2016), Dell’Uomo (2014), Reami e Coraucci Filho (2010) e Von Sperling (2005)

Conforme detalhado no Capítulo 4, a taxa de reajuste do custo de operação foi considerada equivalente a 10,35% ao ano. Assim, na Tabela 5.16 estão resumidos os custos de operação acumulados das opções a cada cinco anos de operação.

Tabela 5.16 – Custos de operação acumulados das opções para os quinquênios de análise

Opção	Custo de Operação Acumulado (US\$)				
	1º ano	5º ano	10º ano	15º ano	20º ano
1	0	0	0	0	0
2	3,280	20,165	53,160	107,150	195,494
3	5,809	35,712	94,149	189,767	346,228

Fonte: elaborado a partir de Domingues *et al.* (2016), Dell’Uomo (2014), Reami e Coraucci Filho (2010) e Von Sperling (2005)

A seguir, a variável de decisão X_{kj} representa a possibilidade ou impossibilidade de instalação de uma opção disponível, onde k é a opção ($k = 1, 2, 3$) e j é o tipo de custo relativo àquela opção ($j = 1, 2, 3$). Em resumo, as variáveis significam:

- X_{11} : possibilidade de instalação da opção 1 (sistemas descentralizados individuais), considerando seu custo de implantação.
- X_{12} : possibilidade de instalação da opção 1 (sistemas descentralizados individuais), considerando seu custo de manutenção.
- X_{13} : possibilidade de instalação da opção 1 (sistemas descentralizados individuais), considerando seu custo de operação.
- X_{21} : possibilidade de instalação da opção 2 (sistemas descentralizados em grupo), considerando seu custo de implantação.
- X_{22} : possibilidade de instalação da opção 2 (sistemas descentralizados em grupo), considerando seu custo de manutenção.
- X_{23} : possibilidade de instalação da opção 2 (sistemas descentralizados em grupo), considerando seu custo de operação.
- X_{31} : possibilidade de instalação da opção 3 (sistema centralizado), considerando seu custo de implantação.
- X_{32} : possibilidade de instalação da opção 3 (sistema centralizado), considerando seu custo de manutenção.
- X_{33} : possibilidade de instalação da opção 3 (sistema centralizado), considerando seu custo de operação.

Portanto, com o auxílio das Tabelas 5.14 a 5.16, formulou-se um modelo para o primeiro ano de operação dos sistemas, representado pela Equação (5.15).

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 434,860X_{11} + 167,800X_{12} + 0X_{13} + 303,210X_{21} \\
 & + 119,120X_{22} + 3,280X_{23} + 305,229X_{31} + 7,640X_{32} \\
 & + 5,809X_{33}
 \end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{13} - X_{12} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{23} - X_{22} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{33} - X_{32} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.15)$$

A Equação (5.16) representa o modelo considerando o quinto ano de operação.

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 434,860X_{11} + 855,780X_{12} + 0X_{13} + 303,210X_{21} \\
 & + 607,512X_{22} + 20,165X_{23} + 305,229X_{31} + 38,964X_{32} \\
 & + 35,712X_{33}
 \end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{13} - X_{12} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{23} - X_{22} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{33} - X_{32} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.16)$$

A Equação (5.17) representa o modelo o décimo ano de operação dos sistemas.

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 434,860X_{11} + 1,753,510X_{12} + 0X_{13} + 303,210X_{21} \\
 & + 1,244,804X_{22} + 53,160X_{23} + 305,229X_{31} \\
 & + 79,838X_{32} + 94,149X_{33}
 \end{aligned}$$

$$\text{s. a.} \quad \left\{ \begin{array}{l}
 X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\
 X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\
 X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\
 X_{12} - X_{11} \leq 0 \\
 X_{13} - X_{12} \leq 0 \\
 X_{22} - X_{21} \leq 0 \\
 X_{23} - X_{22} \leq 0 \\
 X_{32} - X_{31} \leq 0 \\
 X_{33} - X_{32} \leq 0 \\
 X_{ij} \in \{0, 1\}
 \end{array} \right. \quad (5.17)$$

Enquanto que a Equação (5.18) representa o modelo considerando o décimo quinto ano de operação.

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 434,860X_{11} + 2,693,190X_{12} + 0X_{13} + 303,210X_{21} \\
 & + 1,911,876X_{22} + 107,150X_{23} + 305,229X_{31} \\
 & + 122,622X_{32} + 189,767X_{33}
 \end{aligned}$$

$$\text{s. a.} \quad \left\{ \begin{array}{l}
 X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\
 X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\
 X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\
 X_{12} - X_{11} \leq 0 \\
 X_{13} - X_{12} \leq 0 \\
 X_{22} - X_{21} \leq 0 \\
 X_{23} - X_{22} \leq 0 \\
 X_{32} - X_{31} \leq 0 \\
 X_{33} - X_{32} \leq 0 \\
 X_{ij} \in \{0, 1\}
 \end{array} \right. \quad (5.18)$$

E, por fim, a Equação (5.19) representa o modelo considerando o vigésimo ano de operação dos sistemas.

$$\begin{aligned}
(\text{MIN}) \quad Z = & 434,860X_{11} + 3,674,820X_{12} + 0X_{131} + 303,210X_{21} \\
& + 2,608,728X_{22} + 195,494X_{23} + 305,229X_{31} \\
& + 167,316X_{32} + 346,228X_{33}
\end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{13} - X_{12} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{23} - X_{22} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{33} - X_{32} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.19)$$

Nas três primeiras equações apenas uma variável pode ser igual a um, pois o modelo deve retornar como resultado final a possibilidade de ocorrer apenas um custo de implantação, um custo de manutenção e um custo de operação. Deste modo, $X_{kj} = 1$ significa a possibilidade de instalar uma das três opções disponíveis, considerando todos os custos necessários, enquanto que $X_{kj} = 0$ significa impossibilidade de instalação devido a outra opção apresentar um custo total acumulado menor.

Destaca-se ainda que, as seis inequações referem-se às decisões contingentes, que dependem dos resultados de decisões anteriores. Por exemplo, X_{12} é igual a um somente se X_{11} for igual a um e, conseqüentemente X_{13} é igual a um somente se X_{12} for igual a um. Caso X_{11} seja igual a zero, X_{12} também é igual a zero e, por consequência, X_{33} é igual a zero. Assim, qualquer que seja a resposta para a variável X_{11} , conseqüentemente as variáveis X_{12} e X_{13} terão os mesmos resultados. A mesma regra vale para as outras variáveis inseridas no modelo.

Estas restrições significam que o modelo nunca associará os custos de opções diferentes. Por exemplo, o custo de implantação da opção 1 com o custo de manutenção da opção 2 e com o custo de operação da opção 3, porque a coexistência desses custos não seria possível em uma situação real.

A transcrição dos modelos no *software* LINDO™ e suas soluções estão detalhadas nas Figuras A.18 a A.22, do Apêndice A. A Tabela 5.17 apresenta a síntese dos resultados obtidos.

Tabela 5.17 – Síntese dos resultados obtidos por meio do *software* LINDO™

Anos de Operação	Resultado da Função Objetivo (US\$)	Opção	Tipo de Sistema	Tipo de Tratamento
01	318,678	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso
05	379,905	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso
10	479,216	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso
15	617,618	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso
20	818,773	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso

Fonte: obtido a partir de Domingues *et al.* (2016), Dell'Uomo (2014), Reami e Coraucci Filho (2010) e Von Sperling (2005)

Conforme visto na Tabela 5.17, a opção 3 – que consiste na implantação de um sistema centralizado que tem como princípio de tratamento a combinação de reator UASB com filtro biológico aerado submerso – apresentou menor custo total durante o período de vida útil das opções comparadas, com base nas informações iniciais fornecidas em Von Sperling (2005), Reami e Coraucci Filho (2010), Dell'Uomo (2014) e Domingues *et al.* (2016).

O gráfico da Figura 5.16 indica o custo total acumulado ao longo da vida útil de cada opção. Os valores exatos apresentados no gráfico, obtidos por meio do *software* LINDO™, estão detalhados na Tabela B.4 do Apêndice B.

Figura 5.16 – Custo total acumulado durante a vida útil das opções disponíveis para o condomínio com 1.700 habitantes

Fonte: obtido a partir de Domingues *et al.* (2016), Dell’Uomo (2014), Reami e Coraucci Filho (2010) e Von Sperling (2005)

No gráfico da Figura 5.16 está evidenciada a considerável diferença entre os custos totais acumulados das três opções disponíveis. Percebe-se que mesmo sem consumir energia elétrica, a opção 1, com dez sistemas 1 (descentralizados individuais), apresentou o maior custo total. Além disso, verifica-se que vantagem da opção 3, composta pelo sistema 3 (centralizado), deve-se principalmente ao fato de seu custo de manutenção anual ser bastante inferior ao das outras duas opções, conforme indicado na Tabela 5.14.

No entanto, é importante destacar que o custo de manutenção do sistema 3 foi extraído de Von Sperling (2005), que “aplicou os custos *per capita* considerando as faixas populacionais típicas de utilização de cada sistema de tratamento”. Assim, de acordo com Piveli (2004), a população dominante atendida pelo reator UASB em associação com o filtro biológico aerado submerso está entre 20 e 200 mil habitantes. Deste modo, subentende-se que o efeito escala da elevada população estava implícito no custo de manutenção de Von Sperling (2005), utilizado na opção 3. Enquanto que nas opções 1 e 2, os custos de manutenção foram apenas

multiplicados pela quantidade de sistemas necessários, sem considerar o efeito escala que o acréscimo de sistemas poderia ocasionar.

5.2.5 Interferência do efeito escala nos resultados

Os custos de manutenção das opções 1 e 2 foram calculados desconsiderando o efeito escala que pode ocorrer com o acréscimo de sistemas em um condomínio ou uma cidade, por exemplo. Portanto, o modelo matemático detalhado no Item 5.2.4 foi reformulado considerando o efeito escala no custo de manutenção dos sistemas descentralizados, representados pelas opções 1 e 2.

De acordo com Caliman (2010), o conceito de escala se relaciona ao tamanho, que pode ser retratado por meio de dimensões físicas, por exemplo, a área de uma cidade; ou por meio de quantidade, como o número de habitantes de uma região. O autor explica que o efeito escala ocorre quando o tamanho de uma variável apresenta grande influência nos resultados. Assim, no que corresponde aos sistemas de tratamento, quanto maior for a população atendida, menor será o investimento por habitante para produzir a demanda necessária de efluentes.

Ressalta-se que para este item, o efeito escala que ocorre com o aumento da população atendida pelo sistema não foi calculado, pois se utilizaram os custos com base nas referências. No entanto, considerou-se a influência do efeito escala com a inserção de sistemas, somente para o custo de manutenção. O raciocínio por trás dessa decisão se explica pelo fato de que, apesar de haver um aumento na quantidade de sistemas a ser monitorada, a empresa especializada se deslocará apenas uma vez para realizar o serviço, quando necessário. Porém o aumento nos custos de implantação e no consumo de energia será proporcional ao acréscimo sistemas no condomínio.

Além disso, não foi encontrado na literatura um valor exato para o efeito escala que ocorre com a inserção de novas unidades de tratamento em um projeto, pois os custos de manutenção dependem principalmente das empresas especializadas em monitorar os sistemas. Todavia, em pesquisa para analisar as vantagens da descentralização de sistemas de tratamento de esgotos no Distrito Federal, Brostel e

Harada (1997) apresentaram dados que permitiram o cálculo do efeito escala com o acréscimo de sistemas no projeto.

A Tabela 5.18 apresenta a média do efeito escala em porcentagem sobre o custo de manutenção dos sistemas descentralizados, que foi obtida por meio de valores extraídos do estudo de Brostel e Harada (1997).

Tabela 5.18 – Efeito escala no custo de manutenção de sistemas descentralizados

Quantidade de Sistemas Implantados (un)	Efeito Escala no Custo de Manutenção
1	100,00%
2	65,70%
3	47,81%
4	41,52%
5	33,79%
6	27,73%
7	25,50%
8	23,74%
9	22,31%
10	21,13%
11	20,12%
12	19,25%
13	18,50%
14	17,84%
15	17,25%

Fonte: elaborado a partir de Brostel e Harada (1997)

Por exemplo, o sistema 1 (DBR) apresenta um custo de manutenção equivalente a US\$ 16,780, quando instalado sozinho. Para as condições da opção 1, na qual deverão ser instalados dez equipamentos, o custo de manutenção de cada sistema será em torno de 21,13% do custo caso fosse instalado isoladamente, ou seja, aproximadamente US\$ 3,545. Portanto, o custo necessário à manutenção de dez sistemas será US\$ 35,448, arredondando-se os valores.

Assim, para as opções sugeridas no Item 5.2.2, o custo de manutenção unitário de cada sistema foi recalculado considerando a influência do efeito escala com o aumento da quantidade de equipamentos instalados no condomínio, conforme se verifica na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Custos de manutenção unitários dos sistemas considerando o efeito escala

Sistema	Quantidade de Sistemas	Efeito Escala no Custo de Manutenção	Custo de Manutenção Unitário (US\$/ano)		Custo de Manutenção Total das Opções (US\$/ano)
			Sem Efeito Escala	Com Efeito Escala	
1	10	21,13%	16,780	3,545	35,448
2	5	33,79%	23,824	8,050	40,249
3	1	100,00%	7,640	7,640	7,640

Fonte: elaborado a partir de Domingues *et al.* (2016), Dell'Uomo (2014), Reami e Coraucci Filho (2010), Von Sperling (2005) e Brostel e Harada (1997)

Considerando o efeito escala juntamente com a taxa de reajuste anual de 1%, os custos de manutenção acumulados das opções em cada quinquênio de análise foram recalculados, conforme detalhado na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 – Custos de manutenção acumulados considerando o efeito escala

Opção	Custo de Manutenção Acumulado (US\$)				
	1º ano	5º ano	10º ano	15º ano	20º ano
1	35,448	180,785	370,433	568,943	776,314
2	40,249	205,270	420,603	645,998	881,455
3	7,640	38,964	79,838	122,622	167,316

Fonte: elaborado a partir de Domingues *et al.* (2016), Dell'Uomo (2014), Reami e Coraucci Filho (2010), Von Sperling (2005) e Brostel e Harada (1997)

Portanto, a Equação (5.20) representa o modelo para o primeiro ano de operação.

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 434,860X_{11} + 35,448X_{12} + 0X_{13} + 303,210X_{21} \\
 & + 40,249X_{22} + 3,280X_{23} + 305,229X_{31} + 7,640X_{32} \\
 & + 5,809X_{33}
 \end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{13} - X_{12} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{23} - X_{22} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{33} - X_{32} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.20)$$

A Equação (5.21) representa o modelo considerando o quinto ano de operação.

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 434,860X_{11} + 180,785X_{12} + 0X_{13} + 303,210X_{21} \\
 & + 205,270X_{22} + 20,165X_{23} + 305,229X_{31} + 38,964X_{32} \\
 & + 35,712X_{33}
 \end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{13} - X_{12} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{23} - X_{22} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{33} - X_{32} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.21)$$

A Equação (5.22) representa o modelo considerando o décimo ano de operação.

$$\begin{aligned}
(\text{MIN}) \quad Z = & 434,860X_{11} + 370,433X_{12} + 0X_{13} + 303,210X_{21} \\
& + 420,603X_{22} + 53,160X_{23} + 305,229X_{31} + 79,838X_{32} \\
& + 94,149X_{33}
\end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{13} - X_{12} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{23} - X_{22} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{33} - X_{32} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.22)$$

Enquanto que a Equação (5.23) representa o modelo considerando o décimo quinto ano de operação.

$$\begin{aligned}
(\text{MIN}) \quad Z = & 434,860X_{11} + 568,943X_{12} + 0X_{13} + 303,210X_{21} \\
& + 645,998X_{22} + 107,150X_{23} + 305,229X_{31} \\
& + 122,622X_{32} + 189,767X_{33}
\end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{13} - X_{12} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{23} - X_{22} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{33} - X_{32} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.23)$$

E, por fim, a Equação (5.24) representa o modelo considerando o vigésimo ano de operação dos sistemas.

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 434,860X_{11} + 776,314X_{12} + 0X_{13} + 303,210X_{21} \\
 & + 881,455X_{22} + 195,494X_{23} + 305,229X_{31} \\
 & + 167,316X_{32} + 346,228X_{33}
 \end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l}
 X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\
 X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\
 X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\
 X_{12} - X_{11} \leq 0 \\
 X_{13} - X_{12} \leq 0 \\
 X_{22} - X_{21} \leq 0 \\
 X_{23} - X_{22} \leq 0 \\
 X_{32} - X_{31} \leq 0 \\
 X_{33} - X_{32} \leq 0 \\
 X_{ij} \in \{0, 1\}
 \end{array} \right. \quad (5.24)$$

A transcrição dos modelos no *software* LINDO™ e suas soluções estão detalhadas nas Figuras A.23 a A.27, do Apêndice A. A Tabela 5.21 apresenta a síntese dos resultados obtidos.

Tabela 5.21 – Síntese dos resultados obtidos por meio do *software* LINDO™

Anos de Operação	Resultado da Função Objetivo (US\$)	Opção	Tipo de Sistema	Tipo de Tratamento
01	318,678	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso
05	379,905	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso
10	479,216	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso
15	617,618	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso
20	818,773	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso

Fonte: obtido a partir de Domingues *et al.* (2016), Dell'Uomo (2014), Reami e Coraucci Filho (2010), Von Sperling (2005) e Brostel e Harada (1997)

Verifica-se que mesmo considerando o efeito escala nos custos de manutenção, a opção 3 – que consiste na implantação de sistema centralizado, com tratamento feito por meio de reator UASB combinado com filtro biológico aerado submerso – manteve o menor custo total durante o período de vida útil das opções comparadas. Lembrando que os dados iniciais para a formulação do modelo foram extraídos de Von Sperling (2005), Reami e Coraucci Filho (2010), Dell’Uomo (2014) e Domingues *et al.* (2016), além da porcentagem do efeito escala calculada com base no estudo desenvolvido por Brostel e Harada (1997).

O gráfico apresentado na Figura 5.17 indica o custo total acumulado ao longo da vida útil de cada opção, considerando o efeito escala nas opções 1 e 2. Os valores exatos do gráfico, obtidos por meio do *software* LINDO™, estão detalhados na Tabela B.5 do Apêndice B.

Figura 5.17 – Custo total acumulado, com o efeito escala, durante a vida útil das opções disponíveis para o condomínio com 1.700 habitantes

Fonte: obtido a partir de Domingues *et al.* (2016), Dell’Uomo (2014), Reami e Coraucci Filho (2010), Von Sperling (2005) e Brostel e Harada (1997)

Percebe-se que a opção 3, composta pelo sistema centralizado, não sofreu alteração e mesmo com a considerável redução nos custos das outras duas opções, e permaneceu sendo a mais viável economicamente.

Entretanto, com a inserção do efeito escala, verifica-se a inversão de vantagem entre as duas primeiras opções. Assim, a partir do décimo segundo ano de operação, a opção 2, com cinco sistemas descentralizados em grupo, que tinha o segundo menor custo total, passa a ser a opção menos viável economicamente. Enquanto que a opção 1, com dez sistemas descentralizados individuais, inicialmente mais cara, passa a ter o segundo menor custo total acumulado, devido principalmente ao fato de o sistema 1 (disco biológico rotativo) não consumir energia elétrica durante o processo de tratamento de água residuária.

5.3 ESTUDO DE CASO 3: TIPO DE SISTEMA A SER INSTALADO EM UMA CIDADE

No estudo de caso anterior, foi apresentada a comparação de sistemas com tipos de tratamentos e populações diferentes, bem como os dados utilizados, extraídos de referências distintas. Assim, surgiu o seguinte questionamento: será que ao se comparar sistemas com o mesmo tipo de tratamento, cujas informações foram obtidas dos mesmos autores, ainda se verificaria a vantagem econômica no sistema centralizado?

Por este motivo, o modelo formulado na sequência tem como objetivo comparar os custos totais necessários à instalação de sistema descentralizado individual, descentralizado em grupo e centralizado, em uma cidade hipotética com aproximadamente 29.400 habitantes, considerando sistemas com o mesmo tipo de tratamento, porém com capacidade de atender a populações distintas. Além disso, salienta-se que os dados foram extraídos das mesmas literaturas, conforme verificado na sequência.

5.3.1 Características dos sistemas utilizados no estudo de caso 3

Os dados utilizados para a formulação do modelo foram obtidos em Aisse *et al.* (2002), que compararam os custos de tratamentos anaeróbios utilizados no Estado do Paraná. Os custos de implantação dos sistemas indicados pelos autores (conforme Tabela 5.22) foram fornecidos pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), considerando as populações de três municípios diferentes, cujo

tratamento de esgoto é realizado pela combinação de reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB) e filtro biológico aerado submerso.

No entanto, Aisse *et al.* (2002) não apresentaram o consumo de energia nem as despesas com a manutenção dos sistemas, cujos indicadores foram extraídos de Von Sperling (2005) para o mesmo tipo de tratamento. O autor determinou que o custo de manutenção fica entre 7 e 12 reais/hab.ano, e que o consumo de energia varia de 14 a 20 kWh/hab.ano. Porém, num primeiro momento, optou-se por considerar os indicadores máximos para os três sistemas independentemente do número de habitantes, a fim de comparar qual seria o comportamento dos sistemas ao longo da vida útil igual a 20 anos.

Na Tabela 5.22 estão detalhados os custos e o consumo de energia para cada população, com base na literatura. Os valores foram arredondados para simplificar a montagem do modelo.

Tabela 5.22 – População, custos e consumo de energia de cada sistema indicado na literatura

Sistema	Tipo de Tratamento	População Atendida	Custo de Implantação (R\$)	Custo de Manutenção (R\$/hab.ano)	Consumo de Energia (kWh/hab.ano)
1	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso	4.203 ^[1]	409.232 ^[1]	12 ^[2]	20 ^[2]
2	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso	12.610 ^[1]	662.354 ^[1]	12 ^[2]	20 ^[2]
3	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso	29.424 ^[1]	1.206.389 ^[1]	12 ^[2]	20 ^[2]

Fontes: elaborado a partir de ^[1] Aisse *et al.* (2002) e ^[2] Von Sperling (2005)

Os custos de implantação, divulgados em reais, foram calculados em dólar tendo como base a média a cotação do dólar comercial referente a julho de 2001 (AISSE *et al.*, 2002), enquanto que os valores obtidos em Von Sperling (2005) utilizaram como referência o dólar igual a R\$ 2,70, conforme indicado pelo próprio autor. O Capítulo 4 detalha tanto o cálculo do consumo de energia em US\$/ano quanto o

cálculo do custo de manutenção em US\$/ano. A Tabela 5.23 apresenta os custos após a atualização dos valores.

Tabela 5.23 – Custos em dólar de cada sistema indicado na literatura

Sistema	Tipo de Tratamento	População Máxima Atendida	Custo de Implantação (US\$)	Custo de Manutenção (US\$/ano)	Custo de Operação (US\$/ano)
1	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso	4.203 ^[1]	160,244 ^[1]	18,680 ^[2]	14,203 ^[2]
2	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso	12.610 ^[1]	259,360 ^[1]	56,044 ^[2]	42,613 ^[2]
3	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso	29.424 ^[1]	472,390 ^[1]	130,773 ^[2]	99,433 ^[2]

Fontes: elaborado a partir de ^[1] Aisse *et al.* (2002) e ^[2] Von Sperling (2005)

Os custos indicados na Tabela 5.23 referem-se ao primeiro ano de operação dos sistemas, quando ocorre a instalação dos equipamentos. Para encontrar o custo total acumulado ao final da vida útil, consideraram-se novamente as seguintes taxas de reajuste anuais: 1% referente aos custos de manutenção e 10,35% para o custo de operação. Assim, nas Tabelas 5.24 e 5.25 estão apresentados, respectivamente, os custos de manutenção e de operação acumulados a cada cinco anos de operação dos três sistemas.

Tabela 5.24 – Custos de manutenção acumulados dos sistemas para os respectivos anos de análise

Sistema	Custo de Manutenção Acumulado (US\$)				
	1º ano	5º ano	10º ano	15º ano	20º ano
1	18,680	95,268	195,206	299,814	409,092
2	56,044	285,824	585,660	899,506	1,227,364
3	130,773	666,942	1,366,578	2,098,907	2,863,929

Fontes: elaborado a partir de Aisse *et al.* (2002) e Von Sperling (2005)

Tabela 5.25 – Custos de operação acumulados dos sistemas para os respectivos anos de análise

Sistema	Custo de Operação Acumulado (US\$)				
	1º ano	5º ano	10º ano	15º ano	20º ano
1	14,203	87,317	230,193	463,981	846,527
2	42,613	261,975	690,644	1,392,074	2,539,819
3	99,433	611,292	1,611,547	3,248,259	5,926,403

Fontes: elaborado a partir de Aisse *et al.* (2002) e Von Sperling (2005)

5.3.2 Características da cidade hipotética

Com o intuito de comparar os sistemas descentralizados em grupo, descentralizados individuais e centralizados, considerou-se que os sistemas podem ser instalados em uma cidade com 29.400 habitantes aproximadamente, dividida em sete bairros com 4.200 moradores. Além disso, o projetista da estação de tratamento de água não potável encontra disponível no mercado os três sistemas apresentados na Tabela 5.23. Deste modo, de acordo com as populações máximas atendidas, o projetista possui as seguintes opções para distribuir os sistemas a fim de satisfazer a demanda da cidade:

- opção 1: sistemas descentralizados individuais, compostos por sete unidades do sistema 1, capazes de suprir a demanda total de 29.421 habitantes.
- opção 2: sistemas descentralizados em grupo, constituídos por uma unidade do sistema 1 e duas unidades do sistema 2, capazes de suprir a demanda total de 29.423 habitantes.
- opção 3: sistema centralizado, representado por uma unidade do sistema 3, capaz de suprir a demanda total de 29.424 habitantes.

As possíveis distribuições dos sistemas em cada uma das opções são observadas nas Figuras 5.18 a 5.20.

Figura 5.18 – Opção 1 com sete sistemas descentralizados individuais

Fonte: a autora (2017)

Figura 5.19 – Opção 2 com três sistemas descentralizados em grupo

Fonte: a autora (2017)

Figura 5.20 – Opção 3 com um sistema centralizado

Fonte: a autora (2017)

Além disso, as três opções juntamente com os custos de implantação, de manutenção e de operação indicados anteriormente, nas Tabelas 5.23, 5.24 e 5.25, foram inseridas nas restrições do modelo para tomada de decisão quanto ao tipo de sistema a ser empregado na cidade hipotética, conforme detalhado a seguir.

5.3.3 Formulação do modelo

A variável de decisão X_{ijk} representa a quantidade de sistema a ser instalada a fim de satisfazer determinada demanda. Sendo que, i representa o sistema com determinado tipo de tratamento ($i = 1, 2, 3$), j é o tipo de custo relativo àquele sistema ($j = 1, 2, 3$) e k é a opção determinada pelo projetista ($k = 1, 2, 3$). Em resumo, as variáveis significam:

- X_{111} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 1 (descentralizados individuais), considerando os custos de implantação do sistema 1.
- X_{121} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 1 (descentralizados individuais), considerando os custos de manutenção do sistema 1.

- X_{131} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 1 (descentralizados individuais), considerando os custos de operação do sistema 1.
- X_{112} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 2 (descentralizados em grupo), considerando os custos de implantação do sistema 1.
- X_{122} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 2 (descentralizados em grupo), considerando os custos de manutenção do sistema 1.
- X_{132} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 2 (descentralizados em grupo), considerando os custos de operação do sistema 1.
- X_{212} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 2 (descentralizados em grupo), considerando os custos de implantação do sistema 2.
- X_{222} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 2 (descentralizados em grupo), considerando os custos de manutenção do sistema 2.
- X_{232} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 2 (descentralizados em grupo), considerando os custos de operação do sistema 2.
- X_{313} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 3 (centralizado), considerando os custos de implantação do sistema 3.
- X_{323} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 3 (centralizado), considerando os custos de manutenção do sistema 3.
- X_{333} : quantidade de sistemas a serem instalados na opção 3 (centralizado), considerando os custos de operação do sistema 3.

O objetivo do modelo matemático formulado neste item foi responder não somente qual é o menor custo total acumulado dentre diferentes opções de distribuição dos sistemas disponíveis ao projetista, mas também quantos sistemas são necessários implantar para suprir a demanda de uma população, tendo como base os dados obtidos nas referências consultadas.

Assim, considerando o vigésimo ano de operação, a formulação do modelo deste caso é representada pela Equação (5.25).

$$\begin{aligned}
(\text{MIN}) \quad Z = & 160,244X_{111} + 409,092X_{121} + 846,527X_{131} \\
& + 160,244X_{112} + 409,092X_{122} + 846,527X_{132} \\
& + 259,360X_{212} + 1,227,364X_{222} + 2,539,819X_{232} \\
& + 472,390X_{313} + 2,863,929X_{323} + 5,926,403X_{333}
\end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l}
X_{121} - X_{111} \leq 0 \\
X_{131} - X_{121} \leq 0 \\
X_{122} - X_{112} \leq 0 \\
X_{132} - X_{122} \leq 0 \\
X_{222} - X_{212} \leq 0 \\
X_{232} - X_{222} \leq 0 \\
X_{323} - X_{313} \leq 0 \\
X_{333} - X_{323} \leq 0 \\
X_{212} + X_{112} \leq 3 \\
X_{222} + X_{122} \leq 3 \\
X_{232} + X_{132} \leq 3 \\
4203X_{111} + 4203X_{112} + 12610X_{212} + 29424X_{313} \geq 29400 \\
4203X_{121} + 4203X_{122} + 12610X_{222} + 29424X_{323} \geq 29400 \\
4203X_{131} + 4203X_{132} + 12610X_{232} + 29424X_{333} \geq 29400 \\
X_{ijk} \in \mathbb{Z}_+
\end{array} \right. \quad (5.25)$$

As oito primeiras inequações cujos resultados devem ser menores ou iguais a zero referem-se às decisões contingentes, que dependem de decisões anteriores. Por exemplo, qualquer que seja o resultado para a variável X_{111} , consequentemente as variáveis X_{121} e X_{131} terão as mesmas respostas. A mesma regra vale para os demais sistemas.

Quanto à opção 2 (sistemas descentralizados em grupo), três novas restrições foram consideradas (inequações cujos resultados são menores ou iguais a três), com o intuito de associar as variáveis para a implantação de uma unidade do sistema 1 e duas unidades sistema 2, sendo utilizadas conjuntamente a fim de satisfazer a opção 2. Desta forma, as variáveis X_{112} e X_{212} , X_{122} e X_{222} , bem como X_{132} e X_{232} ocorrerão sempre juntas. Isto foi necessário, pois o sistema 1 também pode ocorrer na opção 1 (sistemas descentralizados individuais), mas para este caso, o modelo deve retornar apenas resultados para as variáveis X_{111} , X_{121} e X_{131} .

Nas três últimas inequações, os coeficientes referem-se à restrição de população de cada sistema que foi fornecida por *Aisse et al.* (2002). Desta forma, como definido

no Item 5.3.2, a cidade contará com aproximadamente 29.400 habitantes, sendo este o valor para a população mínima de projeto das opções.

Assim, os dados do modelo apresentado na Equação (5.25) foram inseridos no *software* LINDO™, conforme a Figura 5.21, a fim de que pudesse ser solucionado.

Figura 5.21 – Inserção dos dados do modelo no *software* LINDO™ (cidade)

Fonte: a autora (2017)

As informações destacadas na Figura 5.22 indicam que foram necessárias 34 iterações para chegar à solução ótima do modelo. O resultado da função objetivo foi acima de nove milhões de dólares, valor este que representa o menor custo total dentre as opções disponíveis. Todavia, para saber qual opção fornece o menor custo total e quantos sistemas são necessários, recorreu-se à coluna *value* apresentada na janela de relatório fornecida no *software* LINDO™, conforme destacado na Figura 5.23.

Figura 5.22 – Solução do modelo no *software* LINDO™ (cidade)

Fonte: a autora (2017)

Figura 5.23 – Relatório dos resultados do modelo fornecido pelo *software* LINDO™ (cidade)

Reports Window

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 9
OBJECTIVE VALUE = 9255167.00

SET X313 TO >= 1 AT 1, BND= -0.9256E+07 TWIN=-0.9388E+07 18
SET X323 TO >= 1 AT 2, BND= -0.9258E+07 TWIN=-0.9860E+07 23
SET X333 TO >= 1 AT 3, BND= -0.9263E+07 TWIN=-0.1272E+08 32

LAST INTEGER SOLUTION IS THE BEST FOUND
RE-INSTALLING BEST SOLUTION...

OBJECTIVE FUNCTION VALUE

1) 9262722. ←

VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
X111	0.000000	160244.000000
X121	0.000000	409092.000000
X131	0.000000	846527.000000
X112	0.000000	160244.000000
X122	0.000000	409092.000000
X132	0.000000	846527.000000
X212	0.000000	259360.000000
X222	0.000000	1227364.000000
X232	0.000000	2539819.000000
X313	1.000000	472390.000000
X323	1.000000	2863929.000000
X333	1.000000	5926403.000000

ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
2)	0.000000	0.000000
3)	0.000000	0.000000
4)	0.000000	0.000000
5)	0.000000	0.000000
6)	0.000000	0.000000
7)	0.000000	0.000000
8)	0.000000	0.000000
9)	0.000000	0.000000
10)	3.000000	0.000000
11)	3.000000	0.000000
12)	3.000000	0.000000
13)	24.000000	0.000000
14)	24.000000	0.000000
15)	24.000000	0.000000

NO. ITERATIONS= 34

Fonte: a autora (2017)

A seta presente na Figura 5.23, indica que o resultado exato da função objetivo foi igual a US\$ 9,262,722. Enquanto isso, na coluna *value* têm-se que os resultados das variáveis X_{111} , X_{121} , X_{131} , X_{112} , X_{122} , X_{132} , X_{212} , X_{222} e X_{232} foram todos iguais a zero, enquanto que os resultados de X_{313} , X_{323} e X_{333} foram iguais a um. Isto significa que a opção 3, além de apresentar o menor custo total dentre as opções disponíveis, necessidade apenas um sistema centralizado para suprir a demanda da cidade.

Além disso, na Figura 5.23, destacou-se também a coluna *slack or surplus* (folga ou excedente), que indica quanto a opção de menor custo total pode superar a demanda mínima. Neste caso, como o modelo indicou que a melhor opção era a instalação de apenas uma unidade do sistema 3, capaz de suprir até 24.424 habitantes, e como a população da cidade hipotética é igual a 29.400 pessoas, tem-se que a demanda mínima pode ser excedida em até 24 habitantes.

Para verificar o comportamento deste modelo caso uma opção descentralizada fosse a mais viável economicamente, desconsiderou-se a opção 3. Assim, formulou-se o modelo representado pela Equação (5.26).

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 160,244X_{111} + 409,092X_{121} + 846,527X_{131} \\
 & + 160,244X_{112} + 409,092X_{122} + 846,527X_{132} \\
 & + 259,360X_{212} + 1,227,364X_{222} + 2,539,819X_{232}
 \end{aligned}$$

$$\text{s. a.} \quad \left\{ \begin{array}{l}
 X_{121} - X_{111} \leq 0 \\
 X_{131} - X_{121} \leq 0 \\
 X_{122} - X_{112} \leq 0 \\
 X_{132} - X_{122} \leq 0 \\
 X_{222} - X_{212} \leq 0 \\
 X_{232} - X_{222} \leq 0 \\
 X_{212} + X_{112} \leq 3 \\
 X_{222} + X_{122} \leq 3 \\
 X_{232} + X_{132} \leq 3 \\
 4203X_{111} + 4203X_{112} + 12610X_{212} \geq 29400 \\
 4203X_{121} + 4203X_{122} + 12610X_{222} \geq 29400 \\
 4203X_{131} + 4203X_{132} + 12610X_{232} \geq 29400 \\
 X_{ijk} \in \mathbb{Z}_+
 \end{array} \right. \quad (5.26)$$

Na sequência, conforme mostra a Figura 5.24, os dados do modelo foram inseridos no *software* LINDO™. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 5.25.

Figura 5.24 – Inserção dos dados do modelo no *software* LINDO™ (cidade)

Fonte: a autora (2017)

Figura 5.25 – Relatório dos resultados do modelo fornecido pelo *software* LINDO™ (cidade)

Fonte: a autora (2017)

Conforme destacam as setas da Figura 5.25, foram feitas 38 iterações até alcançar a solução ótima do modelo, igual a US\$ 9,468,949, valor que representa o menor custo total dentre as opções disponíveis. Verifica-se também que os resultados das variáveis X_{111} , X_{121} e X_{131} foram iguais a zero, enquanto que os resultados das variáveis X_{112} , X_{122} e X_{132} foram iguais a um e os resultados das variáveis X_{212} , X_{222} e X_{232} foram iguais a dois. Portanto, o menor custo total acumulado dentre as opções disponíveis referem-se à instalação de uma unidade do sistema 1 e duas unidades do sistemas 2, que compõem o sistema descentralizado em grupo sugerido pela opção 2.

Também se observa na Figura 5.25, que a coluna *slack or surplus* (folga ou excedente) indicou que a demanda mínima de 29.400 habitantes pode ser excedida em até 23 pessoas, sem sofrer alterações de custos, pois a opção 2 (sistemas descentralizados em grupo) tem capacidade de suprir até 29.423 habitantes, conforme indicado no Item 5.3.2.

5.3.4 Verificação do modelo formulado

O modelo apresentado na sequência foi formulado com o intuito de verificar os resultados obtidos no item anterior e entender o comportamento dos custos ao longo do tempo. Para tal, calcularam-se os custos referentes à cada opção para suprir a demanda da cidade. Nas opções 1 e 2, que possuem mais de um sistema instalado, os custos foram calculados multiplicando-se os custos unitários pela quantidade a ser implantada, conforme indicam as Equações (5.27) a (5.32):

$$CI_{Alternativa\ 1} = 7 * 160,244 = US\$ 1,121,708 \quad (5.27)$$

$$CM_{Alternativa\ 1} = 7 * 18,680 = US\$ 130,760 \quad (5.28)$$

$$CO_{Alternativa\ 1} = 7 * 14,203 = US\$ 99,421 \quad (5.29)$$

$$CI_{Alternativa\ 2} = 1 * 160,244 + 2 * 259,360 = US\$ 678,964 \quad (5.30)$$

$$CM_{Alternativa\ 2} = 1 * 18,680 + 2 * 56,044 = US\$ 130,768 \quad (5.31)$$

$$CO_{Alternativa\ 2} = 1 * 14,203 + 2 * 42,613 = US\$ 99,429 \quad (5.32)$$

A Tabela 5.26 resume os resultados obtidos para o primeiro ano de operação.

Tabela 5.26 – Custos de cada opção no primeiro ano de operação

Opção	Tipo de Sistema	Quantidade de Sistemas	Custo de Implantação (US\$)	Custo de Manutenção (US\$/ano)	Custo de Operação (US\$/ano)
1	Descentralizado Individual	7	1,121,708	130,760	99,421
2	Descentralizado em Grupo	3	678,964	130,768	99,429
3	Centralizado	1	472,390	130,773	99,433

Fontes: elaborado a partir de Aisse *et al.* (2002) e Von Sperling (2005)

Considerando que os custos de manutenção dos sistemas possuem taxa de reajuste igual a 1% ao ano, a Tabela 5.27 apresenta os custos de manutenção acumulados a cada cinco anos.

Tabela 5.27 – Custos de manutenção acumulados das opções para os quinquênios de análise

Opção	Custo de Manutenção Acumulado (US\$)				
	1º ano	5º ano	10º ano	15º ano	20º ano
1	130,760	666,876	1,366,442	2,098,698	2,863,644
2	130,768	666,917	1,366,526	2,098,826	2,863,819
3	130,773	666,942	1,366,578	2,098,907	2,863,929

Fontes: elaborado a partir de Aisse *et al.* (2002) e Von Sperling (2005)

Conforme detalhado no Capítulo 4, a taxa de reajuste do custo de operação foi considerada igual a 10,35% ao ano. Assim, a Tabela 5.28 resume os custos de operação cada cinco anos.

Tabela 5.28 – Custos de operação acumulados das opções para os quinquênios de análise

Opção	Custo de Operação Acumulado (US\$)				
	1º ano	5º ano	10º ano	15º ano	20º ano
1	99,421	611,219	1,611,353	3,247,867	5,925,688
2	99,429	611,268	1,611,482	3,248,128	5,926,165
3	99,433	611,292	1,611,547	3,248,259	5,926,403

Fontes: elaborado a partir de Aisse *et al.* (2002) e Von Sperling (2005)

Percebe-se que os custos de manutenção e de operação das três opções são semelhantes, isto ocorreu, pois devido à falta destas informações em Aisse *et al.* (2002), foram utilizados os indicadores apresentados em Von Sperling (2005) para tratamentos realizados com reator UASB e filtro biológico aerado submerso, a saber, 20 kWh/hab.ano para a energia consumida e 12 reais/hab.ano para os custos de manutenção, conforme indicado na Tabela 5.22.

A seguir, a variável de decisão X_{kj} representa a possibilidade ou impossibilidade de instalação de uma opção disponível, onde k é a opção ($k = 1, 2, 3$) e j é o tipo de custo relativo àquela opção ($j = 1, 2, 3$). Em resumo, as variáveis significam:

- X_{11} : possibilidade de instalação da opção 1 (sistemas descentralizados individuais), considerando seu custo de implantação.
- X_{12} : possibilidade de instalação da opção 1 (sistemas descentralizados individuais), considerando seu custo de manutenção.
- X_{13} : possibilidade de instalação da opção 1 (sistemas descentralizados individuais), considerando seu custo de operação.
- X_{21} : possibilidade de instalação da opção 2 (sistemas descentralizados em grupo), considerando seu custo de implantação.
- X_{22} : possibilidade de instalação da opção 2 (sistemas descentralizados em grupo), considerando seu custo de manutenção.
- X_{23} : possibilidade de instalação da opção 2 (sistemas descentralizados em grupo), considerando seu custo de operação.

- X_{31} : possibilidade de instalação da opção 3 (sistema centralizado), considerando seu custo de implantação.
- X_{32} : possibilidade de instalação da opção 3 (sistema centralizado), considerando seu custo de manutenção.
- X_{33} : possibilidade de instalação da opção 3 (sistema centralizado), considerando seu custo de operação.

Portanto, com o auxílio das Tabelas 5.26 a 5.28, formulou-se o modelo considerando o primeiro ano de operação dos sistemas. A função objetivo (Z) e suas restrições são representadas pela Equação (5.33).

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 1,121,708X_{11} + 130,760X_{12} + 99,421X_{13} + 678,964X_{21} \\
 & + 130,768X_{22} + 99,429X_{23} + 472,390X_{31} \\
 & + 130,773X_{32} + 99,433X_{33}
 \end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l}
 X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\
 X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\
 X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\
 X_{12} - X_{11} \leq 0 \\
 X_{13} - X_{12} \leq 0 \\
 X_{22} - X_{21} \leq 0 \\
 X_{23} - X_{22} \leq 0 \\
 X_{32} - X_{31} \leq 0 \\
 X_{33} - X_{32} \leq 0 \\
 X_{ij} \in \{0, 1\}
 \end{array} \right. \quad (5.33)$$

A Equação (5.34) representa o modelo considerando o quinto ano de operação.

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 1,121,708X_{11} + 666,876X_{12} + 611,219X_{13} + 678,964X_{21} \\
 & + 666,917X_{22} + 611,268X_{23} + 472,390X_{31} \\
 & + 666,942X_{32} + 611,292X_{33}
 \end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l}
 X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\
 X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\
 X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\
 X_{12} - X_{11} \leq 0 \\
 X_{13} - X_{12} \leq 0 \\
 X_{22} - X_{21} \leq 0 \\
 X_{23} - X_{22} \leq 0 \\
 X_{32} - X_{31} \leq 0 \\
 X_{33} - X_{32} \leq 0 \\
 X_{ij} \in \{0, 1\}
 \end{array} \right. \quad (5.34)$$

A Equação (5.35) representa o modelo considerando o décimo ano de operação.

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 1,121,708X_{11} + 1,366,442X_{12} + 1,611,353X_{13} \\
 & + 678,964X_{21} + 1,366,526X_{22} + 1,611,482X_{23} \\
 & + 472,390X_{31} + 1,366,578X_{32} + 1,611,547X_{33}
 \end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{13} - X_{12} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{23} - X_{22} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{33} - X_{32} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.35)$$

Enquanto que a Equação (5.36) representa o modelo considerando o décimo quinto ano de operação.

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 1,121,708X_{11} + 2,098,698X_{12} + 3,247,867X_{13} \\
 & + 678,964X_{21} + 2,098,826X_{22} + 3,248,128X_{23} \\
 & + 472,390X_{31} + 2,098,907X_{32} + 3,248,259X_{33}
 \end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{13} - X_{12} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{23} - X_{22} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{33} - X_{32} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.36)$$

E, por fim, a Equação (5.37) representa o modelo considerando o vigésimo ano de operação dos sistemas.

$$\begin{aligned}
(\text{MIN}) \quad Z = & 1,121,708X_{11} + 2,863,644X_{12} + 5,925,688X_{13} \\
& + 678,964X_{21} + 2,863,819X_{22} + 5,926,165X_{23} \\
& + 472,390X_{31} + 2,863,929X_{32} + 5,926,403X_{33}
\end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{13} - X_{12} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{23} - X_{22} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{33} - X_{32} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.37)$$

Nas três primeiras equações apenas uma variável pode ser igual a um, pois o modelo deve retornar como resultado final a possibilidade de ocorrer apenas um custo de implantação, um custo de manutenção e um custo de operação. Deste modo, $X_{kj} = 1$ significa a possibilidade de instalar uma das três opções disponíveis, considerando todos os custos necessários, enquanto que $X_{kj} = 0$ significa impossibilidade de instalação devido a outra opção apresentar um custo total acumulado menor.

Destaca-se ainda que, as seis inequações referem-se às decisões contingentes, que dependem dos resultados de decisões anteriores. Por exemplo, X_{12} é igual a um somente se X_{11} for igual a um e, conseqüentemente X_{13} é igual a um somente se X_{12} for igual a um. Caso X_{11} seja igual a zero, X_{12} também é igual a zero e, por consequência, X_{33} é igual a zero. Assim, qualquer que seja a resposta para a variável X_{11} , conseqüentemente as variáveis X_{12} e X_{13} terão os mesmos resultados. A mesma regra vale para as outras variáveis inseridas no modelo.

Estas restrições significam que o modelo nunca associará os custos de opções diferentes. Por exemplo, o custo de implantação da opção 1 com o custo de manutenção da opção 2 e com o custo de operação da opção 3, porque a coexistência desses custos não seria possível em uma situação real.

A transcrição dos modelos no *software* LINDO™ e suas soluções estão detalhadas nas Figuras A.28 a A.32, do Apêndice A. A Tabela 5.29 apresenta a síntese dos resultados obtidos.

Tabela 5.29 – Síntese dos resultados obtidos por meio do *software* LINDO™

Anos de Operação	Resultado da Função Objetivo (US\$)	Opção	Tipo de Sistema	Tipo de Tratamento
01	702,596	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso
05	1,750,624	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso
10	3,450,515	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso
15	5,819,556	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso
20	9,262,722	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso

Fontes: obtido a partir de Aisse *et al.* (2002) e Von Sperling (2005)

Conforme visto na Tabela 5.29, a opção 3, que consiste na implantação de um sistema centralizado, apresentou menor custo total acumulado durante o período de vida útil das opções comparadas, com base nas informações iniciais fornecidas em Aisse *et al.* (2002) e Von Sperling (2005), para o tratamento realizado com a associação do reator UASB aliado e do filtro biológico aerado submerso.

O gráfico apresentado na Figura 5.26 indica o custo total acumulado ao longo da vida útil de cada opção. Os valores exatos do gráfico, obtidos por meio do *software* LINDO™, estão detalhados na Tabela B.6 do Apêndice B.

Figura 5.26 – Custo total acumulado durante a vida útil das opções disponíveis para a cidade com 29.400 habitantes

Fontes: obtido a partir de Aisse *et al.* (2002) e Von Sperling (2005)

No gráfico da Figura 5.26 está evidenciado que o sistema centralizado, representado pela opção 3, é o que possui o menor custo total acumulado ao longo do tempo. Percebe-se ainda que a opção 1, com sete sistemas descentralizados individuais, é a que mais se distancia das outras duas curvas. Inclusive, por meio dos valores verificados da Tabela B.5, do Apêndice B, a diferença de custos entre as opções 1 e 2 é maior do que o dobro da diferença entre os custos das opções 2 e 3.

Torna-se importante ressaltar ainda que os indicadores utilizados no custo de manutenção e no consumo de energia, extraídos de Von Sperling (2005), foram os mesmos independentemente da quantidade de pessoas atendidas pelos sistemas, ou seja, não foi considerado tanto o efeito escala com o aumento da população quanto o efeito escala com o acréscimo de sistemas. Assim, entende-se que, para este caso, o menor custo de implantação dos sistemas foi a variável determinante na escolha da opção mais viável economicamente.

5.3.5 Interferência do efeito escala nos resultados

Como Aisse *et al.* (2002) não divulgaram os custos de manutenção nem de operação, foram utilizados os indicadores definidos por Von Sperling (2005) para tratamentos realizados com reator UASB e filtro biológico aerado submerso. O autor define que o custo de manutenção varia entre 7 e 12 reais/hab.ano, e que o consumo de energia varia de 14 a 20 kWh/hab.ano.

Assim, considerando-se a influência do efeito escala que ocorre com o aumento da população, determinou-se que para o sistema 3, capaz de abastecer 29.424 pessoas, os indicadores dos custos seriam os mínimos, enquanto que para o sistema 1, capaz de suprir 4.203 habitantes, os indicadores utilizados seriam os máximos estipulados por Von Sperling (2005). Quanto ao sistema 2, calculou-se a média entre os indicadores máximos e mínimos para os custos de manutenção e de operação.

A Tabela 5.30 detalha os custos e o consumo de energia elétrica para cada população, com base na literatura. Os valores foram arredondados para simplificar a montagem do modelo.

Tabela 5.30 – População, custos e consumo de energia de cada sistema indicado na literatura

Sistema	Tipo de Tratamento	População Atendida	Custo de Implantação (R\$)	Custo de Manutenção (R\$/hab.ano)	Consumo de Energia (kWh/hab.ano)
1	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso	4.203 ^[1]	409.232 ^[1]	12 ^[2]	20 ^[2]
2	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso	12.610 ^[1]	662.354 ^[1]	9,5 ^[2]	17 ^[2]
3	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso	29.424 ^[1]	1.206.389 ^[1]	7 ^[2]	14 ^[2]

Fontes: elaborado a partir de ^[1] Aisse *et al.* (2002) e ^[2] Von Sperling (2005)

Os custos de implantação foram calculados em dólar tendo como base a média a cotação do dólar comercial referente a julho de 2001 (AISSE *et al.*, 2002), enquanto que os valores obtidos em Von Sperling (2005) utilizaram como referência o dólar igual a R\$ 2,70, conforme indicado pelo autor. O cálculo do custo de manutenção e do consumo de energia em US\$/ano é detalhado no Capítulo 4. A Tabela 5.31 apresenta os custos após a conversão dos valores.

Tabela 5.31 – Custos em dólar de cada sistema indicado na literatura

Sistema	Tipo de Tratamento	População Máxima Atendida	Custo de Implantação (US\$)	Custo de Manutenção (US\$/ano)	Custo de Operação (US\$/ano)
1	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso	4.203 ^[1]	160,244 ^[1]	18,680 ^[2]	14,203 ^[2]
2	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso	12.610 ^[1]	259,360 ^[1]	44,369 ^[2]	36,221 ^[2]
3	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso	29.424 ^[1]	472,390 ^[1]	76,284 ^[2]	69,603 ^[2]

Fontes: elaborado a partir de Aisse *et al.* (2002) e Von Sperling (2005)

Foi considerada também a influência do efeito escala com o acréscimo da quantidade de sistemas a serem instalados na cidade, conforme verificado em Brostel e Harada (1997). Portanto, com base nas porcentagens apresentadas na Tabela 5.18, do Item 5.2.5, recalculou-se apenas o custo de manutenção unitário dos sistemas, conforme verifica-se na Tabela 5.32. Torna-se importante lembrar ainda, que a opção 2 (sistema descentralizado em grupo) representa a instalação de uma unidade do sistema 1 e de duas unidades do sistema 2, totalizando 3 sistemas.

Tabela 5.32 – Custos de manutenção unitários dos sistemas considerando o efeito escala

Opção	Sistema	Quantidade de Sistemas	Efeito Escala no Custo de Manutenção	Custo de Manutenção Unitário (US\$/ano)		Custo de Manutenção Total das Opções (US\$/ano)
				Sem Efeito Escala	Com Efeito Escala	
1	1	7	25,50%	18,680	4,763	33,341
2	1	3	47,81%	18,680	8,932	51,360
	2			44,369	21,214	
3	3	1	100,00%	76,284	76,284	76,284

Fonte: elaborado a partir de Brostel e Harada (1997)

Além disso, sabendo que as opções 1 e 2, que possuem mais de um sistema instalado, os custos de implantação e de operação foram calculados multiplicando-se os custos unitários pela quantidade de sistemas a ser implantada, conforme indicam as Equações (5.38) a (5.41):

$$CI_{Alternativa\ 1} = 7 * 160,244 = US\$ 1,121,708 \quad (5.38)$$

$$CO_{Alternativa\ 1} = 7 * 14,203 = US\$ 99,421 \quad (5.39)$$

$$CI_{Alternativa\ 2} = 1 * 160,244 + 2 * 259,360 = US\$ 678,964 \quad (5.40)$$

$$CO_{Alternativa\ 2} = 1 * 14,203 + 2 * 36,221 = US\$ 86,645 \quad (5.41)$$

Portanto, a Tabela 5.33 resume os resultados obtidos para o primeiro ano de operação.

Tabela 5.33 – Custos de cada opção no primeiro ano de operação

Opção	Tipo de Sistema	Quantidade de Sistemas	Custo de Implantação (US\$)	Custo de Manutenção (US\$/ano)	Custo de Operação (US\$/ano)
1	Descentralizado Individual	7	1,121,708	33,341	99,421
2	Descentralizado em Grupo	3	678,964	51,360	86,645
3	Centralizado	1	472,390	76,284	69,603

Fontes: elaborado a partir de Aisse *et al.* (2002), Von Sperling (2005) e Brostel e Harada (1997)

Considerando que os custos de manutenção dos sistemas possuem taxa de reajuste igual a 1% ao ano, a Tabela 5.34 apresenta os custos de manutenção acumulados a cada cinco anos.

Tabela 5.34 – Custos de manutenção acumulados das opções para os quinquênios de análise

Opção	Custo de Manutenção Acumulado (US\$)				
	1º ano	5º ano	10º ano	15º ano	20º ano
1	33,341	170,041	348,417	535,128	730,175
2	51,360	261,938	536,715	824,333	1,124,791
3	76,284	389,048	797,168	1,224,358	1,670,620

Fontes: elaborado a partir de Aisse *et al.* (2002), Von Sperling (2005) e Brostel e Harada (1997)

Conforme detalhado no Capítulo 4, a taxa de reajuste do custo de operação foi considerada igual a 10,35% ao ano. Assim, a Tabela 5.35 resume os custos de operação cada cinco anos.

Tabela 5.35 – Custos de operação acumulados das opções para os quinquênios de análise

Opção	Custo de Operação Acumulado (US\$)				
	1º ano	5º ano	10º ano	15º ano	20º ano
1	99,421	611,219	1,611,353	3,247,867	5,925,688
2	86,645	532,674	1,404,287	2,830,503	5,164,213
3	69,603	427,904	1,128,081	2,273,778	4,148,476

Fontes: elaborado a partir de Aisse *et al.* (2002), Von Sperling (2005) e Brostel e Harada (1997)

Portanto, com o auxílio das Tabelas 5.33 a 5.35, formulou-se o modelo considerando o primeiro ano de operação. A função objetivo (Z) e as restrições são representadas pela Equação (5.42).

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 1,121,708X_{11} + 33,341X_{12} + 99,421X_{13} + 678,964X_{21} \\
 & + 51,360X_{22} + 86,645X_{23} + 472,390X_{31} + 76,284X_{32} \\
 & + 69,603X_{33}
 \end{aligned}$$

$$\text{s. a.} \quad \left\{ \begin{array}{l}
 X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\
 X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\
 X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\
 X_{12} - X_{11} \leq 0 \\
 X_{13} - X_{12} \leq 0 \\
 X_{22} - X_{21} \leq 0 \\
 X_{23} - X_{22} \leq 0 \\
 X_{32} - X_{31} \leq 0 \\
 X_{33} - X_{32} \leq 0 \\
 X_{ij} \in \{0, 1\}
 \end{array} \right. \quad (5.42)$$

A Equação (5.43) representa o modelo considerando o quinto ano de operação.

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 1,121,708X_{11} + 170,041X_{12} + 611,219X_{13} + 678,964X_{21} \\
 & + 261,938X_{22} + 532,674X_{23} + 472,390X_{31} \\
 & + 389,048X_{32} + 427,904X_{33}
 \end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{13} - X_{12} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{23} - X_{22} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{33} - X_{32} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.43)$$

A Equação (5.44) representa o modelo considerando o décimo ano de operação.

$$\begin{aligned}
 (\text{MIN}) \quad Z = & 1,121,708X_{11} + 348,417X_{12} + 1,611,353X_{13} \\
 & + 678,964X_{21} + 536,715X_{22} + 1,404,287X_{23} \\
 & + 472,390X_{31} + 797,168X_{32} + 1,128,081X_{33}
 \end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{13} - X_{12} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{23} - X_{22} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{33} - X_{32} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.44)$$

Enquanto que a Equação (5.45) representa o modelo considerando o décimo quinto ano de operação.

$$\begin{aligned}
(\text{MIN}) \quad Z = & 1,121,708X_{11} + 535,128X_{12} + 3,247,867X_{13} \\
& + 678,964X_{21} + 824,333X_{22} + 2,830,503X_{23} \\
& + 472,390X_{31} + 1,224,358X_{32} + 2,273,778X_{33}
\end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{13} - X_{12} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{23} - X_{22} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{33} - X_{32} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.45)$$

E, por fim, a Equação (5.46) representa o modelo considerando o vigésimo ano de operação dos sistemas.

$$\begin{aligned}
(\text{MIN}) \quad Z = & 1,121,708X_{11} + 730,175X_{12} + 5,925,688X_{13} \\
& + 678,964X_{21} + 1,124,791X_{22} + 5,164,213X_{23} \\
& + 472,390X_{31} + 1,670,620X_{32} + 4,148,476X_{33}
\end{aligned}$$

$$s. a. \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1 \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} = 1 \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} = 1 \\ X_{12} - X_{11} \leq 0 \\ X_{13} - X_{12} \leq 0 \\ X_{22} - X_{21} \leq 0 \\ X_{23} - X_{22} \leq 0 \\ X_{32} - X_{31} \leq 0 \\ X_{33} - X_{32} \leq 0 \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (5.46)$$

As três primeiras restrições dos modelos detalhados representam grupos de alternativas mutuamente exclusivas, pois o modelo deve retornar como resposta apenas um custo de implantação, um custo de manutenção e um custo de operação. Enquanto que as seis inequações têm a função de não permitir que o modelo associe os custos de opções diferentes. Desta forma, o modelo não irá retornar como resultado, por exemplo, o custo de implantação da opção 2 com o custo de

manutenção da opção 3 com o custo de operação da opção 1, porque a coexistência desses custos não seria possível em uma situação real.

A transcrição dos modelos no *software* LINDO™ e suas soluções estão detalhadas nas Figuras A.33 a A.37, do Apêndice A. A Tabela 5.36 apresenta a síntese dos resultados obtidos.

Tabela 5.36 – Síntese dos resultados obtidos por meio do *software* LINDO™

Anos de Operação	Resultado da Função Objetivo (US\$)	Opção	Tipo de Sistema	Tipo de Tratamento
01	618,277	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso
05	1,289,342	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso
10	2,397,639	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso
15	3,970,526	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso
20	6,291,486	3	Centralizado	Reator UASB com Filtro Biológico Aerado Submerso

Fontes: obtido a partir de Aisse *et al.* (2002), Von Sperling (2005) e Brostel e Harada (1997)

Conforme pode ser verificado na Tabela 5.36, mesmo com a inserção da influência do efeito escala, a opção 3, representada pelo sistema centralizado, continuou apresentando o menor custo total acumulado durante o período de vida útil dentre as opções comparadas.

O gráfico apresentado na Figura 5.27 indica o custo total acumulado ao longo da vida útil de cada opção, considerando o efeito escala nas opções 1 e 2. Os valores exatos do gráfico, obtidos por meio do *software* LINDO™, estão detalhados na Tabela B.7 do Apêndice B.

Figura 5.27 – Custo total acumulado, com o efeito escala, durante a vida útil das opções disponíveis para a cidade com 29.400 habitantes

Fontes: obtido a partir de Aisse *et al.* (2002), Von Sperling (2005) e Brostel e Harada (1997)

Observa-se pelo gráfico da Figura 5.27, que mesmo considerando o efeito escala nos custos o sistema centralizado permaneceu o mais viável economicamente, dentre as opções comparadas. Isso ocorreu porque, além do custo de implantação da opção 3 ser inferior ao das outras opções, houve considerável influência do efeito escala nos custos de operação do sistema centralizado devido ao aumento da população.

A interferência do efeito escala é verificada principalmente a partir do décimo ano da vida útil, quando a curva dos custos totais acumulados das opções 1 e 2 se distanciam da opção 3, conforme evidenciado no gráfico da Figura 5.28, que apresenta apenas os custos de manutenção e de operação acumulados.

Figura 5.28 – Custos de manutenção e de operação acumulados, com o efeito escala, durante a vida útil das opções disponíveis para a cidade com 29.400 habitantes

Fontes: obtido a partir de Aisse *et al.* (2002), Von Sperling (2005) e Brostel e Harada (1997)

Entende-se então que, para o modelo formulado a partir das informações iniciais de Aisse *et al.* (2002), Von Sperling (2005) e Brostel e Harada (1997), o efeito escala decorrente do aumento da população, teve um impacto muito maior ao longo do tempo do que a influência do efeito escala nos custos de manutenção devido ao acréscimo na quantidade de sistemas na cidade. Isto porque, mesmo apresentando custo de manutenção inferior (Tabela 5.33), a opção 1, que consiste na instalação de sete sistemas descentralizados individuais, permaneceu com o maior custo acumulado dentre as opções disponíveis.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos princípios da Programação Linear Inteira, foi possível formular diferentes modelos matemáticos para a tomada de decisão. Os modelos formulados permitiram indicar qual tipo de tratamento ou de sistema – descentralizado individual, descentralizado em grupo ou centralizado – apresenta o menor custo total, quanto é o valor desse custo ao final de determinado período de tempo e quantos sistemas são necessários instalar para atender a uma demanda específica.

Os modelos apresentaram-se versáteis, pois puderam ser aplicados em cenários com características e demandas variáveis, a saber, em uma edificação comercial com 156 usuários, um condomínio residencial hipotético com, aproximadamente, 1.700 moradores e uma cidade hipotética com 29.400 habitantes.

Destaca-se, ainda, que os modelos foram formulados considerando as variáveis mais citadas pela literatura consultada quais sejam: custos de implantação, de manutenção e de operação, que engloba o consumo de energia dos sistemas. No entanto, a partir das formulações gerais, diferentes modelos matemáticos podem ser elaborados, com base nas necessidades do projetista.

Assim, caso a despesa com a geração de lodo e seu comportamento ao longo do tempo seja determinante para a tomada de decisão, ela pode ser inserida como uma nova variável do modelo, ao invés de estar inclusa nos custos de manutenção. Ou então, podem ser acrescentadas novas restrições aos modelos formulados, no que se refere aos padrões mínimos de qualidade da água não potável produzida pelos diferentes tipos de tratamento a serem comparados.

Quando se trata da resolução de problemas de Programação Linear que contenham uma diversidade de variáveis, entende-se que o uso de planilhas eletrônicas dificulta a identificação da solução ótima devido à grande quantidade de soluções viáveis que podem ser encontradas. Em contrapartida, o *software* LINDO™, com sua interface simplificada, possibilitou a identificação imediata dos resultados de todos os modelos formulados nos estudos de caso.

Além disso, o *software* LINDO™ mostrou-se uma ferramenta bastante prática e permitiu a resolução dos modelos desenvolvidos de forma confiável. Os resultados

obtidos com o *software* permitiram analisar os dados além das respostas fornecidas para a função objetivo e para as variáveis de decisão, o que possibilitou a criação dos gráficos para a verificação do comportamento dos sistemas.

Tomando como referência os dados disponíveis na literatura consultada, o sistema centralizado apresentou-se mais viável do que os sistemas descentralizados no que diz respeito aos custos de implantação, de manutenção e de consumo de energia considerando uma vida útil de 20 anos. Salienta-se que a comparação entre os tipos de sistemas foi realizada tanto para tipos de tratamentos diferentes quanto para o mesmo tipo de tratamento.

Verificou-se também que determinado tipo de tratamento pode apresentar-se vantajoso quando comparado a outras opções disponíveis, considerando a sua instalação em uma única edificação, ou seja, ao ser empregado como um sistema descentralizado individual. Contudo, o mesmo tipo de tratamento, em um cenário de maior demanda, onde é necessária a instalação de mais unidades de sistemas descentralizados individuais, pode não se manter competitivo quando comparado a outro tipo de tratamento, que atende a demanda total ao ser implantado como um sistema centralizado.

Os resultados obtidos, por meio das fontes consultadas, permitiram identificar a importância de se analisar o comportamento dos custos ao longo da vida útil dos sistemas e a relevância que todas as variáveis inseridas no modelo apresentam, pois um tipo de tratamento ou de sistema inicialmente competitivo pode ter custo total acumulado superior às outras opções disponíveis. Além disso, pôde-se perceber que a frequência de manutenção e o efeito escala resultante do aumento da população e da quantidade de sistemas implantados são fatores que interferem diretamente na viabilidade da implantação dos sistemas.

Os modelos formulados podem auxiliar a tomada de decisão quanto aos aspectos financeiros dos sistemas. Todavia, destaca-se ainda que a escolha do sistema mais viável não deve se concentrar apenas nos custos envolvidos, mas também devem ser consideradas variáveis qualitativas, as quais não foram inseridas nos modelos, como, por exemplo, a qualidade da água não potável produzida, a geração de ruído e a emissão de gases de efeito estufa durante o processo de tratamento. E para

isso, é imprescindível que o profissional responsável pela tomada de decisão tenha pleno conhecimento das principais características, vantagens e desvantagens de cada tipo de tratamento e de sistema.

Ressalta-se que os valores utilizados nos modelos foram extraídos de referências, cujos sistemas se localizam em cidades distintas, sob diferentes condições, o que não representa a situação ideal em termos de comparação. Assim, com o intuito de apoiar a tomada de decisão quanto ao tipo de sistema predial de água não potável a ser empregado, recomenda-se a trabalhos futuros, que contemplem modelos matemáticos formulados considerando dados reais de sistemas descentralizados e centralizados, instalados em locais com características semelhantes.

REFERÊNCIAS

- AFFERDEN, M. V. et al. A step towards decentralized wastewater management in the Lower Jordan Rift Valley. **Water Science & Technology**, v. 61, n.12, p. 181-192, 2010.
- AISSE, M. M. *et al.* Estudo comparativo do reator UASB e do reator anaeróbio compartimentado sequencial no tratamento de esgoto sanitário. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17., 2000, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: 2000, 9 p.
- AISSE, M. M. *et al.* Estudo econômico comparativo de sistemas de tratamento de efluentes anaeróbios no Estado do Paraná (Brasil). In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 18., 2002. **Proceedings...** Cancun: 2002, 4 p.
- AL-JAYYOUSI, O. R. Greywater reuse: towards sustainable water management. **Desalination**, v. 156, p. 181-192, 2003.
- ALMEIDA, D. L.; BENASSI, R. F. Crise hídrica e de energia elétrica entre 2014-2015 na região Sudeste. **Revista Hipótese**, Itapetininga, v. 1, n. 2, p. 65-76, 2015.
- ALVES, W. C. *et al.* Tecnologias de conservação em sistemas prediais. In: GONÇALVES, R. F. **PROSAB 5**: Uso racional de água e energia: conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água. Programa de Pesquisa de Saneamento Básico, 2009, p. 220-294.
- ANNECCHINI, K. P. V. **Aproveitamento da água da chuva para fins não potáveis na cidade de Vitória (ES)**. 2005. 150 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.
- AQUAPOLO. **Sobre o Aquapolo**. 2015. Disponível em: <<http://www.aquapolo.com.br/quem-somos/sobre-o-aquapolo/>>. Acesso em janeiro de 2016.
- ARENALES, M. *et al.* **Pesquisa Operacional para cursos de engenharia**. 8. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13.969**: tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5.626**: instalação predial de água fria. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15.575**: edificações habitacionais — Desempenho — Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO COMERCIAL DE SÃO PAULO (ACSP). **Dólar**: média mensal da cotação do dólar comercial para venda em real (R\$). Associação Comercial de São Paulo. Disponível em: < http://portal.acsp.com.br/assets/html/indicadores/indicadores_iegv/iegv_dolar.html> e < http://economia.acspservicos.com.br/indicadores_iegv/iegv_dolar.html>. Acesso em abril de 2016.

BARBAGALLO, S; CIRELLI, G. L.; INDELICATO, S. Wastewater reuse in Italy. **Water Science and Technology**, v. 43, n. 10, p. 43-50, 2001.

BLUM, J. R. C. Critérios e padrões de qualidade da água. In: MANCUSO, P.C.S.; SANTOS, H.F. **Reuso de água**. Barueri, São Paulo: Manole, 2003. cap. 5. 50 p.

BONI, S. S. N. **Gestão de água em edificações**: formulação de diretrizes para o reuso de água para fins não potáveis. 2009. 258 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

BORGES, K. L. Implantação de ETE Compacta em Araguari-MG. In: XI EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO, 2007 Guarulhos. **Anais...** Guarulhos: 2007, 9 p.

BOZAN, V. S. **Balanço energético e indicadores de consumo de energia em uma edificação dotada de sistema de reuso de águas cinza**. 2011. 54 p. Projeto (Graduação) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

BRASIL. **Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento**: Agenda 21. Câmara dos Deputados, Comissão de Defesa do Consumidor, Meio Ambiente e Minorias, Brasília, 1995.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA nº 377**, de 10 de outubro de 2006. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=507>>. Acesso em maio de 2016.

BRASIL. Ministério da Saúde. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Portaria n. 2914**, de 12 de dezembro de 2011.

BROSTEL, R. C.; HARADA, A. L. Análise da descentralização de sistemas de tratamento de esgotos – uma aplicação para as condições do Distrito Federal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., 1997, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: 1997, 12 p.

CADORE, I. R. *et al.* Biorreatores com membranas: uma alternativa para o tratamento de efluentes. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 10., 2014, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: 2014, 8 p.

CALIMAN, O. Efeito escala. **Gazeta Online**: 21 dez. 2010. Disponível em: < http://gazetaonline.globo.com/_conteudo/2010/12/728929-efeito+escala.html>. Acesso em novembro de 2016.

CASTILHO, C. P. Avaliação durante a operação de sistemas prediais de água não potável. 2015. 263 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação na Construção Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

COLLEGE OF ESTATE MANAGEMENT (CEM). Grey water for UK housing. United Kingdom: The College of Estate Management, 2013. 80 p. Disponível em: < <https://www.ucem.ac.uk/wp-content/uploads/2013/10/grey-water-final.pdf>>. Acesso em janeiro de 2016.

CHRISTOVA-BOAL, D.; EDEN, R. E.; MCFARLANE, S. An investigation into greywater reuse for urban residential properties. **Desalination**, n.106, p.391-397, 1996.

CHUNG, G. et al. A general water supply planning model: evaluation of decentralized treatment. **Environmental Modelling & Software**, n. 23, p. 893-905, 2008.

COHIM, E. *et al.* Perspectivas futuras: água, energia e nutrientes. In: GONÇALVES, R. F. **PROSAB 5**: Uso racional de água e energia: conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água. Programa de Pesquisa de Saneamento Básico, 2009, p. 295-350.

COLIN, E. C. **Pesquisa Operacional**: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

CENTER FOR THE STUDY OF THE BUILT ENVIRONMENT (CSBE). Graywater reuse in other countries and its applicability to Jordan. Jordan: Centre for the Study of the Built Environment. Project funded by Ministry of Planning Enhanced Productivity Program, 2003. 43 p. Disponível em: < <http://www.csbe.org/assets/Greywater-Publications/Graywater-in-other-countries-E.pdf>>. Acesso em janeiro de 2016.

DELL'UOMO, F. **Análise técnica e econômica dos processos de tratamento de águas cinzas visando ao reuso**. 2014. 110 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

DIMITRIADIS, S. Issues encountered in advancing Australia's water recycling schemes. **Parliamentary Library** - Information analysis and advice for the Parliament, Australia, n. 2, 45 p., 2005.

DIXON, A. M.; BUTLER, D.; FEWKES, A. Guidelines for greywater re-use: health issues. **J.CIWEM**, 13, p. 322-326, 1999.

DOMÈNECH, L; SAURÍ, D. Socio-technical transitions in water scarcity contexts: public acceptance of greywater reuse Technologies in the Metropolitan Area of Barcelona. **Resources, Conservation and Recycling**, 55, p 53-62, 2010.

- DOMINGUES, S. F. et al. **Sistemas de aproveitamento de águas cinzas e pluviais em empreendimentos residenciais – estudo de caso**. 2016. 25 p. Trabalho da disciplina de Desempenho e Inovação de Sistemas Prediais Hidráulicos (Mestrado Profissional em Inovação na Construção Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- ENGİN, G. O.; DEMİR, İ. Cost analysis of alternative methods for wastewater handling in small communities. **Journal of Environmental Management**, v. 79, i. 4, p. 357-363, 2006.
- ENVIRONMENT AGENCY. **Greywater for domestic users: an information guide**. United Kingdom, 2011, 31 p. Disponível em: <http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/ENVIRONMENT%20AGENCY%202011%20Greywater%20for%20Domestic%20Users.pdf>. Acesso em janeiro de 2016.
- ERIKSSON, E. et al. Characteristics of grey wastewater. **Urban Water**, v. 4, p. 85-104, 2002.
- FOGLIATTO, F. **Pesquisa Operacional**. s/d. 167 p. Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, s/d.
- GIKAS, P.; TCHOBANOGLOUS, G. The role of satellite and decentralized strategies in water resources management. **Journal of Environmental Management**, v. 90, i. 1, p. 144-152, 2009.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.
- GOMES JÚNIOR, A. C.; SOUZA, M. J. F. **LINDO: manual de referência**. 2004. 19 p. Projeto (Programa PRÓ-ATIVA) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.
- GONÇALVES, R. F. et al. Gerenciamento de águas cinzas. In: _____. **PROSAB: Tecnologias de segregação e tratamento de esgotos domésticos na origem, visando a redução do consumo de água e da infraestrutura de coleta, especialmente nas periferias urbanas**. Programa de Pesquisa de Saneamento Básico, 2006, p. 153-222.
- GUEST, J. S. et al. A new planning and design paradigm to achieve sustainable resource recovery from wastewater. **Environmental Science & Technology**, 43, p. 6126-6130, 2009.
- GUO, T.; ENGLEHARDT, J. D. Principles for scaling of distributed direct potable water reuse systems: a modeling study. **Water Research**, v. 75, p. 146-163, 2015.
- HASTENREITER, T. A. **Estudo de viabilidade técnica e econômica de implantação de um sistema de reuso de água cinza para fim não potável em edificação empresarial**. 2013. 151 p. Projeto (Graduação) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

HAUBERT, M. Região Sudeste vive a pior crise hídrica em 84 anos, afirma ministra. **Folha de São Paulo**: 24 jan. 2015. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2015/01/1579680-regiao-sudeste-vive-a-pior-crise-hidrica-em-84-anos-afirma-ministra.shtml>>. Acesso em julho de 2015.

HENDRICKSON, T. P. et al. Life-cycle energy and greenhouse gas emissions of a building-scale wastewater treatment and nonpotable reuse system. **Environmental Science & Technology**, 49, p. 10303-10311, 2015.

HERNÁNDEZ, F.; URKIAGA, A.; FUENTES, L.; et al. Feasibility studies for water reuse projects: an economical approach. **Desalination**, v. 187, p.253-261, 2005.

HERNÁNDEZ-SANCHO, F.; SALA-GARRIDO, R. Technical efficiency and cost analysis in wastewater treatment processes: a DEA approach. **Desalination**, v. 249, p. 230-234, 2009.

HOFFMANN, H. *et al.* Propostas para o saneamento descentralizado no Brasil (tecnologias de baixo custo para o tratamento de esgotos urbanos). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. Florianópolis, 2004. **Anais...** Florianópolis: ICTR, 2004, 11 p.

JEPPESEN, B. Domestic greywater re-use: Australia's challenge for the future. **Desalination**, v. 106, issues 1-3, p. 311-315, 1996.

JORDÃO, E. P. Análise Crítica. In: GONÇALVES, R. F. **PROSAB**: Tecnologias de segregação e tratamento de esgotos domésticos na origem, visando a redução do consumo de água e da infraestrutura de coleta, especialmente nas periferias urbanas. Programa de Pesquisa de Saneamento Básico, p 323-332, 2006.

KELLIS, M.; KALAVROUZOTIS, I. K.; GIKAS, P. Review of wastewater reuse in the mediterranean countries, focusing on regulations and policies for municipal and industrial applications. **Global NEST Journal**, v. 15, n. 3, p 333-350, 2013.

LIBRALATO, G; GHIRARDINI, A. V.; AVEZZÙ, F. To centralise or to decentralise: an overview of the most recent trends in wastewater treatment management. **Journal of Environmental Management**, v. 94, p. 61-68, 2012.

LIMA, R.G. **Tratamento descentralizado de efluentes como alternativa a despoluição dos recursos hídricos da região metropolitana de Aracaju/SE**. 2008. 127 p. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2008.

LISBOA, E. F. A. **Pesquisa Operacional**. 2002. 57 p. Apostila da disciplina de Pesquisa Operacional, Universidade Estácio de Sá, Rio de Janeiro, 2002.

MAGNABOSCO, A. Em dez anos, preço da energia sobe acima da inflação. **Revista Exame**: 23 out. 2014. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/economia/em-dez-anos-preco-da-energia-sobe-acima-da-inflacao/>>. Acesso em agosto de 2016.

MARINS, F. A. S. **Introdução à Pesquisa Operacional**. São Paulo: Cultura Acadêmica, Universidade Estadual Paulista, Pró-Reitoria de Graduação, 2011.

MARQUES, I. G.; OLIVEIRA, L. H. **Padronização de terminologia e de conceitos de sistemas prediais de água não potável**. 2014. 9 p. Disponível em: <<http://www.cbcs.org.br/website/comunicacao-tecnica/show.asp?ppsCode=F0B31ADA-B27B-41B7-B628-AB5AF89EA5BA>>. Acesso em janeiro de 2016.

MATANGUE, M. T. A. **Comportamento hidrodinâmico e cinético dos reatores anaeróbios compartimentado (RAC) e manta de lodo (UASB) operado em série**. 2011. 397 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

MATOS, C. et al. Wastewater and greywater reuse on irrigation in centralized and decentralized systems – an integrated approach on water quality, energy consumption and CO₂ emissions. **Science of the Total Environment**, v. 493, p. 463-471, 2014.

METCALF e EDDY. **Water reuse: issues, technologies, and applications**, 1. ed. New York: McGraw Hill, USA, 2007.

NOLDE, E. Greywater reuse systems for toilet flushing in multistory buildings - over ten year experience in Berlin. **Urban Water**, n.1, p.275-284, 1999.

OLIVEIRA, L. H.; CORRÊA, F. R.; SANTOS, M. Sistemas de água não potável: centralizados ou descentralizados. **Revista Hydro**, v. 88, p. 54-57, 2014.

OLIVEIRA, S. V. W. B. **Modelo para tomada de decisão na escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário**. 2004. 197 p. Tese (Doutorado) – Departamento de Administração, Faculdade de Economia e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

OLIVEIRA, T. F. **Tratamento de água para abastecimento público por sistema de separação por membrana de ultrafiltração: estudo de caso na ETA Alto da Boa Vista (São Paulo, SP)**. 2010. 104 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PEIXOTO, L. M. **Requisitos e critérios de desempenho para sistema de água não potável de edifícios residenciais**. 2008. 146 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

PEREIRA, E. L. *et al.* Eficiência de um sistema de reatores anaeróbios no tratamento de efluentes líquidos de suinocultura. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 287-293, 2011.

PERTEL, M. **Caracterização do uso da água e da energia associada à água em uma edificação residencial convencional e uma dotada de um sistema de reuso de águas cinza**. 2009. 104 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

PIVELI, R.P. **Apostila para Tratamento de Esgotos**. 2004. 71 p. Apostila para disciplina de graduação – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

QUEIROZ, M. F. A. **Estudo de melhoria de gestão de manutenção de uma estação de tratamento de águas residuais**. 2015. 169 p. Dissertação (Mestrado) – Licenciatura em Ciências de Engenharia e Gestão Industrial, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.

REAMI, L.; CORAUCCI FILHO, B. Estimativas de custos unitários de implantação de estações de tratamento de esgotos. 2010. Disponível em: < http://www.fenasan.com.br/arquivos/2015/09h40_luciano_reami_06-08_sant3.pdf>. Acesso em janeiro de 2016.

RODRIGUES, L. D. B. Reuso de água em sistemas aeroportuários utilizando o processo de ultrafiltração. 2012. 119 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

RUIZ-ROSA, I. et al. Development and application of a cost management model for wastewater treatment and reuse processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 299-310, 2016.

SANTOS, A. M. **Tratamento descentralizado de esgotos domésticos em sistemas anaeróbios com posterior disposição do efluente no solo**. 2013. 83 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2013.

SANTOS, M. P. **Programação Linear**. 2000. 146 p. Departamento de Matemática Aplicada, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

SAUTCHÚK, C. A. **Formulação de diretrizes para implantação de programas de conservação de água em edificações**. 2004. 332 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

SAUTCHÚK, C. A. *et al.* **Conservação e reuso da água em edificações**. São Paulo, 2005, 152 p. Disponível em: < <http://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/conservacao-e-reuso-de-aguas-em-edificacoes-2005/>>. Acesso em junho de 2015.

SCHAEFER, K.; EXALL, K; MARSALEK, J. Water reuse and recycling in Canada: a status and needs assessment. **Canadian Water Resources Journal**, v. 29 (3), p. 195-208, 2004.

SCHEE, W.G. van der. Experiences with a collective domestic water system in Leidsche Rijn. In: CIB W62 SYMPOSIUM WATER SUPPLY AND DRAINAGE FOR BUILDINGS, 2004, Paris. **Proceedings...** Paris: 2004. 5 p.

SELLA, M. B. **Reuso de águas cinzas: avaliação de viabilidade da implantação do sistema em residências**. 2011. 87 p. Trabalho (Diplomação) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SHEHABI, A.; STOKES, J. R.; HORVATH, A. Energy and air emission implications of a decentralized wastewater system. **Environmental Research Letters**, v. 7, n. 2, 7 p., 2012.

SILVA, B. C. *et al.* Consumo de energia. In: GONÇALVES, R. F. **PROSAB 5: Uso racional de água e energia: conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água**. Programa de Pesquisa de Saneamento Básico, 2009, p. 100-350.

SILVA, M. K. Biorreatores com membranas: uma alternativa para o tratamento de efluentes. 2009. 196 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, 2008.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S.EPA). **Primer for municipal wastewater treatment**. Washington: United States Environmental Protection Agency, EPA 832-R-04-001, 2004. 30 p. Disponível em: < <http://www3.epa.gov/npdes/pubs/primer.pdf> >. Acesso em novembro de 2015.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S.EPA). **Guidelines for water reuse**. Washington: United States Environmental Protection Agency, EPA/600/R-12/618, 2012. 643 p. Disponível em: <<http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100FS7K.pdf>>. Acesso em novembro de 2015.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte, MG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

WATER UK. **Sustainability indicators 2007/08**. United Kingdom: WATER UK. 2008. 26 p. Disponível em: < http://www.fcrn.org.uk/sites/default/files/Sustainability_indicators_2008.pdf >. Acesso em dezembro de 2015.

APÊNDICE A – RESOLUÇÕES DOS MODELOS NO SOFTWARE LINDO™

As figuras a seguir detalham as transcrições e resoluções pelo *software* LINDO™ de todos os modelos formulados, que não foram apresentados no decorrer da pesquisa.

Figura A.1 – Resultados do modelo formulado considerando os custos de implantação e de manutenção dos sistemas (quinto ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.2 – Resultados do modelo formulado considerando os custos de implantação e de manutenção dos sistemas (décimo ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.3 – Resultados do modelo formulado considerando os custos de implantação e de manutenção dos sistemas (décimo quinto ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.4 – Resultados do modelo formulado considerando os custos de implantação e de manutenção dos sistemas (vigésimo ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.5 – Resultados do modelo formulado considerando os custos de implantação, de manutenção e de operação dos sistemas (primeiro ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.6 – Resultados do modelo formulado considerando os custos de implantação, de manutenção e de operação dos sistemas (quinto ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.7 – Resultados do modelo formulado considerando os custos de implantação, de manutenção e de operação dos sistemas (décimo ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.8 – Resultados do modelo formulado considerando os custos de implantação, de manutenção e de operação dos sistemas (décimo quinto ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.9 – Resultados do modelo formulado considerando os custos de implantação, de manutenção e de operação dos sistemas (vigésimo ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.10 – Resultados do modelo formulado considerando taxa de reajuste no custo de manutenção do Sistema 1 (DBR) igual a 2% ao ano (quinto ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.11 – Resultados do modelo formulado considerando taxa de reajuste no custo de manutenção do Sistema 1 (DBR) igual a 2% ao ano (décimo ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.12 – Resultados do modelo formulado considerando taxa de reajuste no custo de manutenção do Sistema 1 (DBR) igual a 2% ao ano (décimo quinto ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.13 – Resultados do modelo formulado considerando taxa de reajuste no custo de manutenção do Sistema 1 (DBR) igual a 2% ao ano (vigésimo ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.14 – Resultados do modelo formulado considerando taxa de reajuste no custo de manutenção do Sistema 1 (DBR) igual a 3% ao ano (quinto ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.15 – Resultados do modelo formulado considerando taxa de reajuste no custo de manutenção do Sistema 1 (DBR) igual a 3% ao ano (décimo ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.16 – Resultados do modelo formulado considerando taxa de reajuste no custo de manutenção do Sistema 1 (DBR) igual a 3% ao ano (décimo quinto ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.17 – Resultados do modelo formulado considerando taxa de reajuste no custo de manutenção do Sistema 1 (DBR) igual a 3% ao ano (vigésimo ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.18 – Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para o condomínio (primeiro ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.19 – Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para o condomínio (quinto ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.20 – Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para o condomínio (décimo ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.21 – Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para o condomínio (décimo quinto ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.22 – Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para o condomínio (vigésimo ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.23 – Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala no custo de manutenção das opções para o condomínio (primeiro ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.24 – Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala no custo de manutenção das opções para o condomínio (quinto ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.25 – Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala no custo de manutenção das opções para o condomínio (décimo ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.26 – Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala no custo de manutenção das opções para o condomínio (décimo quinto ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.27 – Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala no custo de manutenção das opções para o condomínio (vigésimo ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.28 – Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para a cidade (primeiro ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.29 – Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para a cidade (quinto ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.30 – Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para a cidade (décimo ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.31 – Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para a cidade (décimo quinto ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.32 – Resultados do modelo formulado considerando os custos das opções para a cidade (vigésimo ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.33 – Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala nos custos das opções para a cidade (primeiro ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.34 – Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala nos custos das opções para a cidade (quinto ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.35 – Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala nos custos das opções para a cidade (décimo ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.36 – Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala nos custos das opções para a cidade (décimo quinto ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

Figura A.37 – Resultados do modelo formulado considerando o efeito escala nos custos das opções para a cidade (vigésimo ano de operação)

Fonte: a autora (2017)

APÊNDICE B – RESULTADOS DA COLUNA *REDUCED COST*

As tabelas a seguir apresentam os resultados fornecidos pela coluna *reduced cost* do *software* LINDO™ e o cálculo do custo acumulado de cada sistema. Os valores das Tabelas B.1, B.2 e B.3 permitiram o desenvolvimento dos gráficos das Figuras 5.5, 5.6 e 5.7, com base nas informações fornecidas em Hastenreiter (2013).

Tabela B.1 – *Reduced cost* e custo acumulado dos sistemas (custos de implantação e de manutenção)

Ano	Sistema	Variável	Reduced Cost LINDO™ (US\$)	Reduced Cost Total (US\$)	Função Objetivo (US\$)	Custo Total Acumulado do Sistema (US\$)
1	1	X ₁₁	5,390	5,390	32,261	37,651
		X ₁₂	0			
	2	X ₂₁	85,248	85,248		117,509
		X ₂₂	0			
	3	X ₃₁	0	0		32,261
		X ₃₂	0			
	4	X ₄₁	1,765	1,765		34,026
		X ₄₂				
5	1	X ₁₁	0	0	43,807	43,807
		X ₁₂	0			
	2	X ₂₁	80,440	80,440		124,247
		X ₂₂	0			
	3	X ₃₁	3,410	3,410		47,217
		X ₃₂	0			
	4	X ₄₁	1,657	1,657		45,464
		X ₄₂	0			
10	1	X ₁₁	0	0	51,854	51,854
		X ₁₂	0			
	2	X ₂₁	81,201	81,201		133,055
		X ₂₂	0			
	3	X ₃₁	14,916	14,916		66,770
		X ₃₂	0			
	4	X ₄₁	8,562	8,562		60,416
		X ₄₂	0			
15	1	X ₁₁	0	0	60,311	60,311
		X ₁₂	0			
	2	X ₂₁	82,002	82,002		142,313
		X ₂₂	0			
	3	X ₃₁	0	27,008		87,319
		X ₃₂	27,008			
	4	X ₄₁	2,623	15,820		76,131
		X ₄₂	13,197			
20	1	X ₁₁	0	0	69,201	69,201
		X ₁₂	0			
	2	X ₂₁	82,842	82,842		152,043
		X ₂₂	0			
	3	X ₃₁	0	39,716		108,917
		X ₃₂	39,716			
	4	X ₄₁	2,623	23,447		92,648
		X ₄₂	20,824			

Fonte: a autora (2017)

Tabela B.2 – *Reduced cost* e custo total acumulado dos sistemas (custos de implantação, de manutenção e de operação)

Ano	Sistema	Variável	Reduced Cost LINDO™ (US\$)	Reduced Cost Total (US\$)	Função Objetivo (US\$)	Custo Total Acumulado do Sistema (US\$)
1	1	X ₁₁	5,461	5,461	32,596	38,057
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	0	85,622		118,218
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	85,622			
	3	X ₃₁	0	0		32,596
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
	4	X ₄₁	1,552	1,552		34,148
		X ₄₂	0			
		X ₄₃	0			
5	1	X ₁₁	89	89	46,214	46,303
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	0	82,392		128,606
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	82,392			
	3	X ₃₁	3,063	3,063		49,277
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
	4	X ₄₁	0	0		46,214
		X ₄₂	0			
		X ₄₃	0			
10	1	X ₁₁	0	0	58,434	58,434
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	86,112	86,112		144,546
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	13,765	13,765		72,199
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
	4	X ₄₁	3,959	3,959		62,393
		X ₄₂	0			
		X ₄₃	0			
15	1	X ₁₁	0	0	73,574	73,574
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	91,900	91,900		165,474
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	26,689	26,689		100,263
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
	4	X ₄₁	6,542	6,542		80,116
		X ₄₂	0			
		X ₄₃	0			

Continua

Continuação

Ano	Sistema	Variável	Reduced Cost LINDO™ (US\$)	Reduced Cost Total (US\$)	Função Objetivo (US\$)	Custo Total Acumulado do Sistema (US\$)
20	1	X ₁₁	0	0	93,399	93,399
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	87,252	100,902		194,301
		X ₂₂	13,650			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	0	35,485		128,884
		X ₃₂	35,485			
		X ₃₃	0			
	4	X ₄₁	2,623	6,520		99,919
		X ₄₂	3,897			
		X ₄₃	0			

Fonte: a autora (2017)

Tabela B.3 – Reduced cost e custo total acumulado dos sistemas (taxa de reajuste do custo de manutenção do Sistema 1 igual a 3% ao ano)

Ano	Sistema	Variável	Reduced Cost LINDO™ (US\$)	Reduced Cost Total (US\$)	Função Objetivo (US\$)	Custo Total Acumulado do Sistema (US\$)
1	1	X ₁₁	5,461	5,461	32,596	38,057
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	0	85,622		118,218
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	85,622			
	3	X ₃₁	0	0		32,596
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
	4	X ₄₁	1,552	1,552		34,148
		X ₄₂	0			
		X ₄₃	0			
5	1	X ₁₁	401	401	46,214	46,615
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	0	82,392		128,606
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	82,392			
	3	X ₃₁	3,063	3,063		49,277
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
	4	X ₄₁	0	0		46,214
		X ₄₂	0			
		X ₄₃	0			

Continua

Continuação

Ano	Sistema	Variável	Reduced Cost LINDO™ (US\$)	Reduced Cost Total (US\$)	Função Objetivo (US\$)	Custo Total Acumulado do Sistema (US\$)
10	1	X ₁₁	0	0	59,937	59,937
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	84,609	84,609		144,546
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	12,262	12,262		72,199
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
	4	X ₄₁	2,456	2,456		62,393
		X ₄₂	0			
		X ₄₃	0			
15	1	X ₁₁	0	0	77,330	77,330
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	88,144	88,144		165,474
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	20,933	20,933		98,263
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
	4	X ₄₁	2,786	2,786		80,116
		X ₄₂	0			
		X ₄₃	0			
20	1	X ₁₁	0	761	99,919	100,680
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	761			
	2	X ₂₁	87,252	94,382		194,301
		X ₂₂	7,130			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	0	28,965		128,884
		X ₃₂	28,965			
		X ₃₃	0			
	4	X ₄₁	0	0		99,919
		X ₄₂	0			
		X ₄₃	0			

Fonte: a autora (2017)

Os valores apresentados nas Tabelas B.4 e B.5 permitiram o desenvolvimento dos gráficos apresentados nas Figuras 5.16 e 5.17 para comparar o comportamento dos custos ao longo da vida útil das três opções do condomínio hipotético, cujas características dos sistemas de tratamento basearam-se em Von Sperling (2005), Reami e Coraucci Filho (2010), Dell’Uomo (2014) e Domingues *et al.* (2016).

Tabela B.4 – Reduced cost e custo total acumulado das opções do condomínio

Ano	Opção	Variável	Reduced Cost LINDO™ (US\$)	Reduced Cost Total (US\$)	Função Objetivo (US\$)	Custo Total Acumulado do Sistema (US\$)
1	1	X ₁₁	283,982	283,982	318,678	602,660
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	106,932	106,932		425,610
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	0	0		318,678
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
5	1	X ₁₁	434,860	910,735	379,905	1,290,640
		X ₁₂	475,875			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	303,210	550,982		930,887
		X ₂₂	247,772			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	0	0		379,905
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
10	1	X ₁₁	434,860	1,709,154	479,216	2,188,370
		X ₁₂	1,274,294			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	303,210	1,121,958		1,601,174
		X ₂₂	818,748			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	0	0		479,216
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
15	1	X ₁₁	434,860	2,510,432	617,618	3,128,050
		X ₁₂	2,075,572			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	303,210	1,704,618		2,322,236
		X ₂₂	1,401,408			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	0	0		617,618
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
20	1	X ₁₁	434,860	3,290,907	818,773	4,109,680
		X ₁₂	2,856,047			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	303,210	2,288,659		3,107,432
		X ₂₂	1,985,449			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	0	0		818,773
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			

Fonte: a autora (2017)

Tabela B.5 – Reduced cost e custo total acumulado das opções do condomínio (com efeito escala no custo de manutenção dos sistemas)

Ano	Opção	Variável	Reduced Cost LINDO™ (US\$)	Reduced Cost Total (US\$)	Função Objetivo (US\$)	Custo Total Acumulado do Sistema (US\$)
1	1	X ₁₁	151,630	151,630	318,678	470,308
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	28,061	28,061		346,739
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	0	0		318,678
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
5	1	X ₁₁	235,740	235,740	379,905	615,645
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	148,740	148,740		528,645
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	0	0		379,905
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
10	1	X ₁₁	326,077	326,077	479,216	805,293
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	297,757	297,757		776,973
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	0	0		479,216
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
15	1	X ₁₁	386,185	386,185	617,618	1,003,803
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	303,210	438,740		1,056,358
		X ₂₂	135,530			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	0	0		617,618
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
20	1	X ₁₁	392,401	392,401	818,773	1,211,174
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	303,210	561,386		1,380,159
		X ₂₂	258,176			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	0	0		818,773
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			

Fonte: a autora (2017)

Os valores apresentados nas Tabelas B.6 e B.7 permitiram o desenvolvimento dos gráficos apresentados nas Figuras 5.26 e 5.27 para comparar o comportamento dos custos ao longo da vida útil das três opções da cidade, cujas características dos sistemas de tratamento basearam-se em Aisse *et al.* (2002) e Von Sperling (2005).

Tabela B.6 – Reduced cost e custo total acumulado das opções da cidade

Ano	Opção	Variável	Reduced Cost LINDO™ (US\$)	Reduced Cost Total (US\$)	Função Objetivo (US\$)	Custo Total Acumulado do Sistema (US\$)
1	1	X ₁₁	649,293	649,293	702,596	1,351,889
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	206,565	206,565		909,161
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	0	0		702,596
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
5	1	X ₁₁	649,179	649,179	1,750,624	2,399,803
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	206,525	206,525		1,957,149
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	0	0		1,750,624
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
10	1	X ₁₁	648,988	648,988	3,450,515	4,099,503
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	206,457	206,457		3,656,972
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	0	0		3,450,515
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
15	1	X ₁₁	648,717	648,717	5,819,556	6,468,273
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	206,362	206,362		6,025,918
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	0	0		5,819,556
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			

Continua

Continuação

Ano	Opção	Variável	Reduced Cost LINDO™ (US\$)	Reduced Cost Total (US\$)	Função Objetivo (US\$)	Custo Total Acumulado do Sistema (US\$)
20	1	X ₁₁	648,318	648,318	9,262,722	9,911,040
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	206,226	206,226		9,468,948
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	0	0		9,262,722
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			

Fonte: a autora (2017)

Tabela B.7 – Reduced cost e custo total acumulado das opções da cidade (com efeito escala nos custos de manutenção e de operação dos sistemas)

Ano	Opção	Variável	Reduced Cost LINDO™ (US\$)	Reduced Cost Total (US\$)	Função Objetivo (US\$)	Custo Total Acumulado do Sistema (US\$)
1	1	X ₁₁	636,193	636,193	618,277	1,254,470
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	198,692	198,692		816,969
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	0	0		618,277
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
5	1	X ₁₁	613,626	613,626	1,289,342	1,902,968
		X ₁₂	0			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	184,234	184,234		1,473,576
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	0			
	3	X ₃₁	0	0		1,289,342
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
10	1	X ₁₁	649,318	683,839	2,397,639	3,081,478
		X ₁₂	34,521			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	0	222,327		2,619,966
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	222,327			
	3	X ₃₁	0	0		2,397,639
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			

Continua

Continuação

Ano	Opção	Variável	Reduced Cost LINDO™ (US\$)	Reduced Cost Total (US\$)	Função Objetivo (US\$)	Custo Total Acumulado do Sistema (US\$)
15	1	X ₁₁	649,318	934,177	3,970,526	4,904,703
		X ₁₂	284,859			
		X ₁₃	0			
	2	X ₂₁	0	363,274		4,333,800
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	363,274			
	3	X ₃₁	0	0		3,970,526
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			
20	1	X ₁₁	649,318	1,486,085	6,291,486	7,777,571
		X ₁₂	730,175			
		X ₁₃	106,592			
	2	X ₂₁	0	676,482		6,967,968
		X ₂₂	0			
		X ₂₃	676,482			
	3	X ₃₁	0	0		6,291,486
		X ₃₂	0			
		X ₃₃	0			

Fonte: a autora (2017)

ANEXO A – DESCRIÇÃO, VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS TIPOS DE TRATAMENTOS

Os processos de tratamento existentes, de acordo com Metcalf & Eddy (2007) são descritos a seguir:

- Físico: a separação dos sólidos ocorre por meio da aplicação de força física. Os mais tradicionais são os processos de gradeamento, mistura, floculação, sedimentação, flotação, filtração e separação por membranas;
- Biológico: a remoção de contaminantes, de nitrogênio e de fósforo, bem como a decomposição de substâncias orgânicas biodegradáveis ocorre por meio de atividade biológica. Neste processo, as substâncias podem ser tanto removidas por decantação quanto ser convertidas em gases liberados para a atmosfera;
- Químico: a remoção de contaminantes é feita pela adição de produtos químicos e suas respectivas reações químicas com o efluente. Precipitação, adsorção, desinfecção e transferência de gás, ou seja, adição de oxigênio na água, são tipos de processos químicos em sistemas de tratamentos.

Estes processos são aplicados simultaneamente e com diferentes combinações para tratar o efluente (VON SPERLING; 2005; METCALF & EDDY, 2007). Assim, uma estação de tratamento pode ser composta de sistemas que têm tanto os processos físicos quanto os biológicos como princípio, ao passo que outra unidade de tratamento pode implantar sistemas com base nos processos físicos e químicos, por exemplo. Piveli (2004) salienta ainda que esta associação apresenta importantes vantagens técnicas e econômicas, devido às limitações que cada processo possui quando utilizado isoladamente.

De acordo com Von Sperling (2005), a remoção de microrganismos e nutrientes do efluente a ser tratado, a fim de adequar sua qualidade aos padrões de uso, associa-se aos conceitos de nível de tratamento, classificado conforme descrito a seguir.

- Tratamento preliminar: utiliza processos físicos representados pela desarenação e pelo gradeamento, cujo objetivo é a remoção, respectivamente, de areia e de sólidos em suspensão grosseiros, representados por materiais de dimensões maiores (PIVELI, 2004). Segundo Lima (2008), esta etapa é fundamental por

minimizar a obstrução e os danos aos equipamentos que tratam e transportam os efluentes, a exemplos de aeradores, removedores, bombas e tubulações.

- Tratamento primário: também é predominante o uso de processos físicos para remover sólidos em suspensão sedimentáveis e parte da matéria orgânica representada pela demanda bioquímica de oxigênio (DBO) desses sólidos em suspensão (VON SPERLING, 2005). São aplicados processos de decantação primária e de flotação com a finalidade de separar os sólidos de diferentes naturezas que não foram retidos no tratamento preliminar, resultando na geração de lodo (LIMA, 2008).
- Tratamento secundário: segundo Von Sperling (2005), o objetivo deste nível é remover a matéria orgânica biodegradável, a DBO remanescente do tratamento primário e eventuais nutrientes (nitrogênio e fósforo), por meio de processos biológicos.
- Tratamento terciário: visa remover os nutrientes e DBO remanescentes do tratamento secundário, além de englobar os processos químicos para a desinfecção com o intuito de remover os organismos patogênicos, sólidos inorgânicos dissolvidos, compostos não biodegradáveis e metais pesados (VON SPERLING, 2005). Conforme Lima (2008), este nível é o mais adequado para tratar efluentes que serão reutilizados, sendo que o grau de desinfecção deve ser aplicado em função do uso que se fará da água não potável, ou seja, tratamento mais rigoroso para atividades que demandam maior qualidade e tratamento terciário mais simples para atividades que demandam efluente com menor qualidade.

Em resumo, Von Sperling (2005) destaca que o tratamento preliminar deve existir em todos os sistemas de nível primário, secundário e terciário, enquanto que o tratamento primário se torna dispensável caso o sistema tenha tratamento secundário em seus processos. Quanto ao tratamento terciário, o autor afirma que é menos utilizado em países em desenvolvimento, onde há o predomínio de sistemas de nível secundário, que também integram a remoção de poluentes, microrganismos patogênicos e nutrientes.

Tendo como princípio os processos físicos, biológicos e químicos, anteriormente descritos, estão disponibilizados no mercado nacional diversos tipos de tratamentos, cujas características podem ser subdivididas de acordo com os grupos indicados a seguir. Destaca-se ainda que os tipos citados, extraídos de Aisse *et al.* (2000), Piveli (2004), Von Sperling (2005) e Matangue (2011), são referentes aos tratamentos realizados em nível secundário e terciário.

- Disposição no Solo:
 - Infiltração lenta no solo
 - Infiltração rápida no solo
 - Infiltração subsuperficial no solo
 - Escoamento superficial no solo
 - Terras úmidas construídas, banhados artificiais ou ilhas flutuantes (wetlands)
- Lagoas de Estabilização:
 - Lagoa facultativa
 - Lagoa anaeróbia associada à lagoa facultativa
 - Lagoa aerada facultativa
 - Lagoa aerada de mistura completa associada à lagoa de decantação
 - Lagoa associada à lagoa de maturação
 - Lagoa associada à lagoa de alta taxa
- Lodos Ativados:
 - Lodo ativado convencional
 - Lodo ativado com aeração prolongada
 - Lodo ativado de fluxo intermitente
 - Lodo ativado convencional com remoção biológica de nitrogênio
 - Lodo ativado convencional com remoção biológica de nitrogênio e fósforo
- Reatores Aeróbios com Biofilmes
 - Filtro biológico percolador de baixa carga ou taxa
 - Filtro biológico percolador de alta carga ou taxa
 - Filtro biológico aerado submerso ou biofiltro aerado submerso
 - Biodisco ou disco biológico rotativo (DBR)

- Reatores Anaeróbios
 - Filtro anaeróbio
 - Reator anaeróbio de fluxo ascendente ou de manta de lodo (RAFA ou UASB)
 - Reator anaeróbio compartimentado (RAC ou ABR)
 - Reator UASB ou RAC complementados com pós-tratamento
- Membranas
 - Separação por membranas de filtração (ultrafiltração, microfiltração, nanofiltração ou de osmose inversa)
 - Biorreator com membrana em módulo submerso (MBR)
- Físico-Químico
 - Filtração seguida de desinfecção por cloração
 - Filtração seguida de desinfecção por ozonização
 - Filtração seguida de desinfecção por radiação ultravioleta

O conhecimento das características dos tipos de tratamentos existentes no mercado auxilia na tomada de decisão quanto ao sistema mais adequado a ser empregado, principalmente quando aspectos financeiros não são suficientes para definir. Desta forma, o Quadro A.1 apresenta a descrição, vantagens e desvantagens dos principais tipos de tratamentos em nível secundário e terciário encontrados na literatura nacional.

Quadro A.1 – Descrição, vantagens e desvantagens dos principais tipos de tratamentos encontrados na literatura nacional

DISPOSIÇÃO NO SOLO	
<p>Infiltração lenta no solo: é considerado um processo de fertilização e irrigação, onde o efluente é aplicado ao solo, sendo que parte é evaporada, parte percolada e a maior parte é absorvida pelas plantas. A taxa de aplicação no terreno são baixas (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Elevada eficiência na remoção de DBO e de coliformes. • Satisfatória eficiência na remoção de nitrogênio e de fósforo. • Requisitos energéticos praticamente nulos. • Construção, operação e manutenção simples. • Baixos custos de implantação e de operação. • Boa resistência a variações de carga. • Não há geração de lodo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevadíssimos requisitos de área. • Possibilidade de geração de maus odores, insetos e vermes. • Dependente do clima e das características do solo, que deve ter baixa declividade. • A aplicação deve ser suspensa ou reduzida nos períodos chuvosos. • Possibilidade de efeitos químicos no solo, vegetais e água subterrânea (quando há despejos industriais).
<p>Infiltração rápida no solo: os efluentes são dispostos em locais rasos e porosos, a fim de percolar pelo solo. A perda por evaporação é menor devido às maiores taxas de aplicação, que é intermitente para proporcionar um período de descanso ao solo (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Boa eficiência na remoção de DBO e de coliformes. • Satisfatória eficiência na remoção de nitrogênio e de fósforo. • Requisitos energéticos praticamente nulos. • Construção, operação e manutenção simples. • Baixos custos de implantação e de operação. • Boa resistência a variações de carga. • Não há geração de lodo. • Menor dependência da declividade do solo. • Independência das condições climáticas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevados requisitos de área. • Possibilidade de geração de maus odores, insetos e vermes. • Possibilidade de efeitos químicos no solo, vegetais e água subterrânea (quando há despejos industriais).

Continua

Continuação

DISPOSIÇÃO NO SOLO	
<p>Infiltração subsuperficial no solo: o efluente pré-decantado é aplicado abaixo do nível do solo, em locais preenchidos com um material poroso, no qual ocorre o tratamento. Os tipos mais comuns de infiltração subsuperficial são as valas de infiltração e os sumidouros (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Boa eficiência na remoção de DBO e de coliformes. • Satisfatória eficiência na remoção de nitrogênio e de fósforo. • Ausência de maus odores. • Requisitos energéticos praticamente nulos. • Construção, operação e manutenção simples. • Baixos custos de implantação e de operação. • Boa resistência a variações de carga. • Não há geração de lodo. • O terreno superior pode ser utilizado como área verde ou parques. • Independência das condições climáticas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevados requisitos de área. • Sistemas maiores necessitam de terrenos muito permeáveis para reduzir os requisitos de área para implantação. • Possibilidade de proliferação de insetos e vermes. • Possibilidade de efeitos químicos no solo, vegetais e água subterrânea (quando há despejos industriais). • Necessidade de unidades reserva para permitir a alternância dos equipamentos (operação e descanso).
<p>Escoamento superficial no solo: os efluentes são distribuídos na parte superior de terrenos com certa declividade, com o intuito de escoarem e serem coletados por valas na parte inferior do terreno, sendo a aplicação intermitente (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Boa eficiência na remoção de DBO e de coliformes. • Satisfatória eficiência na remoção de nitrogênio e de fósforo. • Requisitos energéticos praticamente nulos. • Construção, operação e manutenção simples. • Baixos custos de implantação e de operação. • Boa resistência a variações de carga. • Independência das condições climáticas. • É o método de disposição mais independente da permeabilidade do solo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevados requisitos de área. • Maior dependência da declividade do solo. • Há geração de lodo a ser tratado. • Possibilidade de geração de maus odores, insetos e vermes. • Possibilidade de efeitos químicos no solo, vegetais e água subterrânea (quando há despejos industriais).

Continua

Continuação

DISPOSIÇÃO NO SOLO	
<p>Terras úmidas construídas, banhados artificiais ou ilhas flutuantes (<i>wetlands</i>): consistem em lagoas ou canais rasos, que abrigam plantas aquáticas, cujos processos biológicos, químicos e físicos que ocorrem entre o solo e a raízes das plantas permitem o tratamento de efluentes. Não são recomendados para o tratamento do esgoto bruto (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Elevada eficiência na remoção de DBO e de coliformes. • Requisitos energéticos praticamente nulos. • Construção, operação e manutenção simples. • Reduzidos custos de implantação e de operação. • Boa resistência a variações de carga. • Não há geração de lodo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevados requisitos de área. • Necessidade de construção de substrato poroso, como brita e areia. • Susceptível a entupimentos. • Necessidade de manejo de plantas aquáticas indesejáveis. • Possibilidade de proliferação de mosquitos. • Necessidade de tratamento prévio do esgoto bruto (em nível primário ou secundário).
LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO	
<p>Lagoa facultativa: os efluentes permanecem por vários dias em lagoas construídas para o tratamento de águas residuárias. A DBO solúvel e a finamente particulada são estabilizadas aerobiamente por bactérias dispersas na lagoa, enquanto que a DBO suspensa sedimenta e é convertida anaerobiamente por bactérias no fundo da lagoa. O oxigênio requerido pelas bactérias aeróbias é fornecido por algas, através da fotossíntese (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, segundo Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Satisfatória eficiência na remoção de DBO. • Razoável eficiência na remoção de organismos patogênicos. • Construção, operação e manutenção simples. • Reduzidos custos de implantação e operação. • Requisitos energéticos reduzidos devido à ausência de equipamentos mecânicos. • Satisfatória resistência a variações de carga. • Remoção de lodo necessária após períodos superiores a 20 anos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevados requisitos de área. • Dificuldade em satisfazer padrões de lançamento restritivos. • A simplicidade operacional pode trazer o descaso na manutenção. • Possível necessidade de remoção de algas. • Desempenho variável com as condições climáticas (temperatura e insolação). • Possibilidade de proliferação de insetos.

Continua

Continuação

LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO	
<p>Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa: entre 50 a 65% da DBO é removida na lagoa anaeróbia (mais profunda e com menor volume) e convertida em líquidos e gases, enquanto que a DBO remanescente é removida na lagoa facultativa. O sistema ocupa uma área inferior à da lagoa facultativa única (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Satisfatória eficiência na remoção de DBO. • Razoável eficiência na remoção de organismos patogênicos. • Construção, operação e manutenção simples. • Reduzidos custos de implantação e operação. • Requisitos energéticos reduzidos devido à ausência de equipamentos mecânicos. • Satisfatória resistência a variações de carga. 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos requisitos de área. • Dificuldade em satisfazer padrões de lançamento restritivos. • A simplicidade operacional pode trazer o descaso na manutenção. • Possível necessidade de remoção de algas. • Desempenho variável com as condições climáticas (temperatura e insolação). • Possibilidade de proliferação de insetos e maus odores na lagoa anaeróbia. • Necessidade de remoção periódica (intervalo de alguns anos) do lodo da lagoa anaeróbia.
<p>Lagoa aerada facultativa: a remoção da DBO ocorre da mesma forma que na lagoa facultativa, porém, o oxigênio é fornecido por aeradores mecânicos e não pela fotossíntese. Grande parte dos sólidos e da biomassa sedimenta, sendo decompostos anaerobiamente por bactérias no fundo da lagoa (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Eficiência na remoção da DBO ligeiramente superior à das lagoas facultativas. • Requisitos de área inferiores aos sistemas de lagoas facultativas e anaeróbio-facultativas. • Maior independência das condições climáticas do que os sistemas de lagoas facultativas e anaeróbio-facultativas. • Satisfatória resistência a variações de carga. • Reduzida geração de maus odores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa eficiência na remoção de coliformes. • Requisitos de área ainda elevados. • Ligeiro aumento no nível de sofisticação de construção, operação e manutenção, pela necessidade de equipamentos. • Requisitos de energia relativamente elevados. • Necessidade de remoção periódica (intervalo de alguns anos) do lodo da lagoa aerada.

Continua

Continuação

LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO	
<p>Lagoa aerada de mistura completa + lagoa de decantação: na lagoa aerada de mistura completa, os sólidos permanecem dispersos no meio líquido, o que aumenta a eficiência do sistema na remoção da DBO e permite que a lagoa tenha um volume inferior ao de uma lagoa aerada facultativa. No entanto, o efluente contém elevados teores de sólidos, os quais devem ser removidos pela lagoa de decantação antes do lançamento no corpo receptor (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, segundo Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Eficiência na remoção da DBO ligeiramente superior à das lagoas facultativas. • Menor requisito de área de todos os sistemas de lagoas. • Independência das condições climáticas. • Satisfatória resistência a variações de carga. • Reduzida geração de maus odores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa eficiência na remoção de coliformes. • Ligeiro aumento no nível de sofisticação de construção, operação e manutenção, pela necessidade de equipamentos. • Requisitos de energia relativamente elevados. • Preenchimento rápido da lagoa de decantação com lodo (2 e 5 anos.) • Necessidade de remoção contínua ou periódica (intervalo de alguns anos) do lodo da lagoa de sedimentação.
<p>Lagoas de maturação: predominam condições ambientais adversas para organismos patogênicos, como radiação ultravioleta, elevado pH, elevado oxigênio dissolvido, falta de nutrientes e predação por outros organismos. Constituem um pós-tratamento adequado para sistemas cujo objetivo é a remoção da DBO e de coliformes (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Elevada eficiência na remoção de patógenos e de coliformes. • Razoável eficiência na remoção de nutrientes. • Independência das condições climáticas. • Satisfatória resistência a variações de carga. • Reduzida geração de maus odores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requisitos de área bastante elevados. • Ligeiro aumento no nível de sofisticação de construção, operação e manutenção, pela necessidade de equipamentos. • Requisitos de energia relativamente elevados. • Necessidade de remoção contínua ou periódica (intervalo de alguns anos) do lodo.
<p>Lagoas de alta taxa: possuem reduzidas profundidades, garantindo a penetração da energia luminosa para elevar a atividade fotossintética das algas, proporcionando aumento do pH, altas concentrações de oxigênio dissolvido, crescimento na taxa de mortalidade de microrganismos patogênicos e redução de nutrientes (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Boa eficiência na remoção de patógenos. • Elevada eficiência na remoção de nutrientes. • Independência das condições climáticas. • Satisfatória resistência a variações de carga. • Reduzida geração de maus odores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requisitos de área bastante elevados. • Ligeiro aumento no nível de sofisticação de construção, operação e manutenção, pela necessidade de equipamentos. • Requisitos de energia relativamente elevados. • Necessidade de remoção contínua ou periódica (intervalo de alguns anos) do lodo.

Continua

Continuação

LODOS ATIVADOS	
<p>Lodo ativado convencional: a concentração de biomassa no reator biológico é elevada, devido à recirculação dos sólidos sedimentados no fundo do decantador secundário. A biomassa permanece mais tempo no sistema do que o efluente, o que garante grande eficiência na remoção da DBO. O oxigênio é fornecido por aeradores mecânicos ou por ar difuso, enquanto que o decantador primário remove os sólidos sedimentáveis (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Elevada eficiência na remoção de DBO. • Nitrificação usualmente obtida. • Possibilidade de remoção biológica de nitrogênio e fósforo. • Baixos requisitos de área. • Processo de tratamento confiável, desde que seja monitorado. • Reduzidas possibilidades de geração de maus odores, insetos e vermes. • Flexibilidade operacional. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa eficiência na remoção de coliformes. • Elevados custos de implantação e operação. • Elevado consumo de energia. • Necessidade de operação sofisticada, devido ao elevado índice de mecanização. • Relativamente sensível a descargas tóxicas. • Necessidade do tratamento completo do lodo e da sua disposição final. • Possíveis problemas ambientais com ruídos e emissão de gases.
<p>Lodo ativado com aeração prolongada: similar ao lodo ativado convencional, com a diferença de que a biomassa permanece mais tempo no sistema, o que diminui a DBO disponível para as bactérias, fazendo com que utilizem matéria orgânica do próprio material celular para a sua manutenção. Desta forma, o lodo excedente sai estabilizado (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, segundo Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Elevada eficiência na remoção de DBO. • Nitrificação consistente. • Possibilidade de remoção biológica de nitrogênio e fósforo. • Baixos requisitos de área. • Processo de tratamento confiável, desde que seja monitorado. • Reduzidas possibilidades de geração de maus odores, insetos e vermes. • Flexibilidade operacional. • Menor geração de lodo e operação mais simples do que o lodo ativado convencional • Estabilização do lodo no próprio reator • Elevada resistência a variações de carga e a cargas tóxicas. • Satisfatória independência das condições climáticas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa eficiência na remoção de coliformes. • Elevados custos de implantação e operação. • Maior consumo de energia dentre os sistemas de lodos ativados. • Necessidade de operação sofisticada, devido ao elevado índice de mecanização (embora inferior ao lodo ativado convencional). • Necessidade de remoção da umidade do lodo e da sua disposição (embora mais simples do que o lodo ativado convencional).

Continua

Continuação

LODOS ATIVADOS	
<p>Lodo ativado de fluxo intermitente: por ser intermitente, no mesmo tanque ocorrem as etapas de reação (aeradores ligados) e de sedimentação (aeradores desligados). Quando os aeradores são desligados, os sólidos sedimentam para a retirada do efluente. Ao religar os aeradores, os sólidos sedimentados retornam à massa líquida, dispensando a necessidade de decantadores secundários (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Elevada eficiência na remoção de DBO. • Satisfatória remoção de nitrogênio e fósforo. • Operação mais simples do que os outros sistemas de lodos ativados. • Flexibilidade operacional. • Menos equipamentos que os demais sistemas de lodos ativados (elevatória de recirculação e decantador secundário desnecessários). • Mais competitivo economicamente para populações pequenas a médias. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa eficiência na remoção de coliformes. • Elevados custos de implantação e operação. • Maior potência instalada dentre os sistemas de lodos ativados. • Necessidade de operação sofisticada. • Necessidade do tratamento e da disposição do lodo.
<p>Lodo ativado com remoção biológica de nitrogênio: o reator biológico incorpora uma zona anóxica, com ausência de oxigênio, mas presença de nitratos, que ao serem utilizados na respiração de microrganismos facultativos reduzem-se a nitrogênio gasoso, liberado para a atmosfera (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Elevada eficiência na remoção de DBO. • Elevada eficiência na remoção de nitrogênio. • Baixos requisitos de área. • Processo de tratamento confiável, desde que seja monitorado. • Reduzidas possibilidades de geração de maus odores, insetos e vermes. • Flexibilidade operacional. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa eficiência na remoção de coliformes. • Elevados custos de implantação e operação. • Elevado consumo de energia. • Necessidade de operação sofisticada, devido ao elevado índice de mecanização. • Relativamente sensível a descargas tóxicas. • Necessidade do tratamento completo do lodo e da sua disposição final. • Problemas com ruídos e emissão de gases.

Continua

Continuação

LODOS ATIVADOS	
<p>Lodo ativado com remoção biológica de nitrogênio e fósforo: além das zonas aeróbias e anóxicas, o reator biológico incorpora uma zona anaeróbia. Recirculações internas permitem que a biomassa seja sucessivamente exposta a condições anaeróbias e aeróbias, fazendo com que microrganismos absorvam o fósforo do efluente em quantidades superiores às normalmente necessárias para seu metabolismo. A retirada desses organismos com o lodo excedente resulta na retirada do fósforo do reator biológico (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Elevada eficiência na remoção de DBO. • Elevada eficiência na remoção de nitrogênio e fósforo. • Baixos requisitos de área. • Processo de tratamento confiável, desde que seja monitorado. • Reduzidas possibilidades de geração de maus odores, insetos e vermes. • Flexibilidade operacional. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa eficiência na remoção de coliformes. • Elevados custos de implantação e operação. • Elevado consumo de energia. • Aumento da complexidade operacional, devido à necessidade de recirculação interna. • Relativamente sensível a descargas tóxicas. • Necessidade do tratamento completo do lodo e da sua disposição final. • Possíveis problemas ambientais com ruídos e emissão de gases.
REATORES AERÓBIOS COM BIOFILMES	
<p>Filtro biológico percolador de baixa carga ou taxa: a DBO é estabilizada aerobiamente por bactérias que crescem aderidas a um meio suporte (britas ou plástico). O efluente é aplicado na superfície do tanque e percola até sair pelo fundo, enquanto que a matéria orgânica fica retida no meio suporte. No sistema de baixa carga ou taxa há pouca disponibilidade de DBO para as bactérias, que sofrem autodigestão, saindo estabilizadas (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, segundo Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Elevada eficiência na remoção de DBO. • Nitrificação frequente. • Requisitos de área relativamente baixos. • Operação mais simples do que os lodos ativados. • Índice de mecanização relativamente baixo. • Equipamentos mecânicos simples. • Estabilização do lodo no próprio filtro. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa eficiência na remoção de coliformes. • Menor flexibilidade operacional do que os lodos ativados. • Elevados custos de implantação. • Requisitos de área mais elevados do que os filtros biológicos de alta carga ou taxa. • Necessidade de decantação primária. • Relativa dependência da temperatura do ar. • Relativamente sensível a descargas tóxicas. • Necessidade de remoção da umidade do lodo e da sua disposição (embora mais simples do que o filtro de alta carga). • Proliferação de moscas. • Elevada perda de carga.

Continua

Continuação

REATORES AERÓBIOS COM BIOFILMES	
<p>Filtro biológico percolador de alta carga ou taxa: similar ao sistema de baixa carga, porém a carga de DBO aplicada é maior, acarretando na necessidade de estabilização do lodo excedente antes de sua disposição (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Boa eficiência na remoção da DBO (embora ligeiramente inferior aos filtros de baixa carga). • Baixos requisitos de área. • Operação mais simples do que os lodos ativados. • Maior flexibilidade operacional que filtros de baixa carga. • Melhor resistência a variações de carga que filtros de baixa carga. • Reduzidas possibilidades de maus odores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa eficiência na remoção de coliformes. • Operação ligeiramente mais sofisticada do que os filtros de baixa carga. • Elevados custos de implantação. • Relativa dependência da temperatura do ar. • Necessidade do tratamento completo do lodo e da sua disposição final. • Elevada perda de carga.
<p>Filtro biológico ou biofiltro aerado submerso: constitui-se de um tanque preenchido com material poroso submerso, através do qual efluente e ar fluem permanentemente. O fluxo de ar é sempre ascendente, ao passo que o fluxo do líquido pode ser ascendente ou descendente. Assim, ocorre a remoção de compostos orgânicos solúveis e de partículas em suspensão (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Elevada eficiência na remoção da DBO. • Nitrificação opcional (frequente, quando necessário). • Requisitos de área bastante baixos. • Reduzida geração de maus odores. • Reduzida perda de carga. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa eficiência na remoção de coliformes. • Custos de implantação e operação relativamente elevados. • Elevado consumo de energia. • São necessárias lavagens periódicas para eliminar o excesso de biomassa acumulada. • Necessidade de tratamento completo do lodo (quando não há retorno para reator UASB) e da sua disposição final.

Continua

Continuação

REATORES AERÓBIOS COM BIOFILMES	
<p>Biodisco ou disco biológico rotativo (DBR): microrganismos aeróbios crescem aderidos a um meio suporte constituído por discos, onde formam uma camada de biofilme. Os discos, parcialmente imersos no efluente, giram, ora expondo a superfície do biofilme ao líquido ora ao ar, quando o processo se torna aeróbio. Ao atingir determinada espessura, a camada biológica desgruda do biodisco, mas se mantém em suspensão no meio líquido até ser retirada do sistema pelo decantador secundário (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Elevada eficiência na remoção de DBO. • Nitrificação frequente. • Requisitos de área bem baixos. • Mais simples do que lodos ativados. • Equipamento mecânico simples. • Reduzida geração de maus odores. • Reduzida perda de carga. • Adequado principalmente para edificações e pequenas populações. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa eficiência na remoção de coliformes. • Elevados custos de implantação e operação. • Cobertura dos discos usualmente necessária (proteção contra chuvas e ventos). • Relativa dependência da temperatura do ar. • Necessidade do tratamento completo do lodo e da sua disposição final.
REATORES ANAERÓBIOS	
<p>Filtro anaeróbio: a DBO é convertida anaerobiamente por bactérias aderidas a um meio suporte (usualmente britas) presente no reator. O tanque trabalha submerso e o fluxo é ascendente. O sistema requer decantação primária, frequentemente fossas sépticas, e tem baixa produção de lodo, que sai estabilizado do filtro (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Razoável eficiência na remoção de DBO. • Pouca ocupação de área. • Baixos custos de implantação e operação. • Tolerância a efluentes muito concentrados em matéria orgânica. • Reduzido consumo de energia. • Construção, operação e manutenção simples. • Baixíssima produção de lodo, que é estabilizado no próprio filtro. • Rápido reinício após períodos de paralisação. • Boa resistência a variações de carga. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa eficiência na remoção de coliformes, nitrogênio e fósforo. • Dificuldade de satisfazer padrões de lançamento restritivos. • Geração de efluente com aspecto desagradável. • Geração de maus odores e gases. • Riscos de entupimento. • Restrito ao tratamento de efluentes com baixa concentração de sólidos.

Continua

REATORES ANAERÓBIOS	
<p>Reator anaeróbio de fluxo ascendente ou de manta de lodo (RAFA ou UASB): a sigla UASB advém de <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>. A DBO é convertida anaerobiamente por bactérias dispersas no reator, cuja parte superior é dividida nas zonas de sedimentação (que permite a saída do efluente e retorno dos sólidos) e de coleta de gases (principalmente o metano). O fluxo do efluente no reator é ascendente. E o sistema dispensa decantação primária (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Razoável eficiência na remoção de DBO. • Baixos requisitos de área para implantação. • Baixos custos de implantação e operação. • Tolerância a efluentes muito concentrados em matéria orgânica. • Reduzido consumo de energia. • Não necessita de meio suporte. • Construção, operação e manutenção simples. • Baixíssima produção de lodo, que é adensado e estabilizado no próprio filtro. • Rápido reinício após períodos de paralisação. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldade em satisfazer padrões de lançamento restritivos. • Baixa eficiência na remoção de coliformes, nitrogênio e fósforo. • Geração de efluente com aspecto desagradável. • Geração de maus odores e gases. • A partida do processo é geralmente lenta. • Sensível a variações de carga e compostos tóxicos. • Necessita de pós-tratamento.
<p>Reator anaeróbio compartimentado (RAC ou ABR): a sigla ABR advém de <i>Anaerobic Baffled Reactor</i>. Assemelha-se a um tanque séptico com múltiplas câmaras em série, que são alimentadas por dispositivos eficazes. O reator é equipado com chicanas, ou seja, conjunto de cortinas verticais formando compartimentos em série, que impõe ao líquido um movimento ascendente e descendente, que garante um maior contato do efluente com a biomassa presente no fundo do equipamento (CHERNICHARO, 1997¹¹ <i>apud</i> AISSE, 2000; MATANGUE, 2011; OLIVEIRA et al., 2014). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Aisse (2000); Matangue (2011) e Oliveira <i>et al.</i> (2014).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Boa eficiência na remoção de matéria orgânica e de sólidos em suspensão. • Baixo custo de implantação. • Simplicidade de operação. • Boa resistência a variações de carga • Pouca dependência das condições do efluente a ser tratado (temperatura, pH e presença de materiais tóxicos). 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa remoção de nitrogênio e fósforo. • Geração de gás metano e hidrogênio, embora em menor quantidade do que o reator UASB. • Excessiva perda de sólidos em unidades de maior porte. • Sistema desprovido de mecanismos auxiliares de retenção de biomassa. • Para obter um desempenho melhor do sistema torna-se necessário complementá-lo com outros equipamentos.

¹¹ CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 1997. 246p.

Continuação

REATORES ANAERÓBIOS	
<p>Reator anaeróbio com pós-tratamento: o pós-tratamento pode ser biológico (aeróbio ou anaeróbio) ou físico-químico (com adição de coagulantes). A eficiência global do sistema é similar à que seria alcançada se o processo de pós-tratamento fosse aplicado ao esgoto bruto, mas os requisitos de área, volume, energia e produção de lodo são menores (VON SPERLING, 2005). Tanto os reatores UASB quanto os RAC podem receber pós-tratamento. A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Manutenção das vantagens inerentes ao reator UASB e ao pós-tratamento utilizado. • Redução no consumo de energia de sistemas aerados de pós-tratamento. • Redução na quantidade e complexidade do lodo a ser tratado e disposto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Manutenção das desvantagens inerentes ao reator UASB (com exceção da qualidade do efluente, que assume as características do pós-tratamento). • Manutenção das desvantagens inerentes ao sistema de pós-tratamento. • Maior dificuldade na remoção biológica de nutrientes no sistema de pós-tratamento.
MEMBRANAS DE FILTRAÇÃO	
<p>Separação por membranas: a membrana atua como uma barreira seletiva capaz de separar partículas sólidas de pequeno diâmetro, bactérias, vírus, moléculas orgânicas, compostos iônicos e gases da fração líquida de um fluido (RODRIGUES, 2012). O que diferencia cada um dos tipos de filtração (ultrafiltração, microfiltração, nanofiltração ou osmose inversa) é a capacidade da membrana em separar contaminantes de diferentes diâmetros e a intensidade da pressão de operação utilizada nos sistemas (SILVA, 2009; OLIVEIRA, 2010). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Silva (2009), Oliveira (2010) e Rodrigues (2012).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas compactos que precisam de pouca área para implantação. • Elevada eficiência na remoção de sólidos em suspensão, matéria orgânica e organismos patogênicos. • Facilidade operacional. • A qualidade do efluente a ser tratado não influencia na qualidade da água produzida. • Elevados níveis de qualidade da água não potável produzida. • No processo de remoção de contaminantes não há consumo de produto químico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevados custos de implantação, por ser uma tecnologia em inserção no mercado. • Alto consumo de energia. • Frequente manutenção para limpeza das membranas.

Continua

Continuação

MEMBRANAS DE FILTRAÇÃO	
<p>Biorreator com membrana em módulo submerso (MBR): consiste em um processo que associa um biorreator com princípios do processo biológico de tratamento à tecnologia de separação por membranas de filtração, garantindo um efluente de alta qualidade, devido à retenção da matéria orgânica, contaminantes e sólidos suspensos pela membrana (METCALF & EDDY, 2007; SILVA, 2009; CADORE <i>et al.</i>, 2014). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Metcalf & Eddy (2007), Silva (2009) e Cadore <i>et al.</i> (2014).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Área reduzida para implantação. • Elevada eficiência na remoção de sólidos em suspensão, matéria orgânica e organismos patogênicos. • Altos níveis de desinfecção e nível de qualidade do efluente produzido. • Facilidade operacional. • Geração de lodo muito reduzida. • O processo é estável e menos suscetível a variações de carga. • A geração de odor e de gases é reduzida. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevados custos de implantação, por ser uma tecnologia em inserção no mercado. • Alto consumo de energia. • Frequente manutenção para limpeza das membranas.
FÍSICO-QUÍMICO	
<p>Filtração + cloração: o cloro é o desinfetante mais conhecido mundialmente e mais utilizado para águas e esgotos. Sua ação desinfetante ocorre devido ao mecanismo de oxidação do material celular. Pode ser aplicado nas formas de cloro gasoso, hipoclorito de sódio ou de cálcio ou outros compostos com cloro na forma líquida ou sólida (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologia amplamente conhecida. • Baixo custo. • O cloro residual prolonga a desinfecção. • Processo efetivo e confiável para uma variedade de patógenos. • Oxida alguns tipos de compostos orgânicos e inorgânicos. • Flexibilidade nas dosagens. 	<ul style="list-style-type: none"> • O cloro é corrosivo e tóxico. • As reações com cloro geram compostos potencialmente perigosos. • Aumenta os sólidos totais dissolvidos. • Cloro residual é instável, tóxico e requer adição de produtos químicos para ser eliminado. • Apesar de eficiente, alguns organismos patogênicos são resistentes.

Continua

Continuação

FÍSICO-QUÍMICO	
<p>Filtração + ozonização: o ozônio (O_3) é um oxidante reativo e bactericida. A desinfecção ocorre com a decomposição do ozônio no oxigênio do efluente num curto período de tempo, ocasionando a destruição da parede celular dos microrganismos (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Mais efetivo que o cloro na remoção de vírus e bactéria. • Não gera residuais perigosos. • Não resulta em recrescimento de bactérias. • Fácil armazenamento e manuseio. • Eleva o oxigênio dissolvido no efluente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixas doses não são eficientes para eliminar determinados vírus, esporos e cistos. • Tecnologia complexa. • Alto custo para efluentes com elevados teores de sólidos suspensos, DBO e DQO. • O ozônio é reativo, corrosivo, irritante e pode ser tóxico.
<p>Filtração + radiação ultravioleta (UV): o mecanismo da radiação ultravioleta consiste no dano direto aos ácidos celulares. Sua eficiência depende das características do efluente, da intensidade da radiação aplicada, do tempo de exposição e da configuração do reator (VON SPERLING, 2005). A seguir, são indicadas as vantagens e desvantagens deste tipo de tratamento, de acordo com Von Sperling (2005).</p>	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Efetivo na inativação de vírus e esporos. • Não precisa de geração, manuseio, transporte ou estocagem de produtos químicos. • Não têm efeitos residuais prejudiciais. • Operação simples. • Menor demanda de área do que outros processos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixas doses não são eficientes para eliminar determinados vírus, esporos e cistos. • Os microrganismos podem ser reativados ou recuperados no escuro. • Necessita de controle da formação de biofilmes nos reatores de contato. • É sensível à turbidez e sólidos suspensos totais no efluente. • É mais caro do que a cloração.