

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E CONTABILIDADE  
DE RIBEIRÃO PRETO  
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO

ALEXANDRE BEVILACQUA LEONETI

**Avaliação de modelo de tomada de decisão para escolha de  
sistema de tratamento de esgoto sanitário**

Ribeirão Preto  
2009

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Suely Vilela  
Reitora da Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Rudinei Toneto Júnior  
Diretor da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade  
de Ribeirão Preto

Prof. Dr. André Lucirton Costa  
Chefe do Departamento de Administração

ALEXANDRE BEVILACQUA LEONETI

**Avaliação de modelo de tomada de decisão para escolha de  
sistema de tratamento de esgoto sanitário**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração de Organizações da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do título de Mestre em Administração.

Orientadora: Profa. Dra. Sonia Valle Walter Borges de Oliveira

Ribeirão Preto  
2009

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

#### Catálogo na publicação

Leoneti, Alexandre Bevilacqua

Avaliação de modelo de tomada de decisão para escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário / Alexandre Bevilacqua Leoneti; Orientadora: Sonia Valle Walter Borges de Oliveira. Ribeirão Preto, (2009).

154 f. : fig.

Dissertação de Mestrado, apresentada à Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo.

1. Modelo. 2. Tomada de decisão. 3. Esgoto. 4. Águas residuárias. 5. Análise hierárquica de processos (AHP). 6. Equilíbrio de Nash. 7. Simulação

## ERRATA

(LEONETI, A.B.). **(Avaliação de modelo de tomada de decisão para escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário)**. (2009). (154 p.). Dissertação (Mestrado em Administração de Organizações) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, (2009).

| <b>página</b>   | <b>linha</b> | <b>onde se lê</b>       | <b>leia-se</b>          |
|-----------------|--------------|-------------------------|-------------------------|
| 14 (introdução) | 22           | (www.etex.fearp.usp.br) | (www.fearp.usp.br/etex) |

-----

## ERRATA

(LEONETI, A.B.). **(Avaliação de modelo de tomada de decisão para escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário)**. (2009). (154 p.). Dissertação (Mestrado em Administração de Organizações) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, (2009).

| <b>página</b>   | <b>linha</b> | <b>onde se lê</b>  | <b>leia-se</b>   |
|-----------------|--------------|--|--|
| 14 (introdução) | 22           | ( <a href="http://www.etex.fearp.usp.br">www.etex.fearp.usp.br</a> ) | ( <a href="http://www.fearp.usp.br/etex">www.fearp.usp.br/etex</a> ) |

-----

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### **Alexandre Bevilacqua Leoneti**

Avaliação de modelo de tomada de decisão para escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração de Organizações da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do título de Mestre em Administração.

Aprovado em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

### **Banca examinadora**

Nome: \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Nome: \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Nome: \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

*Dedico este trabalho aos meus pais,  
João e Mércia, à minha futura esposa Valquíria,  
aos meus irmãos Marcelo e Gerusa e aos meus  
avós Zulmira e Edécio (in memorian)*

## AGRADECIMENTOS

Eu já ouvi várias vezes, e até cheguei a concordar, que “aquele monte de agradecimentos” em uma conclusão de trabalho é uma grande “breguice”. No entanto, deixei este preconceito de lado, pois, se avaliarmos sinceramente, veremos que nós não conseguimos nada sozinhos e, desta forma, o agradecimento não é um “algo a mais”, mas sim é a prova desta constatação.

A experiência do mestrado é uma experiência tal como a vida é, cheio de surpresas. Algumas boas e outras ruins, mas que, no final das contas, vale a pena ter vivido. Portanto, primeiramente, e sem demagogias, agradeço a Deus por ter me dado a oportunidade de cursar o mestrado. Foi Dele que nasceu este anseio e foi Dele que provieram as condições físicas, mentais e espirituais para chegar até o seu fim.

Agradeço à Profa. Sonia, pela qual tenho uma grande estima e uma enorme admiração por sua forma de fazer da vida uma experiência de respeito, trabalho e dedicação, conciliando a família e a academia de uma forma exemplar. Pelas reuniões nas tardes de quinta-feira, pelas viagens que fizemos para apresentar trabalhos, pelas aulas, pelo apoio nas horas difíceis, posso afirmar que valeu a pena ter feito o mestrado somente por ganhar sua amizade. “Um amigo fiel é uma poderosa proteção: quem o achou, descobriu um tesouro.” (ECLESIASTICO 6,14)

Ao meu pai João e minha mãe Mércia, pelos quais aprendi ter força e coragem para trilhar por caminhos imaginados inexploráveis, “a força e a coragem nos levam por caminhos inexploráveis”, sinto-me imensamente grato por terem me ensinado além dessas “palavras mágicas”, a ter fé em Deus suficientemente grande para não me corromper nas trilhas destes caminhos. Pelo exemplo de vida, pelo amor dedicado em cada gesto, palavra, carinho, meus eternos agradecimentos.

À Valquiria, meu melhor presente, primeiramente pelo amor, carinho e por todos os momentos que com certeza foram e serão, mais hoje do que ontem, os melhores de minha vida. Tenho muita sorte em ter ao meu lado uma pessoa tão especial, com um coração tão lindo e cheio de Deus. Também agradeço imensamente pelo apoio que, desde a graduação até o mestrado, me inspiraram e me reanimaram, muitas vezes.

Também agradeço ao Wilson Basqueroto, ao meu amigo que me “orientou” nas primeiras linhas do meu primeiro projeto. Também ao Vitor e ao Charles, meus precedentes no mestrado, que tão pacientemente me ajudaram a escolher o tema do projeto.

Agradeço ao Prof. Pedro Nowosad, pela sua intercessão, e ao Prof. Evandro Eduardo Seron Ruiz, que adquiriu, em Nova York, na época de seu pós-doutoramento, um livro indisponível no Brasil, *How to model it*, que considerei de grande importância para esta pesquisa.

Agradeço aos engenheiros Renato Crivelenti e Adolfo Monteiro Moraes, do DAEE de Ribeirão Preto, que pelas diversas sugestões, apoio e dados fornecidos estiveram sempre presentes desde o começo desta pesquisa.

Aos engenheiros Tokio Hirata e Guilherme Diogo Júnior, do DAEE de São José do Rio Preto, pelos dados disponibilizados e pelas preciosas informações.

Ao Prof Dr. José Roberto Campos, da EESC-USP, pelas preciosas informações e pela indicação do Eng. Marco Antonio Moretti, que forneceu uma tabela de custos de construção da SINAPI.

Ao Prof. Dr. Marcos von Sperling, da UFMG, por toda a atenção em ter me recebido mesmo em uma época cheia de compromissos, pelo ótimo curso de modelagem e pelas dicas e sugestões para o aperfeiçoamento do modelo.

Ao Eng. Silvio Leifert, superintendente da SABESP em São Paulo, pela tabela de preços atualizada e pela disposição demonstrada em contribuir com a pesquisa.

Aos engenheiros Luciano Reami e Nathanael Silva Junior, da SABESP de Franca, que contribuíram com dados e com uma nova leitura de possibilidades de uso para o modelo em estudo. Ao Dr. João Comparini, por ter tornado possível esta oportunidade.

Aos engenheiros Leonardo Buim Barradas e Glauco Figueiredo da REDUR da Caixa Econômica Federal de Ribeirão Preto, por terem disponibilizado os dados e pelas dicas e sugestões para o modelo. Ao Dr. Paulo Lins, por ter tornado possível esta oportunidade.

Agradeço ao meu “companheiro de quarto”, o meu irmão Marcelo, por todas as vezes que foi dormir um pouco mais tarde para aguardar que eu terminasse sempre alguma coisa a mais da

dissertação. Agradeço à minha irmã Gersa por sempre ajudar-me nos momentos que eu precisava de alguma coisa.

Aos meus amigos de fé, Marina Massini, Daniel Benez, José Rafael Pereira, Vinicius Martins, Ronaldo Novaes, Wilson Basqueroto, Pes. Amauri, Julio, Valentin, Lauro e Moraes, que me ajudaram a não vacilar na fé durante o tempo de mestrado.

À FEA-RP, instituição que me acolheu e me deu todo o suporte para cursar o mestrado. Extensivo a todos os professores e funcionários.

Meus sinceros agradecimentos à FAPESP, pela confiança e pelo o apoio financeiro que foi fundamental para que fosse possível realizar tudo o que foi proposto nesta pesquisa.

## RESUMO

LEONETI, Alexandre Bevilacqua. **Avaliação de modelo de tomada de decisão para escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário**. 2009. 154 f. Dissertação (Mestrado em Administração de Organizações) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto – FEARP, Universidade de São Paulo – USP, 2009.

Uma solução para a preservação das águas é o investimento em saneamento e no tratamento do esgoto sanitário, que é realizado por meio de estações de tratamento de esgoto. Todavia, a escolha do sistema de tratamento a ser implantado em um município deve atender aos requisitos técnicos, ambientais, sociais e econômicos do mesmo. O objetivo principal desta pesquisa foi validar e avaliar a aplicabilidade de um modelo de tomada de decisão para escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário de menor custo econômico desenvolvido por Oliveira (2004). Este modelo elabora o dimensionamento de oito sistemas de tratamento e, a partir desses dados, faz a estimativa do custo de implantação, manutenção e operação de cada sistema. Para esta avaliação, foram realizadas entrevistas em órgãos relacionados a saneamento no Brasil, bem como com tomadores de decisão e especialistas em saneamento, a fim de coletar os dados necessários para aplicação de testes com o modelo. No total, foram coletados dados de 61 projetos de estações de tratamento de esgoto, os quais foram utilizados nos testes realizados. Durante a avaliação do modelo, foram utilizadas técnicas como simulação, análise hierárquica de processos e equilíbrio de Nash, além de serem realizados ajustes nos custos do modelo, nas variáveis utilizadas, nos sistemas de tratamento, dentre outras, totalizando 12 novas versões até a final, denominada “ETEX-FEARP”. Com base nas análises realizadas neste trabalho, considera-se o modelo adequado para proporcionar uma visão global no planejamento dos investimentos, bem como para estudos de concepções de estações de tratamento, auxiliando o tomador de decisão na escolha do sistema, com base em critérios econômicos, ambientais e técnicos.

Palavras-chave: Modelo de tomada de decisão. Tratamento de águas residuárias. Análise Hierárquica de Processos (AHP). Equilíbrio de Nash. Simulação.

## ABSTRACT

LEONETI, Alexandre Bevilacqua. **Evaluation of decision-making model to choice system for treatment of sewage**. 2009. 154 f. Dissertação (Mestrado em Administração de Organizações) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto – FEARP, Universidade de São Paulo – USP, 2009.

A solution for the preservation of the water is the investment in sanitation and in the treatment of sanitary sewer, which is accomplished through sewer treatment stations. However, the choice of the treatment system to be implanted in a municipal district should meet its technical, environmental, social and economical requirements. The main objective of this research was to validate and to evaluate the applicability of a decision making model to choose the system of sanitary sewer treatment with the lowest economical cost developed by Oliveira (2004). This model elaborates the sizing of eight treatment systems, and then it estimates the implantation cost, maintenance and operation of each system. For this evaluation, interviews were performed in institutions related to sanitation in Brazil, as well as with decision makers and specialists in sanitation, in order to collect the necessary data for application of tests with the model. In the total, data from 61 projects of sewer treatment stations were collected, which were used in the accomplished tests. During the evaluation of the model, techniques such as simulation, hierarchical analysis of processes and Nash equilibrium were used. In addition, changes have been made in the costs of the model, in the used variables, in the treatment systems, among others, totaling 12 new versions, and the final version, was denominated "ETEX-FEARP". Based on the analysis done in this research, the model is considered appropriate to provide a global vision in the planning of the investments, as well as for studies of conceptions of treatment stations, helping the decision maker choose the system, based on economical, environmental and technical criteria.

Keywords: Decision making model. Wastewater treatment. Analytic Hierarchy Process (AHP). Nash equilibrium. Simulation.

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO .....  | 12 |
| 2 OBJETIVOS .....   | 16 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....   | 17 |
| 3.1 Atual situação do saneamento básico no Brasil.....                          | 17 |
| 3.2 Técnicas de apoio à tomada de decisão clássicas .....                       | 22 |
| 3.3 Técnicas de apoio à tomada de decisão multicritérios .....                  | 24 |
| 3.3.1 Análise Hierárquica de Processos .....                                    | 25 |
| 3.4 Modelos de apoio à tomada de decisão .....                                  | 29 |
| 3.5 Modelos de apoio à tomada de decisão aplicados ao tratamento de esgoto..... | 30 |
| 3.6 Modelo de apoio à tomada de decisão Oliveira (2004).....                    | 32 |
| 3.7 Simulação de modelos.....   | 34 |
| 3.7.1 Simulação de Monte Carlo .....  | 35 |
| 3.8 Teoria dos jogos e equilíbrio de Nash.....                                  | 36 |
| 3.9 Análise de agrupamentos.....  | 38 |
| 4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....   | 39 |
| 4.1 Fase de ajustes no modelo Oliveira (2004) e teste piloto.....               | 40 |
| 4.2 Fase de avaliação do modelo Oliveira (2004) .....                           | 41 |
| 4.3 Etapas da pesquisa.....   | 43 |
| 5 AJUSTES INICIAIS NO MODELO OLIVEIRA (2004) E TESTE PILOTO .....               | 45 |
| 5.1 Variáveis de entrada excluídas.....   | 47 |
| 5.2 Atualização da tabela de custo de construção e de equipamentos .....        | 47 |
| 5.3 Teste de simulação com o modelo Oliveira (2004) .....                       | 51 |
| 5.3.1 Correção do cálculo do número de aeradores dos sistemas.....              | 52 |
| 5.3.2 Correção do cálculo da área dos sistemas .....                            | 53 |
| 5.3.3 Correção da estimativa do custo de implantação dos sistemas.....          | 55 |
| 5.4 Padronização dos parâmetros.....  | 56 |
| 5.5 Variável “Tipo de solo” .....   | 59 |
| 5.6 Teste piloto .....  | 60 |
| 6 AVALIAÇÃO DO MODELO OLIVEIRA (2004) .....                                     | 67 |
| 6.1 Versões adaptadas do modelo Oliveira (2004) .....                           | 67 |
| 6.2 Verificação dos sistemas do modelo Oliveira (2004) .....                    | 68 |
| 6.3 Verificação da adequação do modelo Oliveira (2004) à legislação.....        | 70 |
| 6.4 Verificação das variáveis de entrada do modelo Oliveira (2004).....         | 71 |

|  |     |
|--|-----|
| 6.5 Análise quantitativa.....  | 72  |
| 6.5.1 Simulação .....  | 72  |
| 6.5.2 Análise de sensibilidade .....   | 76  |
| 6.5.3 Relação custo/habitante e custo/m <sup>3</sup> /d.....                       | 84  |
| 6.6 Análise qualitativa.....   | 89  |
| 6.6.1 Equilíbrio de Nash.....  | 89  |
| 6.6.2 Análise hierárquica de processos .....                                       | 93  |
| 6.6.3 Opinião dos tomadores de decisões .....                                      | 101 |
| 6.7 Possíveis aplicações do modelo Oliveira (2004) .....                           | 103 |
| 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....   | 110 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....  | 115 |
| APÊNDICE A – Dados coletados nos projetos de estações de tratamento de esgoto..... | 120 |
| APÊNDICE B – Questionário para coleta de julgamentos.....                          | 123 |
| APÊNDICE C – Versões do modelo Oliveira (2004) .....                               | 127 |
| APÊNDICE D – Pré-projeto de Fortaleza de Minas (MG).....                           | 131 |

## 1 INTRODUÇÃO

Devido à disseminação do uso de computadores, o processo de tomada de decisão vem ganhando sofisticação e eficácia. Várias técnicas que inicialmente eram de difícil implementação e execução, hoje podem ser satisfatoriamente aplicadas com a utilização de um microcomputador e uma planilha eletrônica.

Com a demanda crescente de água para o consumo humano e a conseqüente diminuição da quantidade de água potável ou de água que possa se tornar potável disponível para esta finalidade, a consideração dos impactos ambientais causados pelos sistemas humanos vem se tornando cada vez mais relevantes nas decisões das empresas e dos governos, seja por conscientização dos administradores destas organizações, seja por pressão das populações atendidas por elas.

O esgoto sanitário, que nos últimos anos tem tido persistentes aumentos em sua produção, seja pelo aumento das populações ou pelo maior consumo de água, também tem piorado sua qualidade devido ao aumento da variedade de despejos que lhos compõe. Este resíduo das atividades humanas é um dos principais problemas na preservação das águas no Brasil, pois, pelo menos em grande parte do país, o mesmo ainda é lançado *in-natura* nos corpos de água, gerando problemas de poluição e até de contaminação, devido à presença de tóxicos e/ou patogênicos.

Uma solução para a preservação dessas águas é o investimento em saneamento e no tratamento do esgoto sanitário, que é realizado por meio de estações de tratamento de esgoto que reproduzem, em um menor espaço e tempo, a capacidade de autodepuração dos cursos d'água. As águas recuperadas por estas estações possuem uma grande variedade de aplicações, dentre elas: (i) irrigação de campos de esportes, praças, etc.; (ii) usos paisagísticos; (iii) descarga de toaletes; (iv) combates a incêndios; (v) lavagem de automóveis; (vi) limpeza de ruas; (vii) usos na construção (PROSAB, 2006), o que contribui

para a diminuição do uso de água potável para estes fins, além de gerar externalidades positivas sobre a saúde e o meio-ambiente (TONETO JUNIOR, 2004, p. 31).

Para a escolha de um sistema de tratamento de esgoto, além de considerar os custos de implantação e os benefícios ambientais gerados a partir dos processos de tratamento existentes, devem ser considerados os custos de operação e manutenção e os “impactos ambientais negativos, reversíveis ou não, passíveis de mitigação ou não, em menor ou maior grau, em função do processo de tratamento que vier a ser adotado” (URBAGUA, 2003), ou seja, a eficiência ecológica e econômica deve ser alcançada.

Nagel e Meyer (1999) defendem que não deveria existir uma lacuna entre ecologia e economia. Eles argumentam que as soluções ecológicas geralmente levam às econômicas, uma vez que a redução do consumo de matérias-primas e de energia, reciclagem ou reutilização de produtos são, ao mesmo tempo, ecológicas e econômicas. No entanto, o processo para se atingir esse ideal ecológico-econômico é complexo e deverá estar adaptado à realidade da legislação ou certificação a que deverá atender.

Nesse sentido, Oliveira (2004) desenvolveu um modelo baseado em técnicas de tomada de decisão para auxiliar na escolha de estações de tratamento de esgoto para municípios. O modelo foi desenvolvido em uma planilha eletrônica e apresenta, a partir de algumas poucas variáveis de entrada, os cálculos dos custos de implantação, operação e manutenção de oito tipos diferentes de sistemas de tratamento de esgoto, sendo eles apresentados por meio de uma árvore de decisão quantitativa, onde pode ser visualizada a alternativa com o menor custo dentre as demais.

Todavia, no processo de sua concepção, esse modelo foi testado apenas para quatro casos distintos da literatura, o que tornava necessária a ampliação de testes, tanto no sentido de se trabalhar com casos reais, como de se ter um número maior de respostas do modelo para o aprimoramento do mesmo.

Esta pesquisa teve como objetivo principal efetivar a aplicabilidade do modelo para escolha de sistema de tratamento de esgoto desenvolvido por Oliveira (2004), o que foi alcançado por meio de ajustes nos parâmetros do modelo que se mostraram necessários a partir de simulações e análises estatísticas, além e de entrevistas com pesquisadores e profissionais da área de hidráulica e saneamento.

Algumas possíveis aplicações do modelo Oliveira (2004) foram testadas, como a criação de um projeto de concepção de estação de tratamento de esgoto para o município de Fortaleza de Minas, que foi apresentado à Câmara Municipal do referido município, e a integração com um modelo de qualidade das águas de rios, desenvolvido pelo Prof. Dr. Marcos von Sperling, da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Para isto foram atualizados os custos do modelo com base em oito novas tabelas de custos disponibilizadas por agências estaduais ligadas à construção civil, além da prefeitura de São Paulo.

Para avaliar a qualidade das respostas do modelo, a ele se implantou uma ponderação qualitativa, por meio da metodologia de análise hierárquica de processos (AHP) – proposta por Thomas L. Saaty, na década de 1970, o que permitiu inserir os julgamentos de tomadores de decisão no processo de escolha do modelo. Além disto, também foi incorporada uma tabela de pagamentos para avaliar, por meio do equilíbrio de jogos proposto por Nash (1951), quais seriam as alternativas que, concomitantemente, pudessem atender aos critérios de menor custo e de maior eficiência,

Por fim, o modelo Oliveira (2004) recebeu um nome para sua identificação, passando a ser denominado “ETEX-FEARP” e foi disponibilizado em uma página da Internet (<http://www.etex.fearp.usp.br>), por onde podem ser solicitados os orçamentos das oito alternativas de estações de tratamento de esgoto.

A apresentação do trabalho foi dividida em duas partes. A primeira, com aspecto quantitativo, descreve os testes e ajustes realizados no modelo, bem como as análises

estatísticas realizadas para verificar a adequação do modelo com os dados coletados de projetos. A segunda, com aspecto qualitativo, descreve os testes aplicados para se verificar a qualidade das respostas do modelo e a avaliação de especialistas da área de hidráulica e saneamento quanto aos seus usos.

Segundo Souza (1998) existem, fundamentalmente, dois tipos de abordagens metodológicas para auxiliar na seleção de processos de tratamento de águas residuárias: (i) a econômica; e (ii) a de tecnologia apropriada. O desenvolvimento desta pesquisa pretendeu oferecer um auxílio quanto à abordagem econômica, para que os tomadores de decisão envolvidos na preservação da qualidade das águas no Brasil possam avaliar diferentes alternativas para a implantação de estações de tratamento de esgotos economicamente adequadas.

## 2 OBJETIVOS

A presente pesquisa visou verificar a validade e a aplicabilidade do modelo desenvolvido por Oliveira (2004), a fim de oferecer auxílio aos tomadores de decisão na administração dos municípios brasileiros na escolha do sistema de tratamento de esgoto, levando em consideração a otimização técnica e da administração quantitativa dos recursos ambientais e financeiros disponíveis.

Os objetivos específicos foram:

- criar um banco de dados com informações das unidades de tratamento já implantadas (fontes DAEE, SABESP, ANA, ASSEMAE, OUTROS);
- verificar se os sistemas de tratamento constantes no modelo são os mais utilizados no Brasil;
- verificar como foram escolhidos os sistemas de tratamento que já estão definidos em alguns municípios;
- verificar se as variáveis do modelo são compatíveis com a disponibilidade de dados dos municípios;
- testar o modelo de Oliveira (2004) com dados reais coletados;
- verificar se há tendências de respostas em relação a faixas de população;
- avaliar se há necessidade de inserir “nós” de riscos na árvore de decisão;
- verificar se é necessário inserir outros tipos de sistemas de tratamento no modelo;
- avaliar qualitativamente as respostas do modelo com o auxílio dos julgamentos de especialistas na área de hidráulica e saneamento;
- complementar o modelo com os itens necessários;
- auxiliar os municípios na escolha de seu sistema de tratamento de esgoto.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

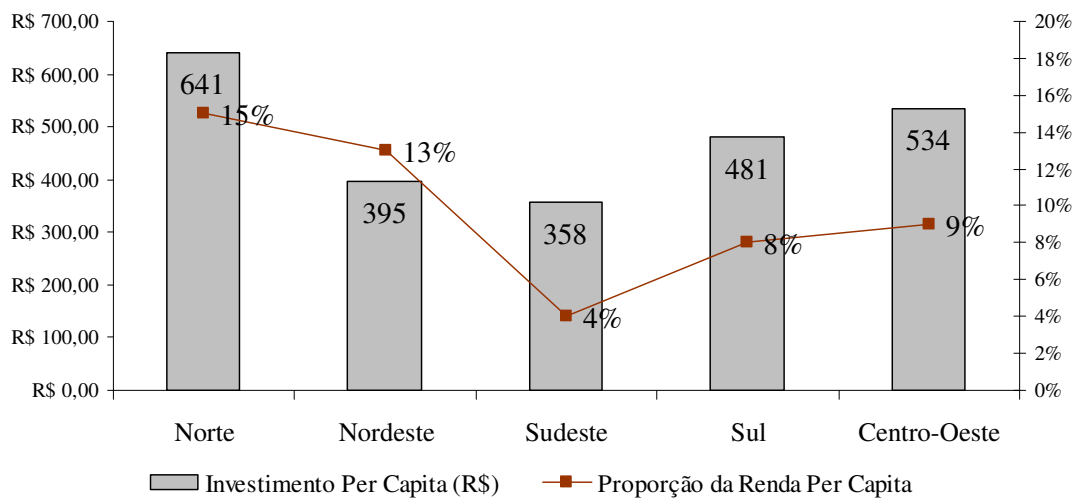
#### 3.1 Atual situação do saneamento básico no Brasil

O saneamento básico no Brasil ainda pode ser considerado muito precário. Segundo dados do Sistema Nacional de Informações em Saneamento (SNIS, 2007), em 2006, o índice médio de atendimento urbano mostrava valores relativamente elevados, em termos de abastecimento de água, com um índice médio nacional de 93,1%. Porém, em termos de esgotamento sanitário, o atendimento urbano com coleta era muito escasso, tendo um índice médio nacional de 48,3%, e um índice médio nacional de apenas 32,2% para o tratamento deste esgoto coletado. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2007), no Brasil, quase todo o esgoto sanitário coletado nas cidades ainda é despejado *in-natura* em corpos de água ou no solo, principalmente em municípios com população inferior a 30 mil habitantes.

A figura 3.1 apresenta o total de investimento necessário para universalização do saneamento básico no Brasil, tendo como referência o ano 2000 quando o déficit do tratamento de esgoto era ainda de 70% do total de esgoto coletado, e explicita a desigualdade regional causada pela menor capacidade de pagamento da população nas regiões Norte e Nordeste em comparação com as outras regiões, “o déficit está intimamente relacionado ao perfil de renda dos consumidores” (SAIANI, 2007, p. 263).

Em números absolutos, para se alcançar a universalização dos serviços de água e esgoto no Brasil seria necessário ser investido por volta de R\$ 11 bilhões anualmente desde o ano de 2006 até o ano de 2024 (AESBE, 2006). Todavia, de acordo com os dados do SNIS (2007), em 2006, o total de investimentos efetivamente realizados no setor saneamento brasileiro foi de apenas R\$ 4,5 bilhões (sendo R\$ 1,8 bilhões em esgoto). Quando considerado o período de 2003 a 2006, o total de investimentos chega a apenas R\$ 15,6 bilhões em valores

atualizados para dezembro de 2006, utilizando-se o IPCA.



**Figura 3.1 – Investimento necessário para universalização do saneamento em 2000**

Fonte: Adaptado de AESBE (2006)

Este déficit de investimentos é ocasionado, em grande parte, pela “fragmentação das responsabilidades e dos recursos federais, indefinições regulatórias e irregularidades contratuais” (SAIANI, 2007, p. 262). Estes problemas dificultam a qualidade dos investimentos e a participação privada no setor de saneamento. Segundo Toneto Junior (2004, p. 178), pode-se afirmar que, apesar de apresentar praticamente todas as características dos demais setores de infra-estrutura, “o setor de saneamento básico é o que ainda apresenta a menor participação do setor privado”. Segundo os dados da Associação das Empresas de Saneamento Básico Estaduais (AESBE, 2006), em 2006, mais de 95% dos serviços de saneamento eram realizados por organizações do setor público, ou seja, menos de 5% dos serviços de saneamento eram realizados por empresas do setor privado.

Atualmente, por meio de políticas de saneamento ambiental e o afrouxamento das regras de acesso ao setor privado, o setor de saneamento tem recebido considerável atenção e incremento de investimentos tanto do setor privado, viabilizado pelas Parcerias Público-Privadas – PPP’s – e recursos próprios, quanto do setor público, por meio de recursos dos fundos de Garantia do Tempo de Serviço (FGTS), de Amparo ao Trabalhador (FAT), do

Orçamento Geral da União (OGU) e de programas como o Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas (PRODES), que paga aos municípios pelo esgoto efetivamente tratado (ANA, 2008).

Segundo os dados da Associação Brasileira das Concessionárias Privadas de Serviços Públicos de Água e Esgoto (ABCON, 2008a), a participação do setor privado responde hoje em torno de 9,6% pelo atendimento nos serviços públicos de água e esgoto da população urbana no Brasil, com 198 concessões em 202 municípios (ABCON, 2008b). Ainda conforme dados consolidados divulgados pela ABCON (2008b), estão previstos investimentos do setor privado em saneamento da ordem de R\$ 1,4 bilhões, no período de 2008 a 2012.

De acordo com o Ministério das Cidades (2007), desde 2007 estão sendo disponibilizados mais de R\$ 40 bilhões para investimento em saneamento até o ano 2012, divididos em: R\$ 12 bilhões do OGU; R\$ 20 bilhões do FGTS/FAT e R\$ 8 bilhões investidos pelos estados, municípios e prestadores dos serviços. Deste montante, foi definido como uma das prioridades pela Fundação Nacional da Saúde (FUNASA) – em conjunto com o Ministério das Cidades e da Integração Nacional, o saneamento em municípios com população total de até 50 mil habitantes (FUNASA, 2008). Em 2007, o montante de recursos investidos em saneamento básico (total de onerosos e não onerosos) foi de, aproximadamente, R\$ 10,4 bilhões, sendo 69,73% oriundos do OGU e 30,26% de financiamentos (MC, 2008a).

Espera-se que mais 24,5 milhões de brasileiros passem a ter água encanada, 25,4 milhões, coleta e tratamento de esgotos e 31,1 milhões, coleta e destinação adequada de resíduos sólidos (ASSEMAE, 2007), o que fará o país alcançar significativo avanço na meta comprometida com a Organização das Nações Unidas (ONU) em diminuir para a metade o número de pessoas sem saneamento básico até o ano de 2015 (PNUD, 2008), tendo por base o ano de 1990. No entanto, ainda em relação ao tratamento de esgoto, a probabilidade do Brasil em cumprir este objetivo, o sétimo dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), é

de apenas 30% (PMSS, 2007).

Não somente a escassez de recursos e a falta de financiamento foram as causas do atraso no desenvolvimento do setor de saneamento no Brasil (BNDES, 2008b). Esse déficit se deve, além dos problemas relacionados à restrição de recursos financeiros, à falta de avaliação dos custos, ambientais, econômicos e sociais relacionados à implantação, operação e manutenção dos investimentos, ou seja, por não levar em consideração a sustentabilidade dos mesmos. Segundo Klevas, Streimikiene, e Kleviene (2009), a cultura do desenvolvimento econômico é ainda resistente em considerar o conceito de desenvolvimento sustentável no processo de tomada de decisão.

Conforme os dados consolidados do SNIS (2007), em 2006, dos 4,5 bilhões investidos em saneamento: 49% foram realizados com recursos próprios das organizações de saneamento; 29% foram realizados com recursos onerosos (financiamentos retornáveis por meio de amortizações, juros e outros encargos); e 10% foram realizados com recursos não onerosos (investimentos realizados com recursos não reembolsáveis, que não oneram o serviço da dívida). Todavia, em muitos desses investimentos, não foram considerados os custos de operação e manutenção dos sistemas, sendo considerados somente os seus custos de implantação, e isto faz com que “as despesas totais de tais prestadores de serviços deixe de contemplar um elemento de custo importante, necessário à reposição dos investimentos.” (SNIS, 2007, p. 113).

No Brasil, a lei 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, prevê que os serviços públicos de saneamento básico devem, entre outros princípios, alcançar a eficiência e sustentabilidade econômica. Este desafio, a ser enfrentado pelos municípios brasileiros, demanda atuação consistente e multidisciplinar para que seja superado de forma sustentável (BNDES, 2008a). Segundo Zuffo (1998, p. 5), “com a implantação no País de gestão dos recursos hídricos, considerando as bacias hidrográficas

como unidades de gerenciamento, haverá grande necessidade de ferramentas que venham a auxiliar os órgãos administradores a realizar tal atividade”.

Consta como um dos principais objetivos da resolução 62 de 3 de dezembro de 2008, denominada Pacto Pelo Saneamento Básico, que antecede a elaboração do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB), a ser elaborado entre fevereiro de 2009 a maio de 2010, que, quanto à gestão dos serviços de saneamento, o PLANSAB:

[...] deverá buscar o desenvolvimento de mecanismos de gestão dos serviços e incentivar o desenvolvimento de modelos alternativos de gestão que permitam alcançar níveis crescentes de eficiência e eficácia e a sustentabilidade social, ambiental, econômica e financeira do saneamento básico [...] (MC, 2008b, p.7)

Faz-se necessário um auxílio aos tomadores de decisão quanto à avaliação das alternativas possíveis considerando a sustentabilidade dos investimentos. De acordo com os objetivos propostos pela Associação Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento (ASSEMAE), existe a necessidade de se desenvolver o saneamento no Brasil, trazendo contribuições técnicas que possam auxiliar esse desenvolvimento, baseadas “no desenvolvimento e divulgação de pesquisas tecnológicas, incentivando programas de melhoria da qualidade do saneamento ambiental” (ASSEMAE, 2006).

Segundo Moreira (2002) a utilização de modelos permite que as organizações se tornem pró-ativas, ou seja, que as organizações possam atuar antes de serem atingidas por conseqüências advindas do mercado no qual elas estão inseridas, pois elas passam a ter condições de testar os resultados de suas decisões antes de colocá-las em prática. Por exemplo, um aumento do preço pago pelo consumo de energia elétrica pode afetar negativamente as organizações que são muito dependentes deste insumo, o que poderia tornar outras alternativas de produção mais interessantes, sendo que isto poderia ser verificado com o auxílio de modelos. No entanto, na ausência de uma ferramenta deste tipo, as organizações se tornam reativas, ou seja, as organizações só atuam após receberem os impactos negativos

do mercado, não tendo como testarem as decisões a tomar e, muitas vezes, tomando decisões que agravam o problema ou impossibilitam de sair dele.

Um planejamento consistente dos recursos a serem investidos, baseados na utilização de técnicas e modelos adequados para este fim, torna-se indispensável em países com poucos recursos como o Brasil. Isto porque “a função principal desses instrumentos é determinar a prioridade de um projeto, por meio de uma análise comparativa dos usos alternativos, que os recursos investidos possam ter” (ZUFFO, 1998).

Com a validação de um modelo de tomada de decisão, que permite por meio de uma análise comparativa de sistemas alternativos de tratamento de esgoto alcançar uma melhoria na qualidade dos recursos investidos, a presente pesquisa oferece uma ferramenta de auxílio aos gestores para que as cidades brasileiras, que ainda não possuem sistemas de tratamento de esgoto ou que possuam um sistema inadequado ou insuficiente, tomem uma decisão financeira e ambientalmente correta, visando ao desenvolvimento sustentável.

### **3.2 Técnicas de apoio à tomada de decisão clássicas**

Ferramentas muito utilizadas para a análise e cálculo de alternativas no processo de tomada de decisão são: árvore de decisão, análise de sensibilidade e diagrama de tornado.

A técnica da árvore de decisão considera as decisões e as chances de ocorrerem certos eventos por meio de cálculo do valor monetário esperado (VME) para cada alternativa. É um grafo composto por nós quadrados que representam as decisões a serem tomadas e nós em forma de círculos que representam as chances de cada alternativa (CLEMEN, 1996). Este grafo pode ser visto como um fluxo de decisão seqüencial, onde na extrema direita estão os resultados condicionais e em suas ramificações a probabilidade esperada (COOPER; SCHINDLER, 2003, p. 571). Segundo Shimizu (2006), a árvore de decisão pode estruturar de maneira bastante clara qualquer problema de decisão, pois identifica as alternativas, as

variáveis e os cenários possíveis. Essa técnica tem sido amplamente utilizada em vários tipos de problemas operacionais (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

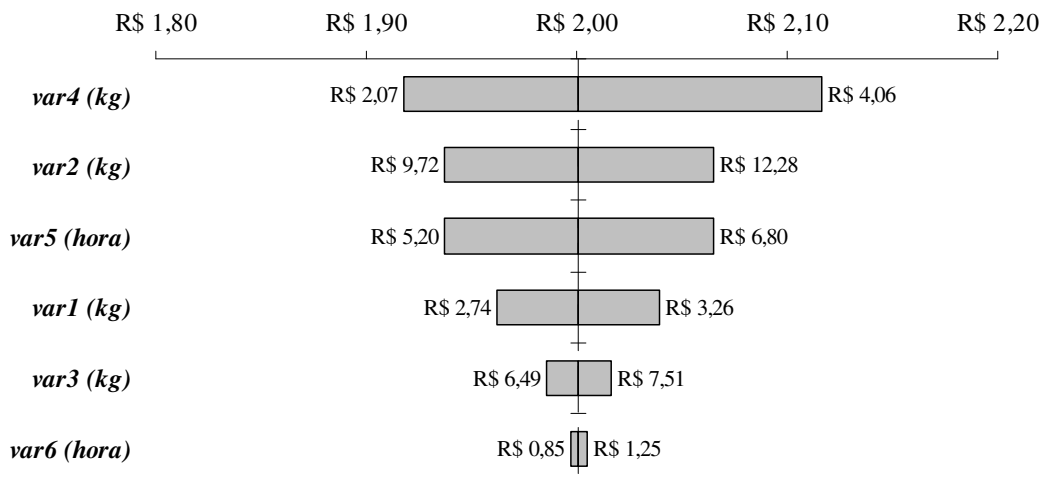
A análise de sensibilidade, conhecida também por análise *what-if*, avalia como mudanças nos elementos de um modelo podem afetar a solução ótima (WINSTON, 1994). Pode ser considerada como uma técnica de melhoria de processo, pois identifica os componentes críticos do problema. De acordo com Lachtermacher (2004, p. 168) existem dois tipos de análise de sensibilidade: (i) a que estabelece limites inferiores e superiores para todos os coeficientes do problema, mas que avalia apenas uma alteração a cada vez; e (ii) a que também estabelece limites inferiores e superiores e avalia mais de uma alteração simultaneamente. O primeiro tipo de análise pode ser realizado automaticamente no Excel<sup>®</sup>, pelo módulo Solver. Já o segundo tipo exige a execução de softwares específicos, dentre eles o Crystal Ball<sup>®</sup>, da Oracle<sup>™</sup>, e o Decision Tools<sup>®</sup>, da Palisade<sup>™</sup>.

Após se realizar uma análise de sensibilidade, a avaliação das variáveis pode ser verificada a partir de um diagrama de tornado. Esta prática se torna recomendável quando existem muitas variáveis envolvidas, pois organiza os dados de uma maneira que se pode entender de imediato (HILLIER; LIEBERMAN, 2006). O gráfico formado por este diagrama tem o aspecto de um tornado, já que é um gráfico de barras horizontais, cujas barras superiores são mais largas, por representar as variáveis mais impactantes, e as inferiores mais estreitas, ou menos impactantes, e permite comparar os efeitos de todas as variáveis nos resultados.

A figura 3.2 apresenta um diagrama de tornado gerado a partir da análise de sensibilidade realizada em uma função-objetivo, para estimar qual o custo de produção de um determinado produto. A função-objetivo utilizada, representada pela equação 1, é composta pelas quantidades de cada matéria-prima, como constantes, e seu custo variável, em reais. A análise de sensibilidade realizada foi do segundo tipo, conforme classificado por

Lachtermacher (2004, p. 168), ou seja, todas as variáveis receberam um limite inferior e superior e foram avaliadas concomitantemente, a partir de mil cenários diferentes gerados pelo *software* Crystal Ball<sup>®</sup>.

$$\text{custo\_total} = 0,15.\text{var1} + 0,05.\text{var2} + 0,03.\text{var3} + 0,1.\text{var4} + 0,08.\text{var5} + 0,02.\text{var6} \quad (1)$$



**Figura 3.2 – Exemplo de um diagrama de tornado**

Fonte: próprio autor

Como evidenciado pela figura, a utilização de um diagrama de tornado facilita a identificação das variáveis de maior impacto na função-objetivo. No exemplo ilustrado, a variável “var4” é o item cujo custo seria o maior responsável na variação do custo de produção total.

### 3.3 Técnicas de apoio à tomada de decisão multicritérios

Alguns tipos de problemas mais complexos, principalmente àqueles com múltiplos critérios e objetivos, exigem uma abordagem diferenciada em seu tratamento, pois os métodos baseados apenas na otimização matemática ou na programação linear, programação dinâmica, programação geométrica, entre outros, podem ser “inadequados para tratar o caso do problema com múltiplos critérios e variáveis qualitativas” (SHIMIZU, 2006, p. 275).

De acordo com Gomes, Gomes e Almeida (2006), até a primeira metade do século XX a esperança matemática era utilizada para a tomada de decisão em condições aleatórias. Na década de 50, deu-se ênfase à solução dos problemas utilizando a Pesquisa Operacional. Na década de 60, foram utilizados métodos probabilísticos para a tomada de decisão e, somente a partir dos anos 70, começaram a surgir os primeiros métodos para os problemas de decisão em ambiente multicritério ou multiobjetivo. Atualmente, esses métodos estão sendo “suplantados por métodos cuja matemática é menos complexa, cuja transparência é inegavelmente maior e são corretos do ponto de vista científico” (GOMES; GOMES; ALMEIDA, 2006, p. 56).

Gomes, Gomes e Almeida (2006, p. 59) consideram que “os métodos de apoio multicritério, procuram esclarecer o processo de decisão, tentando incorporar os julgamentos de valores dos agentes, na intenção de se acompanhar como se desenvolvem as preferências”. Zuffo (1998) já observava que não se utilizam estes métodos multicritérios na avaliação de projetos, sendo a análise de custo/benefício a principal ferramenta utilizada.

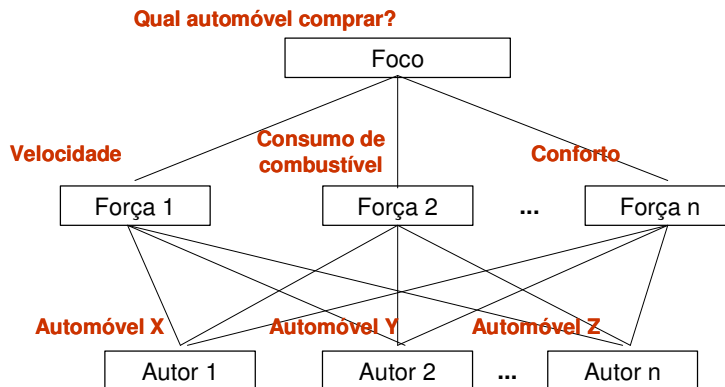
### **3.3.1 Análise Hierárquica de Processos**

A Análise Hierárquica de Processos – *Analytic Hierarchy Process* (AHP) – é um método multicritério de apoio a tomada de decisão desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1970, considerado atualmente um dos mais comentados e aplicados métodos na prática das decisões multicritério (SHIMIZU, 2006), que permite a modelagem de problemas não-estruturados nas atividades econômicas, sociais e gerenciais. Um problema não estruturado é aquele para o qual não existem soluções através de algoritmos bem definidos, o que o torna dificilmente tratável por computador (PORTO; AZEVEDO, 1997).

Segundo Saaty (1991, p. 1), “para sermos realistas, nossos modelos têm de incluir e medir todos os fatores importantes, qualitativa e quantitativamente mensuráveis, sejam eles

tangíveis ou intangíveis”. Por exemplo, é difícil considerar em unidades monetárias valores relacionados à moral ou imagem pública (COOPER; SCHINDLER, 2003). A utilização do método AHP torna possível a criação de uma escala de medida que permite avaliar equivalências entre dinheiro, qualidade ambiental, saúde, felicidade e outros “valores sociais de nossa sociedade complexa” (SAATY, 1991, p. 4).

Basicamente, este método consiste em hierarquizar “n” alternativas de acordo com “m” objetivos (BRAGA; GOBETTI, 1997). Saaty (1991) propõe o seguinte método para estruturar problemas de forma hierárquica: (i) listar conceitos ao problema sem uma relação de ordem; (ii) tentar deixar os objetivos principais no topo da hierarquia, seguidos dos sub-objetivos e as forças limitantes. O melhor resultado possível é alcançado quando no topo da hierarquia se encontra o objetivo principal ou foco, nas ramificações se encontram os sub-objetivos ou forças e nos extremos os fatores de avaliação ou autores. “Uma hierarquia bem construída será, na maioria dos casos, um bom modelo da realidade” (SAATY, 1991, p. 15). A figura 3.3 apresenta um problema semi-estruturado que foi organizado de forma hierárquica. A complexidade deste problema, que justificaria a utilização do AHP, encontra-se na mensuração da variável “Conforto”, que é uma variável qualitativa.



**Figura 3.3 – Exemplo de um problema em forma hierárquica**

Fonte: próprio autor

Após a hierarquização do problema, é necessário mensurar com qual intensidade os

elementos em um nível influenciam os elementos do nível mais alto seguinte. Para determinar esta intensidade, deve-se comparar par a par todos os elementos, utilizando para isto uma escala numérica de 1 à 9, onde 1 é assumido quando se considera que os elementos influenciam igualmente o nível mais alto e 9 é assumido quando se considera que o primeiro elemento influencia no nível mais alto absolutamente mais do que o segundo elemento. No intervalo de 1 à 9, os números ímpares representam: (1) iguais; (3) o primeiro influencia um pouco mais; (5) o primeiro influencia mais; (7) o primeiro influencia muito mais; e (9) o primeiro influencia absolutamente mais; e os números pares são valores intermediários entre um e outro.

A partir da atribuição das intensidades, que é realizada por meio de entrevistas com tomadores de decisão com o auxílio de um questionário de coleta de julgamentos, o próximo passo é a criação de uma matriz que receberá os dados que foram coletados nessas entrevistas. Os dados coletados são as comparações par a par entre todos os elementos, baseados na escala de 1 à 9. Desta forma, os elementos  $m(A,B)$  da matriz indicarão a intensidade relativa atribuída pelo tomador de decisão, através da escala, entre um objetivo “A” e outro objetivo “B”. Uma vez selecionado o valor de  $m(A,B)$ , segue imediatamente que  $m(B,A) = 1/m(A,B)$  (BRAGA; GOBETTI, 1997). Por exemplo, se na comparação entre um elemento “A” e outro elemento “B” fosse considerado que “A” influencia muito mais no nível superior do que “B”, o elemento  $m(A,B)$  da matriz receberia o valor 7 e o elemento  $m(B,A)$  receberia  $1/7$ . O contrário, ou seja, caso fosse considerado que “B” influencia muito mais no nível superior do que “A”, o elemento  $m(A,B)$  da matriz receberia o valor  $1/7$  e o elemento  $m(B,A)$  receberia 7. A diagonal principal da matriz recebe o valor 1. O quadro 3.1 apresenta o exemplo de uma questão de um questionário de coleta de julgamentos e a tabela 3.1 apresenta a matriz gerada a partir dos dados coletados.

Comparando em cada linha as variáveis da coluna 1 com as variáveis da coluna 2, em sua opinião, qual delas lhe proporciona **maior** satisfação em um automóvel?

Utilize a escala:

- (1) iguais;  
 (3) causa pouco mais satisfação;  
 (5) causa mais satisfação;  
 (7) causa muito mais satisfação;  
 (9) absolutamente mais;

| Variáveis (coluna 1)   | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | Variáveis (coluna 2)   |
|------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|------------------------|
| Velocidade             |   |   |   |   | X |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Consumo de combustível |
| Velocidade             | X |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Conforto               |
| Consumo de combustível |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | X |   | Conforto               |

**Quadro 3.1 – Exemplo de uma questão do questionário de coleta de julgamentos**

Fonte: próprio autor

**Tabela 3.1 – Exemplo de uma matriz gerada a partir da coleta de dados**

|                        | Velocidade | Consumo de combustível | Conforto |
|------------------------|------------|------------------------|----------|
| Velocidade             | 1          | 5                      | 9        |
| Consumo de combustível | 1/5        | 1                      | 1/7      |
| Conforto               | 1/9        | 7                      | 1        |

Fonte: próprio autor

Tendo sido criada a matriz, calcula-se o seu vetor de prioridades. Matematicamente, o autovetor principal da matriz, quando normalizado, torna-se o vetor de prioridades. Para normalizar o autovetor, basta dividir cada componente do autovetor pela soma de seus componentes. Faz-se o mesmo processo de nível a nível entre todos os elementos pertencentes a cada nível. Cada elemento deverá possuir uma matriz e um vetor prioridade para cada outro elemento a ele submetido hierarquicamente. De acordo com Shimizu (2006, p. 278) a quantidade de comparações necessárias é uma das grandes dificuldades apontadas na utilização do AHP.

Utilizando todos os vetores de prioridades calculados cria-se uma matriz chamada “matriz de prioridades”, a qual será transposta e multiplicada à direita pelo vetor de prioridades da matriz criada no nível mais alto, ou “matriz do primeiro nível”. O resultado

desta operação algébrica é o vetor de prioridades global, ou seja, o que representará as preferências de um indivíduo quanto à escolha das alternativas existentes, a partir dos critérios definidos. Por exemplo, na escolha de qual automóvel comprar, automóvel “X”, “Y” ou “Z”, levando em consideração os critérios de maior velocidade, maior autonomia e maior conforto, se o vetor de prioridades global for  $[0,3;0,5;0,2]$  significa que o automóvel mais preferível é o automóvel “Y”, o segundo mais preferível é o automóvel “X” e por último o automóvel “Z”.

Por fim, pode-se ainda verificar a consistência das preferências estabelecidas. Esta verificação é possível a partir do cálculo do índice de consistência – IC – e da razão de consistência – RC. Quando a matriz possuir 3 ou 4 linhas ou colunas, as preferências serão consistentes se a razão de consistência estabelecer valores entre 0,05 e 0,08, para mais que 5 linhas ou colunas, as preferências serão consistentes para valores menores do que 0,1.

### **3.4 Modelos de apoio à tomada de decisão**

Frequentemente imagina-se que modelos são compostos apenas por equações matemáticas. Entretanto, modelos podem ser como representações imperfeitas e abstratas de qualquer estrutura ou função do mundo real (ODUM, 1971). Um modelo pode descrever, representar e imitar procedimentos “estabelecendo o relacionamento das variáveis com os objetivos, da melhor maneira possível” (SHIMIZU, 2006, p.41).

Os modelos podem ser classificados em três tipos, a saber: físicos, análogos e matemáticos ou simbólicos, sendo este último o mais utilizado na modelagem de situações gerenciais. Modelos no qual alguma das “variáveis representa uma decisão gerencial a ser tomada, denominam-se ‘modelos de decisão’” (LACHTERMACHER, 2004, p. 6).

Há que se ressaltar que estes modelos não são concebidos para tomar decisões, mas para apoiar um indivíduo ou grupo de indivíduos na execução desta tarefa (PORTO; AZEVEDO, 1997). Esses autores afirmam que um indivíduo soluciona problemas a partir de

dois elementos essenciais: (i) informações, que o permite conhecer melhor uma determinada situação; e (ii) modelos, que o permite determinar quais são as variáveis de um determinado problema e como elas se interagem.

Alguns pacotes de *software* de planilhas, como o Excel<sup>®</sup>, podem ser utilizados para auxiliar o homem na utilização desses dois elementos: informações e modelos. “Grande parte do poder das planilhas reside em sua habilidade de revelar imediatamente os resultados de quaisquer alterações feitas na solução” (HILLIER; LIEBERMAN, 2006, p. 64).

### **3.5 Modelos de apoio à tomada de decisão aplicados ao tratamento de esgoto**

Devido à complexidade que envolve a escolha de um sistema de tratamento de esgoto sanitário, estudos acadêmicos têm demonstrado a necessidade do uso de técnicas adequadas para a avaliação do sistema a ser instalado em um município. Técnicas de tomada de decisão são utilizadas nos modelos desenvolvidos nesses trabalhos, que são criados principalmente por meio de métodos quantitativos.

Segundo Souza (1998), o primeiro estudo sobre técnicas para a análise de sistemas de tratamento de esgotos foi desenvolvido por Lynn, Logan e Charnes, em 1962, quando utilizaram conceitos de análise de sistemas para avaliar a decisão. Após este, vários outros trabalhos foram realizados envolvendo otimização, com o auxílio de métodos clássicos como programação linear, programação dinâmica, programação geométrica, entre outros. Ainda segundo Souza (1998), no início da década de 1970, a Divisão de Engenharia do Exército – *U.S. Army Corps of Engineers* (COE) – e a Agência de Proteção Ambiental – *Environment Protection Agency* (EPA), dos Estados Unidos, produziram o primeiro modelo de auxílio à tomada de decisão aplicado ao tratamento de águas residuárias, o modelo CAPDET. Nesta mesma época, a Agência Americana para Desenvolvimento Internacional – *U.S. Agency for International Development* (USAID) – e a Universidade de Oklahoma produziram um modelo

de seleção de tecnologias para tratamento de água e saneamento em países em desenvolvimento.

Atualmente, existem alguns modelos que podem ser utilizados gratuitamente para auxiliar na escolha de sistemas de tratamento, como o Sistema de Apoio à Decisão – SAD (CHERNICHARO et al., 2001), o SANEX™ (LOETSCHER, 2003), o *Water and Wastewater Treatment Technologies Appropriate for Reuse* – WAWTTAR (MCGAHEY, 2003) e o DAISY (RIVAS; IRIZAR; AYESA, 2008).

Porém esses modelos são limitados, pois têm “especificidade para determinadas situações ou condições, nem sempre condizentes para o tratamento de esgoto sanitário municipal” (OLIVEIRA, 2004, p. 51). Além disso, não dimensionam os sistemas e nem calculam os seus custos. No quadro 3.2 estão listados alguns desses modelos de tomada de decisão, suas características e restrições.

| <b>Nome do modelo</b>  | <b>Principal característica</b>  | <b>Principal restrição</b>   |
|--|--|--|
| SAD – Sistema de Apoio à Decisão (CHERNICHARO et al., 2001)  | Metodologia de análise: (I) instruções gerais e informação de dados; (II) pré-seleção de alternativas viáveis; (III) avaliação tecnológica e (IV) análise tecnológica global     | Especificidade para sistemas de pós-tratamento                     |
| SANEX™ (LOETSCHER, 2003)   | Aspectos utilizados na escolha são sócio-culturais, financeiros e técnicos e são utilizadas técnicas de análise de decisão multicritério   | Exclusivo para pequenas comunidades                                |
| WAWTTAR - <i>Water and Wastewater Treatment Technologies Appropriate for Reuse</i> (MCGAHEY, 2003) | Auxiliar engenheiros, contadores, planejadores e tomadores de decisão nas estratégias sustentáveis de gestão de recursos hídricos e saneamento, a fim de minimizar seus impactos | Aplicável somente nas primeiras etapas de planejamento de estações |
| DAISY 3.0 (RIVAS; IRIZAR; AYESA, 2008)   | Método de tomada de decisão para a configuração de plantas onde o número de parâmetros independentes a ser selecionados é grande   | Específico para otimização de parâmetros individuais               |

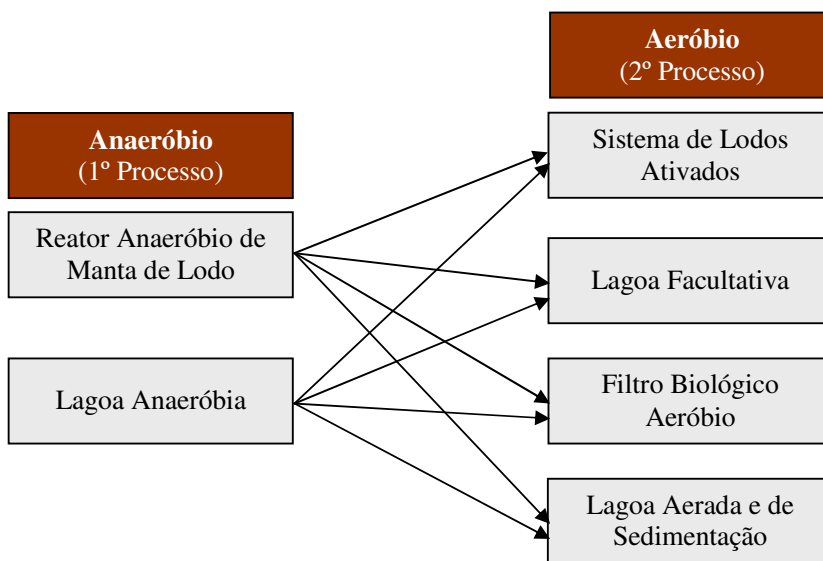
**Quadro 3.2 – Alguns modelos de tomada de decisão**

Fonte: Adaptado de Oliveira (2004)

### 3.6 Modelo de apoio à tomada de decisão Oliveira (2004)

Oliveira (2004), em sua tese de doutorado, propôs um modelo que utiliza as técnicas de análise de sensibilidade e árvore de decisão quantitativa para auxiliar na escolha de estações de tratamento de esgoto mais economicamente adequada para municípios.

Esse modelo foi desenvolvido em Excel<sup>®</sup> e contém oito planilhas que representam a combinação dos seis sistemas de tratamento de esgoto considerados, dois anaeróbios no primeiro processo, seguido de quatro aeróbios no segundo processo (figura 3.4). Estas planilhas foram nomeadas de “A” à “H” (quadro 3.3) e podem calcular os custos dos itens de implantação, operação e manutenção dos dois processos de cada um dos sistemas.



**Figura 3.4 – Processos de tratamento empregados no modelo Oliveira (2004)**

Fonte: Oliveira (2004)

Cada uma das oito planilhas também faz o dimensionamento do primeiro processo, seguido do dimensionamento do segundo processo, bem como faz uma estimativa da DBO no efluente final, o que pode ser considerado um índice de eficiência. Em uma planilha geral, que é compartilhada por todas as outras, é possível inserir os parâmetros dos municípios para que o custo total do sistema e a eficiência do tratamento sejam calculados. Os parâmetros de

entrada do modelo Oliveira (2004) são: (a) população estimada; (b) vazão afluente média; (c) vazão afluente máxima; (d) DBO média afluente; (e) alcance do projeto; (f) classificação do rio receptor; e (g) temperatura média no mês mais frio.

| Sistemas do Modelo | Composição dos sistemas                  |   |
|--------------------|--|---|
|                    | Unidade anaeróbia<br>(1º Processo)       | Unidade aeróbia<br>(2º Processo)                                |
| <b>Sistema A</b>   | Reator Anaeróbio de Manta de Lodo (UASB) | Lodos Ativados Convencional                                     |
| <b>Sistema B</b>   | Reator Anaeróbio de Manta de Lodo (UASB) | Lagoa Facultativa   |
| <b>Sistema C</b>   | Reator Anaeróbio de Manta de Lodo (UASB) | Filtro Biológico Percolador de Alta Carga                       |
| <b>Sistema D</b>   | Reator Anaeróbio de Manta de Lodo (UASB) | Lagoa Aerada de Mistura Completa seguida de Lagoa de Decantação |
| <b>Sistema E</b>   | Lagoa Anaeróbia                          | Lodos Ativados Convencional                                     |
| <b>Sistema F</b>   | Lagoa Anaeróbia                          | Lagoa Facultativa   |
| <b>Sistema G</b>   | Lagoa Anaeróbia                          | Filtro Biológico Percolador de Alta Carga                       |
| <b>Sistema H</b>   | Lagoa Anaeróbia                          | Lagoa Aerada de Mistura Completa seguida de Lagoa de Decantação |

**Quadro 3.3 – Sistemas e unidades de tratamento usados no modelo Oliveira (2004)**

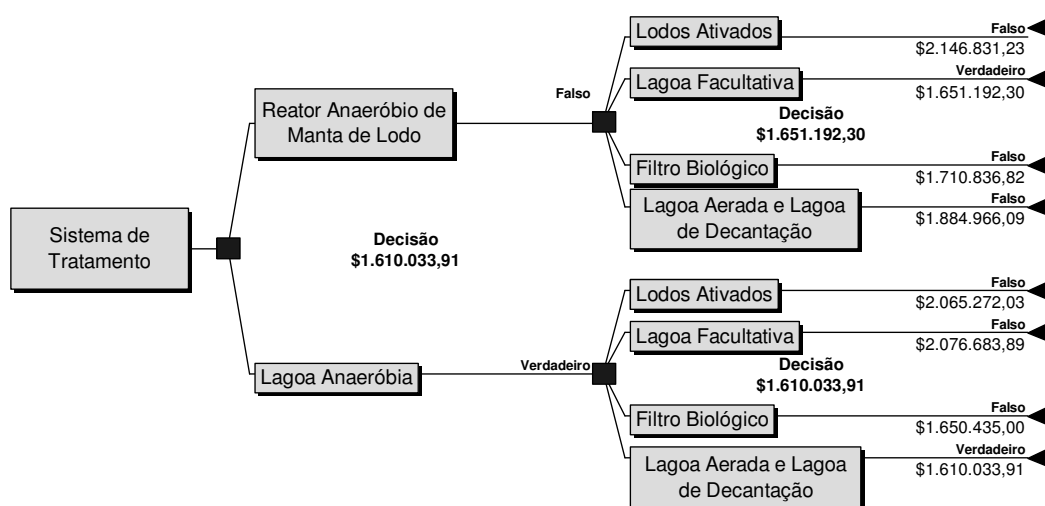
Fonte: Oliveira (2004)

Segundo Oliveira (2004), as planilhas de cálculo dos oito sistemas foram compostas por vinte e um itens definidos com base na literatura e informações de especialistas: custo do terreno; escavações/limpeza do terreno; valor de projetos; tratamento preliminar; fundações; paisagismo; drenagem; instalações elétricas; segurança; pára-raios; redes de água e esgoto; concreto armado; impermeabilização; edificações de apoio; equipamentos; telefonia e informática; vias de circulação; área de “cinturão verde”; desinfecção com cloro; custo de operação; depreciação de equipamentos. Em todos os sistemas foram usados os mesmos itens para possibilitar as análises.

Ainda segundo a autora, na composição dos custos houve a preocupação de se projetar estações de tratamento com qualidade ambiental e paisagística, a fim de criar uma área agradável e de baixo impacto ambiental. Nesse intuito, todas as áreas livres foram gramadas e ajardinadas; há coleta de águas pluviais; foi previsto um cinturão verde de 10 metros de

largura ao redor do terreno da estação; instalação de equipamentos de coleta e queima de gás gerado nos reatores anaeróbios (metano); e equipamento para desaguamento do lodo. As composições de custos de obras de todos os sistemas foram desenvolvidas de acordo com orçamentos para obras prediais, pavimentação e tratamento paisagístico de entornos.

Após terem sido realizados os cálculos inerentes a todos os sistemas, o modelo Oliveira (2004) indica, por meio de uma árvore de decisão quantitativa, a alternativa de menor custo dentre os oito sistemas considerados, como exemplificado pela figura 3.5.



**Figura 3.5 – Exemplo de árvore de decisão com escolha da alternativa de menor custo**

Fonte: Oliveira (2004)

### 3.7 Simulação de modelos

Considerando que modelos são representações simplificadas da realidade, faz-se necessária uma aplicação de testes tanto no sentido de se trabalhar com casos reais, como de se ter um número maior de respostas do modelo para se determinar com maior especificidade as condições em que se estabelecem os resultados e o aprimoramento dos mesmos.

Para Ackoff e Sasieni (1971, p.114), a simulação é uma maneira de manipular modelos para fazer com que os mesmos representem uma realidade que pretendemos avaliar:

[...] os modelos representam a realidade, a simulação a imita. A simulação sempre significa a manipulação de um modelo. É, realmente, a maneira de manipular o modelo para que ele proporcione uma visão dinâmica, quase cinematográfica da realidade. (ACKOFF; SASIENI, 1971, p.114).

Em síntese, “se escolhe simulação para ampliar o conhecimento sobre um sistema e para avaliar novas idéias e conceitos sobre o mesmo” (SANTOS, 1992, p. 37). Segundo Starfield, Smith e Bleloch (1990), na construção do modelo, o tempo total gasto em sua construção deve obedecer à regra do 20/80, ou seja, 20% do tempo deverá ser gasto na construção do modelo e 80% na validação do mesmo. Esta validação inclui a análise estatística do modelo para verificar se os resultados estimados são possíveis de serem alcançados em situações reais.

Shannon (1975, p. 2, apud MAIA, 2005) define os seguintes objetivos para a simulação: (i) descrever o comportamento de sistemas; (ii) construir teorias ou hipóteses que explicam o comportamento observado; (iii) utilizar estas teorias para prever o comportamento futuro. Segundo Clemen (1996), ao se executar uma quantidade de interações suficientemente grande de um modelo será possível se ter uma boa idéia da distribuição dos possíveis resultados.

De acordo com Ragsdale (2004), simulação é um processo de 4 passos: (i) identificar as variáveis incertas no modelo; (ii) implementar uma distribuição apropriada para cada variável incerta; (iii) reproduzir o modelo n vezes e registrar os valores medidos; (iv) analisar os valores da amostra coletados na medida de desempenho.

### **3.7.1 Simulação de Monte Carlo**

Uma técnica muito utilizada para simular modelos de tomada de decisão é a simulação de Monte Carlo. O nome “Monte Carlo” faz menção aos jogos no cassino de Monte Carlo na cidade de Mônaco, devido ao caráter aleatório dos mesmos. Este método permite gerar

“valores probabilísticos ou aleatórios sobre os modelos que imitam ou simulam a realidade” (SHIMIZO, 2006, p. 116). Clemen (1996) afirma que pode-se utilizar a simulação de Monte Carlo para descrever situações em que a incerteza é grande. Para isto, devem ser conhecidas as distribuições de probabilidade das variáveis do modelo que são consideradas incertas. Ao serem substituídos os valores de entrada do modelo por essas distribuições, as variáveis tornam-se aleatórias e a simulação deve ser realizada muitas vezes até que se consiga uma aproximação para a distribuição de probabilidade dos pagamentos para as diversas alternativas do modelo. “Quanto mais simulações pudermos realizar, maior a precisão desta aproximação” (CLEMEN, 1996, p. 413).

Uma possibilidade de se atingir uma maior precisão no processo da simulação de Monte Carlo é a utilização de *softwares* de simulação em modelos desenvolvidos sob a forma de planilhas eletrônicas. Um *software* considerado adequado para esta tarefa é o Crystal Ball<sup>®</sup>. “O Crystal Ball<sup>®</sup> possui 16 diferentes famílias de distribuições, incluindo uma distribuição customizável que pode ser usada para criar uma distribuição de qualquer forma” (CLEMEN, 1996, p. 418).

### **3.8 Teoria dos jogos e equilíbrio de Nash**

A teoria dos jogos “é uma teoria matemática que trata das características gerais de situações competitivas [...] ela coloca particular ênfase nos processos de tomada de decisão dos jogadores” (HILLIER; LIEBERMAN, 2006, p. 641). Sua metodologia permite que esta teoria seja utilizada para clarificar os fenômenos econômicos, políticos e biológicos e a maioria das situações cotidianas, que são abstraídas na forma de modelos, os quais tornam factível a avaliação das vantagens e das desvantagens das várias estratégias possíveis, considerando as estratégias dos outros indivíduos envolvidos nessa mesma situação (OSBORNE, 2004). Na prática, esta teoria pode auxiliar no entendimento de situações nas

quais tomadores de decisão se interagem. “Muitos dos problemas de decisão podem ser pensados como jogos” (BIERMAN; FERNANDEZ, 1998, p. 4).

Segundo Bierman e Fernandez (1998), um jogo pode ser descrito usando um formulário onde, em seu topo, estão os nomes dos jogadores. Em seguida, em cada linha, são dispostas as estratégias de cada jogador com seus respectivos pagamentos, ou seja, o quanto o jogador ganhará adotando esta estratégia. Ainda segundo os autores, de forma geral, é mais conveniente apresentar os pagamentos dos jogadores na forma de uma tabela de pagamentos. A figura 3.6 apresenta uma tabela de pagamentos para um jogo fictício com dois jogadores. O jogador 1 possui seus pagamentos representados pelas letras “A, B, C e D”, enquanto o jogador 2 possui seus pagamentos representados pelos números “1, 2, 3 e 4”.

|           |                           | Jogador 2                 |                           |
|-----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|           |                           | Estratégia 1 do jogador 2 | Estratégia 2 do jogador 2 |
| Jogador 1 | Estratégia 1 do jogador 1 | (A, 1)                    | (B, 2)                    |
|           | Estratégia 2 do jogador 1 | (C, 3)                    | (D, 4)                    |

**Figura 3.6 – Exemplo de uma tabela de pagamentos**

Fonte: próprio autor

De forma geral, a teoria dos jogos é um meio para se identificar os resultados de um jogo. Quando algum resultado é a “combinação das estratégias que são as melhores respostas umas às outras” (FIANI, 2006, p. 93), considera-se que foi encontrado o equilíbrio de Nash. No equilíbrio de Nash os jogadores têm o conhecimento sobre as estratégias dos seus concorrentes e escolhe a melhor estratégia possível levando em consideração as escolhas de todos os outros jogadores estabelecendo-se, então, uma situação na qual nenhum dos participantes tem incentivo a mudar de estratégias.

### **3.9 Análise de agrupamentos**

A análise de agrupamentos, segundo Hair et al. (2006), é uma ferramenta útil para realizar a redução de dados em grupos heterogêneos onde as observações são semelhantes entre si, de forma que seja possível classificar os dados. De acordo com Hair et al. (2006, p. 397) “a análise de agrupamentos é uma metodologia objetiva para quantificar as características estruturais de um conjunto de observações”.

#### 4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente estudo é uma pesquisa aplicada que avaliou um modelo de tomada de decisão para escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário para municípios proposto por Oliveira (2004). Para tornar possível esta avaliação, foi realizada uma coleta de dados em projetos fornecidos por empresas e órgãos públicos responsáveis pela avaliação, execução ou financiamento de obras de infra-estrutura, incluindo o tratamento de esgoto em municípios, a fim de se levantar os valores para as variáveis de entrada do modelo.

A avaliação do modelo Oliveira (2004) se realizou de forma aplicada, inserindo-se os dados coletados e comparando as respostas do modelo com os projetos. Também foram verificados e ajustados os parâmetros do modelo, com base em simulações realizadas com a utilização do *software* Crystal Ball<sup>®</sup>, conforme metodologia proposta por Ragsdale (2004).

Além desta avaliação quantitativa, ainda foram testadas as suas respostas qualitativamente comparando-as com a inserção de um critério ambiental, adicionado ao modelo pela metodologia proposta por Saaty (1991) e foram verificadas as consistências das suas respostas para solucionar o conflito entre eficiência e custo, através da teoria dos jogos e o seu equilíbrio proposto por Nash (1951).

Por fim, a aplicabilidade do modelo Oliveira (2004) foi julgada com base em entrevistas realizadas com acadêmicos e profissionais da área de hidráulica e saneamento e em testes práticos, como a criação de um estudo de concepção de sistema de tratamento de esgoto para o município de Fortaleza de Minas (MG) e a conjugação de seu uso com outro modelo para modelagem da qualidade das águas de rios – o QUAL-UFMG.

A seguir, são apresentados os procedimentos gerais de coleta e análise dos dados para as etapas específicas – (1) ajustes do modelo e teste piloto e (2) avaliação do modelo. Maiores detalhes desses procedimentos serão descritos ao longo da apresentação dos resultados dessas duas etapas, constantes nos capítulos 5 e 6 desta dissertação.

#### 4.1 Fase de ajustes no modelo Oliveira (2004) e teste piloto

A coleta de dados primários foi realizada por meio de entrevistas semi-estruturadas com especialistas em projetos de estações de tratamento do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) de Ribeirão Preto.

Nesta primeira fase, foram utilizados os primeiros cinco projetos de estação de tratamento de esgoto disponibilizados pelo DAEE de Ribeirão Preto. Os dados foram inseridos ao modelo e foram iniciados os ajustes que se mostraram necessários. A partir de mais sete projetos disponibilizados, que somaram 12, foram feitos os ajustes finais que tornaram possível a realização da simulação, conforme os quatro passos propostos por Ragsdale (2004).

Os dados utilizados eram referentes aos projetos do programa estadual “Água Limpa” dos municípios de Ibiporanga, Ecatu-Tanabi, Mirassolândia, Cruz das Posses, Caconde, Casa Branca, Rio das Pedras, Descalvado, Barrinha, Ituverava, Américo Brasiliense e Vargem Grande do Sul.

Especificamente para a coleta de dados dos julgamentos da autora do modelo Oliveira (2004), foi desenvolvido um questionário para coleta de julgamento (apêndice B). Nele, foram utilizadas questões que se adequaram ao tipo de pergunta proposta por Saaty (1991, p. 40): “dado um par de elementos da matriz, qual deles seria o mais dominante em termos de possuir ou contribuir para a propriedade em questão?”. Não obstante, considerando que “o modo como o problema é ‘estruturado’, ou apresentado, pode mudar drasticamente o ponto neutro percebido da questão” (BAZERMAN, 2004, p. 62), a pergunta foi proposta como do tipo “ganho certo” e, segundo Bazerman (2004), as pessoas tendem a optar pela certeza nestes tipos de pergunta. Como o critério em questão é o impacto ambiental causado pela tecnologia utilizada pelos sistemas de tratamento de esgoto as perguntas foram expostas como “qual,

dentre estas duas opções causa maior impacto ambiental?''.

#### **4.2 Fase de avaliação do modelo Oliveira (2004)**

Nesta fase da pesquisa, uma fonte de consulta fundamental para o desenvolvimento das análises foi a tese de doutorado de Oliveira (2004). Como fontes auxiliares, foram utilizados os parâmetros atualizados da coleção de livros técnicos do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, bem como literatura nacional e internacional sobre técnicas de tomada de decisão, que serviram para refinar as respostas do modelo e como base para a complementação de dados, realizada concomitantemente à avaliação do modelo Oliveira (2004). Também se buscou a verificação das leis e resoluções pertinentes ao tratamento de esgotos no Brasil e no Estado de São Paulo.

No total, foram coletados os dados referentes a 61 projetos de estação de tratamento de esgotos (apêndice A), sendo 49 referentes a municípios localizados no estado de São Paulo, sete no estado de Minas Gerais, três no estado do Paraná, um no estado da Bahia e um no estado do Rio de Janeiro. Os projetos foram fornecidos pelas seguintes organizações: Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) de Ribeirão Preto; Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) de Franca; Representação de Desenvolvimento Urbano (REDUR) da Caixa Econômica Federal de Ribeirão Preto; e Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas (PRODES) da Agência Nacional das Águas (ANA) em Brasília.

Inicialmente foram aplicados três questionários de julgamentos que foram obtidos por meio de um arquivo no formato Word<sup>®</sup> (apêndice B). Estes três questionários foram aplicados em datas diferentes sendo todos respondidos pela Profa. Dra. Sonia Valle Walter Borges de Oliveira, com o intuito de se aprimorar o mesmo. Ao final de cada aplicação, eram verificadas as deficiências do questionário e o mesmo era aprimorado. No entanto, devido aos problemas

encontrados, tais como: preenchimento incorreto da comparação par a par, falta de padronização para o envio do questionário respondido e inconsistência das repostas ocasionadas pela proposição das perguntas, a última versão do questionário foi transformada em uma versão eletrônica, que foi disponibilizada para ser respondida por meio de uma página na Internet (figuras 4.5 e 4.6). No total, foram aplicados 20 questionários com os julgamentos de especialistas da área de hidráulica e saneamento.

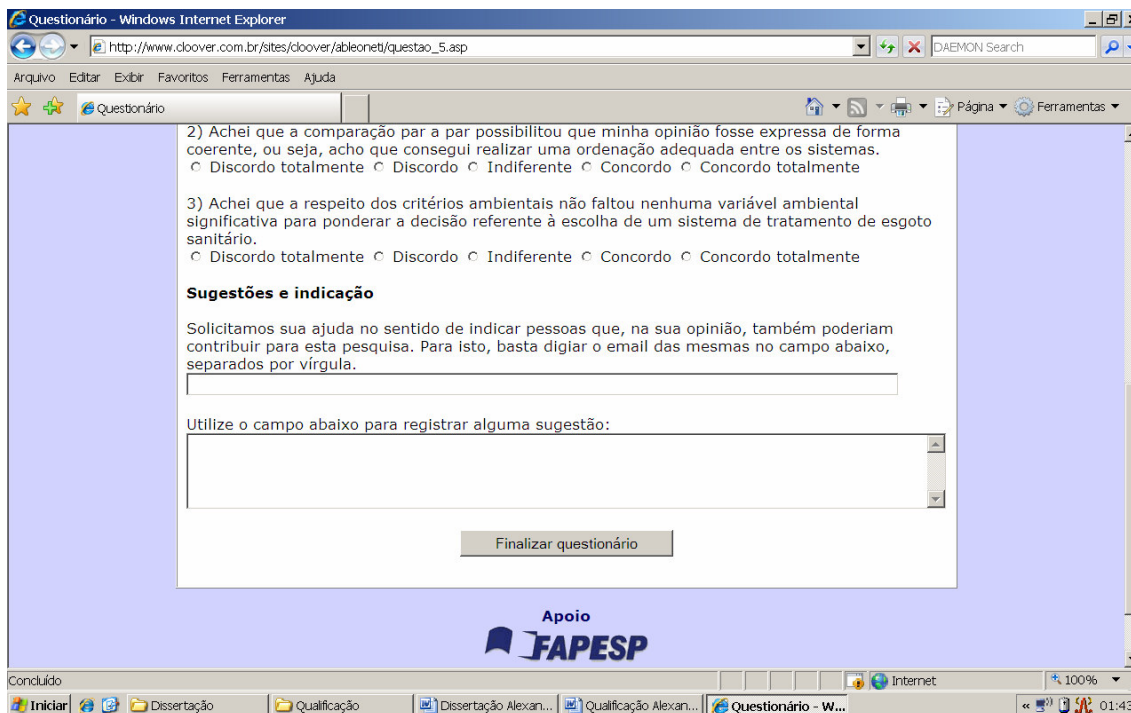


**Figura 4.5 – Início do questionário para coleta de julgamentos**

Fonte: próprio autor

Ao final do questionário, foram incluídas três afirmações com o intuito de avaliar o método AHP, são elas (1) “Achei que o modo como foram exibidas as perguntas e as tabelas para resposta foram adequadas para eu expressar minha opinião.”; (2) “Achei que a comparação par a par possibilitou que minha opinião fosse expressa de forma coerente, ou seja, acho que consegui realizar uma ordenação adequada entre os sistemas.”; e (3) “Achei que a respeito dos critérios ambientais não faltou nenhuma variável ambiental significativa para ponderar a decisão referente à escolha de um sistema de tratamento de esgoto sanitário.” Essas afirmações deveriam ser avaliadas obedecendo a uma escala de Likert contendo as

seguintes opções para cada uma: (i) discordo totalmente; (ii) discordo; (iii) indiferente; (iv) concordo; e (v) concordo totalmente.



**Figura 4.6 – Final do questionário para coleta de julgamentos**

Fonte: próprio autor

Finalmente, também foram realizadas pesquisas exploratórias, para o levantamento de tabelas de custos de construção e para atualizar os custos dos equipamentos, que foram realizadas junto aos órgãos públicos de saneamento e empresas fornecedoras de equipamentos para o tratamento de esgoto.

Todos os dados coletados foram sendo inseridos no modelo, criando-se novas versões, em um total de 12, chegando-se ao modelo final, denominado “ETEX-FEARP”. Tais procedimentos foram descritos em detalhes no capítulo 6.

### 4.3 Etapas da pesquisa

As etapas da pesquisa estão descritas a seguir:

a) revisão bibliográfica – foi realizada uma pesquisa bibliográfica complementar, que trouxe informações atualizadas sobre tratamento de esgoto sanitário em municípios do Estado de São Paulo e do Brasil;

b) elaboração do roteiro de entrevista – de acordo com as informações necessárias para o modelo, foi feito um roteiro de entrevista, semi-estruturado, para haver flexibilidade na condução de novas perguntas em função das respostas dos entrevistados;

c) pesquisa exploratória – foi feita por meio de entrevistas com especialistas em projetos na área e com tomadores de decisão e responsáveis pelos órgãos públicos, além de material, não bibliográfico, fornecido por eles;

d) ajustes do modelo e teste piloto – foram feitos a partir dos dados coletados na pesquisa exploratória, com a atualização de custos, alterações em variáveis e ajustes em parâmetros de projeto;

e) pesquisa aplicada – foi desenvolvida a partir das informações coletadas nas etapas anteriores, utilizando-se o modelo de tomada de decisão, por meio de análises quantitativas – aplicação de simulação de Monte Carlo, análise de sensibilidade e relações entre variáveis, e qualitativas – aplicação do equilíbrio de Nash, análise hierárquica de processos (AHP) e análises das opiniões de tomadores de decisão na área de saneamento;

f) desenvolvimento do modelo final – foi feito a partir de todas as informações e aplicações de técnicas qualitativas e quantitativas descritas nas etapas anteriores, chegando-se ao modelo “ETEX-FEARP”, décima segunda versão do mesmo.

## 5 AJUSTES INICIAIS NO MODELO OLIVEIRA (2004) E TESTE PILOTO

Para se proceder à avaliação do modelo de Oliveira (2004), foram necessários alguns ajustes na versão original, bem como a elaboração de um teste piloto, para se observar o comportamento do modelo frente a essas modificações. Inicialmente, obteve-se uma amostra de cinco projetos de estações de tratamento de esgoto, disponibilizados pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) de Ribeirão Preto (tabela 5.1). Com exceção do projeto elaborado para o município de Caconde, em todos os outros foi adotado o Sistema Australiano para tratar o esgoto dos municípios.

**Tabela 5.1 – Parâmetros de projetos utilizados na primeira fase dos ajustes do modelo**

| Parâmetros                      | Unidade           | Américo<br>Brasiliense | Barrinha | Caconde | Ituverava | Casa<br>Branca |
|---------------------------------|-------------------|------------------------|----------|---------|-----------|----------------|
| População estimada (20 anos)    | hab               | 46.740                 | 37.299   | 28.394  | 39.515    | 29.602         |
| Consumo médio água              | L/hab.dia         | 169                    | 398      | 215     | 232       | 200            |
| Vazão afluente média            | m <sup>3</sup> /d | 9.250                  | 7.240    | 4.395   | 6.220     | 4.940          |
| Vazão afluente máxima           | m <sup>3</sup> /d | 11.100                 | 8.689    | 7.911   | 7.292     | 8.982          |
| DBO média afluente              | mg/L              | 273                    | 278      | 227     | 290       | 341            |
| DQO média afluente              | mg/L              | 356                    | 417      | 340     | 435       | 580            |
| Sólidos suspensos (SS)          | mg/L              | 378 (*)                | 378 (*)  | 200     | 378 (*)   | 378 (*)        |
| Nitrogênio total Kjeldahl (NTK) | mg/L              | 30                     | 30       | 30      | 30        | 30             |
| Vida útil                       | anos              | 20                     | 20       | 20      | 20        | 20             |
| Classificação do rio receptor   | Classe            | 2                      | 2        | 2       | 2         | 3              |
| Temperatura do líquido          | °C                | 18                     | 18       | 18      | 18        | 23             |

Fonte: \* Dados médios de Chernicharo et al. (2001). Demais dados: projetos de estações fornecidos pelo DAEE.

Os dados coletados foram inseridos no modelo Oliveira (2004) e foi realizada uma análise de sensibilidade do primeiro tipo, conforme classificado por Lachtermacher (2004, p. 168), ou seja, todas as variáveis receberam um limite inferior e superior e foram avaliadas uma de cada vez. O primeiro problema encontrado foi relacionado ao cálculo da variável “Custo do terreno” no “Sistema F”, que estava supervalorizando o custo deste sistema. Imaginou-se que as medidas adotadas pelo modelo para o “Sistema F” estavam erradas e deveriam estar em metros e não em pés como supostamente o modelo estaria utilizando. Foi realizada uma transformação dessa unidade, mas esta alteração se mostrou equivocada em

testes posteriores, pois a medida não estava em pés.

O problema do tamanho do terreno do “Sistema F” e seu respectivo custo começaram a ser resolvidos a partir de novos testes, desta vez com base em mais sete projetos, também disponibilizados pelo DAEE de Ribeirão Preto, totalizando doze projetos (tabela 5.2). Foi, então, verificado que o valor da variável “Ajardinamento do entorno” para todos os sistemas era de 30% e, por se tratar de um sistema que exige uma área de implantação muito maior do que os outros, o “Sistema F” passou a receber o valor 10% para a esta variável. O mesmo foi feito com as variáveis: (i) “Vegetação de médio porte (cinturão verde)”, que também é calculada com base na área do terreno e passou a ter 5 metros ao invés dos 10 metros que constava em todos os outros sistemas; e (ii) “Pavimentação em blocos sextavados de concreto sobre coxim de areia”, que passou de 15% para 10%. Após esses ajustes, o custo proposto pelo modelo Oliveira (2004) para o “Sistema F” começou a se comportar de forma robusta, tornando este sistema o ponto de referência para a avaliação dos outros sistemas.

**Tabela 5.2 – Parâmetros dos projetos utilizados na continuação dos ajustes do modelo**

| <b>Projeto de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)</b> | <b>População estimada (20 anos)</b> | <b>Vazão afluente média</b> | <b>Vazão afluente máxima</b> | <b>DBO média afluente</b> | <b>Alcance do projeto</b> | <b>Classe do rio receptor</b> | <b>Temp. mês mais frio</b> |
|---|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| <b>Cidade</b>   | <b>hab</b>                          | <b>m<sup>3</sup>/d</b>      | <b>m<sup>3</sup>/d</b>       | <b>mg/L</b>               | <b>anos</b>               | <b>classe</b>                 | <b>°C</b>                  |
| Ibiporanga  | 1093                                | 196                         | 235                          | 233                       | 20                        | 2                             | 23                         |
| Ecatu-Tanabi  | 1606                                | 307                         | 368                          | 282                       | 20                        | 2                             | 23                         |
| Mirassolândia   | 5169                                | 1009                        | 1210                         | 266                       | 20                        | 2                             | 22                         |
| Cruz das Posses   | 10463                               | 1689                        | 1950                         | 307                       | 20                        | 3                             | 18                         |
| Caconde   | 28394                               | 4406                        | 7862                         | 313                       | 20                        | 2                             | 18                         |
| Casa Branca   | 29602                               | 4940                        | 8982                         | 341                       | 20                        | 3                             | 23                         |
| Rio das Pedras  | 31604                               | 6048                        | 7257                         | 280                       | 20                        | 3                             | 22                         |
| Descalvado  | 35709                               | 6307                        | 7516                         | 275                       | 20                        | 2                             | 22                         |
| Barrinha  | 37299                               | 7240                        | 8689                         | 278                       | 20                        | 2                             | 18                         |
| Ituverava   | 39515                               | 7344                        | 8640                         | 290                       | 20                        | 4                             | 18                         |
| Américo Brasiliense                                     | 46740                               | 9250                        | 11059                        | 273                       | 20                        | 2                             | 18                         |
| Vargem Grande do Sul                                    | 51595                               | 9597                        | 13600                        | 302                       | 20                        | 2                             | 17                         |

Fonte: Projetos das estações fornecidos pelo Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE) de Ribeirão Preto e prefeitura municipal de Vargem Grande do Sul-SP

## 5.1 Variáveis de entrada excluídas

No início desta pesquisa, as variáveis de entrada do modelo Oliveira (2004) eram: (i) população estimada (20 anos); (ii) consumo médio d'água; (iii) vazão afluente média; (iv) vazão afluente máxima; (v) DBO média afluente; (vi) DQO média afluente; (vii) sólidos suspensos; (viii) nitrogênio total Kjeldahl; (ix) vida útil da estação; (x) classificação do rio receptor; e (xi) temperatura média do líquido no mês mais frio. Todavia, durante o período inicial de testes com os dados dos doze projetos, foi verificado que as respostas do modelo não eram influenciadas pela alteração de algumas variáveis de entrada.

Com a realização dos testes, foi verificado que as variáveis de entrada “DQO”, “Sólidos suspensos (SS)”, “NTK” e “Fator de conversão de água” não influenciam na decisão, independente do tamanho da população, e foram excluídas. No caso da variável “DQO”, conforme proposto por Von Sperling (2006, p. 94), a “relação DQO/DBO<sub>5</sub> varia em torno de 1,7 a 2,4” sendo que, em estudos anteriores, Von Sperling (2006) constatou uma mediana de 2,1 em 163 ETE's dos estados de São Paulo e Minas Gerais. Como solução, esta variável “DQO” passou a receber um valor 2,1 vezes maior do que a variável “DBO”, sendo, portanto, calculada automaticamente.

Após estas variáveis serem retiradas do modelo, o mesmo passou a contar com apenas as seguintes variáveis de entrada: (i) população estimada (20 anos); (ii) vazão afluente média; (iii) vazão afluente máxima; (iv) DBO média afluente; (v) alcance do projeto; (vi) classe do rio receptor; e (vii) temperatura média do líquido no mês mais frio.

## 5.2 Atualização da tabela de custo de construção e de equipamentos

No cálculo do orçamento dos seus oito sistemas, o modelo Oliveira (2004) utiliza uma tabela de custos de construção que foi orçada em 2004. Nesta tabela constavam os orçamentos

dos seguintes itens: (i) raspagem e limpeza do terreno; (ii) escavação do terreno; (iii) concreto armado; (iv) custo médio de construção; (v) impermeabilização concreto com epóxi; (vi) impermeabilização lagoas; (vii) ajardinamento dos entornos; (viii) vegetação de médio porte para o cinturão verde; (ix) pavimentação em blocos sextavados de concreto sobre coxim de areia; (x) muros, cercas e portões; (xi) brita para filtro percolador; (xii) guarda-corpo tipo grade ao redor de tanques; (xiii) tubulação e boca de lobo para drenagem de pista; (xiv) guias e sarjetas de concreto moldado "in loco".

Preliminarmente, Leoneti, Cortapasso e Oliveira (2007) contextualizaram os custos das variáveis do modelo para 2007, visto que as mesmas ainda estavam em valores de 2004 (tabela 5.3). Estes custos foram utilizados na primeira fase dos testes.

**Tabela 5.3 – Custos utilizados no modelo Oliveira (2004) e custos atualizados em 2007**

| Custos de construção                          | Un.            | Custos (1) originais       | Custos (2)                 |
|---|----------------|----------------------------|----------------------------|
|   |                | da planilha 2004<br>(US\$) | atualizados 2007<br>(US\$) |
| Raspagem e limpeza do terreno                 | m <sup>2</sup> | 0,64                       | 0,14                       |
| Escavação do terreno                          | m <sup>3</sup> | 0,68                       | 1,23                       |
| Concreto armado (incluindo formas)            | m <sup>3</sup> | 450,00                     | 392,18                     |
| Custo médio de construção                     | m <sup>2</sup> | 305,00                     | 402,43                     |
| Impermeabilização de concreto (epoxi)         | m <sup>2</sup> | 27,78                      | 27,78                      |
| Impermeabilização lagoas                      | m <sup>2</sup> | 10,00                      | 10,00                      |
| Ajardinamento do entorno                      | m <sup>2</sup> | 5,00                       | 5,00                       |
| Vegetação de médio porte (cinturão verde)     | m <sup>2</sup> | 10,00                      | 12,50                      |
| Pavimentação em blocos sextavados de concreto | m <sup>2</sup> | 22,50                      | 22,50                      |
| Muros, cercas e portões                       | m <sup>2</sup> | 26,25                      | 24,69                      |
| Brita para filtro percolador (30% BDI)        | m <sup>3</sup> | 28,50                      | 23,08                      |
| Guarda-corpo tipo grade ao redor de tanques   | m <sup>2</sup> | 75,75                      | 85,35                      |
| Tubulação + boca de lobo para drenagem        | m              | 24,00                      | 24,00                      |
| Guias e sarjetas (concreto moldado)           | m              | 18,00                      | 17,70                      |

(1) Fonte: Tabelas Editora PINI (2004) e SABESP (ref. 2004) (material e mão de obra, com 30% BDI) (2) Fonte: Tabela SANEPAR (2005), Tabelas da SABESP (ref. 2007) e especialistas.

No decorrer desta pesquisa foram substituídos três dos itens iniciais: “pavimentação em blocos sextavados de concreto sobre coxim de areia” por “pavimentação com lastro de brita ou cascalho 25mm”; “guias e sarjetas de concreto moldado ‘in loco’” por “guias pré-moldada em concreto”; e “custo médio de construção” por “compactação de aterro”.

Com o intuito de se aprimorar os orçamentos dos sistemas do modelo Oliveira (2004), foram levantadas oito novas tabelas de custos de construção, a partir das quais foram apurados os custos médios para serem atualizados em cada um dos itens que o modelo passou a utilizar em seus cálculos. Por se referirem a data base diferentes, os custos das tabelas foram atualizados, em reais, para o ano base de 2008, sendo após isto convertidos em dólares, correspondendo à cotação de 1,65, ou seja, US\$ 1,00 = R\$ 1,65. Na tabela 5.4 constam os preços de cada uma das tabelas para cada item, além dos custos originais do modelo Oliveira (2004) e a atualização de preços realizada em 2007 por Leoneti, Cortapasso e Oliveira (2007).

**Tabela 5.4 – Itens de custo de construção adotados no modelo Oliveira (2004) e seus respectivos preços nas tabelas de custos (em US\$)**

| <b>Custos de construção</b>  | <b>OLIVEIRA (1)</b> | <b>LEONETI (2)</b> | <b>SINAPI (3)</b> | <b>SEOP (4)</b> | <b>DERSP (5)</b> | <b>DERPR (6)</b> | <b>DAER (7)</b> | <b>PREF SP (8)</b> | <b>SANEPAR (9)</b> | <b>SABESP (10)</b> | <b>CUSTO MÉDIO</b> |
|------------------------------|---------------------|--------------------|-------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Raspagem e limp.do terreno   | 0,6                 | 0,1                | 0,9               | 0,3             | 0,5              | 0,4              | 0,3             | 0,3                | 0,3                | 0,8                | <b>0,4</b>         |
| Escavação do terreno         | 6,0                 | 7,7                | 4,3               | 6,9             | 6,9              | 5,3              | 8,9             | 5,4                | 4,7                | 4,2                | <b>6,0</b>         |
| Concreto armado              | 450,0               | 392,9              | 446,4             | 298,1           | 326,8            | 303,3            | 308,2           | 336,8              | 346,8              | 343,5              | <b>355,3</b>       |
| Impermeabil. do concreto     | 27,8                | 27,8               | 24,7              | 17,2            | 19,5             | 25,2             | 29,2            | 23,2               | 17,4               | 14,2               | <b>22,6</b>        |
| Impermeabil. de lagoas       | 10,0                | 10,0               | 11,9              | 10,7            | 9,6              | 13,2             | 12,7            | 8,3                | 9,4                | 14,0               | <b>10,9</b>        |
| Ajardinamento dos entornos   | 5,0                 | 5,0                | 3,0               | 4,2             | 4,6              | 2,8              | 2,9             | 3,7                | 2,2                | 3,2                | <b>3,7</b>         |
| Vegetação de médio porte     | 10,0                | 12,5               | 9,1               | 5,1             | 9,5              | 7,9              | 5,6             | 7,0                | 8,9                | 10,3               | <b>8,6</b>         |
| Pavim. com lastro de brita   | 22,5                | 22,5               | 1,1               | 1,2             | 9,5              | 4,4              | 8,1             | 7,3                | 2,1                | 9,4                | <b>8,8</b>         |
| Muros, cercas e portões      | 26,3                | 24,7               | 25,0              | 27,6            | 31,2             | 22,4             | 24,4            | 25,0               | 28,9               | 19,3               | <b>25,5</b>        |
| Brita para filtro percolador | 28,5                | 23,1               | 27,4              | 44,1            | 50,9             | 34,0             | 25,1            | 37,1               | 45,2               | 66,4               | <b>38,2</b>        |
| Guarda-corpo tanques         | 75,8                | 83,4               | 77,7              | 67,5            | 76,4             | 84,3             | 66,9            | 74,1               | 77,5               | 63,9               | <b>74,7</b>        |
| Tubulação para drenagem      | 24,0                | 24,0               | 40,0              | 33,1            | 46,8             | 48,3             | 50,5            | 58,6               | 46,8               | 41,7               | <b>41,4</b>        |
| Guias pré-moldadas           | 18,0                | 17,7               | 11,9              | 15,7            | 20,1             | 19,0             | 13,2            | 20,8               | 4,8                | 11,9               | <b>15,3</b>        |
| Compactação de aterro        | 2,3                 | 2,3                | 2,3               | 2,2             | 2,0              | 2,3              | 2,8             | 2,5                | 2,3                | 2,6                | <b>2,4</b>         |

Fonte: (1) Tabela de custos de construção do modelo Oliveira (2004)  
 (2) Atualização da tabela de custos de construção do modelo Oliveira (2004) (06/2007)  
 (3) Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (06/2007)  
 (4) Secretaria de Estado de Obras Públicas do Paraná (08/2008)  
 (5) Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (06/2008)  
 (6) Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (05/2008)  
 (7) Departamento de Programação Rodoviária do Rio Grande do Sul (06/2008)  
 (8) Prefeitura de São Paulo (07/2008)  
 (9) Companhia de Saneamento do Paraná (07/2008)  
 (10) Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (10/2008)

A falta de padronização entre essas tabelas, tanto na nomenclatura dos itens, quanto na

composição dos preços, criou uma dificuldade para se obter os custos. Como forma de superar esta limitação, os itens não encontrados foram obtidos a partir de uma composição entre preços e serviços sugeridos na tabela de custos da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), pois, dentre todas as tabelas, foi a que possuía uma forma de exibição mais clara dos cálculos de composição de preços. O quadro 5.1 apresenta as composições utilizadas para calcular os preços dos itens que não foram encontrados em todas as tabelas.

| <b>Item</b>                                    | <b>Composição</b>  |
|--|--|
| Raspagem e limpeza do terreno                  | Servente 0,065/h   |
| Escavação do terreno                           | Retroescavadeira 0,016/h ; Servente 0,016/h  |
| Concreto armado                                | Concreto 1,02/m <sup>3</sup> ; Aço 4,00/kg;<br>Forma 1,00/m <sup>2</sup> ; Servente 0,30/h |
| Impermeabilização concreto com epoxi           | Impermeabilizante 1,00/L/m <sup>2</sup> ; Servente 1,04/h                                  |
| Impermeabilização lagoas                       | Manta asfáltica 1,00/m <sup>2</sup> ; Servente 1,75/h                                      |
| Ajardinamento dos entornos                     | Gramma em placas 1,96/m <sup>2</sup> ; Jardineiro 0,196/h                                  |
| Vegetação de médio porte para o cinturão verde | Árvores (h>2,50m) 0,20/m <sup>2</sup> ; Servente 4,92/h                                    |
| Pavimentação com lastro de brita (25mm)        | Brita 1,10/m <sup>2</sup> ; Servente 2,50/h  |
| Muros, cercas e portões                        | Arame farpado 5,00/m;<br>Madeira 0,17/m; Servente 1,40/h                                   |
| Brita para filtro percolador                   | Retroescavadeira 0,20/h; Brita 1/m <sup>3</sup>  |

#### **Quadro 5.1 – Composição de preços e serviços**

Fonte: Companhia de Saneamento do Paraná (07/2008)

Os itens que são específicos dos sistemas com reatores também foram orçados para que seus custos fossem atualizados no modelo Oliveira (2004). O levantamento de dados foi realizado junto às empresas fornecedoras de equipamentos para o tratamento de esgoto. Foram solicitados orçamentos dos seguintes itens: (i) aeradores de alta rotação, de 5 até 25 cavalos de potência; (ii) removedor de lodo para decantador, de 12 e 15 metros de diâmetro; (iii) dispositivo de distribuição para filtro, de 12 e 15 metros de diâmetro. Uma das três empresas consultadas não disponibilizou orçamentos, tendo fornecido apenas uma estimativa para os aeradores, baseados em sua potência. Devido ao número restrito de empresas especializadas, foi realizada uma pesquisa exploratória para se encontrar o preço destes itens em licitações de obras, o que foi possível no *site* da Saneamento de Goiás S/A (SANEAGO).

A tabela 5.5 apresenta os orçamentos dos equipamentos realizados, bem como os seus custos originais, no modelo Oliveira (2004).

**Tabela 5.5 – Orçamentos dos custos dos equipamentos (em mil US\$)**

| <b>Equipamentos</b>                            | <b>OLIVEIRA (1)</b> | <b>EMPRESA (2)</b> | <b>EMPRESA (3)</b> | <b>EMPRESA (4)</b> | <b>SANEAGO (5)</b> | <b>SANEAGO (5)</b> | <b>CUSTOS MÉDIOS</b> |
|--|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| <b>Aeradores de alta rotação</b>               |                     |                    |                    |                    |                    |                    |                      |
| Aerador de 5 CV                                | 4,7                 | 5,7                | 12,0               | 5,2                |                    |                    | <b>6,9</b>           |
| Aerador de 7,5 CV                              | 5,6                 | 6,3                | 14,0               |                    |                    |                    | <b>8,6</b>           |
| Aerador de 10 CV                               | 7,6                 | 8,5                | 16,0               |                    | 13,5               |                    | <b>11,4</b>          |
| Aerador de 15 CV                               | 7,8                 | 9,2                | 18,0               |                    | 15,6               | 18,8               | <b>13,9</b>          |
| Aerador de 20 CV                               | 8,9                 |                    | 20,0               |                    |                    |                    | <b>14,5</b>          |
| Aerador de 25 CV                               | 9,3                 |                    | 22,0               | 22,0               |                    | 23,0               | <b>19,1</b>          |
| <b>Removedor de lodo para decantador</b>       |                     |                    |                    |                    |                    |                    |                      |
| Diâmetro de 12 m                               | 32,0                |                    | 40,0               |                    |                    |                    | <b>36,0</b>          |
| Diâmetro de 15 m                               | 35,0                |                    | 70,0               |                    |                    |                    | <b>52,5</b>          |
| <b>Dispositivo de distribuição para filtro</b> |                     |                    |                    |                    |                    |                    |                      |
| Diâmetro de 12 m                               | 680,0               |                    |                    |                    |                    |                    | <b>680,0</b>         |
| Diâmetro de 15 m                               | 800,0               |                    |                    |                    |                    |                    | <b>800,0</b>         |

Fonte: (1) Custos de equipamentos do modelo Oliveira (2004)  
 (2) Orçamento de uma empresa de São Paulo - SP (09/2008)  
 (3) Orçamento de uma empresa de Blumenau - SC (09/2008)  
 (4) Estimativa de preços de uma empresa de São Paulo - SP (09/2008)  
 (5) <http://www.saneago.com.br/ope/atas/75-2007.htm>

### **5.3 Teste de simulação com o modelo Oliveira (2004)**

Após a atualização dos custos do modelo, foi possível realizar um teste de simulação com o mesmo. Seguindo os quatro passos preliminares para a realização de simulações propostos por Ragsdale (2004), primeiramente, foram identificadas as variáveis de entrada do modelo Oliveira (2004) consideradas incertas. Para isto, as variáveis do modelo foram comparadas com os parâmetros iniciais dos 12 projetos de sistemas de tratamento de esgoto coletados.

Dentre as variáveis de entrada do modelo Oliveira (2004), apenas as variáveis “Alcance do projeto” e “Classificação do rio receptor” receberam valores constantes,

portanto, não foram consideradas incertas. A primeira recebeu o valor de 20 anos, pois foi este o parâmetro utilizado em todos os projetos, e a segunda foi considerada como classe 2, que é a classe de rio com o valor mais restritivo dentre todos os projetos.

Depois da definição das variáveis incertas, o próximo passo foi a definição de uma distribuição de probabilidade apropriada para cada variável incerta. A variável “População estimada (20 anos)” recebeu valores aleatórios, com distribuição uniforme, entre 500 e 100.000 habitantes. As variáveis “Vazão afluyente média” e “Vazão afluyente máxima” receberam, respectivamente, 18 e 24% do valor da variável “População estimada (20 anos)”, pois, em média, estas variáveis receberam esses valores nos projetos. Dentre os parâmetros coletados nos projetos, a variável “DBO média afluyente” se comportava com uma distribuição normal, de média 287 e desvio padrão 27 e foi esta distribuição que a variável recebeu na simulação. Por fim, a variável “Temperatura média do líquido no mês mais frio”, assim como a variável “DBO média afluyente”, tinha o comportamento de uma distribuição normal e recebeu os valores de 20 para a média e 2 para o desvio padrão.

Tendo sido definidas quais eram as variáveis incertas do modelo Oliveira (2004) e suas respectivas distribuições probabilísticas, os dados de entrada da planilha eletrônica do modelo Oliveira (2004) foram configurados apropriadamente com o auxílio do *software* Crystal Ball<sup>®</sup> e foram realizadas mil simulações para populações variando entre 500 e 100.000 habitantes, concretizando o terceiro passo definido por Ragsdale (2004).

### **5.3.1 Correção do cálculo do número de aeradores dos sistemas**

Após a simulação, foram identificadas lacunas nos resultados. Estas lacunas eram referentes a um problema de cálculo de aeradores que ainda estava ocorrendo nos sistemas “A”, “C”, “E” e “G”. Como solução, estes sistemas passaram a receber um aerador a mais para cada 10 mil habitantes quando a população era menor do que 20 mil habitantes. Na faixa

entre 20 e 50 mil habitantes, passaram a ser adicionados dois aeradores a mais para cada 10 mil habitantes. Na faixa entre 50 e 75 mil habitantes, passaram a ser adicionados três aeradores a mais para cada 10 mil habitantes. Entre 75 e 100 mil habitantes, quatro aeradores a mais. E, a partir de 100 mil habitantes, cinco aeradores a mais. No caso do “Sistema A” também foi necessário corrigir um problema, em uma das fórmulas da planilha, que não estava considerando o intervalo entre 7 e 7,5 no cálculo da potência dos aeradores. Portanto, se o valor estivesse dentro desta faixa, o cálculo não era realizado, o que causava problemas nos cálculos do custo deste sistema. Em seguida a estes ajustes, foi realizada uma nova simulação com as mesmas variáveis definidas no item 5.3 e mais nenhuma lacuna foi encontrada nos resultados, o que comprovou a correção deste problema.

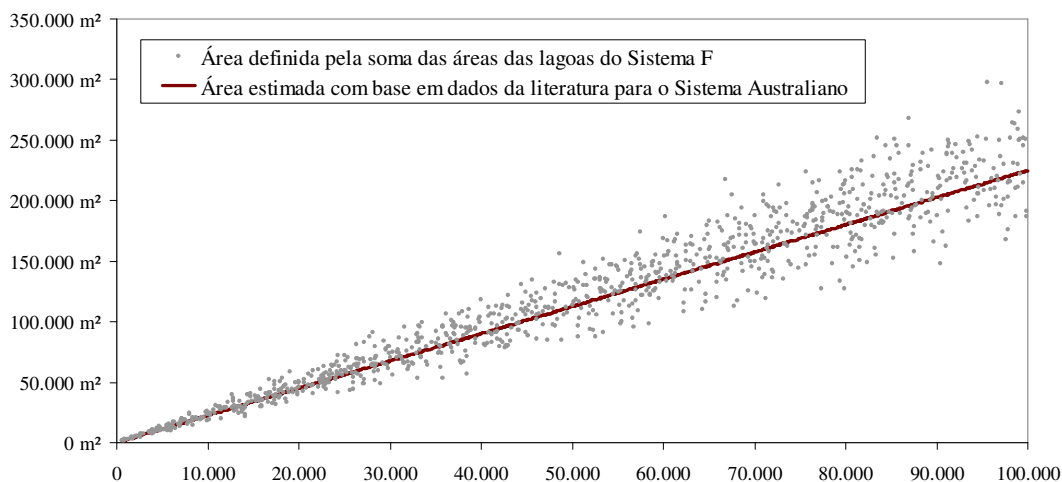
Também foi corrigido o problema do número de aeradores que devem compor o sistema da “Lagoa aerada”. Este sistema estava adotando como padrão quatro aeradores. No entanto, para populações maiores do que 50 mil habitantes, este número se tornava insuficiente, sendo corrigido com um aerador a mais para cada 10 habitantes. Esta alteração solucionou os problemas dos sistemas “D” e “H” do modelo Oliveira (2004).

Especificamente no “Sistema E” o cálculo da depreciação dos equipamentos estava incorreto. O modelo Oliveira (2004) estava utilizando um valor próximo de zero para efetuar o cálculo de 4% do valor dos equipamentos por ano. Isto foi corrigido orientando o cálculo a utilizar o valor correto dos equipamentos situados na planilha.

### **5.3.2 Correção do cálculo da área dos sistemas**

Um problema que estava causando distorções nos cálculos dos custos dos sistemas que adotam lagoas no processo de tratamento era o referente ao tamanho do terreno. Esta variável estava sendo calculada de acordo com uma estimativa encontrada na literatura, em função do número de habitantes. No entanto, havia situações em que o tamanho da área das lagoas era

muito maior ou muito menor do que o tamanho da área estimada para o terreno. Este erro foi corrigido fazendo com que o modelo passasse a calcular o custo do terreno com base na soma da área das lagoas para todos os sistemas que as utilizam no seu processo de tratamento, neste caso os sistemas “B”, “D”, “F” e “H”. A figura 5.1 apresenta, graficamente, com base nos dados simulados, a estimativa da área do terreno baseada na literatura e o tamanho do terreno baseado na soma das áreas necessárias pelas lagoas para o “Sistema F”, que representa o mesmo problema dos outros sistemas. Conforme o gráfico desta figura, para uma população de 50 mil habitantes a área seria de 110 mil m<sup>2</sup>.



**Figura 5.1 – Dimensionamento da área do “Sistema F” do modelo Oliveira (2004)**

Fonte: próprio autor

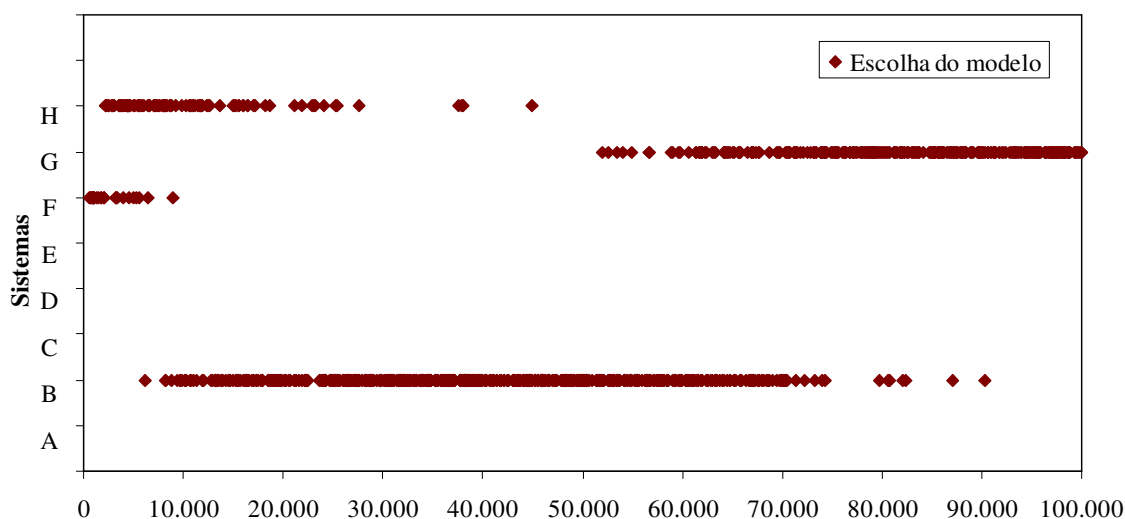
Foi identificado ainda, com a comparação dos custos calculados pelo modelo Oliveira (2004) e os orçamentos dos projetos das 12 cidades coletados, que o cálculo da variável “Escavações e limpeza do terreno” para os sistemas “F” e “H” estava superestimado. Para o cálculo desta variável, o modelo utiliza as variáveis dos custos de construção “Escavação do terreno” e “Raspagem e limpeza do terreno”, sendo que a primeira destas variáveis é uma estimativa média entre a escavação manual e a mecanizada. Devido o tamanho destas lagoas ser superior aos dos outros sistemas, foi criada uma ponderação para se assumir um pouco mais o custo da escavação mecanizada nos sistemas “F” e “H”, o que diminui um pouco o

custo da variável “Escavação do terreno”. A ponderação adotada foi 20% para o custo da escavação mecanizada e 80% para o custo da média entre escavação manual e mecanizada.

Também se verificou um erro no cálculo do valor de projeto para o “Sistema H”, pois estava bem inferior ao adotado no “Sistema F”, que é geralmente menos complexo e, portanto, mais barato. Caso semelhante foi quanto ao cálculo do valor do terreno, que no “Sistema H” estava bem defasado, o qual foi corrigido adotando o tamanho da área das lagoas ao cálculo do tamanho do terreno.

### 5.3.3 Correção da estimativa do custo de implantação dos sistemas

Até então tinham sido verificados somente os custos relacionados à implantação dos sistemas. Todavia, o modelo Oliveira (2004) também calcula os custos de operação e manutenção dos mesmos, com base em custos estimados por habitante encontrados na literatura. Estes valores são calculados pelo modelo para todo o tempo de alcance do projeto e são trazidos a valor presente para serem incorporados ao custo de implantação, sendo o custo total o escolhido para se avaliar as alternativas. A figura 5.2 apresenta as alternativas de menor custo total calculados pelo modelo Oliveira (2004), com base nos dados simulados.



**Figura 5.2 – Alternativas de menor custo total escolhidas pelo modelo Oliveira (2004)**

Fonte: próprio autor

Foi verificado que alguns sistemas não foram escolhidos e, portanto, os custos estimados para a implantação dos mesmos foram revistos e atualizados, com base em custos estimados propostos por Von Sperling (2006, p. 340). Estes custos são utilizados como estimativas em vários cálculos. A tabela 5.6 apresenta as estimativas que estavam sendo adotadas no modelo Oliveira (2004) e as estimativas propostas por Von Sperling (2006).

**Tabela 5.6 – Estimativas do custo de implantação dos sistemas (em US\$)**

|                    | Sistemas |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | A        | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     |
| Custos originais   | 37,00    | 36,00 | 33,00 | 33,00 | 36,00 | 21,00 | 44,00 | 28,00 |
| Custos atualizados | 36,00    | 24,00 | 30,00 | 29,00 | 29,00 | 21,00 | 24,00 | 26,00 |

Fonte: Estimativas adotadas pelo modelo Oliveira (2004) e estimativas propostas por Von Sperling (2006)

Pode-se observar que, originalmente, o “Sistema E” estava com um valor próximo ao do “Sistema A”. Estes dois sistemas utilizam reator de Lodos Ativados no segundo processo de tratamento e apenas se diferenciam no primeiro processo, sendo aquele por lagoas e este por reator. Como o custo de operação e manutenção dos reatores é maior do que das lagoas, a diferença entre os custos dos dois sistemas foi aumentada, com base na literatura. O mesmo caso ocorreu com o “Sistema G”, que possuía o maior valor dentre todos os sistemas. Este sistema utiliza um reator de Filtro Biológico no segundo processo de tratamento, da mesma forma que o “Sistema C”, sendo que ambos só se diferenciam no primeiro processo. Como no caso anterior, os custos de operação e manutenção foram alterados para estes dois sistemas.

#### **5.4 Padronização dos parâmetros**

Uma constatação importante foi que alguns cálculos das planilhas que fazem parte do modelo Oliveira (2004) estavam baseados no consumo de água, enquanto que outros utilizavam a concentração de DBO. Desta forma, as comparações entre os sistemas estavam erradas, pois deveriam estar padronizadas a um único parâmetro. Para solucionar este problema, todos os sistemas passaram a calcular a área pela concentração de DBO e não mais

pelo consumo médio de água por habitante por dia.

A partir disto, foi realizada uma revisão em todos os parâmetros do modelo Oliveira (2004) com base em dados de literatura atualizada. A importância destes parâmetros está relacionada aos custos de cada sistema. As alterações foram realizadas diretamente nas planilhas de cada sistema do modelo e foram identificadas pelo tipo de alteração e a data na qual ocorreu, conforme a figura 5.3.

|     | B                 | C                 | D   | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N |
|-----|-------------------|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 109 | mg/L              | 10                |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 110 | <b>Inadequado</b> |                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 111 |                   |                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 112 | <b>o Sistema</b>  |                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 113 | <b>ntação</b>     |                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 114 | <b>Unidade</b>    | <b>Qtd./Valor</b> |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 115 | US\$              | 0,00              | <b>Adaptado (26/9/2008)</b>   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 116 | m <sup>2</sup>    | 0                 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 117 | US\$              | 0,73              |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 118 | m <sup>2</sup>    | 16699,99          | <b>Corrigida a área pelo tamanho das lagoas (17/9/2008)</b>                                 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 119 |                   |                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 120 | US\$              | 148411,22         | <b>Criada a ponderação (22/9/2008)</b>  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 121 | m <sup>3</sup>    | 5574              | <b>Adaptado (7/4/2008)</b>  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 122 |                   | 22577             | <b>Adaptado (7/4/2008)</b>  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 123 | US\$              | 0,98              | <b>Inserido para fazer a ponderação entre valor escavado geral e mecanizado (22/9/2008)</b> |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 124 | US\$              | 6,01              | <b>Inserido uma "penalidade" para áreas muito grandes, seguno Ivens Teles (9/12/2008)</b>   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 125 | US\$              | 0,45              |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 126 | m <sup>2</sup>    | 16699,9875        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 127 |                   |                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 128 | US\$              | 10986,15          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 129 | US\$              | 219723,00         |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

**Figura 5.3 – Identificação das alterações realizadas no modelo Oliveira (2004)**

Fonte: próprio autor

Para cada alteração nos parâmetros foram verificadas as alterações no custo total dos sistemas e em suas variáveis relacionadas aos custos de implantação, operação e manutenção. As variáveis de custo observadas foram as seguintes: (a) custo do terreno; (b) custos de escavações e limpeza do terreno; (c) custo de projetos, em função do valor estimado da obra (5% do valor total da obra); (d) custo do tratamento preliminar: processo anterior aos sistemas de tratamento que compõem o modelo; (e) custo das fundações (20% do custo de concreto armado): para a construção dos reatores e tanques; (f) custo de paisagismo; (g) custo de drenagem; (h) custo de instalações elétricas: em função da potência instalada para

equipamentos; (i) custo de segurança: fechamento externo do terreno e guarda-corpo no entorno dos tanques; (j) custo de pára-raios; (k) custo de redes de água, esgoto e água de serviço; (l) custo de impermeabilização: de concreto e de lagoas; (m) custo das edificações de apoio: em função do custo médio de construção do local a ser implantada a estação; (n) custo de equipamentos: usados nos reatores, tanques e lagoas aeradas, para aeração, distribuição do fluxo e raspagem de lodo; (o) custo de telefonia e informática para automação; (p) custo de pavimentação, guias e sarjetas; (q) custo de vegetação para o “cinturão verde”; (r) custo do equipamentos de cloração e descloração; (s) custo de operação: estimado em função do custo anual de operação por habitante; e (t) custo de depreciação de equipamentos. A figura 5.4 apresenta a planilha “Resumo dos resultados”, que foi inserida no modelo Oliveira (2004) para facilitar a observação destas variáveis, permitindo a comparação entre os sistemas.

|    | Sistema A                                    | Sistema B     | Sistema C     | Sistema D     | Sistema E     | Sistema F     | Sistema G     | Sistema H     |
|----|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|    | US\$   | US\$          | US\$          | US\$          | US\$          | US\$          | US\$          | US\$          |
| 1  |  |               |               |               |               |               |               |               |
| 2  |  |               |               |               |               |               |               |               |
| 3  | <b>Descrição do custo</b>                    |               |               |               |               |               |               |               |
| 4  | Terreno                                      | 67.286,31     | 250.480,27    | 56.071,93     | 89.088,03     | 183.167,44    | 504.639,07    | 164.476,80    |
| 5  | Escavações e limpeza do terreno              | 156.731,34    | 2.680.776,71  | 151.289,18    | 1.435.217,31  | 1.266.323,47  | 10.373.018,56 | 1.339.310,28  |
| 6  | Valor de projetos (5% valor obra)            | 658.378,80    | 438.919,20    | 548.649,00    | 530.360,70    | 530.360,70    | 384.054,30    | 493.784,10    |
| 7  | Treatmento preliminar                        | 889.014,58    | 889.014,58    | 889.014,58    | 889.014,58    | 889.014,58    | 889.014,58    | 889.014,58    |
| 8  | Fundações (20% concreto armado)              | 382.047,12    | 258.282,16    | 419.565,83    | 258.282,16    | 237.336,25    | 0,00          | 244.923,21    |
| 9  | Paisagismo                                   | 100.929,47    | 125.240,14    | 84.107,89     | 66.816,02     | 274.751,16    | 252.319,54    | 246.715,19    |
| 10 | Drenagem                                     | 114.418,07    | 283.955,42    | 95.348,39     | 100.994,10    | 311.469,96    | 572.080,97    | 279.687,16    |
| 11 | Instalações elétricas                        | 289.522,06    | 0,00          | 0,00          | 145.000,00    | 289.522,06    | 0,00          | 0,00          |
| 12 | Segurança                                    | 208.304,32    | 218.035,41    | 194.886,84    | 191.544,64    | 235.402,30    | 245.561,62    | 217.038,04    |
| 13 | Pára-raios                                   | 25.400,42     | 25.400,42     | 25.400,42     | 25.400,42     | 25.400,42     | 25.400,42     | 25.400,42     |
| 14 | Redes de água, esgoto, água de serviço       | 430.791,07    | 321.051,27    | 375.526,17    | 366.782,02    | 366.782,02    | 293.628,82    | 348.493,72    |
| 15 | Concreto armado                              | 1.960.235,61  | 1.291.410,79  | 2.087.829,15  | 1.291.410,79  | 1.542.695,60  | 48.346,14     | 1.224.616,07  |
| 16 | Impermeabilização                            | 410.270,07    | 3.208.641,60  | 445.296,73    | 1.959.967,64  | 785.344,05    | 6.075.966,75  | 898.411,39    |
| 17 | Edificações                                  | 27.402,82     | 13.701,41     | 18.268,54     | 22.935,68     | 18.268,54     | 4.567,14      | 9.134,27      |
| 18 | Equipamentos                                 | 2.049.758,67  | 1.369.638,89  | 2.023.388,49  | 1.693.448,78  | 1.823.138,53  | 1.143.018,75  | 1.996.527,05  |
| 19 | Telefonia/informática para automação         | 508.008,33    | 508.008,33    | 508.008,33    | 508.008,33    | 508.008,33    | 508.008,33    | 508.008,33    |
| 20 | Vias de circulação                           | 206.490,63    | 512.495,19    | 172.075,53    | 182.264,35    | 562.110,76    | 1.032.436,24  | 504.752,25    |
| 21 | Área de "cinturão verde"                     | 114.655,19    | 110.608,15    | 104.665,39    | 79.157,36     | 189.170,97    | 156.996,80    | 179.259,71    |
| 22 | Desinfecção                                  | 1.016.016,67  | 1.016.016,67  | 1.016.016,67  | 1.016.016,67  | 1.016.016,67  | 1.016.016,67  | 1.016.016,67  |
| 23 | Estimativa do custo de operação              | 9.343.674,33  | 6.229.116,22  | 6.830.171,29  | 7.649.791,85  | 8.879.222,68  | 3.278.482,22  | 7.062.397,12  |
| 24 | Depreciação de equipamentos                  | 1.114.275,57  | 744.553,58    | 1.099.940,40  | 920.580,86    | 991.081,90    | 621.359,91    | 1.079.902,04  |
| 25 | <b>Custos por habitante</b>                  | <b>US\$</b>   | <b>US\$</b>   | <b>US\$</b>   | <b>US\$</b>   | <b>US\$</b>   | <b>US\$</b>   | <b>US\$</b>   |
| 26 | Custo total por habitante                    | 54,90         | 56,03         | 46,90         | 52,01         | 57,21         | 74,98         | 51,17         |
| 27 | Custo de implantação por habitante           | 26,31         | 36,97         | 25,22         | 28,57         | 30,22         | 64,32         | 28,91         |
| 28 | <b>Resumo dos custos</b>                     | <b>US\$</b>   | <b>US\$</b>   | <b>US\$</b>   | <b>US\$</b>   | <b>US\$</b>   | <b>US\$</b>   | <b>US\$</b>   |
| 29 | Estimativa de custo de implantação           | 9.623.861,55  | 13.521.646,60 | 9.225.809,06  | 10.451.609,59 | 11.054.273,81 | 23.525.074,69 | 10.575.569,23 |
| 30 | Estimativa de custo de operação e manutenção | 10.457.949,90 | 6.973.669,80  | 7.930.111,63  | 8.570.372,71  | 9.870.304,58  | 3.899.842,13  | 8.142.299,15  |
| 31 | <b>Custo total do sistema</b>                | <b>US\$</b>   | <b>US\$</b>   | <b>US\$</b>   | <b>US\$</b>   | <b>US\$</b>   | <b>US\$</b>   | <b>US\$</b>   |
| 32 | Custo total do sistema                       | 20.081.611,45 | 20.495.316,40 | 17.155.920,75 | 19.021.982,30 | 20.924.578,39 | 27.424.916,82 | 18.717.868,39 |
| 33 | Ordem  | 4             | 5             | 1             | 3             | 6             | 8             | 2             |

Figura 5.4 – Planilha “Resumo dos resultados” inserida no modelo Oliveira (2004)

Fonte: próprio autor

Para se verificar outros aspectos não evidenciados pela simulação, foram realizadas entrevistas semi-estruturadas junto aos representantes de organizações envolvidas no tratamento de esgoto. Os entrevistados foram os engenheiros Renato Crivelenti e Adolfo

Monteiro Moraes do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) de Ribeirão Preto, o engenheiro Guilherme Diogo Junior do DAEE de São José do Rio Preto, o engenheiro Silvio Leifert da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) de São Paulo, os engenheiros Nathanael Silva Junior e Luciano Reami da SABESP de Franca, o engenheiro e professor universitário Marcos von Sperling da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), os engenheiros Leonardo Buim Barradas e Glauco Figueiredo da Representação de Desenvolvimento Urbano (REDUR) da Caixa Econômica Federal de Ribeirão Preto, além do engenheiro e projetista Ivens Telles Alves da T. Alves Engenharia Ambiental LTDA.

### **5.5 Variável “Tipo de solo”**

Nos doze projetos coletados, também não constava o custo de impermeabilização do terreno, isto pode explicar o fato de que, com exceção do projeto do município de Caconde, que adotou um tratamento com Lagoa Aerada seguida de Lagoa de Decantação, a maioria das cidades adotou como alternativa o Sistema Australiano, pois, sem a impermeabilização, este sistema se torna economicamente mais barato.

De acordo com a Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE, 1981, p.7), devem ser conhecidos os coeficientes de permeabilidade do solo para “que cumpra da melhor forma possível todos os objetivos visados”, pois alguns tipos de solos podem não ser adequados para certos tipos de sistemas. Por exemplo, os sistemas que utilizam lagoas em seu processo de tratamento de esgoto necessitam que o tipo de solo seja formado por areias finas e argilosas, para que não haja percolação do líquido em tratamento. Ainda segundo a ABGE (1981), os tipos de solos podem ser classificados em: (i) pedregulhos; (ii) areias; (iii) areias finas siltosas e argilosas; e (iv) argilas. Somente o terceiro tipo de solo é apropriado para a implantação de lagoas sem impermeabilização. Neste caso, a impermeabilização do mesmo é

alcançada realizando-se uma compactação no terreno.

Para adaptar os custos do terreno com os custos diferenciados que os tipos de solos podem acarretar, uma variável dicotômica do tipo 0 ou 1, foi inserida para tratar o caso de quando o tipo de solo da área disponível requeresse a aplicação de mantas para impermeabilização das lagoas, calculando o seu custo por metro quadrado de aplicação, que é mais caro do que apenas a compactação do solo.

### 5.6 Teste piloto

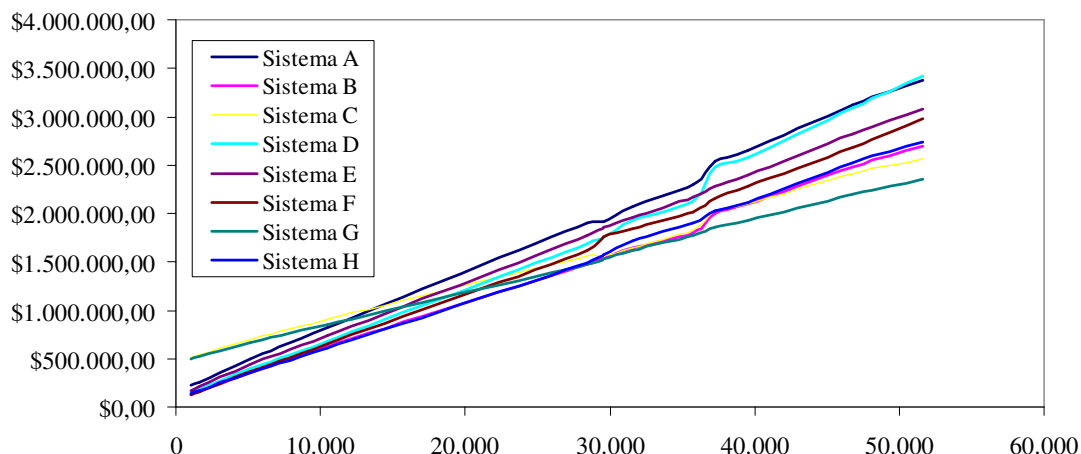
Após esses ajustes iniciais o modelo começou a alcançar resultados mais robustos que resistiam a variações relativamente significativas nas variáveis de maior impacto, com exceção da variável “População estimada (20 anos)”. O quadro 5.2 mostra as alternativas de menor custo monetário propostas pelo modelo Oliveira (2004) para os municípios, que evidenciaram tendências com relação à faixa de população.

| <b>Cidade</b>        | <b>População estimada (20 anos)</b> | <b>Sistema proposto pelo modelo Oliveira (2004)</b> |
|----------------------|-------------------------------------|---|
| Ibiporanga           | 1093                                | Sistema F   |
| Ecatu-Tanabi         | 1606                                | Sistema F   |
| Mirassolândia        | 5169                                | Sistema H   |
| Cruz das Posses      | 10463                               | Sistema H   |
| Caconde              | 28394                               | Sistema B   |
| Casa Branca          | 29602                               | Sistema B   |
| Rio das Pedras       | 31604                               | Sistema G   |
| Descalvado           | 35709                               | Sistema G   |
| Barrinha             | 37299                               | Sistema G   |
| Ituverava            | 39515                               | Sistema G   |
| Américo Brasiliense  | 46740                               | Sistema G   |
| Vargem Grande do Sul | 51595                               | Sistema G   |

**Quadro 5.2 – Out-puts do modelo Oliveira (2004)**

Fonte: próprio autor

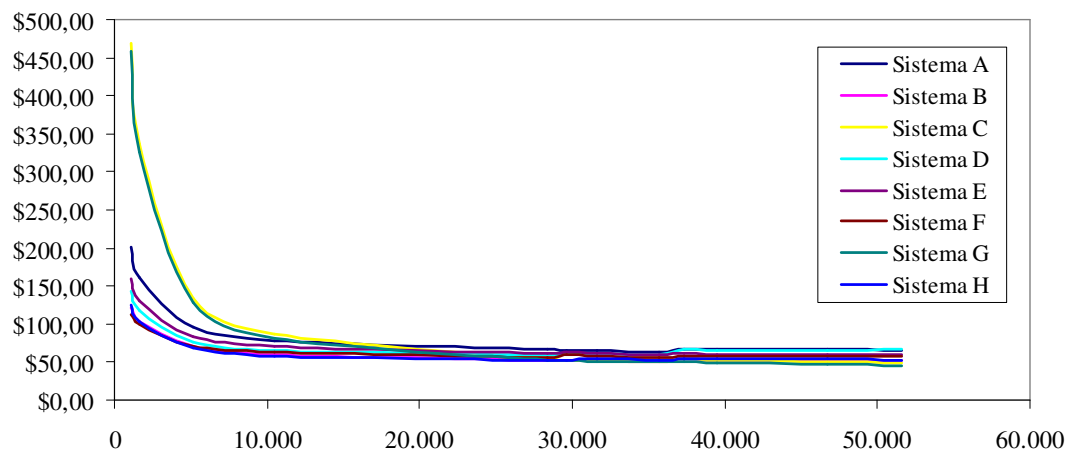
A figura 5.5 mostra as curvas dos custos de implantação, operação e manutenção, durante um período de 20 anos, para cada sistema em função do tamanho da população.



**Figura 5.5 – Curvas de custo total por sistema (em US\$)**

Fonte: próprio autor

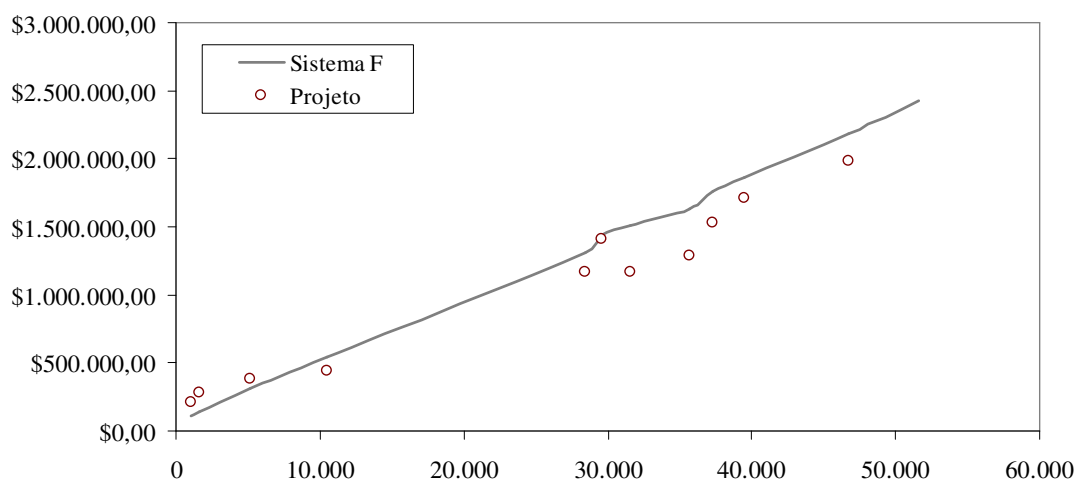
Outro fato percebido foi que existe um ganho de escala em cada sistema, quando aumentado o tamanho da população atendida. A figura 5.6 demonstra esta tendência ao ganho de escala na implantação das estações de tratamento de esgoto.



**Figura 5.6 – Curvas de custo total por habitante dos sistemas (em US\$)**

Fonte: próprio autor

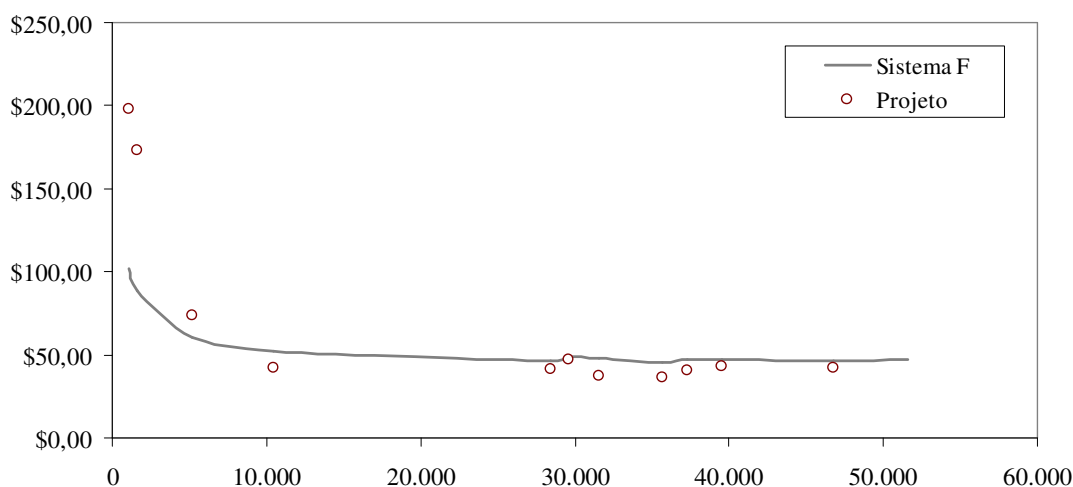
Os projetos consideravam apenas o custo de implantação do sistema. Assim, considerando apenas o custo de implantação proposto pelo modelo Oliveira (2004), puderam ser comparados os *out-puts* gerados pelo modelo com os dados coletados nos projetos. O gráfico que pode ser observado na figura 5.7 contempla apenas o “Sistema F”, que é a representação do sistema utilizado em 11 dos 12 municípios, o Sistema Australiano.



**Figura 5.7 – Curva de custo de implantação do “Sistema F” comparado com os custos de implantações dos projetos (em US\$)**

Fonte: próprio autor

A mesma análise de ganho de escala foi realizada considerando apenas o custo de implantação e, conforme o gráfico da figura 5.8, verifica-se ainda esta tendência.



**Figura 5.8 – Curva de custo de implantação por habitante do “Sistema F” comparado com os custos de implantações dos projetos (em US\$)**

Fonte: próprio autor

O fato da maioria dos projetos não contemplar os custos de operação e manutenção dos sistemas pode ser considerado uma falha na análise das alternativas no processo de tomada de decisão. Nos projetos que faziam a menção de um estudo de concepção, estes citavam que os estudos foram realizados em forma de comparações entre três tipos de

estações de tratamento de esgoto, sendo que a escolha do Sistema Australiano foi justificada por ser este sistema mais barato quando comparado aos outros.

Um subsídio ao estudo de soluções ambientais é a análise econômica dos investimentos. Pindyck (2000) avalia a relação custo-benefício na escolha da melhor e mais oportuna solução ambiental e enfatiza que soluções podem parecer interessantes em longo prazo, no entanto, o custo pode provocar aumentos de custos indesejáveis no produto final. Deve-se chegar a soluções que atendam aos aspectos técnicos, ecológicos e econômicos.

O ajuste do modelo aos custos dos projetos se mostrou satisfatório para o “Sistema F”. O próximo passo foi esclarecer o processo de decisão, tentando incorporar os julgamentos de valores dos agentes, na intenção de acompanhar a maneira como se desenvolvem as preferências (GOMES; GOMES; ALMEIDA, 2006). Uma metodologia que permite atingir este objetivo é a Análise Hierárquica de Processos (AHP).

O método AHP foi inicialmente concebido para satisfazer a uma demanda específica de planejamento de contingência, mas também foi utilizado em vários outros estudos e áreas atingindo resultados satisfatórios.

No teste piloto, foi utilizado o método AHP e, por meio dele, foi possível inserir o julgamento da autora do modelo Oliveira (2004), que julgou sobre os aspectos ambientais dos sistemas a serem instalados. Desta forma, foi possível determinar a força com que os elementos ambientais podiam influenciar na escolha da estação de tratamento e, assim, foi possível também comparar o custo dos sistemas ponderando as seguintes variáveis: geração de lodo; geração de gás metano; e consumo de energia.

Seguindo a metodologia proposta por Saaty (1991), um questionário para obtenção de julgamentos foi desenvolvido (apêndice B) e foi aplicado com a autora do modelo Oliveira (2004). As matrizes geradas a partir do questionário para obtenção de julgamentos podem ser visualizadas nas tabelas 5.7 a 5.12.

**Tabela 5.7 – Matriz de avaliação dos sistemas anaeróbios quanto à produção de lodo**

|                 | Anaeróbio |                 |
|-----------------|-----------|-----------------|
|                 | UASB      | Lagoa anaeróbia |
| UASB            | 1         | 7               |
| Lagoa anaeróbia | 1/7       | 1               |

**Tabela 5.8 – Matriz de avaliação dos sistemas aeróbios quanto à produção de lodo**

|                   | Aeróbio      |                   |                  |                   |
|-------------------|--------------|-------------------|------------------|-------------------|
|                   | Lodo ativado | Lagoa facultativa | Filtro biológico | Aerada/decantação |
| Lodo ativado      | 1            | 9                 | 9                | 2                 |
| Lagoa facultativa | 1/9          | 1                 | 1/5              | 1/7               |
| Filtro biológico  | 1/9          | 5                 | 1                | 1/6               |
| Aerada/decantação | 1/2          | 7                 | 6                | 1                 |

**Tabela 5.9 – Matriz de avaliação dos sistemas anaeróbios quanto à produção gás metano**

|                 | Anaeróbio |                 |
|-----------------|-----------|-----------------|
|                 | UASB      | Lagoa anaeróbia |
| UASB            | 1         | 1/9             |
| Lagoa anaeróbia | 9         | 1               |

**Tabela 5.10 – Matriz de avaliação dos sistemas aeróbios quanto à produção gás metano**

|                   | Aeróbio      |                   |                  |                   |
|-------------------|--------------|-------------------|------------------|-------------------|
|                   | Lodo ativado | Lagoa facultativa | Filtro biológico | Aerada/decantação |
| Lodo ativado      | 1            | 9                 | 9                | 3                 |
| Lagoa facultativa | 1/9          | 1                 | 3                | 5                 |
| Filtro biológico  | 1/9          | 1/3               | 1                | 1/3               |
| Aerada/decantação | 1/3          | 1/5               | 3                | 1                 |

**Tabela 5.11 – Matriz de avaliação dos sistemas anaeróbios quanto consumo de energia**

|                 | Anaeróbio |                 |
|-----------------|-----------|-----------------|
|                 | UASB      | Lagoa anaeróbia |
| UASB            | 1         | 3               |
| Lagoa anaeróbia | 1/3       | 1               |

**Tabela 5.12 – Matriz de avaliação dos sistemas aeróbios quanto ao consumo de energia**

|                   | Aeróbio      |                   |                  |                   |
|-------------------|--------------|-------------------|------------------|-------------------|
|                   | Lodo ativado | Lagoa facultativa | Filtro biológico | Aerada/decantação |
| Lodo ativado      | 1            | 9                 | 9                | 3                 |
| Lagoa facultativa | 1/9          | 1                 | 1/4              | 1/9               |
| Filtro biológico  | 1/9          | 4                 | 1                | 1/9               |
| Aerada/decantação | 1/3          | 9                 | 9                | 1                 |

O próximo passo da execução do método AHP, consistia na computação de um vetor de prioridades. Matematicamente, o principal auto-vetor da matriz é calculado e, quando normalizado, torna-se o vetor de prioridades. Os vetores de prioridades para as variáveis “Produção de lodo”, “Produção de gás metano” e “Consumo de energia” foram calculados e uma média entre eles gerou os seguintes vetores prioridades anaeróbios e aeróbios, respectivamente, [0,84;0,16] e [0,59;0,09;0,07;0,25].

Os vetores de prioridades gerados foram inseridos nas planilhas das doze cidades, que foram anteriormente calculadas. Houve uma ponderação entre os valores financeiros, já gerados pelo modelo Oliveira (2004), e estes vetores gerados pelo método AHP, na proporção de 50% cada. Os resultados das escolhas propostas pelo modelo, levando em consideração as variáveis ambientais e a comparação com os resultados anteriormente atingidos podem ser visualizados no quadro 5.2.

| <b>Cidade</b>        | <b>População Estimada (20 anos)</b> | <b>Sistema proposto pelo modelo Oliveira (2004)</b> | <b>Sistema proposto pelo modelo Oliveira (atualizado)</b> |
|----------------------|-------------------------------------|---|---|
| Ibiporanga           | 1093                                | Sistema F   | Sistema F   |
| Ecatu-Tanabi         | 1606                                | Sistema F   | Sistema F   |
| Mirassolândia        | 5169                                | Sistema H   | Sistema F   |
| Cruz das Posses      | 10463                               | Sistema H   | Sistema F   |
| Caconde              | 28394                               | Sistema B   | Sistema G   |
| Casa Branca          | 29602                               | Sistema B   | Sistema G   |
| Rio das Pedras       | 31604                               | Sistema G   | Sistema G   |
| Descalvado           | 35709                               | Sistema G   | Sistema G   |
| Barrinha             | 37299                               | Sistema G   | Sistema G   |
| Ituverava            | 39515                               | Sistema G   | Sistema G   |
| Américo Brasiliense  | 46740                               | Sistema G   | Sistema G   |
| Vargem Grande do Sul | 51595                               | Sistema G   | Sistema G   |

**Quadro 5.2 – Out-puts do modelo Oliveira (2004) sem e com a consideração das variáveis ambientais operacionalizadas pelo método AHP**

Fonte: próprio autor

Verificou-se que, aparentemente, os sistemas estavam se encaixando a uma determinada faixa populacional e as respostas do modelo variaram com a ponderação ambiental gerada pelo método AHP, o que demonstra que, para alguns casos, a proposta do

modelo Oliveira (2004), além de ser a de menor custo monetário, era também ambientalmente adequada.

Os testes e ajustes realizados foram suficientes para confirmar a metodologia proposta neste trabalho e, assim, a pesquisa continuou adicionando-se mais dados de projetos ao banco de dados para a realização de novas simulações com o modelo.

## **6 AVALIAÇÃO DO MODELO OLIVEIRA (2004)**

A avaliação do modelo Oliveira (2004) foi dividida em duas partes: uma quantitativa e outra qualitativa. Na parte quantitativa estão descritos os testes e ajustes realizados no modelo, bem como as análises estatísticas realizadas para verificar a adequação do modelo com os dados coletados de projetos. Na parte qualitativa estão descritos os testes aplicados para verificar a qualidade das respostas do modelo e a avaliação de especialistas da área de hidráulica e saneamento quanto aos seus possíveis usos. Também foram inseridos exemplos de aplicações para o modelo Oliveira (2004).

Nesta parte da pesquisa foi utilizado um método multicritério o AHP, pois, de acordo com Gomes, Gomes e Almeida (2006, p. 59) “os métodos de apoio multicritério procuram esclarecer o processo de decisão, tentando incorporar os julgamentos de valores dos agentes, na intenção de acompanhar a maneira como se desenvolvem as preferências”.

### **6.1 Versões adaptadas do modelo Oliveira (2004)**

Devido ao fato de que vários problemas foram encontrados a partir da inserção dos dados coletados dos projetos no modelo Oliveira (2004), foi necessário realizar adaptações no mesmo, as quais foram denominadas “versões” do modelo. Para cada problema encontrado, uma nova versão do modelo foi criada com a solução implantada.

As avaliações realizadas nesta pesquisa foram baseadas nas versões criadas do modelo Oliveira (2004), sendo utilizada em grande parte das avaliações a última versão. Qualquer outra versão que tenha sido utilizada para obter algum resultado será explicitada no texto.

As versões criadas estão comentadas e podem ser visualizadas no apêndice C. O quadro 6.1 apresenta o resumo descritivo de cada uma destas versões.

| <b>Data</b> | <b>Identificação</b>            | <b>Descrição das alterações</b>   |
|-------------|---------------------------------|---|
| 2004        | <b>Versão 1.0</b>               | Modelo original, resultado da tese de Oliveira (2004);  |
| 20/09/2007  | <b>Versão 1.1</b>               | Atualização dos preços da planilha “Dados Gerais”;  |
| 10/11/2007  | <b>Versão 1.2</b>               | Ajustes no modelo com base em 5 projetos coletados. Alteração do cálculo da variável “Custo do terreno” no “Sistema F”;   |
| 14/04/2008  | <b>Versão 2.0</b>               | Ajustes no modelo com base em 12 projetos coletados. Alteração nas variáveis do “Sistema F”: (i) “Porcentagem de paisagismo”; (ii) “Faixa de vegetação”; e (iii) “% de circulação”. Cálculos padronizados pela concentração de DBO. Excluídas as variáveis de entrada: “DQO”; “Vazão afluente máxima”; “Sólidos suspensos (SS)”; “NTK”; e “Fator de conversão de água”; |
| 15/05/2008  | <b>Versão 2.1</b>               | Substituição das variáveis de custo da planilha “Dados Gerais”: (i) “Pavimentação em blocos sextavados de concreto sobre coxim de areia” por “Pavimentação com lastro de brita ou cascalho 25mm”; e (ii) “Guias e sarjetas de concreto moldado ‘in loco’” por “Guias pré-moldada em concreto”, e seus respectivos custos;   |
| 23/06/2008  | <b>Versão 2.2</b>               | Criação do banco de dados com os dados coletados dos projetos;  |
| 11/07/2008  | <b>Versão 2.3</b>               | Correção das estimativas dos custos de operação e manutenção de acordo com os dados da teoria para cada sistema;  |
| 04/08/2008  | <b>Versão 2.3.1</b>             | Simulação parcial do modelo variando a população de 500 até 100 mil. Corrigido o número de aeradores do sistema da “Lagoa aerada”;  |
| 05/08/2008  | <b>Versão 2.4</b>               | Revisão de todos os parâmetros dos sistemas de acordo com dados atualizados da literatura;  |
| 06/08/2008  | <b>Versão 2.4.1</b>             | Revisão das estimativas dos custos de operação e manutenção de acordo com os dados da teoria e verificação do equilíbrio de Nash;   |
| 09/09/2008  | <b>Ajuste 1 na versão 2.4.1</b> | Correção do cálculo de aeradores nos sistemas “A” e “E”;  |
| 19/09/2008  | <b>Ajuste 2 na versão 2.4.1</b> | Substituídos os custos do modelo pela média entre os custos de 8 tabelas de custos de construção. Substituídos os custos dos aeradores pela média de novos orçamentos realizados;   |
| 08/12/2008  | <b>Versão 2.5</b>               | Ajustes no modelo com base em 61 projetos coletados. Correção do cálculo de aeradores nos sistemas “D” e “H”; Correção no cálculo da área do “Sistema B” e no cálculo da impermeabilização do “Sistema D”; Inserida ponderação para os custos das edificações dos sistemas e consideração de concreto armado nos sistemas “F” e “H”;                                    |
| 09/12/2008  | <b>Ajuste 1 na versão 2.5</b>   | Adequação dos sistemas “B”, “D” e “H” com base nas alterações realizadas na versão 2.0 no “Sistema F”.  |
| 22/12/2008  | <b>Ajuste 2 na versão 2.5</b>   | Correção do número de reatores do “Sistema A” e do número de decantadores dos sistemas “A” e “E”. Inclusão da ponderação AHP;   |

**Quadro 6.1 – Resumo descritivo das alterações realizadas no modelo Oliveira (2004)**

Fonte: próprio autor

## 6.2 Verificação dos sistemas do modelo Oliveira (2004)

Durante a avaliação do modelo Oliveira (2004) foi verificada a compatibilidade dos sistemas nele contemplados com a realidade dos tipos de estações de tratamento de esgoto usualmente adotados nos municípios brasileiros.

De acordo com os dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2000), dos seis sistemas contemplados no modelo de Oliveira (2004), cinco deles estão dentre os cinco primeiros classificados em ordem de utilização e o último, o sistema de Lagoa Aerada, corresponde à nona posição na classificação geral, ou seja, os seis sistemas contemplados no modelo Oliveira (2004) estão entre os dez tipos de sistemas de tratamento de esgoto mais adotados nos municípios e distritos brasileiros, o que demonstra a razoabilidade das alternativas. A tabela 6.1 exibe a classificação, o número de tipos de tratamento e quais deles fazem parte do processo decisório do modelo Oliveira (2004).

**Tabela 6.1 – Comparação entre sistemas contemplados no modelo Oliveira (2004) com sistemas mais adotados em municípios e distritos(\*) brasileiros**

| Classificação | Tipo de sistema    | Quantidade | Proporção | Consta no modelo Oliveira (2004) |
|---------------|--------------------|------------|-----------|----------------------------------|
| 1º            | Lagoa facultativa  | 375        | 18%       | Sim                              |
| 2º            | Filtro biológico   | 331        | 16%       | Sim                              |
| 3º            | Lagoa anaeróbia    | 312        | 15%       | Sim                              |
| 4º            | Reator anaeróbico  | 297        | 14%       | Sim                              |
| 5º            | Lodo ativado       | 227        | 11%       | Sim                              |
| 6º            | Fossa séptica      | 171        | 8%        | Não                              |
| 7º            | Lagoa aeróbia      | 136        | 6%        | Não                              |
| 8º            | Lagoa de maturação | 75         | 4%        | Não                              |
| 9º            | Lagoa aerada       | 61         | 3%        | Sim                              |
| 10º           | Lagoa mista        | 46         | 2%        | Não                              |
| 11º           | Valo de oxidação   | 28         | 1%        | Não                              |
| 12º           | Sem declaração     | 22         | 1%        | Não                              |
| 13º           | Outros             | 20         | 1%        | Não                              |

Fonte: IBGE (2000) (\*) Um mesmo distrito pode apresentar mais de um tipo de sistema de tratamento

Todavia, o modelo Oliveira (2004) não contempla esses sistemas individualmente, mas considera uma composição desses seis sistemas divididos em dois processos, o primeiro anaeróbio e o segundo aeróbio, totalizando oito tipos de sistemas de tratamento, nomeados de “A” a “H”. Apesar de possuir na composição de suas alternativas os sistemas mais utilizados no Brasil, dois desses sistemas compostos, os sistemas “E” e “G”, não são usuais, ou seja, não são adotados para o tratamento de esgoto nos municípios. Esta constatação foi levantada pelo Prof. Dr. Marcos von Sperling, da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e foi

confirmada com a coleta de dados de projetos. Dos 61 projetos coletados, nenhum associava o uso de uma lagoa anaeróbia seguida de lodos ativados, como o “Sistema E”, ou o uso de uma lagoa anaeróbia seguida de filtro biológico, como o “Sistema G”. A tabela 6.2 apresenta a quantidade de projetos coletados que representa cada sistema do modelo Oliveira (2004).

**Tabela 6.2 – Representação dos sistemas do modelo Oliveira (2004) na amostra**

| Nome      | Tipo de sistemas                    | Quantidade |
|-----------|-------------------------------------|------------|
| Sistema A | UASB e Lodo ativado                 | 6          |
| Sistema B | UASB e Lagoa facultativa            | 1          |
| Sistema C | UASB e Filtro biológico             | 3          |
| Sistema D | UASB e Lagoa aerada                 | 3          |
| Sistema E | Lagoa anaeróbia e Lodo ativado      | 0          |
| Sistema F | Lagoa anaeróbia e Lagoa facultativa | 21         |
| Sistema G | Lagoa anaeróbia e Filtro biológico  | 0          |
| Sistema H | Lagoa anaeróbia e Lagoa aerada      | 7          |

Fonte: Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE – de Ribeirão Preto e de São José do Rio Preto; Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP; Representação de Desenvolvimento Urbano – REDUR – da Caixa Federal; e Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas – PRODES

Também se considerou não ser necessária a inclusão de nenhum outro sistema ao modelo Oliveira (2004), pois nenhum outro tipo de composição de sistema, dentre os dados coletados, obteve representatividade.

### 6.3 Verificação da adequação do modelo Oliveira (2004) à legislação

Seguindo uma tendência mundial, o Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) definiu como diretriz que “o apoio financeiro a programas e projetos deve conciliar suas políticas operacionais ao atendimento da legislação ambiental em vigor” (BNDES, 2008c), o que implica em uma maior dificuldade de acesso aos recursos quando um projeto não está em conformidade com os padrões de qualidade ambientais.

O modelo Oliveira (2004) foi projetado para se adequar à legislação vigente, em 2004. Não obstante, a Resolução nº 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2005), de 17 de março de 2005, tornou o “Sistema F” do modelo inadequado, pois este

sistema não estaria atendendo ao nível máximo permitido de 20 mg/L de Nitrogênio no efluente. Um novo processo de tratamento deveria ser inserido ao “Sistema F”. Todavia, esta exigência foi eliminada pela Resolução nº 397 do CONAMA (2008), de 3 de abril de 2008, o que fez com que todos os sistemas do modelo se adequassem novamente à legislação, pois todos os parâmetros exigidos por lei estavam sendo cumpridos.

#### **6.4 Verificação das variáveis de entrada do modelo Oliveira (2004)**

Durante a fase de coleta de dados foram levantados 61 projetos de sistemas de tratamento de esgoto (apêndice A). A partir destes projetos foram extraídos os valores para as sete variáveis de entrada da última versão do modelo Oliveira (2004).

Na maioria dos projetos, os valores para todas as sete variáveis de entrada do modelo foram encontrados. No entanto, os valores para as variáveis “vazão afluente máxima” e “temperatura média do mês mais frio” foram encontrados em poucos projetos da amostra. Para estes casos, a “vazão afluente máxima” foi calculada de acordo com os parâmetros propostos por Von Sperling (2006, p. 78):  $Q_{\max} = Q_{\text{med}} \cdot k_1 \cdot k_2$  ( $k_1=1,5$ =coeficiente do dia de maior consumo e  $k_2=1,2$ =coeficiente da hora de maior consumo), portanto  $Q_{\max} = 1,8 \cdot Q_{\text{med}}$ . e a “temperatura média do mês mais frio” foi obtida no site do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2008)

Durante a fase de inclusão dos dados coletados no modelo, uma dificuldade encontrada foi referente às unidades de medidas de algumas variáveis, pois em alguns projetos elas se apresentavam em diferentes unidades, as quais eram incompatíveis com as variáveis de entrada do modelo. Para realizar a conversão destas variáveis, que se mostrou necessário na medida em que os dados coletados iam sendo inseridos no modelo, foi criada uma “Planilha de conversões” (figura 6.1), a qual tornou possível a inserção dos valores.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled "Planilha de conversões". The spreadsheet is organized into several sections for unit conversions and estimations. The data is as follows:

| Section  | Unit/Parameter                | Value       |
|--|-------------------------------|-------------|
| Conversor L/s para m3/d  | L/s                           | 465         |
|  | m3/d                          | 40176       |
|  |                               |             |
| Conversor T ar para T líquido  | Média do mês mais frio (T ar) | 17,6        |
|  | Temperatura do líquido        | 22,204      |
| Conversão vazão esgoto para consumo água   | m3/d                          | 2297        |
|  | Coef. retorno                 | 0,8         |
|  | Habitantes                    | 27168       |
|  | Consumo                       | 105,6849971 |
| Conversor Kg DBO/d para DBO mg/L   | Kg DBO/d                      | 17382       |
|  | Vazao afluente media (m3/d)   | 53481       |
|  | DBO mg/L                      | 325,0126213 |
| Estimativa para DBO  | Consumo de água (L/hab.dia)   | 148         |
|  | mg/L                          | 243,9392    |
|  |                               |             |
| Conversor m3/econ.mês para L/hab.dia   | m3/econ.mes                   | 16          |
|  | L/econ.dia                    | 533,3333333 |
|  | L/hab.dia                     | 181,3333333 |
| Esta estimativa foi obtida pela regressão simples entre consumo de água e concentração de DBO dos 12 projetos fornecidos pelo DAEE       |                               |             |
| O coeficiente 0,34 foi calculado como uma média das proporções entre L/econ.dia e L/hab.dia (Fonte: PDF - Parametros do consumo de agua) |                               |             |

**Figura 6.1 – Planilha de conversões utilizada durante a inserção de dados no modelo**

Fonte: próprio autor

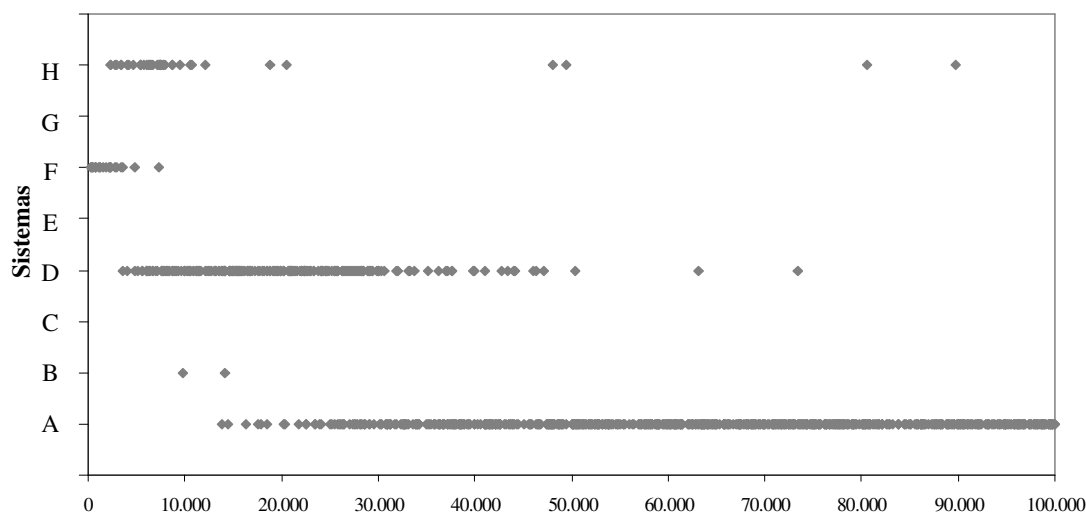
## 6.5 Análise quantitativa

A análise quantitativa realizada nesta pesquisa consistiu na aplicação dos dados coletados nos 61 projetos de estação de tratamento de esgoto à última versão do modelo Oliveira (2004). Foram realizadas análises de sensibilidade para algumas observações, simulações com a variação dos valores das sete variáveis de entrada e dos valores dos custos de construção do modelo, além da comparação dos custos de implantação por habitante dos sistemas do modelo com algumas tabelas de referência de custo. Nesta parte não foram avaliados os sistemas “E” e “G”, pois estes sistemas não estavam representados na amostra.

### 6.5.1 Simulação

A última versão do modelo Oliveira (2004) foi simulada com a utilização do *software* Crystal Ball® para a obtenção de mil cenários diferentes, para a população variando de 500 até

100 mil habitantes, e para a população variando de 500 até 1 milhão de habitantes. Foi verificado, separadamente, o comportamento das alternativas de menor custo monetário para o custo de implantação dos sistemas e para o custo total, incluindo a implantação, operação e manutenção dos sistemas. O gráfico da figura 6.2 apresenta as alternativas que alcançaram o menor valor monetário, somente considerando o custo de implantação dos sistemas, para populações de até 100 mil habitantes.



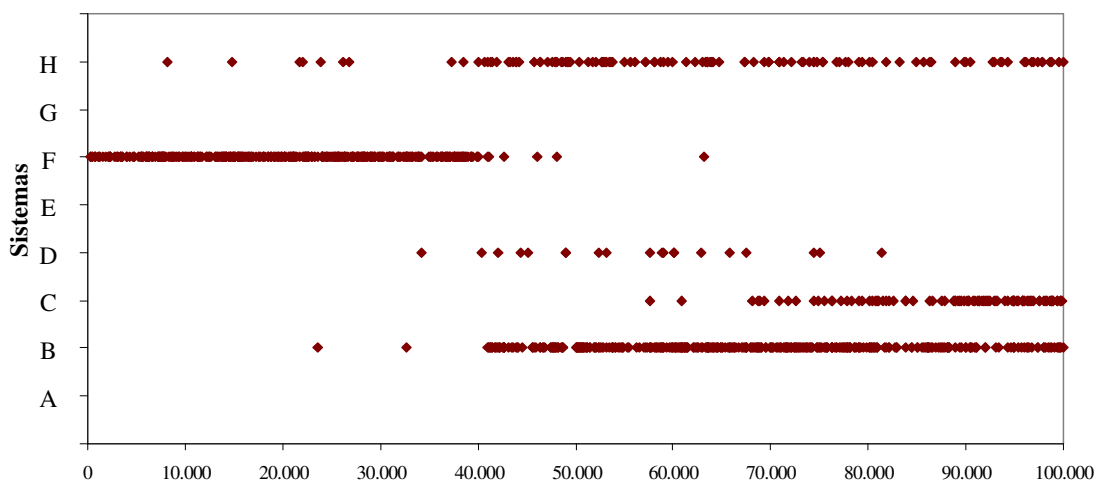
**Figura 6.2 – Alternativa de menor valor monetário, considerando apenas o custo de implantação dos sistemas, para populações de até 100 mil habitantes**

Fonte: próprio autor

Considerando-se apenas o custo de implantação, de acordo com o gráfico, a última versão do modelo Oliveira (2004) seleciona reatores para quase todas as faixas de população. O “Sistema F” é escolhido para populações de até 4 mil habitantes, o “Sistema H” de 4 até 12 mil habitantes, o “Sistema D” de 5 até 50 mil habitantes, com alguns *out-liers*, e o “Sistema A”, composto por um UASB seguido de lodos ativados, a partir de 20 mil habitantes. Esta constatação equivale à prática de se adotar o sistema UASB seguido de lodos ativados como o menor custo de implantação.

Quando considerado o custo total dos sistemas, incluindo os custos de implantação, operação e manutenção, o “Sistema A” deixa de ser escolhido como a alternativa de menor

valor monetário, não sendo escolhido nenhuma vez para a faixa de 500 até 100 mil habitantes, conforme figura 6.3. Neste caso, o “Sistema F” passa a ser escolhido para populações de até 42 mil habitantes, sendo, a partir disto, dividida a preferência desse sistema com os sistemas “B” e “H”, para populações entre 40 e 70 mil habitantes. Para valores acima de 70 mil habitantes as preferências se alternam entre os sistemas “B”, “C” e “H”.

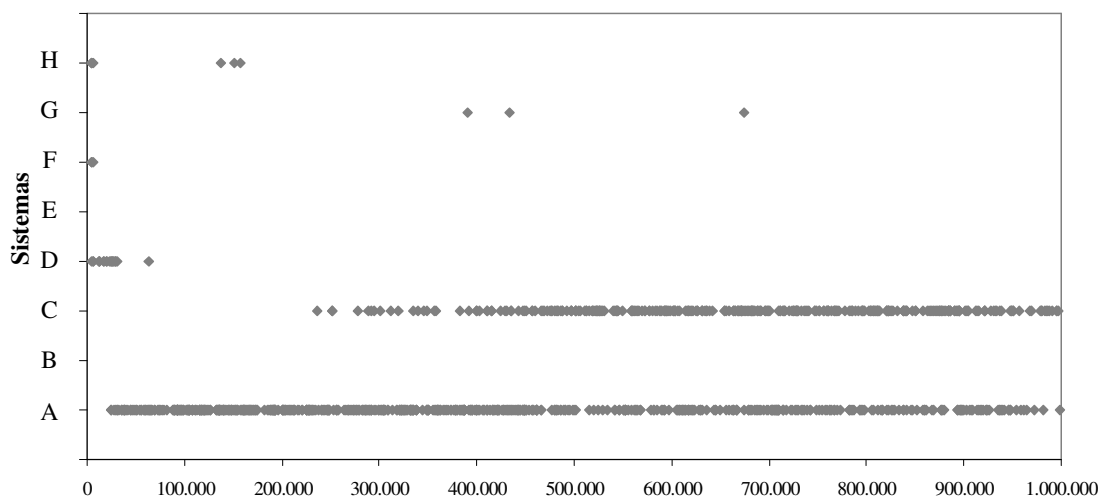


**Figura 6.3 – Alternativa de menor valor monetário, considerando o custo total dos sistemas, para populações de até 100 mil habitantes**

Fonte: próprio autor

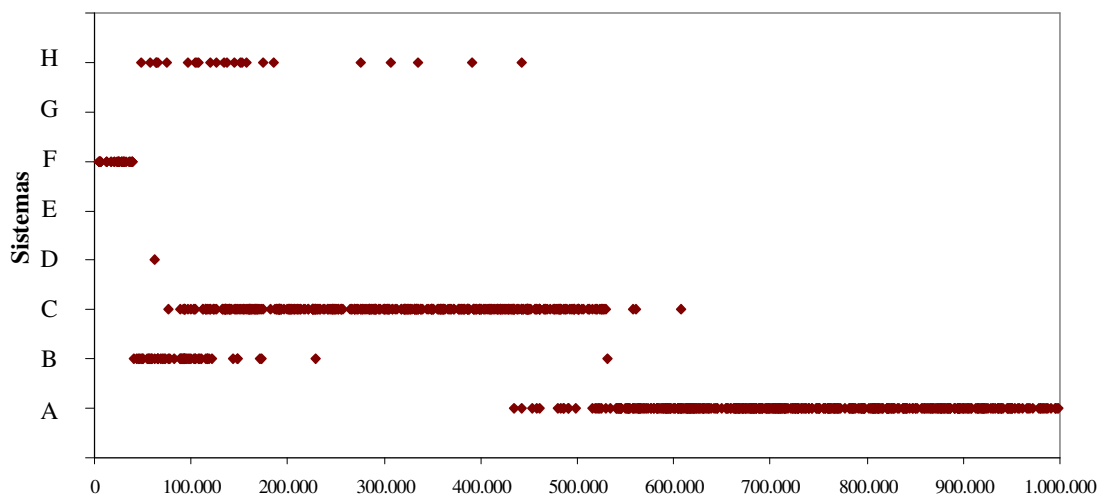
Para populações variando entre 500 e 1 milhão de habitantes, os cenários foram diferentes a partir dos 200 mil habitantes, considerado-se apenas os custos de implantação (figura 6.4). O “Sistema A” permaneceu como um dos melhores custos de implantação, enquanto que o “Sistema C” passou a compartilhar esta posição a partir dos 250 mil habitantes.

Considerando-se os custos de implantação, operação e manutenção, o “Sistema A” começa a ser preferido para populações maiores do que 500 mil habitantes (figura 6.5). O “Sistema B” é também escolhido até 130 mil habitantes, o “Sistema C” na faixa entre 90 e 520 mil habitantes e o “Sistema H” até 200 mil habitantes. O “Sistema D” foi escolhido para apenas um caso e o “Sistema F” para populações de até 50 mil habitantes.



**Figura 6.4 – Alternativa de menor valor monetário, considerando apenas o custo de implantação dos sistemas, para populações de até 1 milhão de habitantes**

Fonte: próprio autor

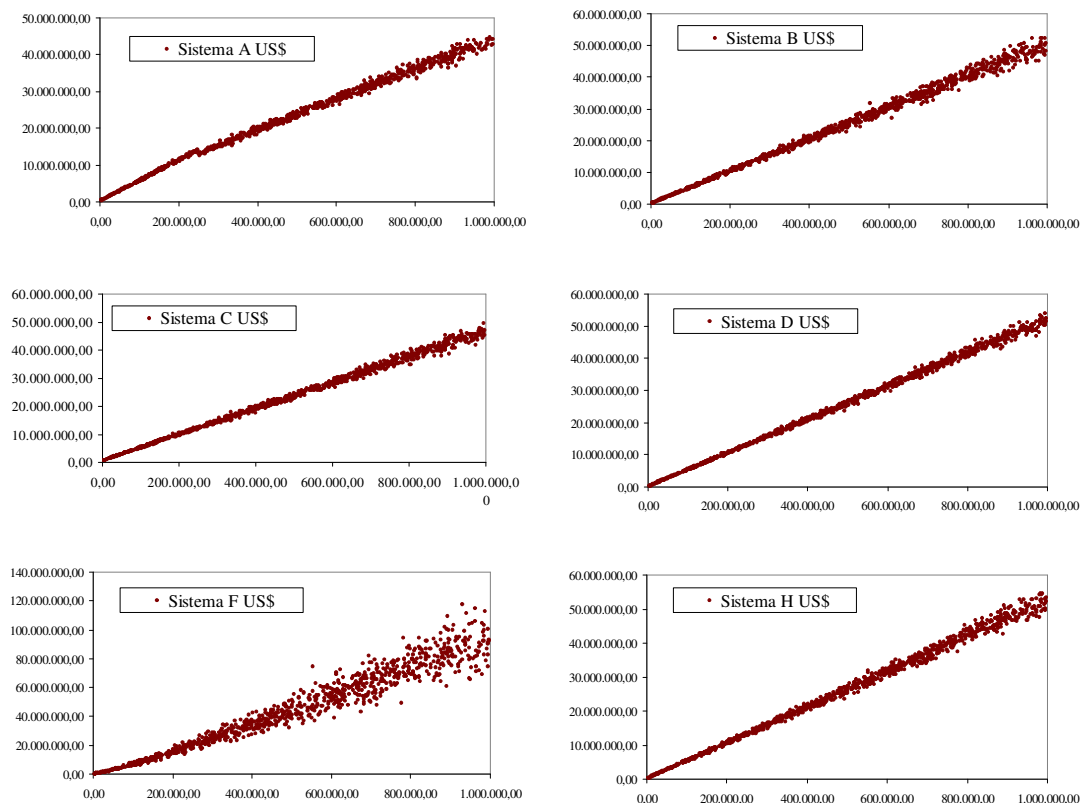


**Figura 6.5 – Alternativa de menor valor monetário, considerando o custo total dos sistemas, para populações de até 1 milhão de habitantes**

Fonte: próprio autor

Pelo fato de a última versão do modelo Oliveira (2004) ter alcançado populações de até 1 milhão de habitantes, fica comprovado que a restrição existente na versão original do modelo, a qual tinha o limite de atender populações de até 100 mil habitantes, foi corrigida. Em grande parte, os problemas com os aeradores eram os que estavam impedindo o aumento

da população e, conforme iam sendo corrigidos, o alcance do modelo foi aumentado. A figura 6.6 apresenta a dinâmica dos custos totais de cada sistema do modelo Oliveira (2004).



**Figura 6.6 – Dinâmica dos custos totais (em US\$) dos sistemas do modelo Oliveira (2004)**

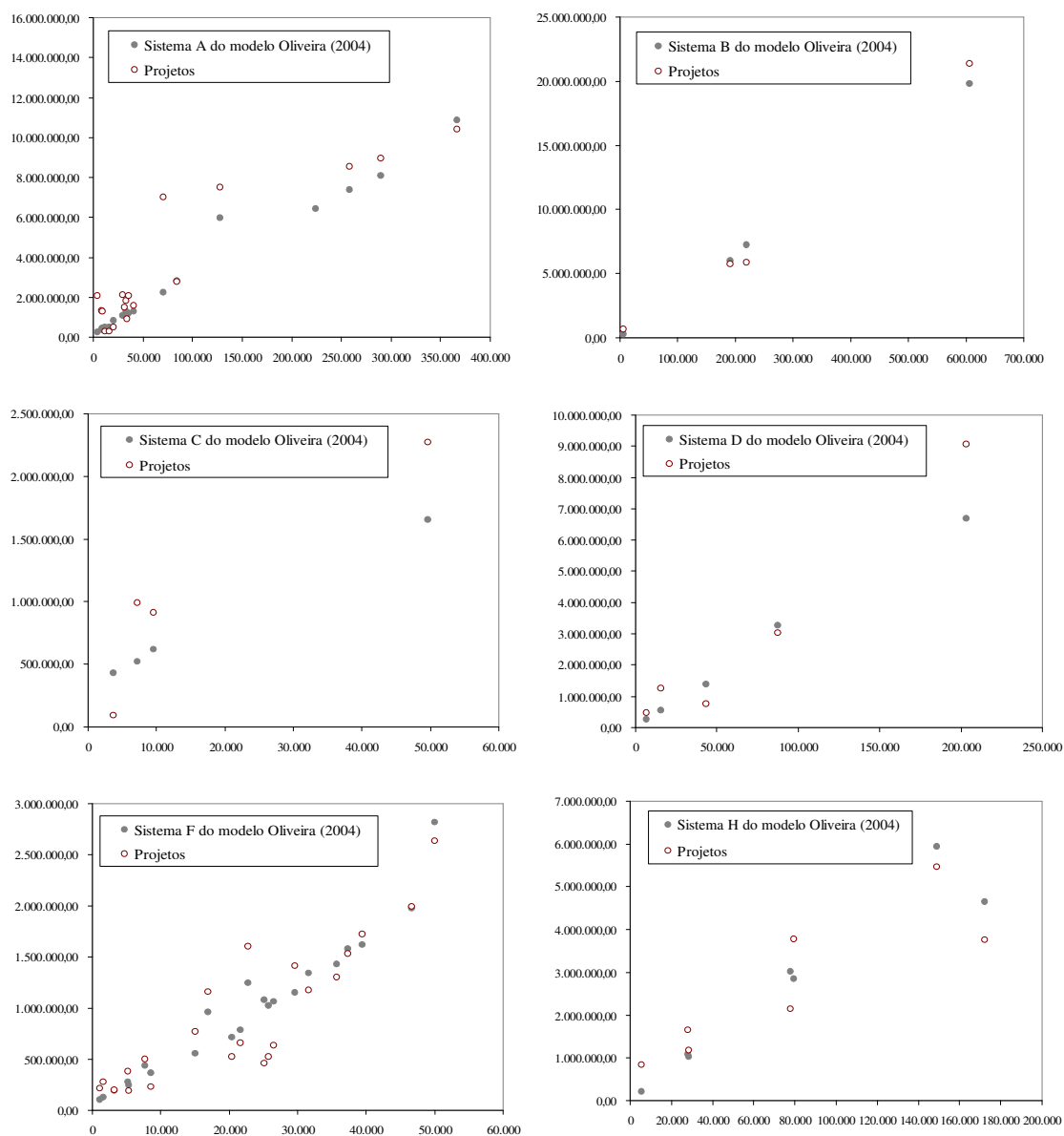
Fonte: próprio autor

A aparência dos gráficos dos custos simulados para cada sistema da última versão do modelo Oliveira (2004) são semelhantes a uma reta. Com exceção do “Sistema F”, todos os sistemas apresentaram pontos mais concentrados, ou seja, apresentaram pouca variação dos custos, o que poderia significar que o custo total do “Sistema F” é menos previsível que dos outros sistemas.

### 6.5.2 Análise de sensibilidade

Para se realizar a análise de sensibilidade, foram utilizados os dados coletados nos 61 projetos de estações de tratamento de esgoto (apêndice A). Os dados coletados foram

inseridos no modelo e a análise de sensibilidade foi realizada para apenas um município de cada tipo de sistema de tratamento. Foi escolhido o que possuía a menor diferença entre o custo proposto pelo modelo e o custo do projeto. Os orçamentos dos projetos foram atualizados para 2008, em reais, e convertidos em dólares na cotação de 1,80, ou seja, US\$ 1,00 = R\$ 1,80. A figura 6.7 apresenta os gráficos gerados a partir dos custos propostos pela última versão do modelo Oliveira (2004) em comparação aos custos dos projetos.



**Figura 6.7 – Comparação dos custos do modelo com os dos projetos (em US\$)**

Fonte: próprio autor

De acordo com Oliveira (2004), “quando houver diferenças de custo final menores que 15% entre as melhores alternativas, deve-se realizar [...] análises de sensibilidade”. O projeto escolhido para se realizar a análise de sensibilidade no “Sistema A”, foi o do município de Volta Redonda, RJ, pois a diferença entre as melhores alternativas deste sistema era menor do que 15% e foi o caso no qual houve o melhor ajuste dos custos de implantação proposto pelo modelo Oliveira (2004) ao custo de implantação definido no projeto. Os dados coletados podem ser visualizados na tabela 6.3.

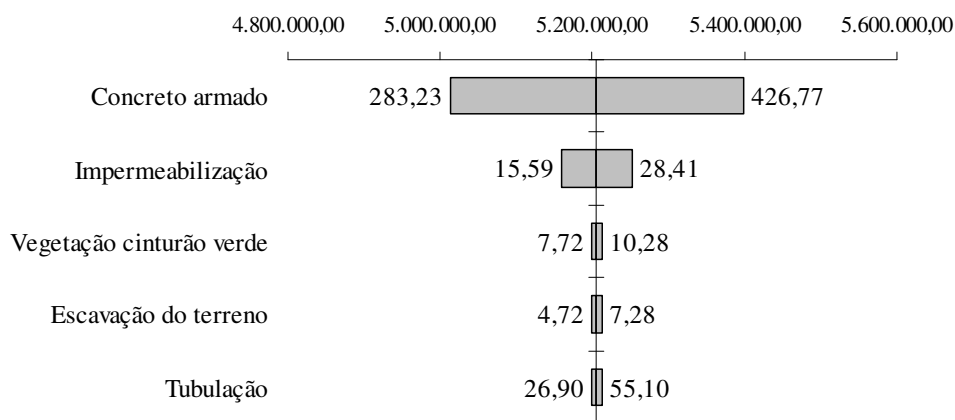
**Tabela 6.3 – Dados coletados no projeto do município de Volta Redonda**

| <b>Descrição</b>              | <b>Unidade</b>            | <b>Valor</b>                         |
|-------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Projeto de ETE                | Cidade                    | Volta Redonda                        |
|                               | UF                        | RJ                                   |
|                               | Fornecido por             | PRODES                               |
| População estimada 2025       | hab                       | 84556                                |
| Vazão afluente média          | m <sup>3</sup> /d         | 24105                                |
| Vazão afluente máxima         | m <sup>3</sup> /d         | 28926                                |
| DBO média afluente            | mg/L                      | 189                                  |
| Alcance do projeto            | ano                       | 20                                   |
| Classificação do rio receptor | Clas.                     | 2                                    |
|                               | Nome                      | Rio Paraíba do Sul                   |
| Temp. mês mais frio           | °C                        | 21                                   |
| Projeto                       | Nome                      | Lodos ativados c/ aeração prolongada |
|                               | Implantação (R\$)         | 7798290                              |
|                               | <b>Implantação (US\$)</b> | <b>2785104</b>                       |
|                               | Ano                       | 2001                                 |
|                               | Sistema                   | A                                    |
| Modelo Oliveira (2004)        | Imperm.                   | Sim                                  |
|                               | <b>Implantação (US\$)</b> | <b>2805670</b>                       |

Fonte: Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas – PRODES

A análise de sensibilidade realizada com os dados de projeto do município de Volta Redonda (figura 6.8) explicita que a variável de custo de construção do modelo Oliveira (2004) que mais influencia no custo total do “Sistema A” é a variável “Concreto armado”, seguida da variável “Impermeabilização”. De acordo com a maioria dos entrevistados e com dados da literatura um dos maiores custos para a implantação deste sistema é realmente o concreto armado (OLIVEIRA, 2004, p. 98). Cabe aqui ressaltar que os custos avaliados são

referentes à implantação dos sistemas.



**Figura 6.8 – Análise de sensibilidade realizada com os dados de projeto do município de Volta Redonda**

Fonte: próprio autor

Seguindo os mesmos critérios de escolhas adotados para o projeto do “Sistema A”, para o “Sistema B”, o projeto escolhido foi o do município de Curitiba (b)<sup>1</sup> (tabela 6.4).

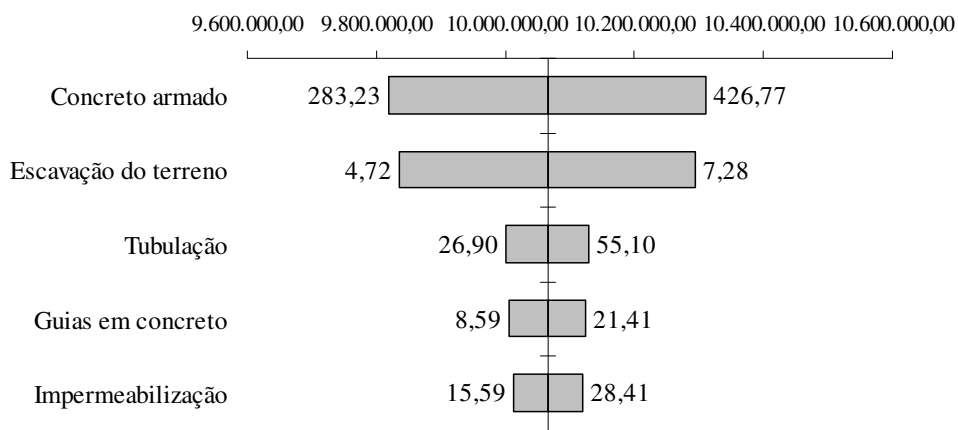
**Tabela 6.4 – Dados coletados no projeto do município de Curitiba (b)**

| Descrição                     | Unidade                   | Valor                  |
|-------------------------------|---------------------------|------------------------|
| Projeto de ETE                | Cidade                    | Curitiba (b)           |
|                               | UF                        | PR                     |
|                               | Fornecido por             | PRODES                 |
| População estimada 2025       | hab                       | 191759                 |
| Vazão afluente média          | m <sup>3</sup> /d         | 37929                  |
| Vazão afluente máxima         | m <sup>3</sup> /d         | 45514,8                |
| DBO média afluente            | mg/L                      | 273                    |
| Alcance do projeto            | ano                       | 20                     |
| Classificação do rio receptor | Clas.                     | 2                      |
|                               | Nome                      | Ribeirão dos Padilhas  |
| Temp. mês mais frio           | °C                        | 17                     |
| Projeto                       | Nome                      | UASB + Lagoa Anaeróbia |
|                               | Implantação (R\$)         | 15972474               |
|                               | <b>Implantação (US\$)</b> | <b>5704455</b>         |
|                               | Ano                       | 2001                   |
|                               | Sistema                   | B                      |
| Modelo Oliveira (2004)        | Imperm.                   | Não                    |
|                               | <b>Implantação (US\$)</b> | <b>6009388</b>         |

Fonte: Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas – PRODES

<sup>1</sup> Para alguns municípios da amostra existiam mais de um projeto, sendo eles diferenciados por letras no final

Semelhantemente à análise de sensibilidade realizada com os dados do município de Volta Redonda, a variável de custo de construção do modelo Oliveira (2004) que mais influencia no custo total do “Sistema B” é a variável “Concreto armado” (figura 6.9). Todavia a segunda variável que mais influencia no custo total do “Sistema B” passou a ser a variável “Escavação do terreno”. Esta mudança pode ser uma influência da adoção de uma lagoa facultativa no processo de tratamento do “Sistema B”.



**Figura 6.9 – Análise de sensibilidade realizada com os dados de projeto do município de Curitiba (b)**

Fonte: próprio autor

Ainda para os dados de projeto do município de Lindóia (tabela 6.5), que foi escolhido para representar a análise de sensibilidade do “Sistema C”, e para os dados de projeto do município de Betim (a) (tabela 6.6.), que foi escolhido para representar a análise de sensibilidade do “Sistema D”, a variável que mais contribui para a variação do custo de implantação dos sistemas é a variável “Concreto armado”, desta vez seguida da variável “Impermeabilização” para o “Sistema C” (figura 6.10) e da variável “Escavação do terreno” para o “Sistema D” (figura 6.11).

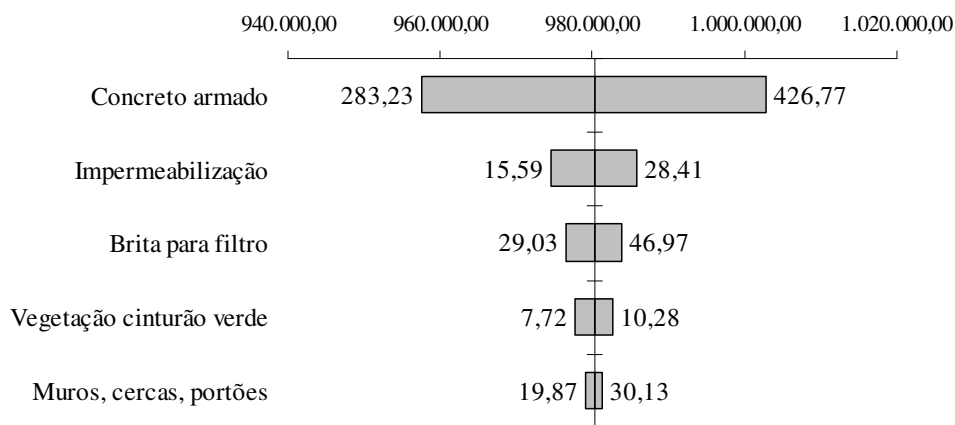
Já para os dois sistemas com lagoa anaeróbia no primeiro processo, a variável de maior impacto no custo total do sistema foi a “Escavação do terreno”. Isto pode ser explicado pelo fato de que os sistemas que utilizam lagoas no processo de tratamento exigem uma

grande movimentação de terra para sua implantação.

**Tabela 6.5 – Dados coletados no projeto do município de Lindóia**

| Descrição                     | Unidade                   | Valor                            |
|-------------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| Projeto de ETE                | Cidade                    | Lindóia                          |
|                               | UF                        | SP                               |
|                               | Fornecido por             | DAEE (Ribeirão Preto)            |
| População estimada 2025       | hab                       | 9534                             |
| Vazão afluente média          | m <sup>3</sup> /d         | 2352                             |
| Vazão afluente máxima         | m <sup>3</sup> /d         | 2664                             |
| DBO média afluente            | mg/L                      | 250                              |
| Alcance do projeto            | ano                       | 20                               |
| Classificação do rio receptor | Clas.                     | 2                                |
|                               | Nome                      | Rio Mogi Guaçu                   |
| Temp. mês mais frio           | °C                        | 24                               |
| Projeto                       | Nome                      | UASB + Biofiltro Aerado Submerso |
|                               | Implantação (R\$)         | 1636618                          |
|                               | <b>Implantação (US\$)</b> | <b>909232,2</b>                  |
|                               | Ano                       | 2006                             |
|                               | Sistema                   | C                                |
| Modelo Oliveira (2004)        | Imperm.                   | Sim                              |
|                               | <b>Implantação (US\$)</b> | <b>619449,3</b>                  |

Fonte: Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE – de Ribeirão Preto



**Figura 6.10 – Análise de sensibilidade realizada com os dados de projeto do município de Lindóia**

Fonte: próprio autor

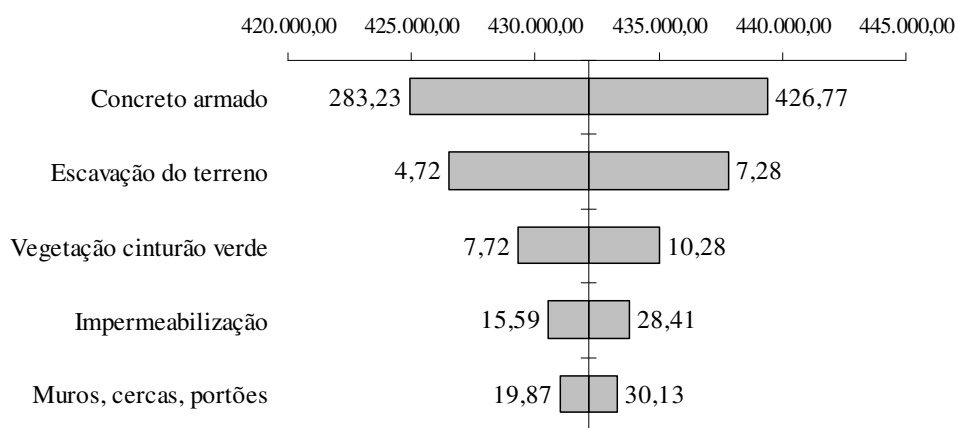
Os municípios escolhidos para representar a análise de sensibilidade dos sistemas “F” e “H”, respectivamente, foram os municípios de Taquaral (tabela 6.7) e Caconde (tabela 6.8). No caso do “Sistema F” a análise de sensibilidade apontou, como segundo custo de maior

impacto, a variável “Vegetação cinturão-verde” (figura 6.12) e no caso do “Sistema H” (figura 6.13), a variável “Tubulação”.

**Tabela 6.6 – Dados coletados no projeto do município de Betim (a)**

| Descrição                     | Unidade                   | Valor             |
|-------------------------------|---------------------------|-------------------|
| Projeto de ETE                | Cidade                    | Betim (a)         |
|                               | UF                        | MG                |
|                               | Fornecido por             | COPASA            |
| População estimada 2025       | hab                       | 6700              |
| Vazão afluente média          | m <sup>3</sup> /d         | 1157              |
| Vazão afluente máxima         | m <sup>3</sup> /d         | 1388,4            |
| DBO média afluente            | mg/L                      | 227               |
| Alcance do projeto            | ano                       | 20                |
| Classificação do rio receptor | Clas.                     | 2                 |
|                               | Nome                      | Córrego Cachoeira |
| Temp. mês mais frio           | °C                        | 21                |
| Projeto                       | Nome                      | UASB + Flotação   |
|                               | Implantação (R\$)         | 860485            |
|                               | <b>Implantação (US\$)</b> | <b>478047,2</b>   |
|                               | Ano                       | 2003              |
|                               | Sistema                   | D                 |
| Modelo Oliveira (2004)        | Imperm.                   | Sim               |
|                               | <b>Implantação (US\$)</b> | <b>271685,8</b>   |

Fonte: Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA



**Figura 6.11 – Análise de sensibilidade realizada com os dados de projeto do município de Betim (a)**

Fonte: próprio autor

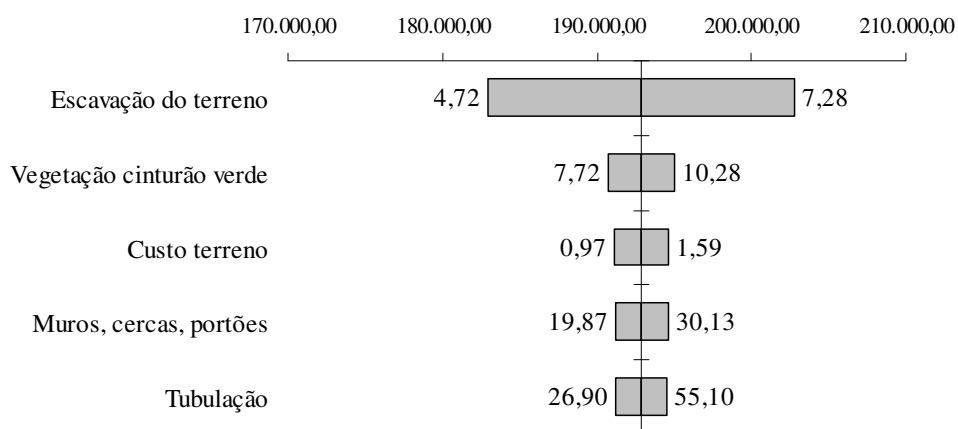
Ainda para o “Sistema F”, a identificação da variável “Vegetação cinturão-verde” pela análise de sensibilidade foi uma comprovação do que se intuiu empiricamente na fase de

testes com o modelo, quando a proporção do cinturão verde, definido para todos os sistemas com 10 metros, passou a receber o valor de 5 metros para o “Sistema F”, pois este custo estava causando uma visão equivocada.

**Tabela 6.7 – Dados coletados no projeto do município de Taquaral**

| Descrição                     | Unidade                   | Valor                                 |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| Projeto de ETE                | Cidade                    | Taquaral                              |
|                               | UF                        | SP                                    |
|                               | Fornecido por             | DAEE (São José do Rio Preto)          |
| População estimada 2025       | hab                       | 3281                                  |
| Vazão afluente média          | m <sup>3</sup> /d         | 590                                   |
| Vazão afluente máxima         | m <sup>3</sup> /d         | 721                                   |
| DBO média afluente            | mg/L                      | 300                                   |
| Alcance do projeto            | ano                       | 20                                    |
| Classificação do rio receptor | Clas.                     | 2                                     |
|                               | Nome                      | Rio Turvo                             |
| Temp. mês mais frio           | °C                        | 24                                    |
| Projeto                       | Nome                      | Lagoa Anaeróbia + Lagoas Facultativas |
|                               | Implantação (R\$)         | 352677,4                              |
|                               | <b>Implantação (US\$)</b> | <b>195931,9</b>                       |
|                               | Ano                       | 2005                                  |
|                               | Sistema                   | F                                     |
| Modelo Oliveira (2004)        | Imperm.                   | Não                                   |
|                               | <b>Implantação (US\$)</b> | <b>191354,7</b>                       |

Fonte: Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE – de São José do Rio Preto



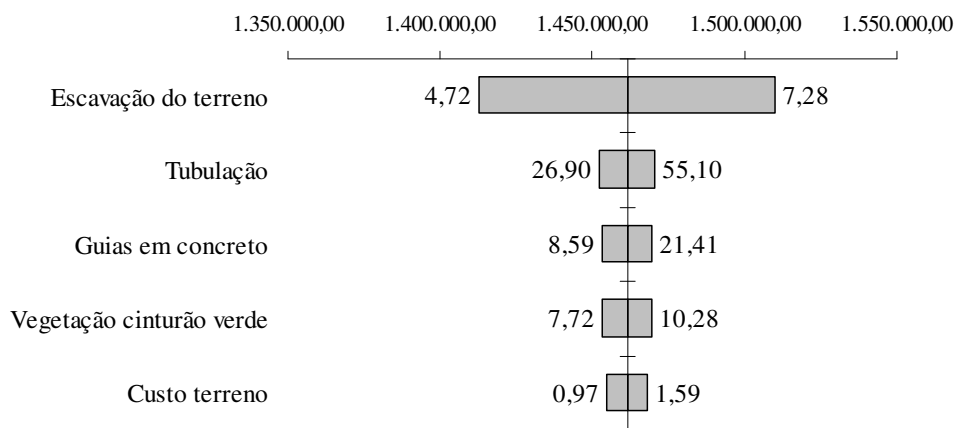
**Figura 6.12 – Análise de sensibilidade realizada com os dados de projeto do município de Taquaral**

Fonte: próprio autor

**Tabela 6.8 – Dados coletados no projeto do município de Caconde**

| Descrição                     | Unidade                   | Valor                              |
|-------------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Projeto de ETE                | Cidade                    | Caconde                            |
|                               | UF                        | SP                                 |
|                               | Fornecido por             | DAEE (Ribeirão Preto)              |
| População estimada 2025       | hab                       | 28394                              |
| Vazão afluente média          | m <sup>3</sup> /d         | 4406                               |
| Vazão afluente máxima         | m <sup>3</sup> /d         | 7862                               |
| DBO média afluente            | mg/L                      | 313                                |
| Alcance do projeto            | ano                       | 20                                 |
| Classificação do rio receptor | Clas.                     | 2                                  |
|                               | Nome                      | Rio Bom Jesus                      |
| Temp. mês mais frio           | °C                        | 18                                 |
| Projeto                       | Nome                      | Lagoa Aerada + Lagoa de Decantação |
|                               | Implantação (R\$)         | 2117564                            |
|                               | <b>Implantação (US\$)</b> | <b>1176424</b>                     |
|                               | Ano                       | 2005                               |
|                               | Sistema                   | H                                  |
| Modelo Oliveira (2004)        | Imperm.                   | Sim                                |
|                               | <b>Implantação (US\$)</b> | <b>1025108</b>                     |

Fonte: Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE – de Ribeirão Preto



**Figura 6.13 – Análise de sensibilidade realizada com os dados de projeto do município de Caconde**

Fonte: próprio autor

### 6.5.3 Relação custo/habitante e custo/m<sup>3</sup>/d

Verificou-se que as faixas de populações definidas na simulação para os sistemas do modelo não foram as mesmas encontradas nos dados do projeto. Por exemplo, a escolha do

“Sistema A”, considerando o custo de implantação, operação e manutenção desse sistema, ocorre na faixa entre 430 mil e 1 milhão de habitantes. Todavia, este sistema foi encontrado na faixa ente 5 mil e 360 mil habitantes nos projetos. O quadro 6.2 apresenta esta comparação, entre as faixas de população da simulação do modelo e dos projetos.

| Nome do sistema | Faixas de população encontradas nos projetos | Faixas de população da simulação (somente custo de implantação) | Faixas de população da simulação (custo total) |
|-----------------|--|---|--|
| Sistema A       | 5.000 – 360.000                              | 12.000 – 1.000.000  | 430.000 – 1.000.000                            |
| Sistema B       | 6.000 – 600.000                              | 10.000 – 15.000   | 40.000 – 130.000                               |
| Sistema C       | 3.000 – 50.000                               | 220.000 – 1.000.000   | 70.000 – 530.000                               |
| Sistema D       | 6.000 – 210.000                              | 3.000 – 50.000  | 30.000 – 80.000                                |
| Sistema F       | 1.000 – 50.000                               | 1.000 – 7.000   | 1.000 – 45.000                                 |
| Sistema H       | 5.000 – 180.000                              | 4.000 – 130.000   | 40.000 – 180.000                               |

**Quadro 6.2 – Faixas de populações identificadas nos projetos e na simulação do modelo**

Fonte: Dados simulados do modelo Oliveira (2004)

Segundo o Eng. Guilherme Diogo Junior, do DAEE de São José do Rio Preto, para populações de até 3 mil habitantes o ideal é a utilização de um sistema compacto, de 3 mil até 50 mil, lagoas com maturação, de 50 mil até 100 mil, lagoas aeradas (com novas tecnologias em substituição aos aeradores) e, para populações maiores do que 100 mil habitantes, a utilização de reatores. Essa informação também serviu como parâmetro para os ajustes realizados no modelo.

A última versão do modelo Oliveira (2004) propõe como a alternativa de menor valor monetário a utilização do “Sistema F” para populações de até 45 mil habitantes e do “Sistema H” para populações maiores do que 40 mil habitantes, até 180 mil habitantes, além de sugerir a aplicação do “Sistema B” para populações 40 e 130 mil habitantes e do “Sistema C” para populações maiores do que 70 mil habitantes. Este comportamento do modelo também se assemelha a opinião da maioria dos entrevistados, de que as lagoas são as melhores opções para populações menores do que 50 mil habitantes e que, a partir disto, pode-se optar por aeradores para diminuir a área da lagoa facultativa.

A importância da definição das faixas de populações por sistemas está relacionada aos

custos por habitante, parâmetro que é frequentemente utilizado como referência pelas organizações que atuam no setor de saneamento.

A simulação da última versão do modelo Oliveira (2004) possibilitou que fossem identificados quais eram as eficiências de tratamento dos sistemas nele considerados. A tabela 6.9 apresenta a estimativa de eficiência média para cada sistema do modelo, considerando o indicador de abatimento de DBO da carga poluidora.

**Tabela 6.9 – Estimativa de eficiência média para os sistemas do modelo Oliveira (2004)**

|                          | Sistemas |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                          | A        | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     |
| Eficiência no tratamento | 97,4%    | 94,5% | 93,3% | 89,6% | 95,0% | 89,9% | 86,1% | 87,0% |

Fonte: Dados simulados do modelo Oliveira (2004)

Durante esta pesquisa foram encontradas algumas tabelas de referências de custos de implantação de sistemas por habitantes. A tabela de referência adotada pelo Programa Despoluição de Bacias Hidrográficas (PRODES) classifica os sistemas de tratamento de esgoto em 9 tipos diferentes, conforme a tabela 6.10.

**Tabela 6.10 – Classificação dos tipos de sistemas de tratamento de esgoto pelo PRODES**

| Indicadores | Padrões de eficiência para tratamento de esgotos |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|             | A  | B   | C   | D   | E   | F   | G   | H   | I   |
| DBO         | 30%  | 60% | 75% | 85% | 85% | 90% | 90% | 90% | 90% |
| SST         | 40%  | 60% | 75% | 85% | 85% | 90% | 90% | 90% | 90% |
| CF          |  |     |     |     | 99% |     | 99% |     | 99% |
| PT          |  |     |     |     |     |     |     | 85% | 85% |
| e/ou        |  |     |     |     |     |     |     |     |     |
| NTK         |  |     |     |     |     |     |     | 80% | 80% |

Fonte: Adaptado da Tabela de Valores de Referência (PRODES)

Para verificar em qual padrão de eficiência os sistemas do modelo Oliveira (2004) se encaixavam, foram utilizadas as estimativas de eficiência média determinadas pela simulação e os valores máximos propostos por Von Sperling (2006, p. 339) para cada indicador. Os sistemas foram classificados de acordo com os níveis mínimos de abatimento das cargas poluidoras, conforme proposto na tabela 6.11.

**Tabela 6.11 – Classificação por tipo de tratamento dos sistemas do modelo Oliveira (2004) de acordo com os níveis mínimos de abatimento**

| Indicadores      | Sistemas |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  | A        | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     |
| DBO              | 97,4%    | 94,5% | 93,3% | 89,6% | 95,0% | 89,9% | 86,1% | 87,0% |
| SS               | 93,0%    | 80,0% | 93,0% | 87,0% | n/e   | 83,0% | n/e   | 80,0% |
| PT               | 35,0%    | 35,0% | 35,0% | 35,0% | n/e   | 50,0% | n/e   | 35,0% |
| NTK              | 60,0%    | 30,0% | 60,0% | 30,0% | n/e   | 65,0% | n/e   | 30,0% |
| Padrão alcançado | G        | E     | H     | D     | n/e   | C     | n/e   | D     |

Fonte: Von Sperling (2006, p. 339) e dados simulados do modelo Oliveira (2004) (n/e = não encontrado)

A tabela 6.12 apresenta a comparação dos custos de implantação por habitantes para cada tipo de tratamento proposto pelo PRODES com os custos de implantação obtidos na simulação do modelo Oliveira (2004), de acordo com o padrão alcançado. Ressalta-se que a simulação foi realizada sem a incorporação do custo da aquisição do terreno.

**Tabela 6.12 – Comparação dos custos de implantação por habitante (em R\$, 2007)**

| Faixa de população   | Sistemas             |        |                      |        |                      |        |                      |        |                      |        |                      |        |
|----------------------|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|--------|
|                      | Sistema A (padrão G) |        | Sistema B (padrão E) |        | Sistema C (padrão H) |        | Sistema D (padrão E) |        | Sistema F (padrão C) |        | Sistema H (padrão D) |        |
|                      | Oliveira (2004)      | PRODES | Oliveira (2004)      | PRODES | Oliveira (2004)      | PRODES | Oliveira (2004)      | PRODES | Oliveira (2004)      | PRODES | Oliveira (2004)      | PRODES |
| até 10.000           | <b>151</b>           | 150    | <b>117</b>           | 120    | <b>238</b>           | 170    | <b>122</b>           | 120    | <b>99</b>            | 80     | <b>111</b>           | 110    |
| de 10.001 a 20.000   | <b>121</b>           | 130    | <b>105</b>           | 100    | <b>141</b>           | 150    | <b>106</b>           | 100    | <b>95</b>            | 70     | <b>102</b>           | 100    |
| de 20.001 a 50.000   | <b>109</b>           | 120    | <b>96</b>            | 90     | <b>110</b>           | 140    | <b>99</b>            | 90     | <b>96</b>            | 60     | <b>98</b>            | 80     |
| de 50.001 a 100.000  | <b>104</b>           | 110    | <b>96</b>            | 80     | <b>97</b>            | 130    | <b>98</b>            | 80     | <b>121</b>           | 60     | <b>98</b>            | 80     |
| de 100.001 a 200.000 | <b>101</b>           | 110    | <b>92</b>            | 80     | <b>90</b>            | 130    | <b>95</b>            | 80     | <b>129</b>           | 60     | <b>95</b>            | 80     |
| acima de 200.000     | <b>89</b>            | 110    | <b>91</b>            | 80     | <b>86</b>            | 130    | <b>94</b>            | 80     | <b>147</b>           | 60     | <b>94</b>            | 80     |

Fonte: Adaptado da Tabela de Valores de Referência (PRODES) e dados simulados do modelo Oliveira (2004)

Observa-se que os sistemas “A”, “B”, “D” e “H” obtiveram valores muito próximos nas duas tabelas e que, com exceção do “Sistema F”, todos os outros sistemas apresentaram ganhos de escala crescentes. A tendência de ganho de escala se inverte para o “Sistema F” na

faixa de população entre 50 mil e 100 mil habitantes, o que poderia ser explicado pelo aumento significativo de área requerida para este sistema e seu respectivo impacto nos custos devido à movimentação de terra.

Outra tabela de referência encontrada foi a da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), que fornece o custo total de implantação de um Sistema Australiano para três tamanhos diferentes de estações, baseadas na vazão afluente em m<sup>3</sup>/d. Os dados da simulação, sem a incorporação do custo de aquisição do terreno, também foram utilizados para obter os custos do “Sistema F” para os valores próximos à vazão indicada. A tabela 6.13 apresenta a comparação do custo de implantação proposto pelo modelo Oliveira (2004) com as referências da SABESP para cada vazão.

**Tabela 6.13 – Comparação dos custos de implantação por m<sup>3</sup>/d (em R\$, 2008)**

| Vazão m <sup>3</sup> /d | Modelo Oliveira (2004) | SABESP    | Diferença |
|-------------------------|------------------------|-----------|-----------|
| 691                     | 256.610                | 220.464   | 16,40%    |
| 1.209                   | 410.342                | 416.783   | -0,10%    |
| 10.800                  | 4.475.040              | 3.952.512 | 13,02%    |

Fonte: Adaptado do Estudo de Custo de Empreendimentos (SABESP) e dados simulados do modelo Oliveira (2004)

Por fim, conforme proposto pelo Prof. Dr. Marcos von Sperling, os custos totais de cada sistema foram classificados de acordo com a quantidade de esgoto tratado, ou seja, o custo total pela eficiência do modelo (tabela 6.14). Para realizar esta classificação, foram utilizadas as estimativas de eficiência média para cada sistema, verificadas pela simulação.

**Tabela 6.14 – Comparação dos custos totais por m<sup>3</sup>/d tratado (em R\$, 2008)**

| Faixa de população   | Sistemas |     |      |     |     |     |      |     |
|----------------------|----------|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|
|                      | A        | B   | C    | D   | E   | F   | G    | H   |
| até 10.000           | 816      | 612 | 1234 | 606 | 781 | 494 | 1182 | 540 |
| de 10.001 a 20.000   | 656      | 549 | 732  | 529 | 649 | 475 | 740  | 495 |
| de 20.001 a 50.000   | 592      | 505 | 572  | 494 | 591 | 478 | 597  | 469 |
| de 50.001 a 100.000  | 565      | 502 | 504  | 488 | 576 | 605 | 538  | 473 |
| de 100.001 a 200.000 | 549      | 483 | 466  | 472 | 560 | 642 | 502  | 459 |
| acima de 200.000     | 484      | 479 | 448  | 468 | 544 | 736 | 483  | 455 |

Fonte: Dados simulados do modelo Oliveira (2004)

## **6.6 Análise qualitativa**

A análise qualitativa realizada nesta pesquisa consistiu na verificação da consistência das respostas do modelo Oliveira (2004), com base nos dados coletados na simulação e entrevistas realizadas com especialistas da área de hidráulica e saneamento. Foi comparada a alternativa de menor custo monetário do modelo com o equilíbrio de Nash (1951), encontrado para solucionar o conflito entre eficiência e custo na escolha de sistemas de tratamento de esgoto sanitário. Por fim, foi verificado se o acréscimo de mais um critério de escolha no modelo, o ambiental, interfere na escolha da alternativa de menor custo monetário preconizada pelo modelo. Este novo critério foi inserido por meio da utilização da metodologia proposta por Saaty (1991), a Análise Hierárquica de Processo (AHP), com base em 20 questionários de coletas de julgamentos respondidos por especialistas. Nesta parte os sistemas “E” e “G” também fizeram parte da avaliação.

### **6.6.1 Equilíbrio de Nash**

No contexto desta pesquisa, foram definidos dois jogadores: o “ecológico”, que prioriza uma solução de menor impacto ambiental; e o “econômico”, que prioriza uma solução de menor custo. Para encontrar o equilíbrio de Nash, que poderia solucionar o conflito entre estes dois jogadores, foi necessário criar uma tabela de pagamentos, onde constam as estimativas de DBO no efluente, que são os pagamentos do jogador “ecológico”, e os custos totais do sistema, que são os pagamentos do jogador “econômico”. Esta tabela de pagamentos pode ser visualizada na figura 6.14.

|                   |                 | Jogador Econômico  |                    |                    |                           |
|-------------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|
|                   |                 | Lodos ativados     | Lagoa facultativa  | Filtro biológico   | Lagoa aerada e Decantação |
| Jogador Ecológico | UASB            | <i>mg/L A,A \$</i> | <i>mg/L B,B \$</i> | <i>mg/L C,C \$</i> | <i>mg/L D,D \$</i>        |
|                   | Lagoa anaeróbia | <i>mg/L E,E \$</i> | <i>mg/L F,F \$</i> | <i>mg/L G,G \$</i> | <i>mg/L H,H \$</i>        |

**Figura 6.14 – Tabela de pagamentos dos jogadores “ecológico” e “econômico”**

Fonte: próprio autor

A primeira entrada de cada par de valores das células corresponde ao ganho do jogador “ecológico”, ou seja, são as estimativas de DBO no efluente final do sistema. Da mesma forma, a segunda entrada mostra as recompensas do jogador “econômico”, que são os custos totais do sistema. Por exemplo, na última linha e na última coluna da figura com a tabela de pagamentos, encontram-se os valores referentes ao “Sistema H” do modelo Oliveira (2004). O valor do lado esquerdo representa, em mg/L, a estimativa de DBO efluente, enquanto o lado direito representa o custo total do “Sistema H”, em dólares. Cada um dos dois jogadores pretende minimizar os valores presentes em seu lado de cada par de elementos da tabela de pagamentos.

Para verificar se a partir da tabela de pagamentos poderia ser encontrado o equilíbrio de Nash, foram realizados alguns testes utilizando os dados dos projetos coletados. Por exemplo, para o município de Casa Branca, com população estimada em 29.602 habitantes, vazão média afluente de 4.940 m<sup>3</sup>/dia, vazão máxima afluente de 8.982 m<sup>3</sup>/dia, DBO média afluente de 341 mg/L, alcance do projeto de 20 anos, rio receptor classe 3 e temperatura do mês mais frio 23°C, foi gerada a tabela da figura 6.15, com os dados das primeiras entradas de cada par de elementos em mg/L e os das segundas em milhares de dólares, a partir da qual foi possível encontrar o equilíbrio de Nash no “Sistema B” (quadro na cor verde da figura 6.15).

Na tabela da figura 6.15, os valores sublinhados são os valores escolhidos pelos jogadores “ecológico” e “econômico”. O equilíbrio de Nash acontece quando existe pelo

menos um par de elementos que estão conjuntamente sublinhados (FIANI, 2006).

|                   |                 | Jogador Econômico |                         |                  |                           |
|-------------------|-----------------|-------------------|-------------------------|------------------|---------------------------|
|                   |                 | Lodos ativados    | Lagoa facultativa       | Filtro biológico | Lagoa aerada e Decantação |
| Jogador Ecológico | UASB            | <u>2</u> , 1984   | <u>19</u> , <u>1742</u> | <u>23</u> , 1898 | <u>30</u> , 1803          |
|                   | Lagoa anaeróbia | 17, 1435          | 34, 1800                | 52, 1927         | 35, <u>1418</u>           |

**Figura 6.15 – Tabela de pagamentos para o município de Casa Branca**

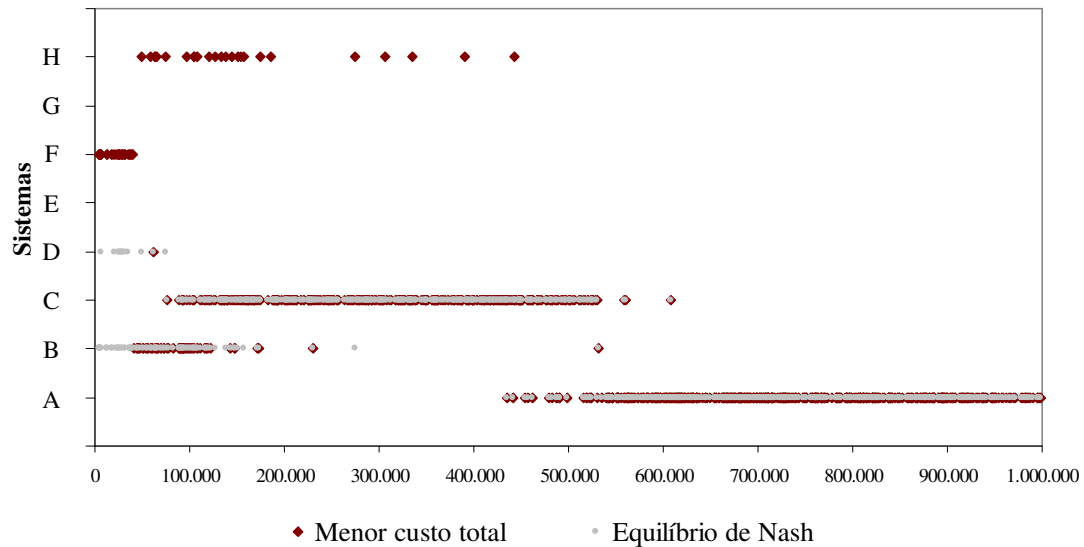
Fonte: próprio autor

O sistema instalado no município de Casa Branca foi o Sistema Australiano. O Sistema Australiano é o nome dado para o conjunto de duas lagoas, a primeira anaeróbia e a segunda facultativa. Este sistema é representado no modelo Oliveira (2004) pelo “Sistema F”. No entanto, a escolha de menor valor monetário indicada pelo modelo Oliveira (2004) para o município de Casa Branca foi o “Sistema B”, com um reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) como primeiro processo e uma lagoa facultativa como segundo processo. Neste caso, a escolha do modelo Oliveira (2004), que é a de menor custo, foi a mesma solução proposta pelo equilíbrio de Nash.

Após esses testes iniciais, a tabela de pagamentos foi inserida no modelo Oliveira (2004), sendo os equilíbrios encontrados em conjunto com o cálculo dos custos dos sistemas. Isto possibilitou a coleta dos dados que foram gerados a partir de uma nova simulação, com mil cenários, para populações variando de 500 até 1 milhão de habitantes. Os dados coletados desta nova simulação estão expostos na figura 6.16.

Ao final da simulação, foi identificado que a primeira linha da tabela de pagamentos é dominante, ou seja, o reator UASB foi sempre escolhido como primeiro processo. Para populações entre 500 e 180 mil habitantes, a predominância dos equilíbrios de Nash ocorreu para o “Sistema B”, o que pode ser uma evidência de que, um sistema que combine reator e lagoa seja o mais adequado para o tratamento de esgoto de municípios com uma população

menor ou igual a este número de habitantes. No entanto, já a partir de 80 mil habitantes o equilíbrio de Nash também ocorreu para o “Sistema C”, sendo este sistema composto por dois reatores, o que poderia representar um outro tipo de solução viável para uma faixa de população diferente.



**Figura 6.16 – Comparação da alternativa de menor custo indicada pelo modelo com o equilíbrio de Nash**

Fonte: próprio autor

Ainda de acordo com a figura 6.16, o modelo Oliveira (2004) distribuiu suas soluções predominantemente em cinco sistemas diferentes, que se encaixaram em diferentes faixas de população. O “Sistema B”, que é composto por um reator UASB e uma lagoa anaeróbia, foi escolhido pelo modelo na faixa entre 40 até 130 mil habitantes. A partir de 70 mil habitantes o “Sistema C”, composto por um reator UASB e um filtro biológico, passou a ser escolhido pelo modelo. O “Sistema D”, sistema composto por um reator UASB no primeiro processo e uma lagoa aerada seguida de uma lagoa de decantação no segundo processo, foi escolhido pelo modelo na faixa entre 30 mil até 80 mil habitantes. O “Sistema F”, que é o Sistema Australiano, sistema implantado em 22 dos 61 municípios analisados, foi escolhido pelo modelo para uma grande faixa de população, desde 500 até 45 mil habitantes. Por fim, o

“Sistema H”, sistema composto por uma lagoa anaeróbia seguida de uma lagoa aerada e lagoa de sedimentação, foi escolhido para faixas de população entre 40 mil e 180 mil habitantes.

No equilíbrio de Nash, o sistema mais indicado para a faixa da população entre 500 e 70 mil habitantes foi o “Sistema B”, a partir de 70 mil habitantes, o “Sistema C”, entre 5 mil e 75 mil habitantes também foi o “Sistema D” e, a partir de 420 mil habitantes o “Sistema A”. Estas faixas de populações, dos equilíbrios de Nash em comparação com as alternativas de menor custo monetário propostas pelo modelo Oliveira (2004), podem ser um indício de que o modelo está sugerindo, na maioria das vezes, um sistema de maior eficiência e de menor valor monetário de implantação, operação e manutenção.

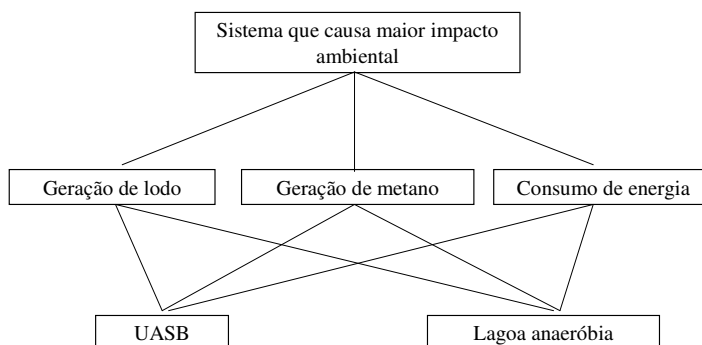
#### **6.6.2 Análise hierárquica de processos**

Nesta pesquisa foi utilizado o método de análise hierárquica de processos (AHP) e, por meio dele, foi possível comparar as respostas do modelo Oliveira (2004) com um novo critério, o critério ambiental.

O primeiro passo para a aplicação do AHP é a hierarquização do problema. Neste caso o problema era definir quais seriam, dentre os oito sistemas do modelo Oliveira (2004), os sistemas que causam maior impacto ambiental, pois, como o modelo escolhe a alternativa de menor valor monetário, ele também passaria a escolher a alternativa de menor impacto ambiental. As forças que foram avaliadas pelo AHP foram: (i) geração de lodo; (ii) geração de gás metano; e (iii) consumo de energia elétrica. A figura 6.17 apresenta a estrutura hierárquica do problema para o primeiro processo de tratamento dos sistemas do modelo e a figura 6.18 apresenta a estrutura para o segundo processo.

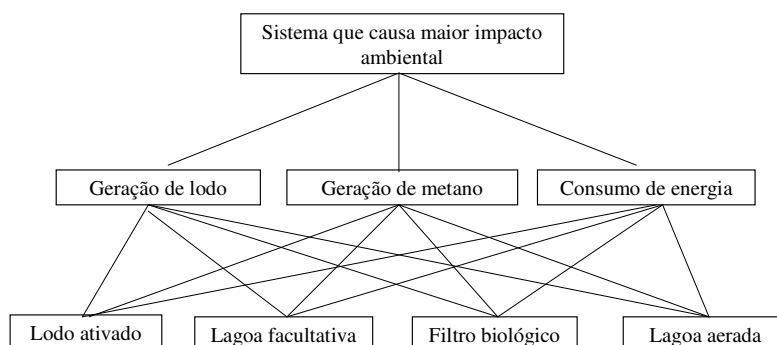
Após isto, um questionário para coleta de julgamentos foi disponibilizado na Internet e foi solicitada, por meio de e-mail, a participação na pesquisa a alguns profissionais, acadêmicos e estudantes da área de hidráulica e saneamento. Ao todo, foram coletados 20

questionários e os vetores de prioridades para os sistemas do primeiro e do segundo processo, gerados pela aplicação da metodologia AHP, estão apresentados na tabela 6.15. Ressalta-se que, por se tratar de opiniões, a identidade dos respondentes será preservada.



**Figura 6.17 – Hierarquização do problema para o primeiro processo**

Fonte: próprio autor



**Figura 6.18 – Hierarquização do problema para o segundo processo**

Fonte: próprio autor

Quando um sistema recebe o valor mais alto dentre todos os outros sistemas significa que ele não será escolhido, pois ele representa o maior impacto ambiental, na opinião do respondente. Quando recebe o valor mais baixo dentre todos os outros sistemas significa que ele será escolhido, pois seu impacto ambiental foi considerado menor pelo respondente. Por exemplo, o respondente identificado pelo número 5 escolheria no primeiro processo o UASB e no segundo processo o Filtro Biológico, enquanto que respondente identificado pelo número 15 escolheria a Lagoa Anaeróbia no primeiro processo e a Lagoa Facultativa no segundo, se fossem considerados apenas o critério do impacto ambiental.

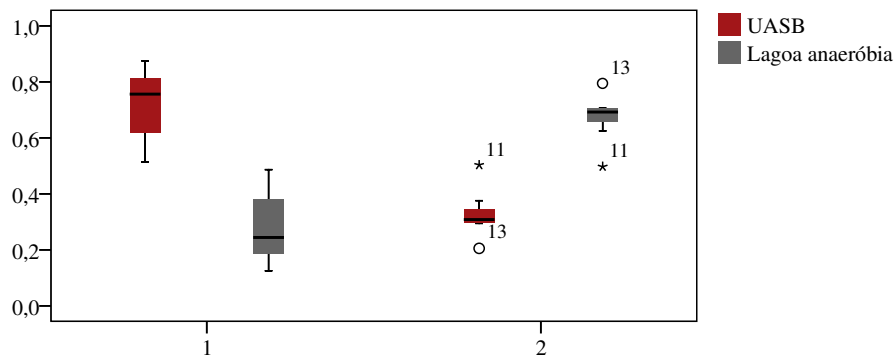
**Tabela 6.15 – Opinião dos respondentes quanto ao sistema de maior impacto ambiental dentre os sistemas do modelo Oliveira (2004)**

| Id | Formacao             | Município             | UF | 1º processo |                 |              | 2º processo       |                  |              |
|----|----------------------|-----------------------|----|-------------|-----------------|--------------|-------------------|------------------|--------------|
|    |                      |                       |    | UASB        | Lagoa anaeróbia | Lodo ativado | Lagoa facultativa | Filtro biológico | Lagoa aerada |
| 1  | Arquiteto            | Ribeirão Preto        | SP | 0,81        | 0,19            | 0,56         | 0,05              | 0,08             | 0,31         |
| 2  | Administração        | Ribeirão Preto        | SP | 0,64        | 0,36            | 0,52         | 0,13              | 0,12             | 0,24         |
| 3  | Engenheiro ambiental | São Carlos            | SP | 0,38        | 0,62            | 0,31         | 0,28              | 0,04             | 0,37         |
| 4  | Engenheiro químico   | São Carlos            | SP | 0,52        | 0,48            | 0,64         | 0,05              | 0,11             | 0,20         |
| 5  | Engenheiro mecânico  | São Carlos            | SP | 0,31        | 0,69            | 0,27         | 0,35              | 0,12             | 0,26         |
| 6  | Engenheiro civil     | São Carlos            | SP | 0,88        | 0,12            | 0,23         | 0,49              | 0,18             | 0,09         |
| 7  | Engenheiro civil     | São Carlos            | SP | 0,73        | 0,27            | 0,10         | 0,48              | 0,24             | 0,19         |
| 8  | Engenheiro sanitaria | Salvador              | SP | 0,51        | 0,49            | 0,58         | 0,13              | 0,09             | 0,20         |
| 9  | Engenheiro civil     | São Carlos            | BA | 0,62        | 0,38            | 0,29         | 0,24              | 0,32             | 0,15         |
| 10 | Engenheiro civil     | São Jose do Rio Preto | SP | 0,81        | 0,19            | 0,54         | 0,15              | 0,07             | 0,25         |
| 11 | Engenheiro           | Belo Horizonte        | SP | 0,50        | 0,50            | 0,57         | 0,08              | 0,15             | 0,20         |
| 12 | Engenheiro civil     | São Carlos            | MG | 0,61        | 0,39            | 0,41         | 0,12              | 0,07             | 0,40         |
| 13 | Engenheiro sanitaria | Salvador              | SP | 0,21        | 0,79            | 0,45         | 0,20              | 0,13             | 0,22         |
| 14 | Engenheiro           | Franca                | BA | 0,30        | 0,70            | 0,62         | 0,09              | 0,12             | 0,16         |
| 15 | Engenheiro           | Franca                | SP | 0,80        | 0,20            | 0,51         | 0,05              | 0,09             | 0,35         |
| 16 | Engenheiro civil     | Ribeirão Preto        | SP | 0,87        | 0,13            | 0,61         | 0,04              | 0,20             | 0,15         |
| 17 | Engenheira civil     | São José do Rio Preto | SP | 0,29        | 0,71            | 0,16         | 0,42              | 0,15             | 0,26         |
| 18 | Engenheiro agrícola  | Brasília              | SP | 0,84        | 0,16            | 0,62         | 0,09              | 0,06             | 0,23         |
| 19 | Engenheiro sanitaria | Ribeirão Preto        | DF | 0,31        | 0,69            | 0,22         | 0,56              | 0,09             | 0,14         |
| 20 | Engenheiro civil     | Ouro Preto            | SP | 0,76        | 0,24            | 0,60         | 0,05              | 0,13             | 0,22         |

Fonte: Dados coletados por meio do questionário de coleta de julgamentos

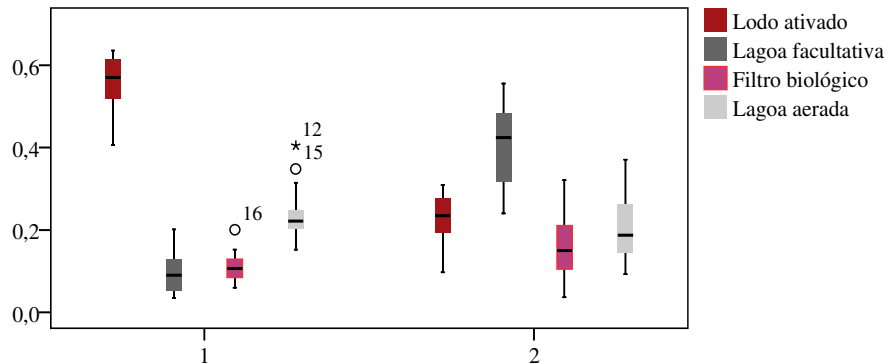
Percebe-se pelos dados da tabela, que não existe uma unanimidade quanto ao sistema de maior impacto ambiental. Com a utilização da ferramenta estatística de análise de agrupamentos, foram definidos dois grupos de semelhanças para cada processo de tratamento, com base nos vetores prioridades. O primeiro grupo representa aqueles respondentes que consideram os processos de tratamento dos reatores e dos sistemas com aeração os maiores causadores de externalidades negativas, ou seja, o esgoto é tratado, mas os resíduos e o consumo de energia são fatores negativos que deveriam ser considerados na fase de implantação destes sistemas. Já o segundo grupo representa aqueles respondentes que consideram os processos de tratamento das lagoas serem os que causam maior impacto ao

meio-ambiente. No segundo processo, o filtro biológico alcançou boas posições nos dois grupos, o que poderia ser um indício da sua maior aceitação pelos respondentes. As figuras 6.19 e 6.20 apresentam, para os dois processos de tratamento, os grupos formados a partir das preferências, lembrando que valores mais altos representam os sistemas classificados como maiores causadores de impactos ao meio ambiente.



**Figura 6.19 – Grupos definidos para o primeiro processo**

Fonte: próprio autor

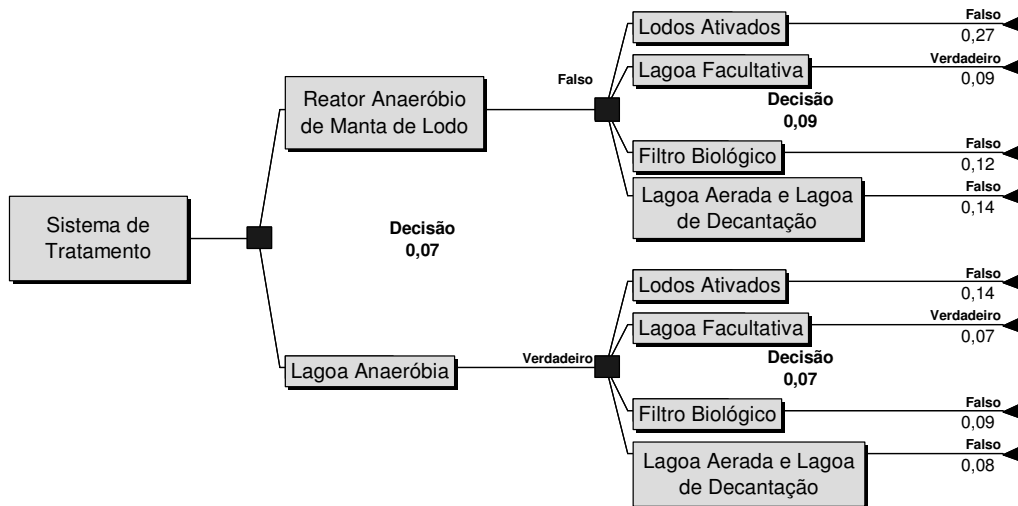


**Figura 6.20 – Grupos definidos para o segundo processo**

Fonte: próprio autor

A partir da definição dos grupos, um vetor de prioridades, contendo a média dos vetores de prioridades dos respondentes, foi criado para cada grupo de cada processo. No primeiro processo o grupo 1, que representa os respondentes mais favoráveis à implantação de lagoas, recebeu o seguinte vetor de prioridades  $[0,72;0,28]$  e o grupo 2, que representa os respondentes mais favoráveis à implantação de reatores, recebeu o vetor de prioridades  $[0,33;0,67]$ . No segundo processo o grupo 1 recebeu o vetor de prioridades

[0,56;0,09;0,11;0,24] e o grupo 2 recebeu o vetor de prioridades [0,23;0,40;0,16;0,21]. Os vetores foram inseridos na árvore de decisão do modelo Oliveira (2004) para criar uma ponderação para o novo critério. O peso para o critério ambiental foi de 50% e para o critério de menor valor econômico foi de 50%. A árvore de decisão do modelo, com o vetor de prioridade adicionado, pode ser visualizada na figura 6.21.



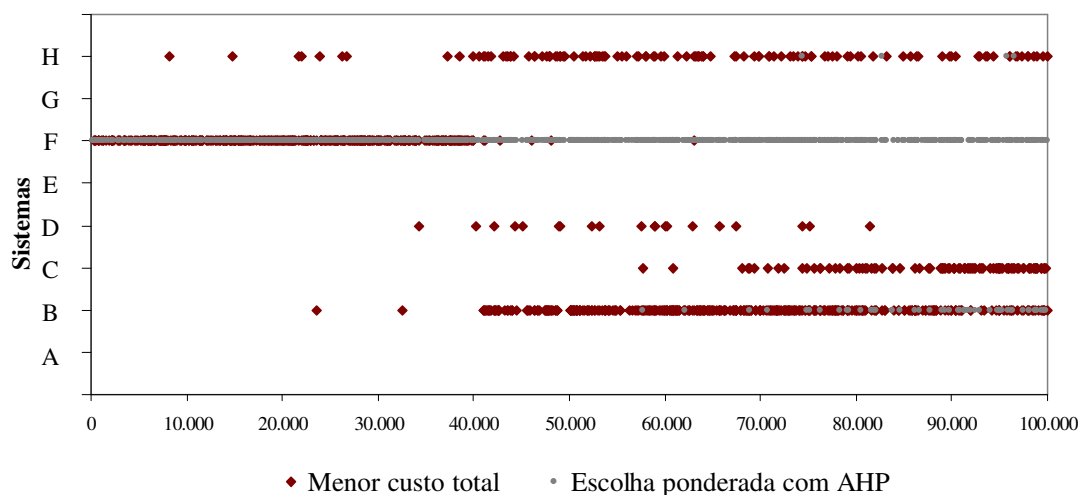
**Figura 6.21 – Árvore de decisão do modelo Oliveira (2004) com a adição do critério ambiental**

Fonte: próprio autor

Com o novo critério adicionado, foi realizada uma simulação, com o vetor de prioridades do grupo 1, e outra, com o vetor de prioridades do grupo 2, para populações variando de 500 até 100 mil habitantes. A figura 6.22 apresenta os resultados para a simulação com o vetor do grupo 1 e a figura 6.23 apresenta os resultados para o grupo 2.

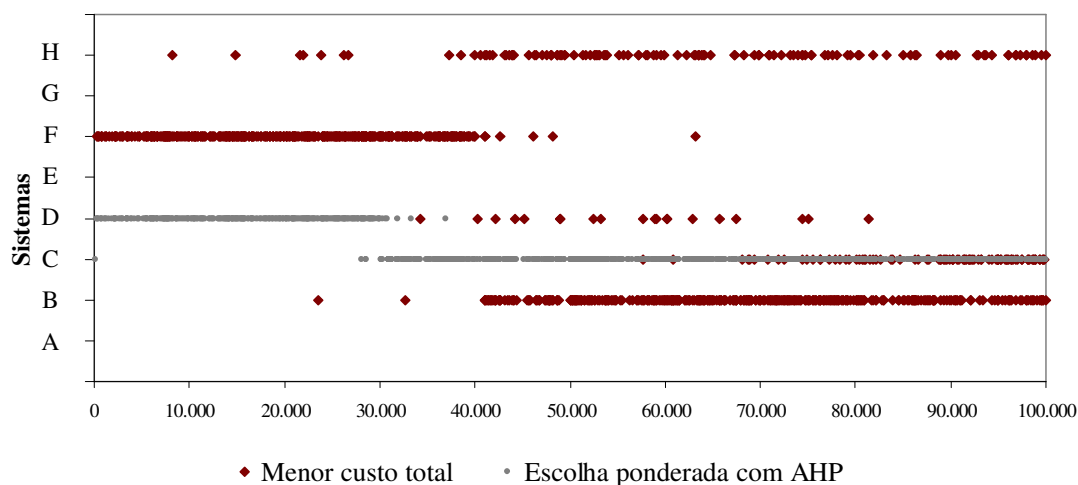
Nota-se que as alternativas de menor valor monetário propostas pelo modelo Oliveira (2004) se adequaram melhor, para populações de até 100 mil habitantes, à ponderação criada com o vetor de prioridades do grupo 1, que prefere a utilização de lagoas nos processos de tratamento. Em 39,8% dos casos, a escolha da alternativa de menor valor monetário não se alterou com a adição do novo critério. Esta constatação poderia ser explicada pelo fato de que, para populações de até 100 mil habitantes, o uso de lagoas e lagoas com aeração é geralmente indicado por especialistas.

Para o vetor de prioridades do grupo 2 e populações até 100 mil habitantes, apenas em 9,2% dos casos, a escolha da alternativa de menor valor monetário não se alterou com a adição do novo critério, o que poderia significar que os especialistas que não consideram adequada a utilização de lagoas nos processos de tratamento não concordariam com as sugestões do modelo para esta faixa de população.



**Figura 6.22 – Comparação da alternativa de menor custo indicada pelo modelo com a alternativa ponderada pelo critério ambiental para o grupo 1 e população até 100 mil habitantes**

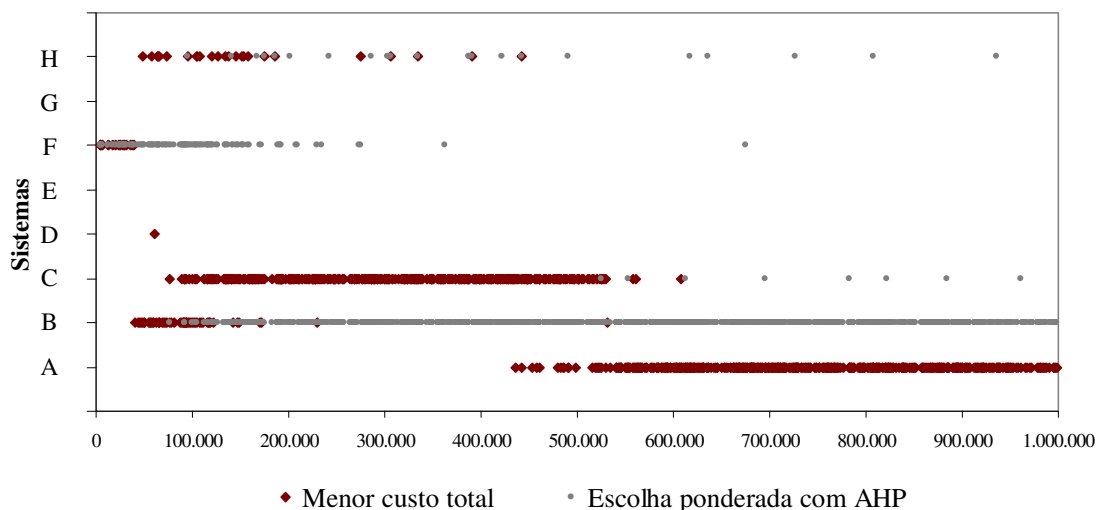
Fonte: próprio autor



**Figura 6.23 – Comparação da alternativa de menor custo indicada pelo modelo com a alternativa ponderada pelo critério ambiental para o grupo 2 e população até 100 mil habitantes**

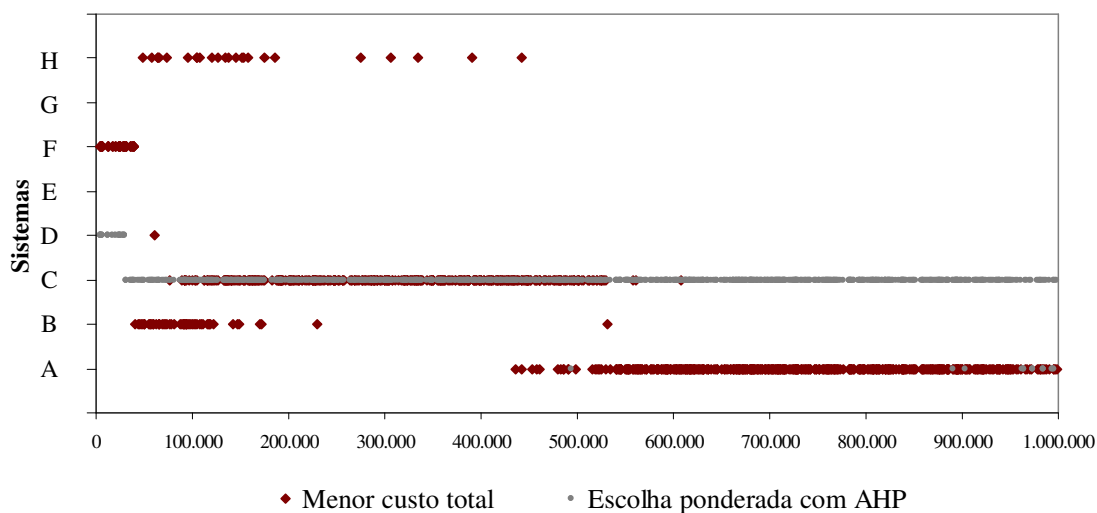
Fonte: próprio autor

Uma nova simulação foi realizada para populações de até 1 milhão de habitantes, com os vetores de prioridades dos grupos 1 e 2. A figura 6.24 apresenta os resultados para a simulação com o vetor do grupo 1 e a figura 6.25 apresenta os resultados para o grupo 2.



**Figura 6.24 – Comparação da alternativa de menor custo indicada pelo modelo com a alternativa ponderada pelo critério ambiental para o grupo 1 e população até 1 milhão de habitantes**

Fonte: próprio autor



**Figura 6.25 – Comparação da alternativa de menor custo indicada pelo modelo com a alternativa ponderada pelo critério ambiental para o grupo 2 e população até 1 milhão de habitantes**

Fonte: próprio autor

No caso da simulação para até 1 milhão de habitantes, o melhor ajuste do modelo ao

novo critério se inverteu, sendo que o vetor de prioridades que ocasionou maior correspondência com as alternativas de menor valor monetário propostas pelo modelo Oliveira (2004) foi o do grupo 2, que prefere a utilização de reatores nos processos de tratamento. Em 40,0% dos casos, a escolha da alternativa de menor valor monetário não se alterou com a adição do novo critério. Este fato pode ser explicado pela maior adoção de sistemas com reatores para populações superiores a 100 mil habitantes. Já para o vetor de prioridades do grupo 1, apenas em 4,7% dos casos a escolha não se alterou. Portanto, pode-se concluir que a utilização do modelo será satisfatória para alguns usuários, de acordo com sua convicção. Por exemplo, para populações de até 100 mil habitantes, o modelo sugerirá alternativas que poderão ser consideradas satisfatórias pelo usuário que prefere lagoas no processo de tratamento e, para populações de até 1 milhão de habitantes, o modelo sugerirá alternativas que poderão ser consideradas satisfatórias pelo usuário que prefere reatores no processo de tratamento.

O AHP possui algumas limitações em sua aplicação. A primeira delas é referente à quantidade de comparações par a par que devem ser realizadas, o que aumenta sobremaneira o tamanho do questionário de coleta de julgamentos. Nesta pesquisa para se avaliar as três variáveis ambientais para os seis sistemas de tratamento de esgoto considerados no modelo Oliveira (2004), foram necessárias 24 comparações par a par em cada questionário.

Não obstante, a média para a primeira questão inserida no final do questionário, “Achei que o modo como foram exibidas as perguntas e as tabelas para resposta foram adequadas para eu expressar minha opinião”, e a segunda, “Achei que a comparação par a par possibilitou que minha opinião fosse expressa de forma coerente, ou seja, acho que consegui realizar uma ordenação adequada entre os sistemas”, alcançaram, respectivamente, 3,80 e 4,05 pontos da escala de Likert, ou seja, em média, os respondentes concordaram com estas afirmações, o que pode significar que, apesar de ser exaustivo, o método é eficaz.

Quanto à terceira questão, “Achei que a respeito dos critérios ambientais não faltou nenhuma variável ambiental significativa para ponderar a decisão referente à escolha de um sistema de tratamento de esgoto sanitário”, a média alcançou apenas 2,7 pontos da escala de Likert, o que demonstra que os respondentes entenderam que poderia haver outras variáveis. Algumas variáveis ambientais foram sugeridas pelos respondentes para serem incorporadas na avaliação ambiental, tais como: área ocupada pelo sistema, localização, qualidade do efluente final, odores, ruídos e atração de insetos e vetores. No entanto, devido ao aumento significativo da quantidade de comparações, a aplicação do AHP se tornaria inviável.

Um alerta foi mencionado por um dos respondentes quanto à consideração da geração de gás metano durante o processo de tratamento dos sistemas, pois atualmente isto tem sido considerado um aspecto que pode ser positivo e não negativo, devido à utilização deste gás para obtenção de energia.

### **6.6.3 Opinião dos tomadores de decisões**

A avaliação das expectativas e opiniões dos tomadores de decisão quanto à utilização do modelo Oliveira (2004) também contribuiu na análise dos resultados, indicando pontos fortes e fracos do modelo.

A maioria dos entrevistados considerou que, devido à complexidade e o nível de detalhamento envolvido na concepção de uma estação de tratamento de esgoto, a utilização de modelos com esta finalidade seria limitada, incluindo o modelo Oliveira (2004). Na opinião do Eng. Guilherme Diogo Junior, do DAEE de São José do Rio Preto, e do Eng. Ivens Telles Alves, da T.Alves Engenharia Ambiental Ltda de Ribeirão Preto, faltaram variáveis consideradas muito importantes para a escolha da estação de tratamento de esgoto mais adequada, tais como: topografia e vento predominante. Neste caso a utilização do modelo estaria restrita a uma fase final da escolha do sistema de tratamento de esgoto, quando a área

já estivesse sido definida tecnicamente e politicamente, pois foi argumentado pelos entrevistados que não basta somente encontrar a melhor área para a implantação do sistema, mas deve-se encontrar a melhor área possível em um lugar que seja permitida sua instalação.

Para ilustrar melhor os aspectos envolvidos, o Eng. Nathanael Silva Junior, da SABESP de Franca, considera que a escolha dos sistemas de tratamento de esgoto deve satisfazer os aspectos de menor valor econômico, de eficiência adequada aos padrões legais e de aceitação perante a sociedade, sendo este último o mais determinante. Devido ao grande número de critérios para serem atendidos, a aplicação do modelo Oliveira (2004) não seria adequada para a decisão de qual sistema a ser implantado.

Todavia, foram identificados usos alternativos ao modelo, principalmente os relacionados ao planejamento e ao controle de gastos dos investimentos. Segundo o Eng. Adolfo Monteiro Moraes, do DAEE de Ribeirão Preto, após a realização do orçamento inicial da obra podem ser realizados aditivos durante a fase de implantação. No entanto, atualmente a liberação desses aditivos é bastante burocrática, o que torna necessário uma melhoria no processo de orçamento. O custo de implantação do modelo Oliveira (2004) poderia ser utilizado como uma referência de preços nestes casos, evitando que o valor contratado em licitação seja muito inferior ao que seria necessário para a conclusão da obra ou muito superior evitando um gasto de recursos além do necessário.

O Eng. Nathanael Silva Junior, propõe que o modelo poderia ser utilizado pelas agências e órgãos de fiscalização ambientais na composição dos seus planos diretores de recursos hídricos permitindo assim planejar e verificar os fluxos de caixa dos investimentos. Esta opinião é compartilhada com o Prof. Dr. Marcos von Sperling, da UFMG, que também evidencia a importância da verificação dos fluxos de caixa para os investimentos, sendo que um modelo seria oportuno para estes casos.

Um problema identificado no modelo pelo Eng. Leonardo Buim Barradas, da Caixa

Federal de Ribeirão Preto, é com relação à unidade monetária adotada em seus cálculos, o dólar. Sugeriu o engenheiro que estes valores poderiam estar em reais, pois a variação dos preços dos equipamentos em relação ao dólar não é muito influenciada atualmente. Não obstante, Leonardo julga que o modelo Oliveira (2004) poderia ser utilizado para estimar os valores que as prefeituras deverão financiar na concepção de projetos de estações de tratamento de esgoto.

### **6.7 Possíveis aplicações do modelo Oliveira (2004)**

Dentre os objetivos da lei 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, encontra-se concretizada a preocupação dos órgãos ligados ao saneamento, principalmente a Frente Nacional pelo Saneamento Ambiental (FNSA), quanto à inclusão de uma fase de planejamento como ferramenta fundamental para a eficiência dos investimentos, garantindo assim a sustentabilidade dos mesmos.

O modelo Oliveira (2004) poderia ser utilizado na fase de planejamento dos investimentos sob a forma de pré-projetos, ou projetos de concepção, onde três ou mais alternativas poderiam ser comparadas levando em consideração o custo de implantação, operação e manutenção dos sistemas de tratamento de esgoto a serem instalados. Esta avaliação permitiria ao tomador de decisão obter uma visão macro dos recursos a serem investidos, o que facilitaria a solicitação de financiamentos e o cálculo de uma tarifa dos serviços que garantisse a reposição dos investimentos.

No apêndice D desta pesquisa, é apresentado um exemplo de um projeto de concepção que foi elaborado para o município de Fortaleza de Minas, em Minas Gerais, com base nos orçamentos propostos pela última versão do modelo Oliveira (2004) e nos projetos de estações de tratamento de esgoto para municípios coletados. Este pré-projeto foi dividido em duas partes: a primeira considera que o tipo de solo é adequado para a instalação de lagoas

sem a necessidade de impermeabilização, a segunda considera que o tipo de solo é inadequado, sendo, portanto, adicionado o custo das mantas. A utilização do modelo se mostrou eficaz para a elaboração deste projeto de concepção.

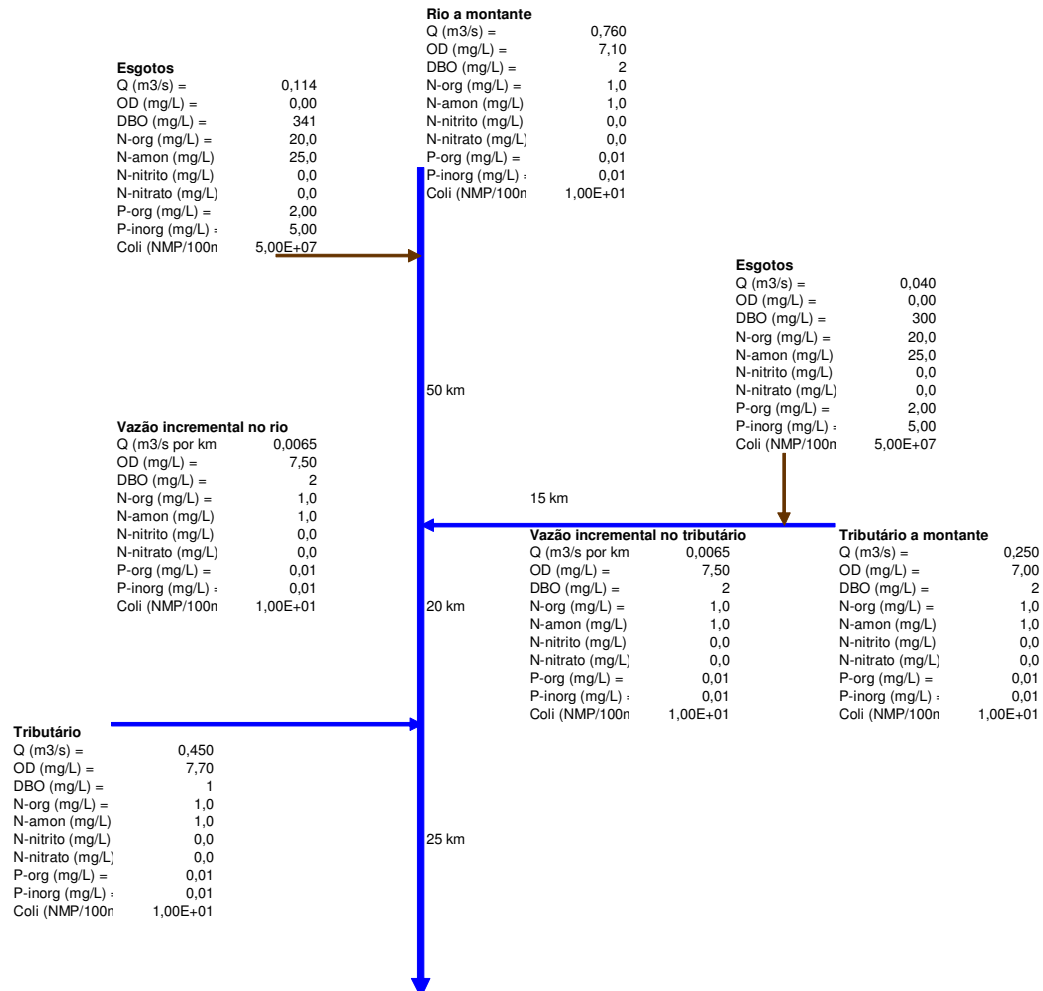
Outra forma de utilização do modelo Oliveira (2004) seria a inibição de fraudes em orçamentos de estações de tratamento de esgoto. Os testes estatísticos realizados demonstraram que o modelo propõe orçamentos comedidos, que geralmente estão entre os preços muito altos e os muito baixos, podendo servir como parâmetro para fiscalização. Os preços muito altos podem estar escondendo fraudes, enquanto que preços muito baixos podem estar comprometendo o cumprimento da empreita, o que acarretará na interrupção da obra.

Por fim, o modelo poderia ser utilizado na fase de planejamento dos planos diretores para fornecer uma visão global de gastos, o que contribuiria sobremaneira para que as discussões não fossem somente subjetivas, pois a utilização dos orçamentos fornecidos pelo modelo serviria como parâmetro. Outros tipos de modelos, por exemplo, o QUAL-UFMG, já são utilizados nas fases de planejamento dos planos de gerenciamento integrados de recursos hídricos (VON SPERLING, 2007).

O modelo em Excel<sup>®</sup> QUAL-UFMG, uma adaptação do modelo QUAL2-E realizada pelo Prof. Dr. Marcos von Sperling, da UFMG, torna possível uma simulação rápida e simples, até mesmo para usuários que desconhecem o modelo QUAL2-E, que é utilizado mundialmente para a simulação de rios (VON SPERLING, 2007). A utilização deste modelo com o modelo Oliveira (2004) proporcionaria uma visão global do problema ambiental a ser sanado, otimizando a aplicação de recursos.

Como exemplar da conjugação destes dois modelos, foi utilizado o próprio exemplo proposto no modelo QUAL-UFMG, que será aqui considerado hipoteticamente a representação de uma bacia hidrográfica. O exemplo citado trata-se de um rio com contribuições múltiplas, sendo que o rio principal possui 90 km de comprimento e, aos seus

50 km, recebe um rio tributário. Este tributário, por sua vez, também recebe o lançamento de esgotos não tratados, o qual tem o percurso de 15 km. Após a confluência do rio principal com o primeiro tributário, ele percorre mais 20 km e recebe o segundo tributário. Após esta confluência o rio principal tem ainda o percurso de mais 25 km (VON SPERLING, 2007, p. 379). A figura 6.26 apresenta o diagrama unifilar do exemplo.

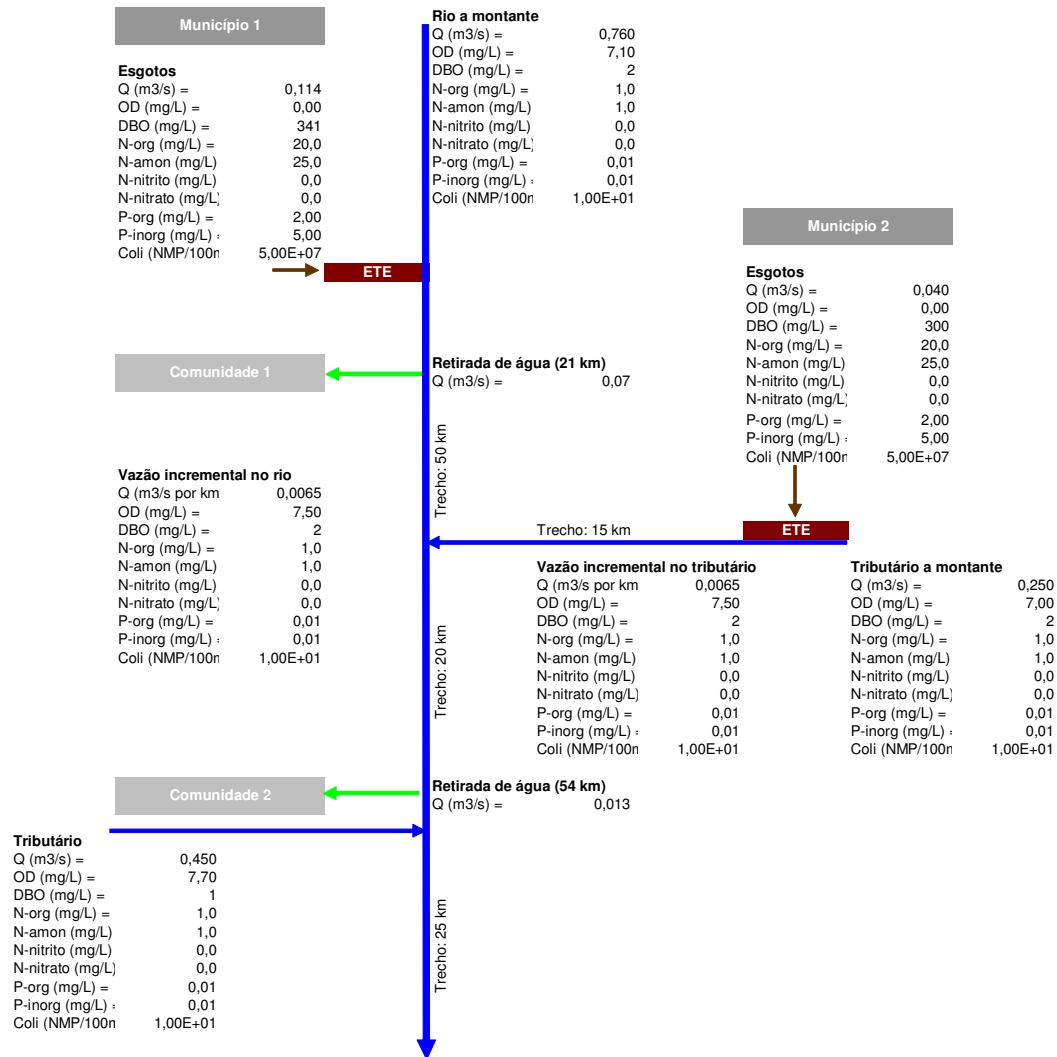


**Figura 6.26 – Exemplo do modelo QUAL-UFMG**

Fonte: Von Sperling (2007, p. 573)

Com a finalidade de se caracterizar uma bacia hidrográfica, foram definidos dois municípios, que estarão representados no exemplo como os lançadores de esgoto, e duas comunidades, que captam água do rio principal, a primeira à 21 km e a segunda à 54 km. De acordo com os dados do QUAL-UFMG, sem estações de tratamento de esgoto implantadas na

bacia hidrográfica, a primeira comunidade estaria captando água com 16,4 mg/L de DBO e a segunda com 5,5 mg/L de DBO. Para as comunidades 1 e 2 captarem água com 2,0 mg/L de DBO, que é o padrão do rio principal, a quantidade de DBO no lançamento do primeiro município deveria ser, no máximo, 27,0 mg/L e a do segundo 150,0 mg/L de DBO, segundo os cálculos do QUAL-UFGM. O problema adaptado pode ser visualizado na figura 6.27.



**Figura 6.26 – Exemplo adaptado do modelo QUAL-UFGM**

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2007, p. 573)

Os dados de entrada do modelo Oliveira (2004) foram preenchidos com as características dos esgotos lançados no primeiro e no segundo município. A partir disto, foram gerados os orçamentos e as estimativas de DBO no efluente final (tabelas 6.16 e 6.17).

**Tabela 6.16 – Orçamentos e estimativa de DBO no efluente final para o município 1 do exemplo adaptado do modelo QUAL-UFMG**

| Item   | Descrição                              | Sistema A           | Sistema B           | Sistema C           | Sistema D           | Sistema E           | Sistema F           | Sistema G           | Sistema H           |
|--|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|  |  | US\$                | US\$                | US\$                | US\$                | US\$                | US\$                | US\$                | US\$                |
| 1  | Terreno                                | 6.438,60            | 38.472,75           | 6.898,50            | 15.991,23           | 25.491,13           | 78.218,71           | 23.191,63           | 35.469,53           |
| 2  | Escavações e limpeza do terreno        | 22.746,52           | 410.804,68          | 23.530,68           | 253.119,63          | 219.453,31          | 1.495.530,55        | 233.970,28          | 559.547,92          |
| 3  | Valor de projetos (5% valor obra)      | 81.000,00           | 54.000,00           | 67.500,00           | 65.250,00           | 65.250,00           | 47.250,00           | 60.750,00           | 58.500,00           |
| 4  | Tratamento preliminar                  | 109.375,00          | 109.375,00          | 109.375,00          | 109.375,00          | 109.375,00          | 109.375,00          | 109.375,00          | 109.375,00          |
| 5  | Fundações (20% concreto armado)        | 74.835,87           | 46.750,15           | 78.351,94           | 46.750,15           | 46.448,39           | 0,00                | 49.237,61           | 0,00                |
| 6  | Paisagismo                             | 9.657,90            | 38.472,75           | 10.347,75           | 15.991,23           | 38.236,70           | 39.109,35           | 34.787,45           | 35.469,53           |
| 7  | Drenagem                               | 10.948,62           | 65.421,59           | 11.730,66           | 27.192,55           | 43.346,80           | 88.672,15           | 39.436,58           | 60.314,72           |
| 8  | Instalações elétricas                  | 32.169,12           | 0,00                | 0,00                | 24.375,00           | 40.211,40           | 0,00                | 0,00                | 24.375,00           |
| 9  | Segurança                              | 39.239,80           | 44.472,40           | 37.598,67           | 35.333,49           | 53.517,90           | 55.426,70           | 46.695,05           | 43.448,05           |
| 10   | Pára-raios                             | 3.125,00            | 3.125,00            | 3.125,00            | 3.125,00            | 3.125,00            | 3.125,00            | 3.125,00            | 3.125,00            |
| 11   | Redes de água, esgoto, água de serviço | 44.900,00           | 39.500,00           | 46.250,00           | 45.125,00           | 45.125,00           | 36.125,00           | 42.875,00           | 41.750,00           |
| 12   | Concreto armado                        | 374.179,33          | 233.750,75          | 391.759,72          | 233.750,75          | 301.914,52          | 19.222,13           | 246.188,04          | 13.524,30           |
| 13   | Impermeabilização                      | 79.360,85           | 144.529,62          | 83.836,23           | 91.284,16           | 80.049,80           | 209.469,07          | 81.522,50           | 123.962,91          |
| 14   | Edificações                            | 27.402,82           | 13.701,41           | 18.268,54           | 22.835,68           | 18.268,54           | 4.567,14            | 9.134,27            | 13.701,41           |
| 15   | Equipamentos                           | 281.020,83          | 192.326,39          | 517.458,32          | 246.294,70          | 247.305,56          | 140.625,00          | 494.730,32          | 194.593,31          |
| 16   | Telefonia/informática para automação   | 62.500,00           | 62.500,00           | 62.500,00           | 62.500,00           | 62.500,00           | 62.500,00           | 62.500,00           | 62.500,00           |
| 17   | Vias de circulação                     | 19.759,01           | 118.066,54          | 21.170,36           | 49.074,47           | 78.228,10           | 160.026,90          | 71.171,31           | 108.850,16          |
| 18   | Área de “cinturão verde”               | 35.467,13           | 86.697,58           | 36.711,97           | 55.894,79           | 70.570,78           | 61.809,56           | 67.312,55           | 83.244,99           |
| 19   | Desinfecção                            | 125.000,00          | 125.000,00          | 125.000,00          | 125.000,00          | 125.000,00          | 125.000,00          | 125.000,00          | 125.000,00          |
| 20   | Estimativa do custo de operação        | 1.193.243,62        | 766.364,92          | 840.312,41          | 941.149,90          | 1.092.406,13        | 403.349,96          | 1.105.851,13        | 806.699,91          |
| 21   | Depreciação de equipamentos            | 152.766,59          | 104.551,14          | 281.297,10          | 133.889,02          | 134.438,53          | 76.445,59           | 268.941,86          | 105.783,47          |
| <b>Custos por habitante</b>                  |  | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         |
| Custo total por habitante                    |  | 61,89               | 59,95               | 61,62               | 57,85               | 64,45               | 71,46               | 70,57               | 57,98               |
| Custo de implantação por habitante           |  | 31,98               | 40,60               | 36,70               | 33,96               | 37,19               | 60,80               | 40,02               | 37,71               |
| <b>Resumo dos custos</b>                     |  | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         |
| Estimativa de custo de implantação           |  | 1.439.126,39        | 1.826.966,60        | 1.651.413,36        | 1.528.262,83        | 1.673.417,91        | 2.736.052,26        | 1.801.002,59        | 1.696.751,84        |
| Estimativa de custo de operação e manutenção |  | 1.346.010,21        | 870.916,05          | 1.121.609,51        | 1.075.038,91        | 1.226.844,66        | 479.795,54          | 1.374.792,99        | 912.483,38          |
| <b>Custo total do sistema</b>                |  | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         |
| Custo total do sistema                       |  | <b>2.785.136,60</b> | <b>2.697.882,65</b> | <b>2.773.022,87</b> | <b>2.603.301,75</b> | <b>2.900.262,57</b> | <b>3.215.847,80</b> | <b>3.175.795,58</b> | <b>2.609.235,22</b> |
| Ordem  |  | <b>5</b>            | <b>3</b>            | <b>4</b>            | <b>1</b>            | <b>6</b>            | <b>8</b>            | <b>7</b>            | <b>2</b>            |
| <b>Eficiências</b>                           |  | <b>mg/L</b>         | <b>mg/L</b>         | <b>mg/L</b>         | <b>mg/L</b>         | <b>mg/L</b>         | <b>mg/L</b>         | <b>mg/L</b>         | <b>mg/L</b>         |
| Estimativa DBO efluente                      |  | <b>9</b>            | <b>19</b>           | <b>23</b>           | <b>30</b>           | <b>17</b>           | <b>34</b>           | <b>47</b>           | <b>36</b>           |
| Ordem  |  | <b>1</b>            | <b>3</b>            | <b>4</b>            | <b>5</b>            | <b>2</b>            | <b>6</b>            | <b>8</b>            | <b>7</b>            |

Fonte: Dados coletados da ultima versão do modelo Oliveira (2004)

Tabela 6.17 – Orçamentos e estimativa de DBO no efluente final para o município 2 do exemplo adaptado do modelo QUAL-UFGM

| Item   | Descrição                              | Sistema A           | Sistema B           | Sistema C           | Sistema D           | Sistema E           | Sistema F           | Sistema G           | Sistema H           |
|--|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|  |  | US\$                | US\$                | US\$                | US\$                | US\$                | US\$                | US\$                | US\$                |
| 1  | Terreno                                | 2.861,60            | 11.885,06           | 3.066,00            | 5.612,09            | 10.450,56           | 24.429,89           | 9.428,56            | 12.446,21           |
| 2  | Escavações e limpeza do terreno        | 7.874,22            | 126.617,68          | 8.235,59            | 87.693,49           | 77.120,69           | 298.086,73          | 82.268,97           | 194.249,39          |
| 3  | Valor de projetos (5% valor obra)      | 36.000,00           | 24.000,00           | 30.000,00           | 29.000,00           | 29.000,00           | 21.000,00           | 27.000,00           | 26.000,00           |
| 4  | Tratamento preliminar                  | 48.611,11           | 48.611,11           | 48.611,11           | 48.611,11           | 48.611,11           | 48.611,11           | 48.611,11           | 48.611,11           |
| 5  | Fundações (20% concreto armado)        | 28.434,15           | 16.254,03           | 28.525,96           | 16.254,03           | 19.000,20           | 0,00                | 20.068,76           | 0,00                |
| 6  | Paisagismo                             | 4.292,40            | 11.885,06           | 4.599,00            | 5.612,09            | 15.675,84           | 12.214,94           | 14.142,84           | 12.446,21           |
| 7  | Drenagem                               | 4.866,05            | 20.210,14           | 5.213,63            | 9.543,17            | 17.770,82           | 27.694,79           | 16.032,95           | 21.164,35           |
| 8  | Instalações elétricas                  | 13.786,76           | 0,00                | 0,00                | 9.375,00            | 18.382,35           | 0,00                | 0,00                | 9.375,00            |
| 9  | Segurança                              | 21.007,95           | 22.630,03           | 22.775,36           | 18.157,54           | 29.548,51           | 28.830,59           | 28.268,00           | 22.963,64           |
| 10   | Pára-raios                             | 1.388,89            | 1.388,89            | 1.388,89            | 1.388,89            | 1.388,89            | 1.388,89            | 1.388,89            | 1.388,89            |
| 11   | Redes de água, esgoto, água de serviço | 19.955,56           | 17.555,56           | 20.555,56           | 20.055,56           | 20.055,56           | 16.055,56           | 19.055,56           | 18.555,56           |
| 12   | Concreto armado                        | 142.170,74          | 81.270,14           | 142.629,79          | 81.270,14           | 123.501,30          | 10.828,23           | 100.343,80          | 8.501,55            |
| 13   | Impermeabilização                      | 30.595,89           | 47.280,22           | 30.712,75           | 32.378,05           | 32.446,51           | 67.961,25           | 32.879,46           | 42.801,83           |
| 14   | Edificações                            | 27.402,82           | 13.701,41           | 18.268,54           | 22.835,68           | 18.268,54           | 4.567,14            | 9.134,27            | 13.701,41           |
| 15   | Equipamentos                           | 163.165,43          | 99.826,39           | 369.605,85          | 115.881,94          | 127.111,11          | 62.500,00           | 341.253,89          | 78.555,56           |
| 16   | Telefonia/informática para automação   | 27.777,78           | 27.777,78           | 27.777,78           | 27.777,78           | 27.777,78           | 27.777,78           | 27.777,78           | 27.777,78           |
| 17   | Vias de circulação                     | 8.781,78            | 36.473,30           | 9.409,05            | 17.222,59           | 32.071,06           | 49.980,87           | 28.934,71           | 38.195,37           |
| 18   | Área de “cinturão verde”               | 23.644,76           | 48.187,13           | 24.474,65           | 33.112,57           | 45.185,62           | 34.543,08           | 42.919,35           | 49.311,58           |
| 19   | Desinfecção                            | 55.555,56           | 55.555,56           | 55.555,56           | 55.555,56           | 55.555,56           | 55.555,56           | 55.555,56           | 55.555,56           |
| 20   | Estimativa do custo de operação        | 530.330,50          | 340.606,63          | 373.472,18          | 418.288,84          | 485.513,84          | 179.266,65          | 491.489,39          | 358.533,29          |
| 21   | Depreciação de equipamentos            | 88.698,86           | 54.266,93           | 200.922,56          | 62.994,94           | 69.099,26           | 33.975,82           | 185.510,07          | 42.703,83           |
| <b>Custos por habitante</b>                  |  | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         |
| Custo total por habitante                    |  | 64,36               | 55,30               | 71,29               | 55,93               | 65,18               | 50,26               | 79,10               | 54,14               |
| Custo de implantação por habitante           |  | 33,41               | 35,56               | 42,57               | 31,87               | 37,45               | 39,60               | 45,25               | 34,08               |
| <b>Resumo dos custos</b>                     |  | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         |
| Estimativa de custo de implantação           |  | 668.173,43          | 711.109,48          | 851.405,05          | 637.337,29          | 748.922,02          | 792.026,40          | 905.064,44          | 681.600,98          |
| Estimativa de custo de operação e manutenção |  | 619.029,35          | 394.873,56          | 574.394,74          | 481.283,78          | 554.613,09          | 213.242,46          | 676.999,46          | 401.237,12          |
| <b>Custo total do sistema</b>                |  | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         | <b>US\$</b>         |
| Custo total do sistema                       |  | <b>1.287.202,78</b> | <b>1.105.983,03</b> | <b>1.425.799,79</b> | <b>1.118.621,07</b> | <b>1.303.535,11</b> | <b>1.005.268,86</b> | <b>1.582.063,90</b> | <b>1.082.838,10</b> |
| Ordem  |  | <b>5</b>            | <b>3</b>            | <b>7</b>            | <b>4</b>            | <b>6</b>            | <b>1</b>            | <b>8</b>            | <b>2</b>            |
| <b>Eficiências</b>                           |  | <b>mg/L</b>         | <b>mg/L</b>         | <b>mg/L</b>         | <b>mg/L</b>         | <b>mg/L</b>         | <b>mg/L</b>         | <b>mg/L</b>         | <b>mg/L</b>         |
| Estimativa DBO efluente                      |  | <b>8</b>            | <b>17</b>           | <b>20</b>           | <b>29</b>           | <b>15</b>           | <b>30</b>           | <b>42</b>           | <b>35</b>           |
| Ordem  |  | <b>1</b>            | <b>3</b>            | <b>4</b>            | <b>5</b>            | <b>2</b>            | <b>6</b>            | <b>8</b>            | <b>7</b>            |

Fonte: Dados coletados da ultima versão do modelo Oliveira (2004)

Conforme os dados da tabela 6.16, o sistema de menor custo proposto pelo modelo Oliveira (2004), o “Sistema D”, não poderia ser implantado, pois sua estimativa de DBO no efluente final é de 30 mg/L, maior do que a máxima requerida, de 27,0 mg/L. O sistema com o segundo menor custo, o “Sistema H”, também não poderia, pois alcançou apenas 34 mg/L de DBO no efluente final. Portanto, para o primeiro município, dever ser implantado o sistema com o terceiro menor custo, o “Sistema B”, composto por um reator UASB seguido de uma Lagoa Facultativa, no valor de, aproximadamente, 2,6 milhões de dólares, pois este sistema alcançou 19 mg/L de DBO no efluente final. Conforme sua vazão, o município 1 teria, provavelmente, 45 mil habitantes.

Já para o município 2 (tabela 6.17), com provavelmente 20 mil habitantes, o sistema de menor custo proposto pelo modelo Oliveira (2004), o “Sistema F” poderia ser implantado, pois sua estimativa de DBO no efluente final é de 30 mg/L e a máxima requerida era de 150,0 mg/L. Este sistema representa o Sistema Australiano e foi orçado pelo modelo em, aproximadamente, 1 milhão de dólares.

Portanto, com um sistema mais sofisticado e com outro mais tradicional, o problema do tratamento de esgoto na bacia hipotética poderia ser solucionado com, aproximadamente, 3,6 milhões de dólares. Este resultado demonstra que o modelo Oliveira (2004) pode ser utilizado com outros modelos, ampliando assim as suas possíveis formas de aplicações.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo Oliveira (2004), que sofreu ajustes e alterações e passou a ser denominado “ETEX-FEARP”, foi avaliado com base em dados obtidos de projetos de estações de tratamento de esgoto que foram coletados no decorrer da pesquisa. No total, foram coletados os dados referentes a 61 projetos de estação de tratamento de esgotos, sendo 49 referentes a municípios localizados no estado de São Paulo, sete no estado de Minas Gerais, três no estado do Paraná, um no estado da Bahia e um no estado do Rio de Janeiro.

Estes projetos, que podem ser considerados o núcleo dos recursos que foram utilizados na pesquisa, não são facilmente encontrados ou disponibilizados pelas organizações públicas responsáveis pelo tratamento de esgoto no Brasil. Com a exceção do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) de Ribeirão Preto e de São José do Rio Preto, da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) de Franca, da Representação de Desenvolvimento Urbano (REDUR) da Caixa Econômica Federal de Ribeirão Preto e do Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas (PRODES) da Agência Nacional das Águas (ANA) em Brasília, nenhuma outra agência forneceu os dados destes projetos.

O banco de dados com os projetos coletados foi utilizado para verificar se os sistemas adotados no modelo “ETEX-FEARP” eram os mais utilizados no Brasil. Estes sistemas do modelo são compostos por dois tipos de tratamento, um anaeróbio no primeiro processo e outro aeróbio ou facultativo no segundo processo. Dentre os dados coletados, foram encontrados arranjos compatíveis a seis dos oito sistemas do modelo. Esta informação foi confirmada em entrevista com o Prof. Dr. Marcos von Sperling, que afirmou não serem usuais os sistemas “E” e “G”. Quando considerados isoladamente os sistemas de cada processo, todos eles fazem parte dos dez tipos de sistemas mais utilizados no Brasil (IBGE, 2000).

Também com base nos projetos coletados, foi verificado que ainda não é uma prática comum a realização de estudos de concepção para se avaliar possíveis alternativas de sistemas

a ser implantados. Também não se encontrou nestes projetos alguma menção de estudos para garantir a sustentabilidade dos investimentos. Isto pode ser considerado uma falha na análise das alternativas no processo de tomada de decisão. A lei 11.445, de 5 de janeiro de 2007, já prevê a inclusão de uma fase de planejamento como ferramenta fundamental para a eficiência dos investimentos, garantindo assim a sustentabilidade dos mesmos.

Algumas variáveis de entrada do modelo “ETEX-FEARP” foram excluídas, pois não eram encontradas nos projetos e, quando encontradas, a sua inclusão no modelo não alterava nenhum cálculo. A versão final do modelo passou a contar com as seguintes variáveis de entrada: (i) população estimada (20 anos); (ii) vazão afluente média; (iii) vazão afluente máxima; (iv) DBO média afluente; (v) alcance do projeto; (vi) classe do rio receptor; e (vii) temperatura média do líquido no mês mais frio. Todas estas variáveis foram encontradas facilmente nos projetos, com exceção das variáveis “vazão afluente máxima”, que foi estimada com dados da literatura, e “temperatura média do líquido no mês mais frio”, que também foi estimada com dados da literatura e mais os dados coletados no IPEA (2008).

Os testes com o modelo “ETEX-FEARP” foram realizados inserindo-se os dados coletados dos projetos ao modelo. O sistema de menor custo monetário proposto pelo modelo era comparado com o tipo de sistema adotado nos projetos. Também foram comparados os custos de implantação dos mesmos. Nesta fase, foram encontrados vários problemas no modelo e, a partir deles, novas versões eram concebidas já com a implementação da correção. No total foram desenvolvidas 12 versões novas. Os maiores problemas encontrados foram relacionados ao cálculo das áreas e do número de aeradores de alguns sistemas.

A partir das distribuições probabilísticas das variáveis de entrada do modelo “ETEX-FEARP”, e com o auxílio do *software* Crystal Ball<sup>®</sup>, foi possível realizar a simulação do modelo, a qual permitiu verificar dinamicamente o comportamento do mesmo para populações até 1 milhão de habitantes. Para isto, foram atualizados os custos de construção

adotados com base em oito novas tabelas de custo de construção, que são utilizadas por agências estaduais ligadas à construção civil, além da prefeitura de São Paulo. Também foram solicitados orçamentos às empresas fornecedoras de equipamentos para estações de tratamento de esgoto, com o intuito de se atualizar os custos dos reatores do modelo. Nesta fase foram encontrados outros problemas de cálculos, os quais foram corrigidos.

A partir da simulação realizada, foi possível identificar faixas de populações para os sistemas do modelo “ETEX-FEARP”. Estas faixas de populações identificadas foram comprovadas por meio de entrevistas com projetistas de estações de tratamento de esgoto. A última versão do modelo propõe como a alternativa de menor valor monetário a utilização do “Sistema F” para populações de até 45 mil habitantes e do “Sistema H” para populações maiores do que 40 mil habitantes, até 180 mil habitantes, além de sugerir a aplicação do “Sistema B” para populações 40 e 130 mil habitantes e do “Sistema C” para populações maiores do que 70 mil habitantes. Este comportamento do modelo se assemelha à opinião da maioria dos entrevistados, de que as lagoas são as melhores opções para populações menores do que 50 mil habitantes e que, a partir disto, pode-se optar por aeradores para diminuir a área da lagoa facultativa. Os custos por sistema de cada faixa de população foram comparados com os custos das tabelas de referência de custo de obra da SABESP e do PRODES, o que mostrou uma boa adequação dos orçamentos propostos pelo modelo.

Com a realização dos testes com base nos dados coletados, não se mostrou necessário a inclusão de nenhum outro tipo de sistema de tratamento ao modelo “ETEX-FEARP”, pois nenhum outro tipo de composição de sistema, dentre os dados coletados, obteve representatividade.

Para se verificar a qualidade das respostas, foram incluídas ao modelo duas metodologias. A primeira foi a análise hierárquica de processos (AHP), proposta por Saaty (1991), que possibilita a inclusão de julgamentos em modelos através de vetores de

prioridades, criando assim um novo critério, além do econômico. Na média, em 40,0% dos casos a escolha da alternativa de menor valor monetário não se alterou com a adição do novo critério, o que pode representar uma consistência dos orçamentos. A segunda foi a teoria dos jogos e seu equilíbrio, proposto por Nash (1951), com a definição de dois jogadores: o “ecológico”, que prioriza uma solução de menor impacto ambiental; e o “econômico”, que prioriza uma solução de menor custo.

No equilíbrio de Nash, o sistema mais indicado para a faixa de população entre 500 e 70 mil habitantes foi o “Sistema B”, a partir de 70 mil habitantes, o “Sistema C”, entre 5 mil e 75 mil habitantes também foi o “Sistema D” e, a partir de 420 mil habitantes o “Sistema A”. Estas faixas de população foram semelhantes às faixas de população do modelo “ETEX-FEARP”, o que pode ser um indício de que o modelo está sugerindo, na maioria das vezes, um sistema de maior eficiência e de menor valor monetário de implantação, operação e manutenção.

Finalmente, as entrevistas realizadas com os especialistas da área de hidráulica e saneamento foram utilizadas para verificar as possíveis aplicações do modelo, bem como suas vantagens e limitações.

Uma das aplicações para o modelo mais sugeridas pelos entrevistados seria a sua utilização pelas agências e órgãos ambientais, além de estados e municípios, para proporcionar uma visão global no planejamento dos investimentos. Com base nas análises realizadas neste trabalho, considera-se o modelo “ETEX-FEARP” adequado para atender às expectativas deste tipo de estudo. Também não se descarta o seu uso em fiscalizações de investimentos realizados, pois os orçamentos do modelo estão próximos aos valores médios dos projetos coletados.

Entretanto a maior limitação levantada pelos entrevistados durante a pesquisa foi relacionada propriamente à decisão. Devido ao grau de complexidade e dos diversos tipos de

critério a serem atendidos, além dos econômicos e técnicos ainda existem o ambiental, social e político, o modelo não seria adequado para propor um sistema. Na melhor das hipóteses, o modelo poderia ser utilizado em uma fase final de projeto ou em estudos de concepções, que foi considerada a sua melhor aplicação.

É importante ressaltar que o modelo “ETEX-FEARP” não é determinístico, ou seja, ele não visa substituir o papel do tomador de decisão, mas sim lhe proporcionar uma visão macro, em oposição aos estudos detalhados de um projeto, para adverti-lo sobre a existência de outras alternativas as quais poderiam ser mais bem estudadas. O melhor nome para um modelo como este seria: modelo de apoio à tomada de decisão e não modelo de tomada de decisão, como foi concebido.

Esta simples mudança semântica representa, sinteticamente, a maior contribuição desta pesquisa. O modelo “ETEX-FEARP” foi avaliado e, apesar de sua restrição quanto à escolha de sistemas de tratamento de esgoto, foi evidenciada sua vocação como indicador de alternativas possíveis. Desta forma, os profissionais e acadêmicos da área de hidráulica e saneamento, passam a contar com um grande auxílio em seu processo de tomada de decisão.

Em grande parte corroborando com a afirmação do Prof. Dr. Marcos von Sperling de que “modelos nunca podem ser considerados válidos, somente pode se considerar que eles não são inválidos”, destaca-se que o modelo avaliado alcançou resultados animadores nos testes realizados. Todavia, estes testes devem ser ainda ampliados, inserindo-se novas metodologias para continuar as análises das respostas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCON – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS CONCESSIONÁRIAS PRIVADAS DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ÁGUA E ESGOTO. **Panorama da participação do setor privado**. Disponível em: <<http://www.abcon.com.br/index.php/379>>. Acesso em: 18 dez. 2008a

\_\_\_\_\_. **Concessões privadas em operação**. Disponível em: <<http://www.abcon.com.br/xls/2.xls>>. Acesso em: 18 dez. 2008b

ACKOFF, R. L.; SASIENI, M. W. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: LTC e EDUSP, 1971. 523 p.

AESBE – ASSOCIAÇÃO DAS EMPRESAS DE SANEAMENTO BÁSICO ESTADUAIS. **Financiamento de Investimentos em Saneamento Básico**: medidas sugeridas para expansão sustentável e modernizadora. 2006. Disponível em: <<http://www.aesbe.org.br/aesbe/pages/documento/exibirAnexo.do?tipo=documentos&arquivo=16.pdf>>. Acesso em: 2 out. 2008

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **O que é o PRODES**. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/prodes/prodes.asp>>. Acesso em: 1 jul. 2008

ASSEMAE – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS SERVIÇOS MUNICIPAIS DE SANEAMENTO. **A Visão da ASSEMAE sobre os principais aspectos conjunturais que interessam ao Saneamento Ambiental nos Municípios Brasileiros**. Disponível em: <<http://www.assemae.org.br/ibam.htm>>. Acesso em: 27 nov. 2006.

\_\_\_\_\_. **A visão da ASSEMAE sobre a promulgação da Lei 11.445/07**. Disponível em: <<http://www.assemae.org.br/visaoassemae.htm>>. Acesso em: 10 abr. 2007.

ABGE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Ensaio de impermeabilidade em solos**: Orientações para sua execução no campo. ABGE, 1981

BAZERMAN, M.H. **Processo decisório**. Para cursos de Administração, Economia e MBAs. São Paulo: Elsevier, 2004. 232 p.

BIERMAN, H. S.; FERNANDEZ, L. **Game theory with economic applications**. 2. ed. Addison-Wesley, 1998.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO. **A infra-estrutura urbana**. Disponível em: <[www.bndes.gov.br/conhecimento/livro\\_setorial/setorial12.pdf](http://www.bndes.gov.br/conhecimento/livro_setorial/setorial12.pdf)>. Acesso em: 10 dez. 2008a

\_\_\_\_\_. **Apoio ao setor de saneamento**. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/conhecimento/bnset/set2804.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2008b

\_\_\_\_\_. **Política Ambiental**. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/ambiente/default.asp>>. Acesso em: 30 jun. 2008c

BRAGA, B; GOBETTI, L. Análise multiobjetivo. In: PORTO, R. L. L. (Org.). **Técnicas**

**quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos.** Porto Alegre: Editora Universidade / UFRGS / Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1997. p. 43-95.

CHERNICHARO, C. A. L. (Coord.) et al. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 554 p.

CLEMEN, R.T. **Making Hard Decisions: An Introduction to Decision Analysis.** 2. ed. Belmont, CA: Duxbury Press, 1996.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília: MMA, 2005.

\_\_\_\_\_. **Resolução CONAMA nº 397, de 03 de abril de 2008.** Altera o inciso II do § 4o e a Tabela X do § 5o, ambos do art. 34 da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA no 357, de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Brasília: MMA, 2008.

COOPER, D. R.; SCHINDLER, P. S. **Métodos de pesquisa em administração.** 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2003. 640 p.

FIANI, R. **Teoria dos jogos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

FUNASA – FUNDAÇÃO NACIONAL DA SAÚDE. **Programa de Aceleração do Crescimento (PAC).** Disponível em: <[http://www.funasa.gov.br/index\\_III.htm](http://www.funasa.gov.br/index_III.htm)>. Acesso em: 27 jun. 2008.

GOMES, L.F.A.M.; GOMES, C.F.S.; ALMEIDA, A.T. **Tomada de decisão gerencial: Enfoque multicritério.** 2. ed. São Paulo: Atlas, 2006. 289 p.

HAIR JR., J.F.; TATHAM, R.L.; ANDERSON, R.E.; BLACK, W. **Análise multivariada de dados.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.L. **Introdução à pesquisa operacional.** 8. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006. 828 p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, 2000.** Disponível em: <<http://www.ibge.com.br/>>. Acesso em: 07 set. 2007.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Estimativas das médias trimestrais de temperatura.** Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/>>. Acesso em: 12 dez. 2008

KLEVAS, V.; STREIMIKIENE, D.; KLEVIENE, A. Sustainability assessment of the energy projects implementation in regional scale. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 155–166, 2009

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisões**: Para cursos de Administração, Economia e Ciências Contábeis. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2004. 384 p.

LEONETI, A. B.; CORTAPASSO, M. A. B.; OLIVEIRA, S.V.W.B. **Avaliação de escolhas de sistemas de tratamento de esgoto em municípios por meio de modelo de tomada de decisão**. In: SEMINÁRIO SOBRE REGENERAÇÃO AMBIENTAL DE CIDADES: ÁGUAS URBANAS, Universidade Estadual de Londrina, 05 a 07 de dezembro de 2007.

LOETSCHER, T.. **Working with you towards appropriate water supply and sanitation**. Disponível em: <<http://www.decisionscape.com.au/>>. Acesso em: 17 abr. 2003.

MAIA, D. A. **Um estudo sobre modelagem e simulação de gestão com dinâmica de sistemas**. 2005. 160 f. Dissertação (Mestrado em Administração)-FEA-USP, São Paulo, 2005.

MCGAHEY, C.. **WAWTTAR**. Disponível em: <<http://www.cep.unep.org/pubs/techreports/tr43en/WAWTTAR.htm>>. Acesso em: 18 abr. 2003.

MC – MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Gasto Público em Saneamento Básico**: Relatório de aplicações de 2007. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/secretarias-nacionais/saneamento-ambiental/>>. Acesso em: 18 dez. 2008a.

\_\_\_\_\_. **Pacto pelo Saneamento Básico**: Plano Nacional em Saneamento Básico. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/secretarias-nacionais/saneamento-ambiental/>>. Acesso em: 18 dez. 2008b.

MOREIRA, J. C. **Orçamento empresarial**: Manual de elaboração. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

NAGEL, C.; MEYER, P.. Caught between ecology and economy: end-of-life aspects of environmentally conscious manufacturing. **Computers & Industrial Engineering**, London, v.36, p.781-792, 1999.

NASH, J. Non-Cooperative Games. **Annals of Mathematics**, v. 54, p. 286-295, 1951.

ODUM, E. P. **Fundamentals of ecology**. 3. ed. Philadelphia: Saunders, 1971.

OLIVEIRA, S.V.W.B. **Modelo para tomada de decisão na escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário**. 2004. 293 f. Tese (Doutorado em Administração). Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

OSBORNE, M. J. **An introduction to game theory**. New York : Oxford University Press, 2004.

PINDYCK, R. S. Irreversibilities and the timing of environmental policy. **Resource and Energy Economics**, London, v.22, p.233-259, 2000.

PMSS – PROGRAMA DE MODERNIZAÇÃO DO SETOR DE SANEAMENTO. **Estudo**

**déficit e metas do milênio:** Estudo sobre a qualificação do deficit em saneamento básico e metas do milênio. 2007. Apresentação. Disponível em: <<http://www.pmss.gov.br/pmss/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=229>>. Acesso em: 15 dez. 2008.

PNUD – PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. **Brasil dificilmente alcançará ODM de esgoto.** Disponível em: <[www.pnud.org.br/odm/](http://www.pnud.org.br/odm/)>. Acesso em: 12 nov. 2008.

PORTO, R. L. L.; AZEVEDO, L. G. T. Sistemas de Suporte a Decisões aplicados a problemas de Recursos Hídricos. In: PORTO, R. L. L. (Org.). **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos.** Porto Alegre: Editora Universidade / UFRGS / Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1997. p. 43-95.

PRODES – PROGRAMA DE DESPOLUIÇÃO DE BACIAS HIDROGÉFICAS. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/prodes/>>. Acesso em: 15 dez. 2008.

PROSAB – PROGRAMA DE PESQUISAS EM SANEAMENTO BÁSICO. **Reuso das águas de esgoto sanitário, inclusive desenvolvimento de tecnologia de tratamento para esse fim.** Rio de Janeiro: ABES, 2006.

RAGSDALE, C.T. **Spreadsheet modeling & decision analysis:** a practical introduction to management science. 4. ed. Mason, Ohio : Thomson/South-Western, 2004.

RIVAS, A.; IRIZAR, I.; Ayesa, E. Model-based optimisation of Wastewater Treatment Plants design. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, p. 435-450, 2008.

SAATY, T. L. **Método de análise hierárquica.** 1991. São Paulo: Makron, 1991. 367 p.

SAIANI, C. C. S. **Restrições à expansão dos investimentos em saneamento básico no Brasil:** déficit de acesso e desempenho dos prestadores. 2007. 315 f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada). Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2007.

SANTOS, S.L. dos. **Uma aplicação de modelos de simulação em sistemas de apoio à decisão.** 1992. 189 f. Dissertação (Mestrado em Administração)-FEA-USP, São Paulo, 1992.

SHANNON, R.E. **Systems simulation:** the art and science. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1975.

SHIMIZU, T. **Decisão nas organizações.** 2. ed. São Paulo: Atlas, 2006. 419 p.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES EM SANEAMENTO. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 13 mar. 2007.

SOUZA, M. A. A. **Um modelo para seleção de processos de tratamento de águas residuárias municipais.** Associação Interamericana de Engenharia Sanitária e Ambiental – AIDIS. Gestão Ambiental no Século XXI. Lima, APIS, 1998, p.1-20

STARFIELD, M.; SMITH, K. A.; BLELOCH, A. L. **How to model it:** problem solving for

the computer age. New York: McGraw Hill, 1990. 206 p.

STEVENSON, W.J. **Estatística aplicada à administração**. Tradução Alfredo Alves de Farias. São Paulo: Harper & Row do Brasil, 2001

TONETO JUNIOR, R. **A situação atual do saneamento básico no Brasil**: Problemas e perspectivas. 2004. 324 f. Tese (Livre Docência em Economia)-Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

URBAGUA – INSTRUMENTOS DE GESTÃO INTEGRADA DA ÁGUA EM ÁREAS URBANAS. **Limites técnicos e econômicos de alternativas de tratamento de esgoto**: Manual de orientação aos municípios e outros agentes. Disponível em: <<http://www.usp.br/fau/pesquisa/infurb/urbagua/>>. Acesso em: 10 jun. 2008.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. v.1, 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Gerais, 2006. 452 p.

\_\_\_\_\_. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. v.7. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 588 p. (não localizei essa referencia no texto)

WINSTON, W.L. **Operations Research**: applications and algorithms. 3. ed. Belmont: Thomson, 1994. 1318 p.

ZUFFO, A. C. **Seleção e aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento ambiental de recursos hídricos**. 1998. 286 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

## APÊNDICE A – Dados coletados nos projetos de estações de tratamento de esgoto

OBS.1: Os números marcados em vermelho (itálico) são estimativas

OBS.2: Os números marcados em azul (negrito) foram extraídos do IPEADATA

OBS.3: O projeto do município de Sertãozinho, SP, contempla duas fases para a implantação do processo de tratamento para atender 100 mil habitantes. No entanto, só foi considerada uma etapa neste estudo

| Projeto de ETE   |    |                              | População<br>estimada<br>2025 | Vazão<br>afluente<br>média | Vazão<br>afluente<br>máxima | DBO<br>média<br>afluente | Alcance<br>do<br>projeto | Classificação do rio receptor |                                 | Temp.<br>mês<br>mais<br>frio |
|--|----|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Cidade   | UF | Fornecido por                | hab                           | m³/d                       | m³/d                        | mg/L                     | ano                      | Clas.                         | Nome                            | °C                           |
| <b>SISTEMA F - Lagoa anaeróbia e lagoa facultativa</b> |    |                              |                               |                            |                             |                          |                          |                               |                                 |                              |
| Ibiporanga   | SP | DAEE (Ribeirão Preto)        | 1093                          | 196                        | 235                         | 233                      | 20                       | 2                             | Ribeirão Cachoeira              | 23                           |
| Ecatu-Tanabi   | SP | DAEE (Ribeirão Preto)        | 1606                          | 307                        | 368                         | 282                      | 20                       | 2                             | Rio Bonito                      | 23                           |
| Taquaral   | SP | DAEE (São José do Rio Preto) | 3281                          | 590                        | 721                         | 300                      | 20                       | 2                             | Rio Turvo                       | 24                           |
| Mirassolândia  | SP | DAEE (Ribeirão Preto)        | 5169                          | 1009                       | 1210                        | 266                      | 20                       | 2                             | Córrego Bálsamo                 | 22                           |
| Américo de Campos                                      | SP | DAEE (São José do Rio Preto) | 5367                          | 773                        | 1296                        | 306                      | 20                       | 2                             | Rio Preto                       | 20                           |
| Colômbia   | SP | Sabesp                       | 7776                          | 1374                       | 2474                        | 303                      | 20                       | 2                             | Rio Grande                      | 18                           |
| Palestina  | SP | DAEE (São José do Rio Preto) | 8651                          | 1315                       | 1643                        | 271                      | 20                       | 2                             | Rio Preto                       | 23                           |
| Pindorama  | SP | DAEE (São José do Rio Preto) | 15020                         | 2047                       | 3729                        | 396                      | 20                       | 2                             | Rio Turvo                       | 24                           |
| Santa Bárbara D'Oeste (a)                              | SP | PRODES                       | 16963                         | 3628                       | 4354                        | 252                      | 20                       | 2                             | Rio Piracicaba                  | 21                           |
| Tanabi   | SP | DAEE (São José do Rio Preto) | 20409                         | 2687                       | 3427                        | 410                      | 20                       | 2                             | Rio Preto                       | 20                           |
| Miguelópolis   | SP | Sabesp                       | 21605                         | 3487                       | 6278                        | 260                      | 20                       | 2                             | Rio Grande                      | 23                           |
| Serra Negra  | SP | Sabesp                       | 22812                         | 4142                       | 7455                        | 297                      | 20                       | 2                             | Ribeirão Serra Negra            | 19                           |
| Ibaté  | SP | PRODES                       | 25185                         | 6048                       | 7258                        | 225                      | 20                       | 2                             | Ribeirão São José das Correntes | 22                           |
| Igarapava  | SP | Sabesp                       | 25762                         | 4898                       | 8816                        | 262                      | 20                       | 2                             | Rio Grande                      | 23                           |
| Pindamonhangaba (a)                                    | SP | PRODES                       | 26574                         | 3542                       | 4250                        | 405                      | 20                       | 2                             | Rio Paraíba do Sul              | 17                           |
| Casa Branca  | SP | DAEE (Ribeirão Preto)        | 29602                         | 4940                       | 8982                        | 341                      | 20                       | 3                             | Ribeirão das Congonhas          | 23                           |
| Rio das Pedras   | SP | DAEE (Ribeirão Preto)        | 31604                         | 6048                       | 7257                        | 280                      | 20                       | 3                             | Ribeirão Tijuco Preto           | 22                           |
| Descalvado   | SP | DAEE (Ribeirão Preto)        | 35709                         | 6307                       | 7516                        | 275                      | 20                       | 2                             | Rio Bonito                      | 22                           |
| Barrinha   | SP | DAEE (Ribeirão Preto)        | 37299                         | 7240                       | 8689                        | 278                      | 20                       | 2                             | Rio Mogi Guaçu                  | 18                           |
| Ituverava  | SP | DAEE (Ribeirão Preto)        | 39515                         | 7344                       | 8640                        | 290                      | 20                       | 4                             | Rio do Carmo                    | 18                           |
| Américo Brasiliense                                    | SP | DAEE (Ribeirão Preto)        | 46740                         | 9250                       | 11059                       | 273                      | 20                       | 2                             | Córrego Ponte Alta              | 18                           |
| Sertãozinho  | SP | CAIXA (Ribeirão Preto)       | 50000                         | 11837                      | 13737                       | 228                      | 10                       | 4                             | Ribeirão Sertãozinho Sul        | 16                           |
| <b>SISTEMA A - UASB e lodos ativados</b>               |    |                              |                               |                            |                             |                          |                          |                               |                                 |                              |
| Guararema (b)  | SP | PRODES                       | 4029                          | 777                        | 932                         | 329                      | 20                       | 2                             | Rio Paraíba do Sul              | 20                           |
| Jacareí (b)  | SP | PRODES                       | 8593                          | 1814                       | 2177                        | 256                      | 20                       | 2                             | Rio Paraíba do Sul              | 20                           |

|   |    |                        |        |       |        |     |    |   |                        |    |
|---|----|------------------------|--------|-------|--------|-----|----|---|------------------------|----|
| Jacareí (a)   | SP | PRODES                 | 9444   | 2419  | 2903   | 211 | 20 | 2 | Rio Paraíba do Sul     | 20 |
| Guararema (a)   | SP | PRODES                 | 12104  | 2246  | 2695   | 342 | 20 | 2 | Rio Paraíba do Sul     | 20 |
| Pindamonhangaba (b)                                     | SP | PRODES                 | 16111  | 976   | 1171   | 891 | 20 | 2 | Rio Una                | 17 |
| Campinas (a)  | SP | PRODES                 | 20167  | 6048  | 7258   | 180 | 20 | 2 | Rio Atibaia            | 20 |
| Campinas (c)  | SP | PRODES                 | 29741  | 7344  | 8813   | 219 | 20 | 2 | Córrego da Lagoa       | 20 |
| Juiz de Fora  | MG | PRODES                 | 31222  | 7344  | 8813   | 230 | 20 | 2 | Rio Paraibuna          | 20 |
| Vinhedo   | SP | PRODES                 | 33019  | 11491 | 13789  | 155 | 20 | 2 | Córrego Pinheirinho    | 19 |
| Rio Claro   | SP | PRODES                 | 34389  | 5797  | 6956   | 320 | 20 | 2 | Rio Corumbataí         | 21 |
| Atibaia   | SP | PRODES                 | 36019  | 7689  | 9227   | 253 | 20 | 2 | Rio Atibaia            | 20 |
| Santa Bárbara D'Oeste (b)                               | SP | PRODES                 | 40796  | 6912  | 8294   | 319 | 20 | 2 | Ribeirão dos Toledos   | 21 |
| Batatais  | SP | CAIXA (Ribeirão Preto) | 70920  | 14533 | 23611  | 383 | 20 | 4 | Córrego das Araras     | 21 |
| Volta Redonda   | RJ | PRODES                 | 84556  | 24105 | 28926  | 189 | 20 | 2 | Rio Paraíba do Sul     | 21 |
| São José dos Campos                                     | SP | PRODES                 | 128111 | 83203 | 99844  | 83  | 20 | 2 | Ribeirão Lavapés       | 19 |
| Campinas (b)  | SP | PRODES                 | 224185 | 48038 | 57646  | 252 | 20 | 2 | Rio Capivari           | 20 |
| Sorocaba  | SP | PRODES                 | 258444 | 55382 | 66458  | 252 | 20 | 2 | Rio Sorocaba           | 20 |
| Taubaté   | SP | PRODES                 | 289700 | 53481 | 64177  | 325 | 20 | 2 | Rio Paraíba do Sul     | 19 |
| Betim (b)   | MG | PRODES                 | 366800 | 85968 | 103162 | 256 | 20 | 2 | Rio Betim              | 21 |
| <b>SISTEMA H - Lagoa aerada e lagoa de sedimentação</b> |    |                        |        |       |        |     |    |   |                        |    |
| São Luiz do Paraitinga                                  | SP | PRODES                 | 5815   | 691   | 829    | 454 | 20 | 2 | Rio Paraitinga         | 18 |
| Biritiba Mirim  | SP | PRODES                 | 28037  | 4752  | 5702   | 319 | 20 | 3 | Rio Tietê              | 19 |
| Caconde   | SP | DAEE (Ribeirão Preto)  | 28394  | 4406  | 7862   | 313 | 20 | 2 | Rio Bom Jesus          | 18 |
| Arujá   | SP | PRODES                 | 78093  | 20736 | 24883  | 203 | 20 | 2 | Rio Baquirivu-Guaçu    | 20 |
| Mococa  | SP | Sabesp                 | 79481  | 12303 | 22146  | 314 | 15 | 3 | Córrego Santa Elisa    | 26 |
| São João Boa Vista                                      | SP | Sabesp                 | 149061 | 27043 | 48677  | 320 | 20 | 2 | Jaguari mirim          | 21 |
| Hortolândia   | SP | PRODES                 | 172130 | 15379 | 18455  | 604 | 20 | 2 | Córrego Quilombo       | 20 |
| <b>SISTEMA D - UASB e lagoa aerada</b>                  |    |                        |        |       |        |     |    |   |                        |    |
| Betim (a)   | MG | COPASA                 | 6700   | 1157  | 1388   | 227 | 20 | 2 | Córrego Cachoeira      | 21 |
| Almirante Tamandaré                                     | PR | PRODES                 | 15981  | 2505  | 3006   | 344 | 20 | 2 | Rio Barigüi            | 18 |
| Piracicaba  | SP | PRODES                 | 43537  | 7257  | 8708   | 324 | 20 | 2 | Ribeirão Piracicamirim | 21 |
| Valinhos  | SP | PRODES                 | 87574  | 21254 | 25505  | 222 | 20 | 2 | Ribeirão Pinheiros     | 19 |
| Uberaba   | MG | PRODES                 | 203566 | 40176 | 48211  | 304 | 20 | 2 | Rio Uberaba            | 22 |
| <b>SISTEMA C -UASB e filtro biológico</b>               |    |                        |        |       |        |     |    |   |                        |    |
| Divinópolis   | MG | PRODES                 | 3704   | 864   | 1037   | 231 | 20 | 2 | Rio Pará               | 21 |
| Divinolândia  | SP | Sabesp                 | 7174   | 1261  | 2270   | 313 | 20 | 2 | Rib. Do Peixe          | 18 |
| Lindóia   | SP | DAEE (Ribeirão Preto)  | 9534   | 2352  | 2664   | 250 | 20 | 2 | Rio Mogi Guaçu         | 24 |
| Itaboraí  | MG | PRODES                 | 49648  | 9331  | 11197  | 287 | 20 | 2 | Rio do Peixe           | 21 |
| <b>SISTEMA B - UASB e lagoa facultativa</b>             |    |                        |        |       |        |     |    |   |                        |    |
| Lençóis   | BA | PRODES                 | 6278   | 1123  | 1348   | 302 | 20 | 2 | Rio São José           | 24 |
| Curitiba (b)  | PR | PRODES                 | 191759 | 37929 | 45515  | 273 | 20 | 2 | Ribeirão dos Padilhas  | 17 |

|                        |    |                        |        |        |               |            |    |   |                          |           |
|------------------------|----|------------------------|--------|--------|---------------|------------|----|---|--------------------------|-----------|
| Curitiba (a)           | PR | PRODES                 | 220037 | 51840  | <i>62208</i>  | 229        | 20 | 2 | Rio Barigüi              | <b>17</b> |
| Belo Horizonte         | MG | PRODES                 | 606537 | 155520 | <i>186624</i> | 211        | 20 | 2 | Ribeirão do Onça         | <b>22</b> |
| <b>Outros</b>          |    |                        |        |        |               |            |    |   |                          |           |
| Capivari               | SP | PRODES                 | 1796   | 432    | <i>518</i>    | 225        | 20 | 2 | Rio Capivari             | <b>20</b> |
| Muriaé (b)             | MG | PRODES                 | 8402   | 1728   | <i>2074</i>   | 350        | 20 | 2 | Rio Muriaé               | <b>21</b> |
| Muriaé (a)             | MG | PRODES                 | 10074  | 2073   | <i>2488</i>   | 262        | 20 | 2 | Rio Muriaé               | <b>21</b> |
| Lagoa Santa            | MG | COPASA                 | 15934  | 2160   | <i>2592</i>   | <i>261</i> | 20 | 2 | Córrego Bebedouro        | <b>22</b> |
| Americana              | SP | PRODES                 | 28759  | 7776   | <i>9331</i>   | 200        | 20 | 2 | Rio Atibaia              | <b>20</b> |
| Vargem Grande do Sul   | SP | Prefeitura Municipal   | 51595  | 9597   | 13600         | 302        | 20 | 2 | Rio Verde                | 17        |
| Itatiba                | SP | PRODES                 | 88469  | 12355  | <i>14826</i>  | 387        | 20 | 2 | Ribeirão Jacarezinho     | <b>19</b> |
| Sertãozinho (completo) | SP | CAIXA (Ribeirão Preto) | 100000 | 23674  | 27475         | 228        | 20 | 4 | Ribeirão Sertãozinho Sul | <b>16</b> |
| Cachoeira Paulista     | SP | PRODES                 | 23083  | 5209   | <i>6251</i>   | 319        | 20 | 2 | Rio Paraíba do Sul       | <b>19</b> |
| São Carlos             | SP | PRODES                 | 365766 | 54864  | <i>65837</i>  | 400        | 20 | 2 | Córrego Monjolinho       | <b>21</b> |

## **APÊNDICE B – Questionário para coleta de julgamentos**

### **Critérios ambientais na escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário**

#### **Alexandre Bevilacqua Leoneti**

Mestrando em administração de organizações  
Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto (FEARP)  
Universidade de São Paulo  
[ableoneti@fearp.usp.br](mailto:ableoneti@fearp.usp.br)  
Cel (16) 9204-2539

#### **Apresentação**

A decisão referente à escolha de um sistema de tratamento de esgoto sanitário não pode ser isolada em apenas um critério, por exemplo: o custo de implantação. Este tipo de decisão precisa levar em consideração, além da adequação técnica e financeira do projeto, a minimização dos impactos causados ao meio-ambiente pela geração de resíduos em seus processos de tratamento. Um modelo de tomada de decisão poderia auxiliar os gestores nesta decisão, uma vez que permitiria uma comparação preliminar entre diversos tipos de arranjos passíveis de serem implementados.

Neste sentido, foi desenvolvido um modelo baseado em técnicas de tomada de decisão para auxiliar a escolha da estação de tratamento de esgoto mais econômica e ambientalmente adequada para uma cidade (OLIVEIRA, 2004). Este modelo foi desenvolvido utilizando técnicas de tomada de decisão, dentre elas a árvore de decisão quantitativa e análise de sensibilidade.

Espera-se com as respostas obtidas por meio deste questionário, refinar a decisão proposta pelo modelo em questão, criando uma ponderação entre as alternativas do modelo e estas respostas, o que tornará o modelo multi-critério, com uma abordagem qualitativa e quantitativa.

A validação do modelo Oliveira (2004) poderá contribuir para que as cidades brasileiras que ainda não possuem sistemas de tratamento de esgoto, ou que possuam um sistema inadequado ou insuficiente, tomem uma decisão econômica e ambientalmente correta, visando ao desenvolvimento sustentável.

#### **Instruções**

Utilizando as tabelas, responder as perguntas com a sua opinião, salvar este arquivo e enviar para o e-mail [ableoneti@fearp.usp.br](mailto:ableoneti@fearp.usp.br) .

### 1) Geração de lodo

Comparando em cada linha os sistemas da coluna 1 com os da coluna 2, em sua opinião, qual sistema é o **maior** gerador de lodos? Responda utilizando a escala e as tabelas abaixo (marque apenas um “x” por linha).

Utilize a escala:

- (1) iguais;
- (3) gera pouco mais lodo;
- (5) gera mais lodo;
- (7) gera muito mais lodo;
- (9) é absolutamente maior;

#### Sistemas anaeróbios

| <b>Sistemas (coluna 1)</b> | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | <b>Sistemas (coluna 2)</b> |
|----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----------------------------|
| UASB                       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Lagoa anaeróbia            |
| UASB                       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Filtro anaeróbio           |
| Lagoa anaeróbia            |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Filtro anaeróbio           |

#### Sistemas aeróbios

| <b>Sistemas (coluna 1)</b> | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | <b>Sistemas (coluna 2)</b> |
|----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----------------------------|
| Lodo ativado               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Lagoa facultativa          |
| Lodo ativado               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Filtro biológico           |
| Lodo ativado               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Lagoa aerada e decantação  |
| Lagoa facultativa          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Filtro biológico           |
| Lagoa facultativa          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Lagoa aerada e decantação  |
| Filtro biológico           |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Lagoa aerada e decantação  |

## 2) Geração de gás metano

Comparando em cada linha os sistemas da coluna 1 com os da coluna 2, em sua opinião, qual sistema é o **maior** gerador de gás metano? Responda utilizando a escala e as tabelas abaixo (marque apenas um “x” por linha).

Utilize a escala:

- (1) iguais;
- (3) gera pouco mais gás metano;
- (5) gera mais gás metano;
- (7) gera muito mais gás metano;
- (9) é absolutamente maior;

### Sistemas anaeróbios

| Sistemas (coluna 1) | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | Sistemas (coluna 2) |
|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---------------------|
| UASB                |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Lagoa anaeróbia     |
| UASB                |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Filtro anaeróbio    |
| Lagoa anaeróbia     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Filtro anaeróbio    |

### Sistemas aeróbios

| Sistemas (coluna 1) | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | Sistemas (coluna 2)       |
|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---------------------------|
| Lodo ativado        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Lagoa facultativa         |
| Lodo ativado        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Filtro biológico          |
| Lodo ativado        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Lagoa aerada e decantação |
| Lagoa facultativa   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Filtro biológico          |
| Lagoa facultativa   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Lagoa aerada e decantação |
| Filtro biológico    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Lagoa aerada e decantação |

### 3) Consumo de energia elétrica

Comparando em cada linha os sistemas da coluna 1 com os da coluna 2, em sua opinião, qual sistema é o **maior** consumidor de energia elétrica? Responda utilizando a escala e as tabelas abaixo (marque apenas um “x” por linha).

Utilize a escala:

- (1) iguais;
- (3) consome pouco mais energia;
- (5) consome mais energia;
- (7) consome muito mais energia;
- (9) é absolutamente maior;

#### Sistemas anaeróbios

| Sistemas (coluna 1) | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | Sistemas (coluna 2) |
|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---------------------|
| UASB                |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Lagoa anaeróbia     |
| UASB                |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Filtro anaeróbio    |
| Lagoa anaeróbia     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Filtro anaeróbio    |

#### Sistemas aeróbios

| Sistemas (coluna 1) | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | Sistemas (coluna 2)       |
|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---------------------------|
| Lodo ativado        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Lagoa facultativa         |
| Lodo ativado        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Filtro biológico          |
| Lodo ativado        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Lagoa aerada e decantação |
| Lagoa facultativa   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Filtro biológico          |
| Lagoa facultativa   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Lagoa aerada e decantação |
| Filtro biológico    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Lagoa aerada e decantação |

### APÊNDICE C – Versões do modelo Oliveira (2004)

|            |            |   |
|------------|------------|---|
| 2004       | Versão 1.0 | Modelo original, resultado da tese de de Oliveira (2004);   |
| 20/09/2007 | Versão 1.1 | Atualização dos preços da planilha “Dados Gerais”;  |
| 10/11/2007 | Versão 1.2 | Ajustes no modelo com base em 5 projetos coletados: Américo Brasiliense, Barrinha, Caconde, Ituverava e Casa Branca. Alteração do cálculo da variável “Custo do terreno” no “Sistema F” (esta alteração se mostrou equivocada em testes posteriores);   |
| 14/04/2008 | Versão 2.0 | Ajustes no modelo com base em 12 projetos coletados: Ibiporanga, Ecatu-Tanabi, Mirassolândia, Cruz das Posses, Caconde, Casa Branca, Rio das Pedras, Descalvado, Barrinha, Ituverava, Américo Brasiliense, Vargem Grande do Sul. Alteração nas variáveis do “Sistema F”: (i) “Porcentagem de paisagismo” (de 30% passou para 10%), que é uma variável de custo utilizada no cálculo do custo geral “Paisagismo”; (ii) “Faixa de vegetação” (de 10 metros passou para 5 metros), que é uma variável de custo utilizada no cálculo do custo geral “Área de cinturão verde”; e (iii) “% de circulação” (de 15% passou para 10%), que é uma variável de custo utilizada no cálculo do custo geral “Vias de circulação”. Todos os cálculos foram padronizados pela concentração de DBO e não mais pelo consumo de água. “DQO” passou a receber automaticamente um valor 2,1 vezes maior do que a variável “DBO” e deixou de ser uma entrada do modelo. A variável “Vazão afluente máxima” também deixou de fazer parte das entradas do modelo. $Q_{max} = Q_{med} \cdot k_1 \cdot k_2$ ( $k_1=1,5$ =coeficiente do dia de maior consumo e $k_2=1,2$ =coeficiente da hora de maior consumo). As variáveis “Sólidos suspensos (SS)”, “NTK” e “Fator de conversão de água” não influenciam na decisão, independente do tamanho da população. Verificou-se que uma variável muito impactante no modelo é a temperatura do líquido; |
| 15/05/2008 | Versão 2.1 | Atualização dos preços da planilha “Dados Gerais” com auxílio da tabela SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. Substituição das variáveis de custo da planilha “Dados Gerais”: (i) “Pavimentação em blocos sextavados de concreto sobre coxim de areia” por “Pavimentação com lastro de brita ou cascalho 25mm”; e (ii) “Guias e sarjetas de concreto moldado ‘in loco’” por “Guias pré-moldada em concreto”, e seus respectivos custos;  |
| 23/06/2008 | Versão 2.2 | Criação de um banco de dados com os dados coletados dos projetos dos municípios e inserção de uma caixa de seleção para a escolha dos custos e dos projetos de forma automática;  |
| 11/07/2008 | Versão 2.3 | Correção das estimativas dos custos de operação e manutenção de acordo com os dados da teoria para cada sistema. Esta operação se mostrou necessária, pois as composições de custos utilizadas para representar esta estimativa nos sistemas “E” e “G” não estavam adequadas;   |

|            |                          |   |
|------------|--------------------------|---|
| 04/08/2008 | Versão 2.3.1             | <p>Simulação parcial do modelo variando a população de 500 até 100 mil habitantes com as variáveis “Vazão média” e “Vazão máxima” adotando o valor de 18 e 24% do número de habitantes, respectivamente. Estes valores foram adotados com base na média das relações entre essas variáveis e o número total da população estimada para os 12 casos coletados. A variável “DBO média afluente” foi utilizada de modo aleatório, com média 287 e desvio padrão de 27. Estes valores também foram obtidos dos dados coletados. Por fim, para as variáveis “Classificação do rio receptor” e “Temperatura do mês mais frio” os valores de 2 e 20°, respectivamente. Estes valores são a média dos dados coletados. Também foi corrigido o problema do número de aeradores que devem compor o sistema da “Lagoa aerada”. Este sistema estava adotando como padrão quatro aeradores. No entanto, para populações maiores do que 50 mil habitantes, este número se tornava insuficiente, sendo corrigido com um aerador a mais para cada 10 habitantes. Esta alteração solucionou os problemas dos sistemas “D” e “H” do modelo Oliveira (2004). Foram corrigidos também os problemas com o número de aeradores do sistema “Lodos ativados” presentes nos sistemas “A” e “E” do modelo Oliveira (2004). O problema era semelhante ao da “Lagoa aerada”. No entanto, para esse caso, a correção deveria obedecer a uma faixa de população para estes sistemas, que receberam um aerador a mais para cada 10 mil habitantes quando a população era menor do que 30 mil habitantes. Na faixa entre 30 e 50 mil habitantes, passaram a ser adicionados dois aeradores a mais para cada 10 mil habitantes. E, a partir de 50 mil habitantes, três aeradores a mais;</p> |
| 05/08/2008 | Versão 2.4               | <p>Revisão de todos os parâmetros dos sistemas de acordo com dados atualizados da literatura. Correção dos indicadores de eficiência da planilha “Alertas”, pois alguns dos indicadores de eficiência de remoção de DBO estavam utilizando dados constantes que não variavam quando o valor máximo permitido era alterado na planilha “Dados gerais”;</p>   |
| 06/08/2008 | Versão 2.4.1             | <p>Revisão das estimativas dos custos de operação e manutenção de acordo com os dados da teoria e inserção da teoria dos jogos para encontrar o equilíbrio de Nash;</p>   |
| 09/09/2008 | Ajuste 1 na versão 2.4.1 | <p>Após a simulação, foram identificadas lacunas nos resultados. Estas lacunas eram referentes a um problema de cálculo de aeradores que ainda estavam ocorrendo nos sistemas “A” e “E”. As faixas de tamanho de população, que foram inseridas na Versão 2.3.1, foram alteradas e estes sistemas passaram a receber um aerador a mais para cada 10 mil habitantes quando a população era menor do que 20 mil habitantes. Na faixa entre 20 e 50 mil habitantes, passou a ser adicionado dois aeradores a mais para cada 10 mil habitantes. Na faixa entre 50 e 75 mil habitantes, passou a ser adicionado três aeradores a mais para cada 10 mil habitantes. Entre 75 e 100 mil</p>  |

|            |                          |  |
|------------|--------------------------|--|
|            |                          | <p>habitantes, quatro aeradores a mais. E, a partir de 100 mil habitantes, cinco aeradores a mais. No caso do “Sistema A” também foi necessário corrigir um problema, em uma das fórmulas da planilha, que não estava considerando o intervalo entre 7 e 7,5 no cálculo da potência dos aeradores. Portanto, se o valor estivesse dentro desta faixa, o cálculo não era realizado, o que causava problemas nos cálculos do custo deste sistema. Em seguida a estes ajustes, foi realizada uma nova simulação com os mesmos parâmetros utilizados na Versão 2.3.1. Para populações entre 0,5 e 1 milhão de habitantes, nenhuma lacuna foi encontrada nos resultados, o que comprovou a correção deste problema;</p>   |
| 19/09/2008 | Ajuste 2 na versão 2.4.1 | <p>Os valores das variáveis de custos do modelo foram substituídas pela média entre os custos de 8 tabelas de custos de construção. Foram substituídos os custos dos aeradores pela média de novos orçamentos realizados. Também verificou-se um erro no cálculo do valor de projeto para o “Sistema H”, pois estava bem inferior ao adotado no “Sistema F”, que é geralmente menos complexo e, portanto, mais barato. Caso semelhante foi quanto ao cálculo do valor do terreno, que no “Sistema H” estava bem defasado, o qual foi corrigido adotando o tamanho da área das lagoas ao cálculo do tamanho do terreno;</p>   |
| 08/12/2008 | Versão 2.5               | <p>Ajustes no modelo com base em 61 projetos coletados. Com o início dos novos testes com os novos dados de projetos coletados, também foi identificado o mesmo problema de cálculo de aeradores que ainda estavam ocorrendo nos sistemas “A” e “E” nos sistemas “D” e “H”. O incremento automático de aeradores para estes sistemas, que tinha sido realizado na versão 2.3.1, se demonstrou ineficaz. Os sistemas “D” e “H” receberam o mesmo tratamento que solucionou este problema no “Sistema E”, no ajuste 1 da versão 2.4.1. Ainda em relação ao “Sistema D”, o mesmo recebeu a mesma correção do tamanho da área que os sistemas “F” e “H” receberam. Por se mostrar extremamente necessário na medida em que aumenta a população, todos os outros sistemas passaram por uma revisão dos parâmetros adotados no cálculo da área para inspecionar os cálculos. Este procedimento fez com que o “Sistemas B” passasse a calcular o custo da área de acordo com o total de área requerida, pois estava com este custo distorcido para grandes populações. Foi também identificado um erro no cálculo de impermeabilização do “Sistema D”, que foi corrigido substituindo o volume pelo valor apropriado. Foi inserida nesta versão do modelo uma ponderação para os custos das edificações. Esta ponderação foi considerada necessária pelo engenheiro Renato Crivelenti, do DAEE, pois os custos estavam iguais para todos os sistemas, mas em alguns sistemas este custo é bastante reduzido relativamente. Desta forma, os sistemas “A”, “B”, “C”, “D”, “E”, “F”, “G”, “H”, passaram a receber,</p> |

|            |                        |   |
|------------|------------------------|---|
|            |                        | respectivamente, 60, 30, 40, 50, 40, 10, 20, 30 % dos seus valores originais. Ainda segundo o engenheiro, deveria ser considerado o custo de concreto armado nos sistemas “F” e “H” relativos à construção do fio sanitário no entorno das lagoas;  |
| 09/12/2008 | Ajuste 1 na versão 2.5 | Com a aplicação de dados de municípios com populações maiores do que 100 mil habitantes ao modelo, outro problema revelado foi o relacionado ao custo de paisagismo e ao custo de área de cinturão verde. O “Sistema F” na versão 2.0 tinha recebido as correções alterando seu valor. A partir disto, os outros sistemas com lagoas também foram ajustados, tendo como parâmetro o “Sistema F”, que já demonstrava um ótimo ajuste de resposta do modelo aos dados reais. O “Sistema B” recebeu alteração nas seguintes variáveis: (i) “Porcentagem de paisagismo” (de 30% passou para 10%, igual ao “Sistema F”), que é uma variável de custo utilizada no cálculo do custo geral “Paisagismo”; (ii) “Faixa de vegetação” (de 10 metros passou para 5 metros, igual ao “Sistema F”), que é uma variável de custo utilizada no cálculo do custo geral “Área de cinturão verde”; e (iii) “% de circulação” (de 15% passou para 10%, igual ao “Sistema F”), que é uma variável de custo utilizada no cálculo do custo geral “Vias de circulação”. Já os sistemas “D” e “H” receberam alterações nas seguintes variáveis: (i) “Porcentagem de paisagismo” (de 30% passou para 15%, 5% a mais do que no “Sistema F”), que é uma variável de custo utilizada no cálculo do custo geral “Paisagismo”; (ii) “Faixa de vegetação” (de 10 metros passou para 6 metros, 1 a mais do que no “Sistema F”), que é uma variável de custo utilizada no cálculo do custo geral “Área de cinturão verde”; e (iii) “% de circulação” (de 15% passou para 10%, igual ao “Sistema F”), que é uma variável de custo utilizada no cálculo do custo geral “Vias de circulação”; |
| 22/12/2008 | Ajuste 2 na versão 2.5 | Correção do cálculo do número de reatores do “Sistema A”, que foi ajustado conforme o cálculo realizado no “Sistema E”, ou seja, para vazões inferiores a 21.600 m <sup>3</sup> /d utiliza-se apenas 1 reator, para vazões superiores utilizam-se 2 reatores. O cálculo do número de decantadores passou a ser automático nos sistemas “A” e “E”, considerando o arranjo proposto por Von Sperling (volume 4, p. 251). O “Sistema A” ainda teve diminuído o valor da rede de água e esgoto, que para todos os outros sistemas era 2,5% do valor do projeto, pois o custo do projeto do “Sistema A” era muito mais caro do que os outros sistemas, o que supervalorizava este custo. Como solução, o custo da rede de água e esgoto deste sistema passou a receber 2% do valor do projeto. Ainda, a estimativa do tamanho da área do “Sistema A” foi corrigida, passando a receber a média deste parâmetro baseado na literatura, como nos outros sistemas. Além das correções foi inserida a ponderação ambiental por meio da metodologia AHP;  |

**APÊNDICE D – Pré-projeto de Fortaleza de Minas (MG)**



**Pré-projeto de sistema de tratamento  
de esgoto sanitário**

*FORTALEZA DE MINAS – MG*

SETEMBRO/2008

**FICHA TÉCNICA***Fortaleza de Minas***Localização**

Município: Fortaleza de Minas, latitude de 855 metros, distante 350 km de Belo Horizonte, à qual se liga pela MG-050.

**Pré-projeto**

Sistema de Tratamento de Esgoto Sanitário

**Elaboração do pré-projeto**

Alexandre Bevilacqua Leoneti – FEARP/USP – [alexandreleoneti@yahoo.com.br](mailto:alexandreleoneti@yahoo.com.br)

Eliana Leão do Prado – EERP/USP – [leprado@ig.com.br](mailto:leprado@ig.com.br)

Sonia Valle Walter Borges de Oliveira – FEARP/USP – [soniavw@terra.com.br](mailto:soniavw@terra.com.br)

**Agradecimentos**

À FAPESP e ao DAEE de Ribeirão Preto, representado pelos estimados engenheiros Carlos Eduardo Alencastre, Renato Crivelenti e Adolfo Monteiro Moraes.

## SUMÁRIO

### APRESENTAÇÃO

#### 1 Introdução

##### 1.1 Saúde pública e saneamento

#### 2 Dados e parâmetros básicos utilizados

#### 3 Critérios básicos utilizados

##### 3.1 Tratamento preliminar

#### 4 Alternativas para a implantação do sistema de tratamento de esgotos sanitários

##### 4.1 Custos medidos adotados

##### 4.2 Alternativas propostas considerando o tipo de solo adequado para compactação

###### 4.2.1 Lagoa anaeróbia + Lagoa facultativa

###### 4.2.2 Lagoa anaeróbia + Lagoa aerada e de decantação

###### 4.2.3 UASB (Reator Anaeróbio de Manta de Lodo) + Lagoa facultativa

##### 4.3 Alternativas propostas considerando a impermeabilização com mantas

###### 4.3.1 UASB + Lagoa facultativa

###### 4.3.2 UASB (Reator Anaeróbio de Manta de Lodo) + Lagoa aerada e de decantação

###### 4.3.3 Lagoa anaeróbia + Lagoa facultativa

#### 5 Considerações finais

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APÊNDICE A – Orçamentos dos sistemas de tratamento de esgoto, considerando o tipo de solo adequado para compactação

APÊNDICE B – Orçamentos dos sistemas de tratamento de esgoto, considerando a impermeabilização com mantas

## APRESENTAÇÃO

Uma solução para a preservação das águas é o investimento em saneamento e no tratamento do esgoto sanitário. Todavia, a escolha do sistema de tratamento de esgoto a ser instalado em um município deve levar em consideração, além da adequação técnica do projeto, a otimização da aplicação dos recursos financeiros, a minimização do consumo de energia e outros insumos, minimização de resíduos gerados, minimização de custos de implantação, operação e manutenção, com garantia da eficiência de remoção de poluentes e matéria orgânica, uma vez que deverá atender aos requisitos ambientais do local a ser implantado.

Nesse sentido, Oliveira (2004) desenvolveu um modelo baseado em técnicas de tomada de decisão para auxiliar a escolha da estação de tratamento de esgoto mais econômica e ambientalmente adequada para uma cidade. O “Pré-projeto de sistema de tratamento de esgoto sanitário” aqui apresentado foi elaborado a partir da utilização de uma versão mais atualizada deste modelo, que está submetido a estudos na Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto (FEARP-USP).

Tendo em vista a complexidade envolvida na escolha de um sistema de tratamento de esgoto sanitário mais adequado para um município, pretendeu-se com este pré-projeto colaborar para auxiliar na escolha do sistema para o município de Fortaleza de Minas, em Minas Gerais, direcionando os estudos às alternativas mais econômicas e ambientalmente adequadas.

Ribeirão Preto, setembro de 2008

Os autores

## **1 Introdução**

Os problemas ambientais, por envolverem muitos tipos de variáveis, são considerados problemas complexos, que exigem a utilização de técnicas de tomada de decisão para auxiliar os gestores na solução dos mesmos. Devido à disseminação do uso de computadores, várias técnicas de tomada de decisão que inicialmente eram de difícil implementação e execução, hoje podem ser satisfatoriamente aplicadas com a utilização de um micro computador e uma planilha eletrônica.

Segundo Welsch (1983), os projetos de investimento geralmente envolvem aplicação de recursos substanciais, sendo que seu impacto sobre a organização se estenderá por períodos relativamente longos. A identificação de projetos preliminares poderia contribuir para que os diferentes projetos factíveis sejam analisados entre si, melhorando a visão do gestor sobre o problema a ser sanado. “A escolha das alternativas mais promissoras torna-se um aspecto fundamental do planejamento e controle de investimentos” (WELSCH, 1983, p. 239).

Em síntese, este pré-projeto apresenta os orçamentos financeiros gerados pelo modelo Oliveira (2004) com as adaptações realizadas em Leoneti (2008) para seis possíveis alternativas para a implantação do sistema de tratamento de esgoto no município de Fortaleza de Minas, Minas Gerais, três delas considerando o solo próprio para compactação e as três outras considerando os custos médios das aplicações de mantas de impermeabilização nas lagoas.

### **1.1 Saúde pública e saneamento**

A Organização Mundial da Saúde – OMS - definiu, em 1946, que saúde significa um completo bem estar físico mental e social e não meramente a ausência de doenças ou enfermidade.

A Conferência Internacional sobre Atenção Primária à Saúde - APS, reunida em Alma-Ata, URSS, em setembro de 1978, reiterou esse conceito proposto pela OMS, reafirmando que a saúde também é um direito humano fundamental e que o alcance do maior grau possível de saúde é um objetivo social sumamente importante em todo o mundo, cuja realização exige a intervenção de muitos outros setores, como o social e o econômico, além da saúde. Isso significa dar condições à criação de trabalho digno, à alimentação para todos, à

moradia higiênica, à educação e a qualidade adequada do meio ambiente, entre outros (BRASIL, 2001).

Neste sentido, é importante ressaltar que vários países têm evidenciado que a conservação e proteção de um ambiente saudável são o centro da preocupação do novo modelo de desenvolvimento da sociedade atual.

Podemos enumerar alguns eventos internacionais assumidos pelos países, nos últimos anos, como a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento-Eco-92, realizada no Rio de Janeiro em 1992, A Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável dos Pequenos Países Insulares em Desenvolvimento, a Conferência Panamericana sobre Saúde e Ambiente no Desenvolvimento Humano Sustentável e as Reuniões da Cúpula de Santa Cruz de La Sierra e Santiago (PNUD, 2004).

Nessas reuniões também e em outros eventos internacionais sobre saúde, ambiente e desenvolvimento sustentável, os governantes vêm assumindo compromissos e responsabilidades, estabelecendo mandatos para orientar ações voltadas para a sustentabilidade ambiental. Essas diretivas vêm sendo fortemente lideradas por organismos internos, como OMS, Organização das Nações Unidas - ONU, Organização Pan-Americana da Saúde - OPAS e Fundo das Nações Unidas para a Infância - UNICEF, entre outros.

No início do mês de abril de 2007, mais de 400 cientistas reunidos em Bruxelas divulgaram o polêmico Relatório do “*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*”, Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, grupo vinculado à Organização das Nações Unidas – ONU, revelando, mais uma vez, a indissociável relação entre a ação humana e os resultados e condições ambientais, de saúde e de vida no Planeta (IPCC, 2007).

Esse novo modelo, iniciado na década de 60 com Lalonde, incorpora os fatores ambientais, sociais, políticos, econômicos, comportamentais, biológicos e médicos, ampliando o conceito atual do processo saúde-doença, sendo representado pela biologia humana, meio ambiente, estilo de vida e a forma como se organizam os Serviços de Saúde (LALONDE, 1981).

Com essa concepção, um novo olhar e agir sobre a saúde tornam-se necessários, nesse cenário globalizado para atender às necessidades das populações, o que tem estado implícito nos debates e conferências internacionais que enfatizam a promoção da saúde como um conceito de fundamental importância para as práticas sanitárias.

Para a saúde pública, tem sido um grande desafio, mesmo com todos os esforços das organizações internacionais e nacionais, garantir a melhoria do estado de saúde da população

que vêm utilizando estratégias de promoção da saúde, prevenção da doença e outras formas de intervenção.

O contínuo processo de urbanização, associado à expansão industrial, tanto urbana como rural, transforma-se em um problema crescente para a saúde pública e requer intervenção antes que se torne incontrolável. Ainda que a maioria dos países possua algum tipo de regulamento sobre despejos industriais, seu cumprimento não é efetivo porque as autoridades sanitárias não têm a capacidade nem os meios para vigiar ou obrigar sua aplicação (OPAS, 2001).

No Brasil, a urbanização acelerada associada à forte concentração de renda apresenta estreita relação com o crescimento das áreas de pobreza. Os projetos de desenvolvimento não sustentáveis, a ampliação do desmatamento principalmente, a baixa qualidade da água para o consumo e o saneamento precário são fatores que estão associados ao aumento de doenças infecto-contagiosas, como a malária e a diarreia, dentre outras. Por sua vez, a contaminação ambiental por poluentes químicos e físicos é um fator emergente na geração de agravos à saúde (BRASIL, 2001).

Nesse contexto, o saneamento do ambiente, definido por Soares (2002) como o conjunto operacional da saúde ambiental que engloba todas as ações isoladas ou em conjunto, destinadas a assegurar a saúde no âmbito das questões ambientais, revela-se um pressuposto fundamental para o planejamento dos sistemas de saneamento, de modo a privilegiar os impactos positivos sobre a saúde pública e sobre o meio ambiente, através de um planejamento integrado.

Sabe-se que os serviços de saneamento são de vital importância para proteger a saúde da população, minimizar as consequências da pobreza e proteger o meio ambiente. No entanto, os recursos financeiros disponíveis para o setor são escassos no Brasil, resultando num processo de degradação ambiental crescente, com impactos na saúde, principalmente das camadas sociais mais inferiores.

Na maioria dos países em desenvolvimento, a improbidade e a carência de infraestrutura sanitária são responsáveis pela alta mortalidade por doença de veiculação hídrica e por um grande número de mortes evitáveis a cada ano. Nesses países, verificam-se condições que tendem a piorar devido às necessidades crescentes de serviços e ações de saneamento ambiental, que excedem a capacidade dos governos de reagir adequadamente (BANCO MUNDIAL, 2000).

Assim, dentre as diferentes ações voltadas para o saneamento básico, não apenas ligadas à qualidade da água para consumo humano, mas também relacionadas a sistemas de

coleta e tratamento de esgoto e de lixo e controle de vetores, na direção de uma melhor condição de saúde da população, destacamos a importância da água para consumo humano.

## 2 Dados e parâmetros básicos utilizados

A seguir estão relacionados os parâmetros para determinação das vazões e cargas orgânicas que foram utilizados no pré-projeto:

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| Período de alcance do projeto .....                   | 2008-2027                   |
| Índice de atendimento por tratamento de esgotos ..... | 100%                        |
| Consumo de água por habitante .....                   | 280 L/hab.dia               |
| Coefficiente de retorno água/esgoto (C) .....         | 1,00                        |
| Coefficiente de máxima vazão diária (K1) .....        | 1,20                        |
| Coefficiente de máxima vazão horária (K2) .....       | 1,50                        |
| Coefficiente de mínima vazão horária (K3) .....       | 0,50                        |
| Taxa de contribuição de infiltração .....             | incluída na taxa de retorno |

### Parâmetros

- População atual (2007): 3.837 habitantes
- População atendida futura (2027): 5.702 habitantes
- Vazão afluente média ( $Q_{med2027}$ ): 1.276 m<sup>3</sup>/dia
- Vazão afluente máxima ( $Q_{max2027}$ ): 2.298 m<sup>3</sup>/dia
- DBO afluente média: 300 mg/L
- Tempo de vida útil da estação: 20 anos
- Temperatura média do mês mais frio: 18° C
- Classe do rio receptor: 3

## 3 Critérios básicos utilizados

O presente pré-projeto não contempla o dimensionamento e o orçamento de emissários e estações elevatórias de esgotos. Não obstante, apresenta os cálculos do dimensionamento e dos custos referentes à construção de uma unidade de tratamento preliminar do esgoto, comum às seis alternativas avaliadas neste pré-projeto.

### 3.1 Tratamento preliminar

#### *Gradeamento*

- Velocidade mínima através das grades ..... 0,60 m/s
- Velocidade máxima através das grades ..... 2,00 m/s

#### *Caixa de Areia*

- Velocidade horizontal (de fluxo) (Vh) ..... 0,30 m/s
- Velocidade de sedimentação (Vs) ..... 0,02 m/s

### 4 Alternativas para a implantação do sistema de tratamento de esgotos sanitários

As alternativas de sistemas de tratamento de esgotos para o município de Fortaleza de Minas apresentadas neste pré-projeto foram geradas com a execução de uma versão mais atualizada do modelo Oliveira (2004) a partir dos dados fornecidos pela prefeitura municipal da referida cidade.

Cada uma das alternativas propostas possui pelo menos três processos de tratamento de esgoto: (i) preliminar, para a remoção de sólidos; (ii) primeiro processo anaeróbio; e (iii) segundo processo aeróbio. Este arranjo das alternativas foi definido como um padrão do modelo Oliveira (2004), tendo em vista o crescente emprego com sucesso da associação de sistemas anaeróbios seguidos de aeróbios (CAMPOS et al., 1997; CHERNICHARO, 2001).

O objetivo principal de um sistema de tratamento de esgoto é, evidentemente, dar um tratamento adequado aos efluentes gerados como resíduo das atividades humanas. No entanto, o sistema a ser implantado também deve evitar alguns impactos negativos, tais como: percolação do esgoto no solo, geração de maus odores, consumo exagerado de energia, dentre outros. Especificamente, de acordo com ABGE (1981, p.7), para evitar a percolação do esgoto no solo, devem ser conhecidos os seus coeficientes de permeabilidade para “que se cumpra da melhor forma possível todos os objetivos visados”.

Os tipos de solos podem ser classificados em: (i) pedregulhos; (ii) areias; (iii) areias finas siltosas e argilosas; e (iv) argilas. Somente o terceiro tipo de solo é apropriado para a implantação de lagoas sem impermeabilização. Neste caso, a impermeabilização do mesmo é alcançada realizando-se uma compactação no terreno (ABGE, 1981).

Devido ao desconhecimento do tipo de solo onde será implantado o sistema de tratamento de esgoto, este pré-projeto foi dividido em duas partes. Na primeira parte, foi considerado o custo médio para a remoção de uma camada de solo, de aproximadamente 1m,

e sua recompação, para homogeneização do fundo das lagoas. Na segunda, foi considerado o custo médio para a impermeabilização das lagoas com manta.

Nas duas partes do pré-projeto foram consideradas as três melhores alternativas propostas pelo modelo Oliveira (2004) adaptado. Para cada alternativa estudada, uma série de vantagens e desvantagens foi elencada e avaliada a partir do desenvolvimento da análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental das variáveis consideradas. Também foi realizada uma análise quanto à qualidade do efluente final em termos de saúde pública.

#### 4.1 Custos medidos adotados

Os custos de construção utilizados no modelo Oliveira (2004) foram atualizados e outras tabelas de custos foram utilizadas para compor um valor médio de custo de construção, que foi utilizado nos cálculos dos custos totais dos sistemas. A tabela 1 contém os custos médios da construção utilizados nos cálculos.

**Tabela 1 – Tabela de custos médios de construção utilizados nos cálculos dos sistemas de tratamento de esgoto (em US\$)**

| Custos de construção         | SINAPI (1) | OLIVEIRA (2) | LEONETI (3) | SEOP (4) | DERSP (5) | DERPR (6) | DAER (7) | PREF SP (8) | SANEPAR (9) | SABESP (10) | CUSTO MÉDIO  |
|------------------------------|------------|--------------|-------------|----------|-----------|-----------|----------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Raspagem e limp.do terreno   | 0,9        | 0,6          | 0,1         | 0,3      | 0,5       | 0,4       | 0,3      | 0,3         | 0,3         | 0,8         | <b>0,4</b>   |
| Escavação do terreno         | 4,3        | 6            | 7,7         | 6,9      | 6,9       | 5,3       | 8,9      | 5,4         | 4,7         | 4,2         | <b>6</b>     |
| Concreto armado              | 446,4      | 450          | 392,9       | 298,1    | 326,8     | 303,3     | 308,2    | 336,8       | 346,8       | 343,5       | <b>355,3</b> |
| Impermeabil. do concreto     | 24,7       | 27,8         | 27,8        | 17,2     | 19,5      | 25,2      | 29,2     | 23,2        | 17,4        | 14,2        | <b>22,6</b>  |
| Impermeabil. de lagoas       | 11,9       | 10           | 10          | 10,7     | 9,6       | 13,2      | 12,7     | 8,3         | 9,4         | 14          | <b>11</b>    |
| Ajardinamento dos entornos   | 3          | 5            | 5           | 4,2      | 4,6       | 2,8       | 2,9      | 3,7         | 2,2         | 3,2         | <b>3,7</b>   |
| Vegetação de médio porte     | 9,1        | 10           | 12,5        | 5,1      | 9,5       | 7,9       | 5,6      | 7           | 8,9         | 10,3        | <b>8,6</b>   |
| Pavim. com lastro de brita   | 1,1        | 22,5         | 22,5        | 1,2      | 9,5       | 4,4       | 8,1      | 7,3         | 2,1         | 9,4         | <b>8,8</b>   |
| Muros, cercas e portões      | 25         | 26,3         | 24,7        | 27,6     | 31,2      | 22,4      | 24,4     | 25          | 28,9        | 19,3        | <b>25,5</b>  |
| Brita para filtro percolador | 27,4       | 28,5         | 23,1        | 44,1     | 50,9      | 34        | 25,1     | 37,1        | 45,2        | 66,4        | <b>38,2</b>  |
| Guarda-corpo tanques         | 77,7       | 75,8         | 83,4        | 67,5     | 76,4      | 84,3      | 66,9     | 74,1        | 77,5        | 63,9        | <b>74,7</b>  |
| Tubulação para drenagem      | 40         | 24           | 24          | 33,1     | 46,8      | 48,3      | 50,5     | 58,6        | 46,8        | 41,7        | <b>41,4</b>  |
| Guias pré-moldadas           | 11,9       | 18           | 17,7        | 15,7     | 20,1      | 19        | 13,2     | 20,8        | 4,8         | 11,9        | <b>15,3</b>  |
| Compactação de aterro        | 2,3        | 2,3          | 2,3         | 2,2      | 2         | 2,3       | 2,8      | 2,5         | 2,3         | 2,6         | <b>2,4</b>   |

Fonte: (1) Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (06/2007); (2) Tabela de custos de construção do modelo Oliveira (2004); (3) Tabela de custos de construção do modelo Oliveira (2004) atualizada em 2007; (4) Secretaria de Estado de Obras Públicas do Paraná (08/2008); (5) Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (06/2008); (6) Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (05/2008); (7) Departamento de Programação Rodoviária do Rio Grande do Sul (06/2008); (8) Prefeitura de São Paulo (07/2008); (9) Companhia de Saneamento do Paraná (07/2008); (10) Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (08/2006)

#### 4.2 Alternativas propostas considerando o tipo de solo adequado para compactação

Uma solução comumente utilizada para a impermeabilização das lagoas dos sistemas de tratamento de esgoto, quando o tipo de solo é composto por areias finas siltosas e argilosas, é a compactação da terra no fundo das lagoas. Este tipo de impermeabilização torna mais barato os sistemas que utilizam lagoas em algum de seus processos de tratamento, pois, usualmente, a área das lagoas é demasiadamente grande, o que elevaria sobremaneira o custo de impermeabilização se o mesmo fosse realizado com concreto ou com mantas, sendo estas últimas as mais frequentemente utilizadas para estes fins.

A escolha de uma área que possui um solo adequado para compactação, poderá contribuir para a escolha de um sistema de menor custo. Todavia, os sistemas de lagoas possuem os maiores valores para demanda bioquímica de oxigênio – DBO – efluentes, o que também deve ser levado em consideração na escolha do melhor sistema de tratamento de esgoto sanitário.

A tabela 2 demonstra o orçamento dos custos de implantação, operação e manutenção de todos os sistemas contemplados pelo modelo Oliveira (2004), bem como a estimativa de DBO efluente de cada sistema, para o caso em que o solo é adequado para a compactação. O apêndice A contém os custos detalhados de cada alternativa.

**Tabela 2 – Orçamento gerado pelo modelo Oliveira (2004) a partir dos dados fornecidos pela prefeitura municipal de Fortaleza de Minas, considerando o solo adequado**

| Sistema  | Posição | Orçamento (US\$) | Estimativa DBO efluente (mg/L) |
|--|---------|------------------|--------------------------------|
| UASB* + Lodos ativados                         | 6       | 533.722,95       | 7                              |
| UASB* + Lagoa facultativa                      | 3       | 431.061,94       | 16                             |
| UASB* + Filtro biológico                       | 8       | 793.509,76       | 19                             |
| UASB* + Lagoa aerada e de decantação           | 4       | 442.587,61       | 31                             |
| Lagoa anaeróbia + Lodos ativados               | 5       | 481.362,16       | 15                             |
| Lagoa anaeróbia + Lagoa facultativa            | 1       | 387.380,85       | 30                             |
| Lagoa anaeróbia + Filtro biológico             | 7       | 765.551,82       | 42                             |
| Lagoa anaeróbia + Lagoa aerada e de decantação | 2       | 426.202,89       | 39                             |

Fonte: dados gerados pelos autores utilizando uma versão atualizada do modelo Oliveira (2004)

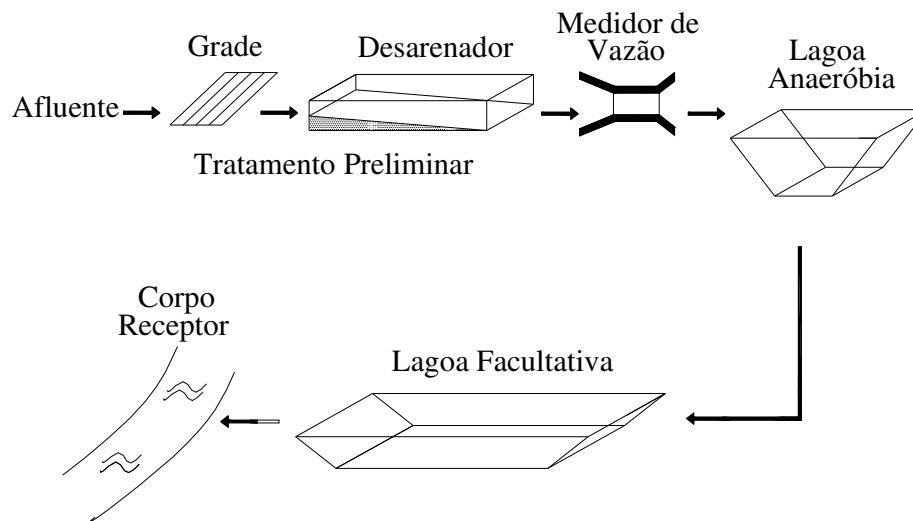
(\*) UASB – Reator Anaeróbio de Manta de Lodo

#### **4.2.1 Lagoa anaeróbia + Lagoa facultativa**

Esse arranjo de sistema de tratamento de esgoto, que atingiu o melhor orçamento e uma das piores estimativas de DBO efluente, é conhecido como Sistema Australiano e tem a vantagem de não necessitar energia para aeração. Porém a área necessária é muito maior em

relação a sistemas com reatores ou tanques de aeração, sendo necessária uma área total de 11.147,79 m<sup>2</sup> para a implantação deste sistema.

Neste pré-projeto, foi considerada apenas uma lagoa anaeróbia seguida de uma lagoa facultativa, além do tratamento preliminar. O fluxograma deste sistema pode ser visualizado na figura 1 enquanto que o seu dimensionamento pode ser conferido no quadro 1.



**Figura 1 – Fluxograma do sistema de lagoa anaeróbia e lagoa facultativa**

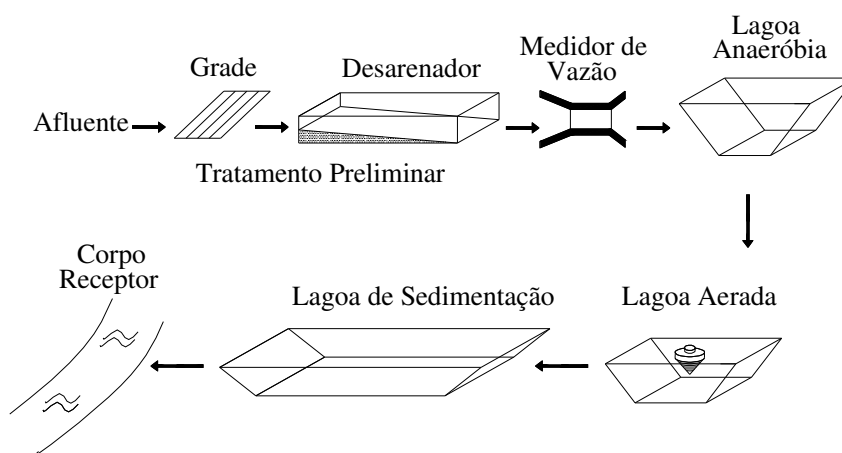
|  |                |                |
|--|----------------|----------------|
| <b>Lagoa Anaeróbia</b>                                       |                |                |
| $\text{Área interna} = ((A + (P \times H)) \times N) + 10\%$ | m <sup>2</sup> | <b>1513,22</b> |
| $A = \text{Área da lagoa}$                                   | m <sup>2</sup> | 850,67         |
| $P = \text{Perímetro da lagoa}$                              | m              | <b>116,66</b>  |
| $H = \text{Altura da lagoa}$                                 | m              | 4,50           |
| $N = \text{Número de lagoas}$                                | un             | 1              |
| <b>Lagoa Facultativa</b>                                     |                |                |
| $\text{Área interna} = ((A + (P \times H)) \times N) + 10\%$ | m <sup>2</sup> | <b>9634,57</b> |
| $A = \text{Área da lagoa}$                                   | m <sup>2</sup> | 7975,0         |
| $P = \text{Perímetro da lagoa}$                              | m              | <b>412,47</b>  |
| $H = \text{Altura da lagoa}$                                 | m              | 1,9            |
| $N = \text{Número de lagoas}$                                | un             | 1              |

**Quadro 1 – Dimensionamento do sistema de lagoa anaeróbia e lagoa facultativa**

Segundo Von Sperling (2006), as principais vantagens do sistema de lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa são: construção, operação e manutenção simples; ausência de equipamentos mecânicos e contratação de técnicos especialistas; remoção de lodo após 20 anos; e requisitos energéticos praticamente nulos. Como desvantagens o autor cita: elevados requisitos de área; possibilidade de maus odores; dificuldades em satisfazer padrões de lançamento restritivos; eficiência variável conforme as condições climáticas; e necessário afastamento mínimo de 600m de residências circunvizinhas.

#### 4.2.2 Lagoa anaeróbia + Lagoa aerada e de decantação

Este sistema, o segundo melhor orçamento, é uma adaptação do Sistema Australiano, mas com uma área requerida menor, sendo necessária uma área total de 6.808,78 m<sup>2</sup> para a implantação deste sistema. Neste pré-projeto, foi considerada apenas uma lagoa anaeróbia seguida de uma lagoa aerada e duas de decantação, além do tratamento preliminar. O fluxograma deste sistema pode ser visualizado na figura 2 enquanto que o seu dimensionamento pode ser conferido no quadro 2.



**Figura 2 – Fluxograma do sistema de lagoa anaeróbia, lagoa aerada e decantação**

Von Sperling (2006), elenca as seguintes vantagens para o sistema de lagoa anaeróbia seguida de lagoa aerada e de decantação: maior independência das condições climáticas; reduzidas possibilidades de maus odores; e satisfatória resistência a variações de cargas. As desvantagens são: introdução de equipamentos; aumento do nível de sofisticação; requisitos de energia relativamente elevados; e necessária remoção contínua ou periódica de lodo.

|  |                |                |
|--|----------------|----------------|
| <b>Lagoa Anaeróbia</b>                                       |                |                |
| $\text{Área interna} = ((A + (P \times H)) \times N) + 10\%$ | m <sup>2</sup> | <b>1513,22</b> |
| $A = \text{Área da lagoa}$                                   | m <sup>2</sup> | 851            |
| $P = \text{Perímetro da lagoa}$                              | m              | <b>116,66</b>  |
| $H = \text{Altura da lagoa}$                                 | m              | 4,5            |
| $N = \text{Número de lagoas}$                                | un             | 1              |
| <b>Lagoa Aerada</b>  |                |                |
| $\text{Área interna} = ((A + (P \times H)) \times N) + 10\%$ | m <sup>2</sup> | <b>1712,38</b> |
| $A = \text{Área da lagoa}$                                   | m <sup>2</sup> | 1094           |
| $P = \text{Perímetro da lagoa}$                              | m              | <b>132,29</b>  |
| $H = \text{Altura da lagoa}$                                 | m              | 3,5            |
| $N = \text{Número de lagoas}$                                | un             | 1              |

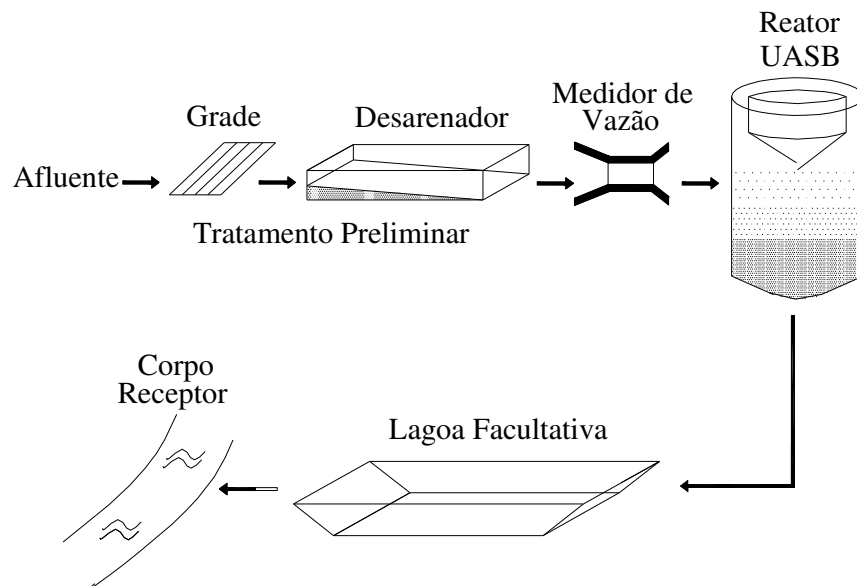
| <b>Lagoa de Decantação</b>                                   |                |                |
|--|----------------|----------------|
| $\text{Área interna} = ((A + (P \times H)) \times N) + 10\%$ | m <sup>2</sup> | <b>3583,18</b> |
| $A = \text{Área da lagoa decantação}$                        | m <sup>2</sup> | 1276           |
| $P = \text{Perímetro da lagoa de}$                           | m              | <b>186</b>     |
| $H = \text{Altura da lagoa de decantação}$                   | m              | 1,9            |
| $N = \text{Número de lagoas}$                                | un             | 2              |

## Quadro 2 – Dimensionamento do sistema de lagoa anaeróbia, lagoa aerada e decantação

### 4.2.3 UASB (Reator Anaeróbio de Manta de Lodo) + Lagoa facultativa

O terceiro melhor orçamento desta primeira parte do pré-projeto pertence a este sistema, que foi o único a inserir um reator em seu processo de tratamento. Apesar de ter alcançado somente o terceiro melhor orçamento, este sistema é o segundo melhor quanto à estimativa de DBO efluente. Este parâmetro é importante quanto à definição de um sistema de tratamento mais adequado ambientalmente, mas isto é possível concomitantemente a um tempo de detenção hidráulica relativamente alta, em torno de 12 dias.

A área total necessária para implantação deste sistema é de 5.234,37 m<sup>2</sup>, sendo considerado neste pré-projeto apenas um reator do tipo UASB seguido de uma lagoa facultativa, além do tratamento preliminar. O fluxograma deste sistema pode ser visualizado na figura 3 enquanto que o seu dimensionamento pode ser conferido no quadro 3.



**Figura 3 – Fluxograma do sistema UASB e lagoa facultativa**

| <b>Reator UASB</b>   |                |                |
|--|----------------|----------------|
| $\text{Área interna} = ((A + (P \times H)) \times N) + 10\%$ | m <sup>2</sup> | <b>297,49</b>  |
| $A = \text{Área do reator}$                                  | m <sup>2</sup> | 95,0           |
| $P = \text{Perímetro do reator}$                             | m              | 38,99          |
| $H = \text{Altura do reator}$                                | m              | 4,5            |
| $N = \text{Número de reatores}$                              | un             | 1              |
| <b>Lagoa Facultativa</b>                                     |                |                |
| $\text{Área interna} = ((A + (P \times H)) \times N) + 10\%$ | m <sup>2</sup> | <b>4936,88</b> |
| $A = \text{Área da lagoa}$                                   | m <sup>2</sup> | 3937,4         |
| $P = \text{Perímetro da lagoa}$                              | m              | 289,82         |
| $H = \text{Altura da lagoa}$                                 | m              | 1,9            |
| $N = \text{Número de lagoas}$                                | un             | 1              |

### Quadro 3 – Dimensionamento do sistema UASB e lagoa facultativa

Segundo Von Sperling (2006), as principais vantagens do sistema de UASB seguido de lagoa facultativa são: maior eficiência na remoção de DBO; menores requisitos de área; baixos custos de implementação e operação; tolerância a afluentes bem concentrados; reduzido consumo de energia; possibilidade de uso energético do biogás; e baixíssima produção de lodo. As desvantagens são: baixa eficiência na remoção de coliformes; possibilidade de geração de efluente com aspecto desagradável; e relativamente sensível a variações de cargas e compostos tóxicos.

#### 4.3 Alternativas propostas considerando a impermeabilização com mantas

Para o caso em que a área a ser implantado o sistema de tratamento de esgoto não possui solo adequado para a realização de uma compactação para evitar a percolação do líquido, faz-se necessária a impermeabilização da área interna das lagoas, sendo a manta uma solução frequentemente utilizada. Além do fato de que os sistemas que utilizam lagoas em seu processo de tratamento não alcançarem os menores valores para DBO efluente, a grande área das lagoas encarece sobremaneira o processo de impermeabilização da mesma, o que talvez justifique a escolha de um sistema com reator, mesmo considerando sua maior complexidade na operação e manutenção.

Outro fato que deve ser considerado na escolha do sistema de tratamento considerando a impermeabilização com mantas é a dificuldade de se realizar a retirada do lodo das lagoas. Não obstante ao fato de que a necessidade de retirada de lodo destas lagoas ocorre em períodos maiores do que 10 anos, a utilização de retro-escavadeiras pode fazer romper a manta em algum ponto.

A tabela 3 demonstra o orçamento dos custos de implantação, operação e manutenção de todos os sistemas contemplados pelo modelo Oliveira (2004), bem como a estimativa de DBO efluente de cada sistema, considerando a impermeabilização das lagoas com manta. O apêndice B contém os custos detalhados de cada alternativa.

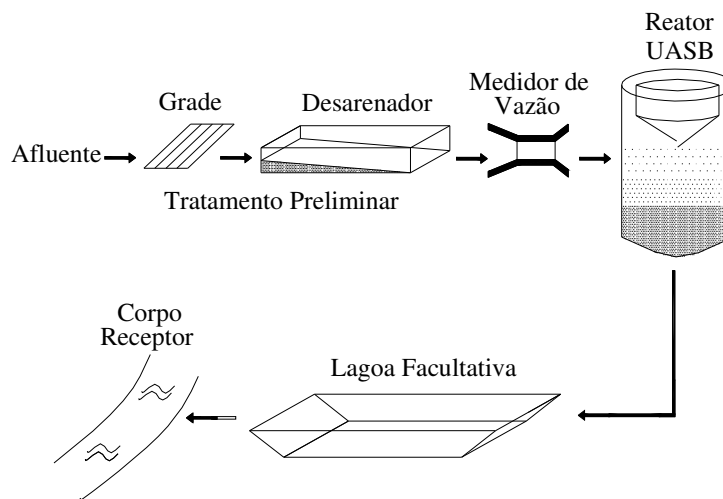
**Tabela 3 – Orçamento gerado pelo modelo Oliveira (2004) a partir dos dados fornecidos pela prefeitura municipal de Fortaleza de Minas, considerando o custo da manta**

| Sistema  | Posição | Orçamento (US\$) | Estimativa DBO efluente (mg/L) |
|--|---------|------------------|--------------------------------|
| UASB + Lodos ativados                          | 6       | 533.295,30       | 7                              |
| UASB + Lagoa facultativa                       | 1       | 468.421,87       | 16                             |
| UASB + Filtro biológico                        | 8       | 792.226,81       | 19                             |
| UASB + Lagoa aerada e de decantação            | 2       | 470.080,87       | 31                             |
| Lagoa anaeróbia + Lodos ativados               | 5       | 491.392,93       | 15                             |
| Lagoa anaeróbia + Lagoa facultativa            | 3       | 483.329,89       | 30                             |
| Lagoa anaeróbia + Filtro biológico             | 7       | 770.023,14       | 42                             |
| Lagoa anaeróbia + Lagoa aerada e de decantação | 4       | 483.950,86       | 39                             |

Fonte: dados gerados pelos autores utilizando uma versão atualizada do modelo Oliveira (2004)

#### 4.3.1 UASB + Lagoa facultativa

Com o custo maior da impermeabilização das lagoas, o sistema composto por um UASB seguido de lagoa facultativa passou a possuir o melhor orçamento dentre todos os sistemas contemplados no modelo Oliveira (2004). Ressalta-se o fato de que este sistema é o segundo melhor quanto à estimativa de DBO efluente. A área total necessária para implantação deste sistema é de 5.234,37 m<sup>2</sup>, sendo também considerado neste pré-projeto apenas um reator do tipo UASB seguido de uma lagoa facultativa, além do tratamento preliminar. O fluxograma deste sistema pode ser visualizado na figura 4, enquanto que o seu dimensionamento pode ser conferido no quadro 4.



**Figura 4 – Fluxograma do sistema UASB e lagoa facultativa**

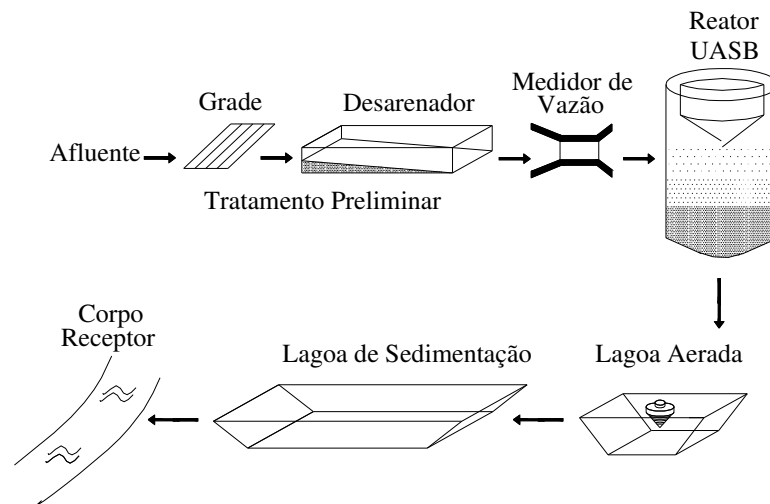
| <b>Reator UASB</b>   |                |                |
|--|----------------|----------------|
| $\text{Área interna} = ((A + (P \times H)) \times N) + 10\%$ | m <sup>2</sup> | <b>297,49</b>  |
| $A = \text{Área do reator}$                                  | m <sup>2</sup> | 95,0           |
| $P = \text{Perímetro do reator}$                             | m              | 38,99          |
| $H = \text{Altura do reator}$                                | m              | 4,5            |
| $N = \text{Número de reatores}$                              | un             | 1              |
| <b>Lagoa Facultativa</b>                                     |                |                |
| $\text{Área interna} = ((A + (P \times H)) \times N) + 10\%$ | m <sup>2</sup> | <b>4936,88</b> |
| $A = \text{Área da lagoa}$                                   | m <sup>2</sup> | 3937,4         |
| $P = \text{Perímetro da lagoa}$                              | m              | 289,82         |
| $H = \text{Altura da lagoa}$                                 | m              | 1,9            |
| $N = \text{Número de lagoas}$                                | un             | 1              |

**Quadro 4 – Dimensionamento do sistema UASB e lagoa facultativa**

As vantagens e desvantagens deste tipo de sistema são os mesmos que se encontram no item 4.2.3 deste pré-projeto.

#### **4.3.2 UASB (Reator Anaeróbio de Manta de Lodo) + Lagoa aerada e de decantação**

Este sistema, com área total de implantação de 3.690,52 m<sup>2</sup>, possui algumas semelhanças com o sistema composto por UASB seguido de lodos ativados, porém com redução do consumo de concreto e com efluente final de baixa concentração de DBO. Neste pré-projeto, foi considerado apenas um reator do tipo UASB seguido de uma lagoa aerada e mais uma de decantação, além do tratamento preliminar. O fluxograma deste sistema pode ser visualizado na figura 5 enquanto que o seu dimensionamento pode ser conferido no quadro 5.



**Figura 5 – Fluxograma do sistema UASB, lagoa aerada e decantação**

|  |                |                |
|--|----------------|----------------|
| <b>Reator UASB</b>   |                |                |
| $\text{Área interna} = ((A + (P \times H)) \times N) + 10\%$ | m <sup>2</sup> | <b>297,49</b>  |
| $A = \text{Área do reator}$                                  | m <sup>2</sup> | 95,0           |
| $P = \text{Perímetro do reator}$                             | m              | <b>38,99</b>   |
| $H = \text{Altura do reator}$                                | m              | 4,5            |
| $N = \text{Número de reatores}$                              | un             | 1              |
| <b>Lagoa Aerada</b>  |                |                |
| $\text{Área interna} = ((A + (P \times H)) \times N) + 10\%$ | m <sup>2</sup> | <b>1712,38</b> |
| $A = \text{Área da lagoa}$                                   | m <sup>2</sup> | 1093,7         |
| $P = \text{Perímetro da lagoa}$                              | m              | <b>132,29</b>  |
| $H = \text{Altura da lagoa}$                                 | m              | 3,5            |
| $N = \text{Número de lagoas}$                                | un             | 1              |
| <b>Lagoa de Decantação</b>                                   |                |                |
| $\text{Área interna} = ((A + (P \times H)) \times N) + 10\%$ | m <sup>2</sup> | <b>1680,65</b> |
| $A = \text{Área da lagoa decantação}$                        | m <sup>2</sup> | 1276,0         |
| $P = \text{Perímetro da lagoa de decantação}$                | m              | <b>120</b>     |
| $H = \text{Altura da lagoa de decantação}$                   | m              | <b>2,1</b>     |
| $N = \text{Número de lagoas}$                                | un             | 1              |

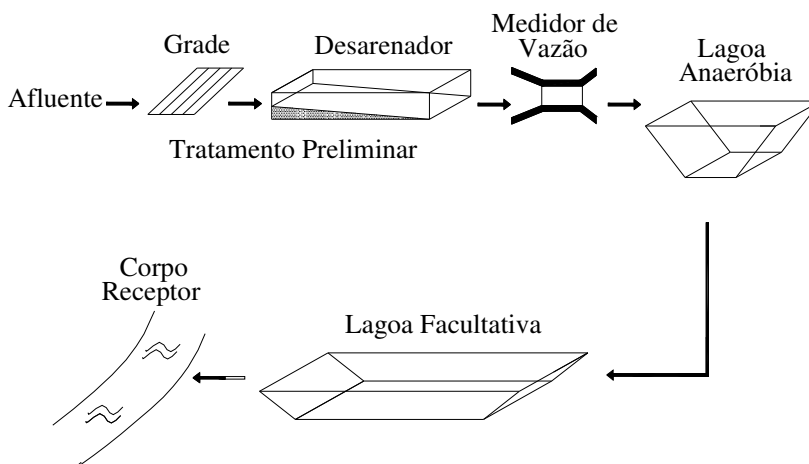
**Quadro 5 – Dimensionamento do sistema de UASB, lagoa aerada e decantação**

Von Sperling (2006), elenca as seguintes vantagens para o sistema de UASB seguido de lagoa aerada e de decantação: maior independência das condições climáticas; reduzidas possibilidades de maus odores; menor área dentre todos os sistemas; e satisfatória resistência a variações de cargas. As desvantagens são: introdução de equipamentos; aumento do nível de sofisticação; requisitos de energia relativamente elevados; e necessária remoção contínua ou periódica de lodo.

#### 4.3.3 Lagoa anaeróbia + Lagoa facultativa

Esse arranjo de sistema de tratamento de esgoto passou a obter o terceiro melhor orçamento quando se torna necessária a impermeabilização de suas lagoas com manta. Em termos de estimativas de DBO efluente, ele também continuou a obter a pior posição dentre os sistemas contemplados no modelo Oliveira (2004). Sua área total ainda permaneceu em 11.147,79 m<sup>2</sup> para a implantação deste sistema.

Aqui também foi considerada apenas uma lagoa anaeróbia seguida de uma lagoa facultativa, além do tratamento preliminar. O fluxograma deste sistema pode ser visualizado na figura 6 enquanto que o seu dimensionamento pode ser conferido no quadro 6.



**Figura 6 – Fluxograma do sistema de lagoa anaeróbia e lagoa facultativa**

|  |                |                |
|--|----------------|----------------|
| <b>Lagoa Anaeróbia</b>                                       |                |                |
| $\text{Área interna} = ((A + (P \times H)) \times N) + 10\%$ | m <sup>2</sup> | <b>1513,22</b> |
| $A = \text{Área da lagoa}$                                   | m <sup>2</sup> | 850,67         |
| $P = \text{Perímetro da lagoa}$                              | m              | <b>116,66</b>  |
| $H = \text{Altura da lagoa}$                                 | m              | 4,50           |
| $N = \text{Número de lagoas}$                                | un             | 1              |
| <b>Lagoa Facultativa</b>                                     |                |                |
| $\text{Área interna} = ((A + (P \times H)) \times N) + 10\%$ | m <sup>2</sup> | <b>9634,57</b> |
| $A = \text{Área da lagoa}$                                   | m <sup>2</sup> | 7975,0         |
| $P = \text{Perímetro da lagoa}$                              | m              | <b>412,47</b>  |
| $H = \text{Altura da lagoa}$                                 | m              | 1,9            |
| $N = \text{Número de lagoas}$                                | un             | 1              |

As vantagens e desvantagens deste tipo de sistema são os mesmos que se encontram no item 4.2.1 deste pré-projeto.

## 5 Considerações finais

Dentre os passos preliminares necessários para a escolha de um sistema de tratamento de esgoto sanitário, proposto por Von Sperling (2006, p. 394), a escolha da área a ser implantado o sistema é um ponto crítico.

Como visto neste pré-projeto, a ordem de preferência das melhores escolhas se alternou quando foi considerada a impermeabilização com manta. Sugere-se, como alternativa mais barata, a escolha de uma área distante 600 m à residências, com solo do tipo argiloso e declividade não maior do que 15 graus para a implantação do Sistema Australiano. Caso não exista uma área que atenda a estas condições, poderá ser implementado um sistema UASB (Reator Anaeróbio de Manta de Lodo) seguido de lagoa facultativa, que requer menos área e proporciona um efluente final de boa qualidade, quando comparado aos outros tipos de sistemas.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

(ABGE) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Ensaio de impermeabilidade em solos**: Orientações para sua execução no campo. ABGE, 1981

BANCO MUNDIAL. **Relatório sobre o desenvolvimento mundial 2000/2001**: Luta contra a pobreza. EUA; 2000. Disponível em: <<http://www.bancomundial.org.br>> Acesso em: 02 de jan 2006.

BRASIL. Ministério da Saúde. Promoção da saúde: Declaração de Alma-Ata, Carta de Ottawa, Declaração de Adelaide, Declaração de Sundsvall, Declaração de Santafé de Bogotá, Declaração de Jacarta, rede de Megapaíses e Declaração do México. **Projeto Promoção da Saúde**. Brasília: Ministério da Saúde, 2001a. 47 p.

CAMPOS, J.R. et al. **Conceitos gerais sobre técnicas de tratamento de águas de abastecimento, esgotos sanitários e desinfecção**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 1997. 43 p.

CHERNICHARO, C. A. L. (Coord.) et al. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 554 p.

(IPCC) INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas**. 2007. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>> acesso em: 8 abr. 2007.

LALONDE, M. **A new perspective on the health of Canadians**: a working document. Ottawa: Minister of Supply and Services Canada, 1981. 77 p.

LEONETI, A.B. **Avaliação de modelo de tomada de decisão para escolha de sistema de tratamento de esgoto municipal**. Mestrando em Administração de Organizações - FEA-RP-USP, Processo FAPESP nº. 07/01943-5, Bolsa no País MS-1, 2007.

(OPAS) ORGANIZAÇÃO PANAMERICANA DE LA SALUD. Organização Mundial de la Salud. Salud, água potable y saneamiento em el desarrollo humano sostenible. Was., D.C., 128ª sesión Del Comitê Ejecutivo, 25-29 jun, 2001.

(PNUD) PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. **Eventos internacionais**. Disponível em: <<http://www.pnud.org.br/links>>. Acesso em: 12 jun 2004.

OLIVEIRA, S.V.W.B. **Modelo para tomada de decisão na escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário**. 2004. 293f. Tese (Doutorado em Administração). Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

SOARES, S. R. A.; BERNARDES, R. S.; CORDEIRO NETTO, Oscar de M.. **Relação entre saneamento, saúde pública e meio ambiente**: elementos para formulação de um modelo de planejamento em saneamento. Cad. Saúde Pública., Rio de Janeiro, v. 18, n. 6, 2002.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. v.1, 3.

ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Gerais, 2006. 452 p.

WELSCH, G. A. **Orçamento empresarial**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 1983. 397 p.

**APÊNDICE A – Orçamentos dos sistemas de tratamento de esgoto, considerando o tipo de solo adequado para compactação**

|   | <b>UASB +<br/>Lodos<br/>ativados</b> | <b>UASB +<br/>Lagoa<br/>facult.</b> | <b>UASB +<br/>Filtro biol.</b> | <b>UASB +<br/>Lagoa<br/>aerada</b> | <b>LA +<br/>Lodos<br/>ativados</b> | <b>LA +<br/>Lagoa<br/>facult.</b> | <b>LA +<br/>Filtro biol.</b> | <b>LA +<br/>Lagoa<br/>aerada</b> |
|---|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| <b>Descrição</b>                        | <b>US\$</b>                          | <b>US\$</b>                         | <b>US\$</b>                    | <b>US\$</b>                        | <b>US\$</b>                        | <b>US\$</b>                       | <b>US\$</b>                  | <b>US\$</b>                      |
| 1 Terreno                               | 1.248,74                             | 2.497,48                            | 416,25                         | 1.040,62                           | 1.701,87                           | 9.019,83                          | 2.087,07                     | 4.595,30                         |
| 2 Escavações e Limpeza do Terreno       | 2.942,89                             | 51.009,96                           | 2.528,18                       | 37.762,85                          | 27.147,49                          | 110.057,48                        | 27.829,63                    | 71.628,45                        |
| 3 Valor de Projetos (5% valor obra)     | 10.548,70                            | 10.263,60                           | 9.408,30                       | 9.408,30                           | 10.263,60                          | 5.987,10                          | 12.544,40                    | 7.982,80                         |
| 4 Tratamento Preliminar                 | 13.859,03                            | 13.859,03                           | 13.859,03                      | 13.859,03                          | 13.859,03                          | 13.859,03                         | 13.859,03                    | 13.859,03                        |
| 5 Fundações (20% concreto armado)       | 13.987,07                            | 7.140,71                            | 13.123,61                      | 7.140,71                           | 9.157,42                           | 0,00                              | 6.401,67                     | 0,00                             |
| 6 Paisagismo                            | 1.873,11                             | 3.746,21                            | 624,37                         | 1.560,92                           | 2.552,81                           | 4.509,92                          | 3.130,61                     | 6.892,95                         |
| 7 Drenagem                              | 2.123,44                             | 4.246,87                            | 707,81                         | 1.769,53                           | 2.893,98                           | 10.225,28                         | 3.548,99                     | 7.814,15                         |
| 8 Instalações Elétricas                 | 4.595,59                             | 0,00                                | 0,00                           | 4.687,50                           | 4.595,59                           | 0,00                              | 0,00                         | 4.687,50                         |
| 9 Segurança                             | 9.747,76                             | 8.929,52                            | 9.334,32                       | 6.606,22                           | 12.530,83                          | 14.830,56                         | 12.742,35                    | 11.265,63                        |
| 10 Pára-raios                           | 395,97                               | 395,97                              | 395,97                         | 395,97                             | 395,97                             | 395,97                            | 395,97                       | 395,97                           |
| 11 Redes de água, esgoto, serviço       | 6.858,24                             | 6.715,69                            | 6.288,04                       | 6.288,04                           | 6.715,69                           | 4.577,44                          | 7.856,09                     | 5.575,29                         |
| 12 Concreto Armado                      | 69.935,35                            | 35.703,54                           | 65.618,04                      | 35.703,54                          | 45.787,11                          | 0,00                              | 35.209,17                    | 0,00                             |
| 13 Impermeabilização                    | 15.440,43                            | 18.431,52                           | 14.341,39                      | 14.771,06                          | 15.243,71                          | 26.431,41                         | 11.736,09                    | 16.143,64                        |
| 14 Edificações                          | 45.671,36                            | 45.671,36                           | 45.671,36                      | 45.671,36                          | 45.671,36                          | 45.671,36                         | 45.671,36                    | 45.671,36                        |
| 15 Equipamentos                         | 94.340,28                            | 46.534,72                           | 304.909,67                     | 61.840,28                          | 62.975,69                          | 17.818,75                         | 279.924,42                   | 33.124,31                        |
| 16 Telefonia/informática para automação | 7.919,44                             | 7.919,44                            | 7.919,44                       | 7.919,44                           | 7.919,44                           | 7.919,44                          | 7.919,44                     | 7.919,44                         |
| 17 Vias de circulação                   | 3.832,17                             | 7.664,34                            | 1.277,39                       | 3.193,48                           | 5.222,77                           | 18.453,59                         | 6.404,87                     | 14.102,22                        |
| 18 Área de “cinturão verde”             | 15.619,46                            | 22.089,25                           | 9.017,90                       | 14.258,55                          | 18.234,50                          | 20.989,38                         | 20.192,91                    | 29.963,14                        |
| 19 Desinfecção                          | 15.838,89                            | 15.838,89                           | 15.838,89                      | 15.838,89                          | 15.838,89                          | 15.838,89                         | 15.838,89                    | 15.838,89                        |
| 20 Estimativa do custo de operação      | 145.660,43                           | 97.106,95                           | 106.476,92                     | 119.254,15                         | 138.419,99                         | 51.108,92                         | 100.088,30                   | 110.736,00                       |
| 21 Depreciação de equipamentos          | 51.284,61                            | 25.296,88                           | 165.752,88                     | 33.617,18                          | 34.234,41                          | 9.686,51                          | 152.170,57                   | 18.006,80                        |
| <b>Custos por habitante</b>             | <b>US\$</b>                          | <b>US\$</b>                         | <b>US\$</b>                    | <b>US\$</b>                        | <b>US\$</b>                        | <b>US\$</b>                       | <b>US\$</b>                  | <b>US\$</b>                      |
| Custo total por habitante               | 93,60                                | 75,60                               | 139,16                         | 77,62                              | 84,42                              | 67,94                             | 134,26                       | 74,75                            |
| Custo de implantação por habitante      | 59,06                                | 54,13                               | 91,42                          | 50,81                              | 54,14                              | 57,28                             | 90,02                        | 52,17                            |
| <b>Resumo das estimativas de custos</b> | <b>US\$</b>                          | <b>US\$</b>                         | <b>US\$</b>                    | <b>US\$</b>                        | <b>US\$</b>                        | <b>US\$</b>                       | <b>US\$</b>                  | <b>US\$</b>                      |
| Custo de implantação                    | 336.777,91                           | 308.658,10                          | 521.279,96                     | 289.716,28                         | 308.707,76                         | 326.585,42                        | 513.292,95                   | 297.460,09                       |
| Custo de operação e manutenção          | 196.945,03                           | 122.403,83                          | 272.229,80                     | 152.871,33                         | 172.654,40                         | 60.795,43                         | 252.258,87                   | 128.742,80                       |
| <b>Custo total do sistema</b>           | <b>533.722,95</b>                    | <b>431.061,94</b>                   | <b>793.509,76</b>              | <b>442.587,61</b>                  | <b>481.362,16</b>                  | <b>387.380,85</b>                 | <b>765.551,82</b>            | <b>426.202,89</b>                |

**APÊNDICE B – Orçamentos dos sistemas de tratamento de esgoto, considerando a impermeabilização com mantas**

|   | <b>UASB +<br/>Lodos<br/>ativados</b> | <b>UASB +<br/>Lagoa<br/>facult.</b> | <b>UASB +<br/>Filtro biol.</b> | <b>UASB +<br/>Lagoa<br/>aerada</b> | <b>LA +<br/>Lodos<br/>ativados</b> | <b>LA +<br/>Lagoa<br/>facult.</b> | <b>LA +<br/>Filtro biol.</b> | <b>LA +<br/>Lagoa<br/>aerada</b> |
|---|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| <b>Descrição</b>                        | <b>US\$</b>                          | <b>US\$</b>                         | <b>US\$</b>                    | <b>US\$</b>                        | <b>US\$</b>                        | <b>US\$</b>                       | <b>US\$</b>                  | <b>US\$</b>                      |
| 1 Terreno                               | 1.248,74                             | 2.497,48                            | 416,25                         | 1.040,62                           | 1.701,87                           | 9.019,83                          | 2.087,07                     | 4.595,30                         |
| 2 Escavações e Limpeza do Terreno       | 2.942,89                             | 51.009,96                           | 2.528,18                       | 37.762,85                          | 27.147,49                          | 110.057,48                        | 27.829,63                    | 71.628,45                        |
| 3 Valor de Projetos (5% valor obra)     | 10.263,60                            | 6.842,40                            | 8.553,00                       | 8.267,90                           | 8.267,90                           | 5.987,10                          | 6.842,40                     | 7.412,60                         |
| 4 Tratamento Preliminar                 | 13.859,03                            | 13.859,03                           | 13.859,03                      | 13.859,03                          | 13.859,03                          | 13.859,03                         | 13.859,03                    | 13.859,03                        |
| 5 Fundações (20% concreto armado)       | 13.987,07                            | 7.140,71                            | 13.123,61                      | 7.140,71                           | 9.157,42                           | 0,00                              | 6.401,67                     | 0,00                             |
| 6 Paisagismo                            | 1.873,11                             | 3.746,21                            | 624,37                         | 1.560,92                           | 2.552,81                           | 4.509,92                          | 3.130,61                     | 6.892,95                         |
| 7 Drenagem                              | 2.123,44                             | 4.246,87                            | 707,81                         | 1.769,53                           | 2.893,98                           | 10.225,28                         | 3.548,99                     | 7.814,15                         |
| 8 Instalações Elétricas                 | 4.595,59                             | 0,00                                | 0,00                           | 4.687,50                           | 4.595,59                           | 0,00                              | 0,00                         | 4.687,50                         |
| 9 Segurança                             | 9.747,76                             | 8.929,52                            | 9.334,32                       | 6.606,22                           | 12.530,83                          | 14.830,56                         | 12.742,35                    | 11.265,63                        |
| 10 Pára-raios                           | 395,97                               | 395,97                              | 395,97                         | 395,97                             | 395,97                             | 395,97                            | 395,97                       | 395,97                           |
| 11 Redes de água, esgoto, serviço       | 6.715,69                             | 5.005,09                            | 5.860,39                       | 5.717,84                           | 5.717,84                           | 4.577,44                          | 5.005,09                     | 5.290,19                         |
| 12 Concreto Armado                      | 69.935,35                            | 35.703,54                           | 65.618,04                      | 35.703,54                          | 45.787,11                          | 0,00                              | 35.209,17                    | 0,00                             |
| 13 Impermeabilização                    | 15.440,43                            | 60.923,25                           | 14.341,39                      | 43.974,92                          | 28.268,02                          | 122.380,45                        | 24.760,41                    | 74.746,91                        |
| 14 Edificações                          | 45.671,36                            | 45.671,36                           | 45.671,36                      | 45.671,36                          | 45.671,36                          | 45.671,36                         | 45.671,36                    | 45.671,36                        |
| 15 Equipamentos                         | 94.340,28                            | 46.534,72                           | 304.909,67                     | 61.840,28                          | 62.975,69                          | 17.818,75                         | 279.924,42                   | 33.124,31                        |
| 16 Telefonia/informática para automação | 7.919,44                             | 7.919,44                            | 7.919,44                       | 7.919,44                           | 7.919,44                           | 7.919,44                          | 7.919,44                     | 7.919,44                         |
| 17 Vias de circulação                   | 3.832,17                             | 7.664,34                            | 1.277,39                       | 3.193,48                           | 5.222,77                           | 18.453,59                         | 6.404,87                     | 14.102,22                        |
| 18 Área de “cinturão verde”             | 15.619,46                            | 22.089,25                           | 9.017,90                       | 14.258,55                          | 18.234,50                          | 20.989,38                         | 20.192,91                    | 29.963,14                        |
| 19 Desinfecção                          | 15.838,89                            | 15.838,89                           | 15.838,89                      | 15.838,89                          | 15.838,89                          | 15.838,89                         | 15.838,89                    | 15.838,89                        |
| 20 Estimativa do custo de operação      | 145.660,43                           | 97.106,95                           | 106.476,92                     | 119.254,15                         | 138.419,99                         | 51.108,92                         | 100.088,30                   | 110.736,00                       |
| 21 Depreciação de equipamentos          | 51.284,61                            | 25.296,88                           | 165.752,88                     | 33.617,18                          | 34.234,41                          | 9.686,51                          | 152.170,57                   | 18.006,80                        |
| <b>Custos por habitante</b>             | <b>US\$</b>                          | <b>US\$</b>                         | <b>US\$</b>                    | <b>US\$</b>                        | <b>US\$</b>                        | <b>US\$</b>                       | <b>US\$</b>                  | <b>US\$</b>                      |
| Custo total por habitante               | 93,53                                | 82,15                               | 138,94                         | 82,44                              | 86,18                              | 84,76                             | 135,04                       | 84,87                            |
| Custo de implantação por habitante      | 58,99                                | 60,68                               | 91,20                          | 55,63                              | 55,90                              | 74,10                             | 90,80                        | 62,30                            |
| <b>Resumo das estimativas de custos</b> | <b>US\$</b>                          | <b>US\$</b>                         | <b>US\$</b>                    | <b>US\$</b>                        | <b>US\$</b>                        | <b>US\$</b>                       | <b>US\$</b>                  | <b>US\$</b>                      |
| Custo de implantação                    | 336.350,26                           | 346.018,04                          | 519.997,01                     | 317.209,54                         | 318.738,53                         | 422.534,46                        | 517.764,27                   | 355.208,06                       |
| Custo de operação e manutenção          | 196.945,03                           | 122.403,83                          | 272.229,80                     | 152.871,33                         | 172.654,40                         | 60.795,43                         | 252.258,87                   | 128.742,80                       |
| <b>Custo total do sistema</b>           | <b>533.295,30</b>                    | <b>468.421,87</b>                   | <b>792.226,81</b>              | <b>470.080,87</b>                  | <b>491.392,93</b>                  | <b>483.329,89</b>                 | <b>770.023,14</b>            | <b>483.950,86</b>                |