



## II-498 - APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E DIAGRAMA DE TORNADO PARA IDENTIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS SIGNIFICATIVAS NA ESCOLHA DE SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO

**Alexandre Bevilacqua Leoneti<sup>(1)</sup>**

Bacharel em Administração de Empresas (Universidade Paulista), bacharel em Matemática Aplicada a Negócios (FFCLRP/USP) e mestre em Administração de Organizações (FEARP/USP). Doutorando em Hidráulica e Saneamento (EESC/USP).

**Calebe Macias Franco**

Bacharel em Matemática Aplicada a Negócios (FFCLRP/USP)

**Sonia Valle Walter Borges de Oliveira**

Bacharel em Arquitetura e Urbanismo (FAU/USP), mestre em Engenharia Hidráulica e Saneamento (EESC/USP) e doutora em Administração (FEA/USP). Professora da FEARP-USP.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto (FEARP/USP) – Av. Bandeirantes, 1900 – Monte Alegre – Ribeirão Preto – SP – Brasil – Tel: +55 (16) 3602-4751 – Cel: +55 (16) 9204-2539 – e-mail: [ableoneti@usp.br](mailto:ableoneti@usp.br)

### RESUMO

A tomada de decisão na escolha de um sistema de tratamento de esgoto sanitário para um município pode ser considerada uma tarefa complexa, já que deve ponderar diversas variáveis que interferem diretamente em seu custo e em sua qualidade ambiental. A utilização de modelos de tomada de decisão pode ser uma ferramenta útil para os gestores, uma vez que lhes apresenta diversas alternativas viáveis e possibilita-os enxergar com mais clareza o problema a ser resolvido. Um modelo de tomada de decisão desenvolvido por Oliveira (2004) apresenta ao tomador de decisão os custos de implantação, operação e manutenção de oito tipos de sistemas de tratamento de esgoto. Segundo Oliveira (2004), vinte e uma variáveis foram consideradas para compor os custos dos sistemas. A resposta do modelo é exibida como uma árvore de decisão quantitativa e permite, com o auxílio de um software apropriado, realizar uma análise de sensibilidade e gerar um diagrama de tornado para a alternativa indicada pelo modelo. A análise de sensibilidade avalia como mudanças nos elementos de um modelo podem afetar a solução ótima e a avaliação das variáveis pode ser realizada a partir de um diagrama de tornado. O objetivo da presente pesquisa foi identificar, com a aplicação da análise de sensibilidade e com o auxílio do diagrama de tornado, quais das vinte e uma variáveis empregadas pelo modelo Oliveira (2004) mais contribuem para a escolha de determinado sistema de tratamento. Para isto, foram utilizados os parâmetros coletados nos projetos de estações de tratamento de esgoto de 13 municípios paulistas. Por meio da análise de sensibilidade e do diagrama de tornado, foi possível identificar, dentre as vinte e uma variáveis utilizadas no modelo de Oliveira (2004), algumas variáveis críticas, que devem receber uma maior atenção dos gestores.

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise de Sensibilidade, Diagrama de Tornado, Decisão, Tratamento de Esgoto.

### INTRODUÇÃO

A tomada de decisão na escolha de um sistema de tratamento de esgoto sanitário para um município pode ser considerada uma tarefa complexa, já que deve ponderar diversas variáveis que interferem diretamente em seu custo e em sua qualidade ambiental. A utilização de modelos de tomada de decisão pode ser uma ferramenta útil para os gestores, uma vez que lhes apresenta diversas alternativas viáveis e possibilita-os enxergar com mais clareza o problema a ser resolvido.

O modelo de tomada de decisão desenvolvido por Oliveira (2004) apresenta ao tomador de decisão oito tipos de sistemas de tratamento de esgoto. Este modelo é composto por planilhas de cálculo, as quais são compostas por vinte e uma variáveis de custo e outros itens de implantação, operação e manutenção, visando à melhor alternativa econômica e ambiental. Segundo Oliveira (2004), as vinte e uma variáveis foram definidas com base na literatura e informações de especialistas. São elas: 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. A resposta do modelo é exibida como uma árvore de decisão quantitativa e permite, com o auxílio de um software apropriado, realizar uma análise de sensibilidade e gerar um diagrama de tornado para a alternativa indicada pelo modelo.

A análise de sensibilidade 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 modelo. Após se realizar uma análise de sensibilidade, a avaliação das variáveis pode ser realizada a partir de um diagrama de tornado, que organiza os dados de uma maneira que se pode entender de imediato (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

O objetivo da presente pesquisa foi identificar, com a aplicação da análise de sensibilidade e com o auxílio do diagrama de tornado, quais das vinte e uma variáveis empregadas pelo modelo Oliveira (2004) mais contribuem para a escolha de determinado sistema de tratamento. Para isto, foram utilizados os parâmetros coletados nos projetos de estações de tratamento de esgoto do programa “Água Limpa”, coordenado pela Secretaria de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento (SERHS), implantadas em treze municípios paulistas, os quais possibilitaram realizar as análises das respostas do modelo e definir quais são as variáveis mais significantes para cada sistema proposto.

## METODOLOGIA UTILIZADA

Para a realização desta pesquisa foi necessário obter os parâmetros de alguns projetos de sistemas de tratamento de esgoto, já implantados ou em implantação, para se comparar as variáveis e respostas do modelo Oliveira (2004) com as variáveis utilizadas nesses projetos. Os parâmetros escolhidos foram os necessários para preencher as variáveis de entrada do modelo Oliveira (2004). As variáveis de entrada do modelo são as seguintes: (i) população estimada (20 anos); (ii) vazão afluente média; (iii) vazão afluente máxima; (iv) DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) média afluente; (v) alcance do projeto; (vi) classe do rio receptor; e (vii) temperatura média do líquido no mês mais frio.

Os projetos utilizados foram fornecidos pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) do Estado de São Paulo, localizado no município de Ribeirão Preto e pela Prefeitura Municipal de Vargem Grande do Sul. Os projetos e orçamentos das estações de tratamento levantados foram dos municípios de Ibiporanga, Ecatur-Tanabi, Mirassolândia, Lindóia, Cruz das Posses, Caconde, Casa Branca, Rio das Pedras, Descalvado, Barrinha, Ituverava, Américo Brasiliense e Vargem Grande do Sul. Os parâmetros referentes a estes municípios foram coletados e estão expostos na tabela 1.

**Tabela 1 – Dados dos municípios e parâmetros de projeto utilizados**

<b>Projeto de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)</b>	<b>Pop. estimada (20 anos)</b>	<b>Vazão afluente média</b>	<b>Vazão afluente máxima</b>	<b>DBO média afluente</b>	<b>Alcance e do projeto</b>	<b>Classe do rio receptor</b>	<b>Temp. mês mais frio</b>
<b>Cidade</b>	<b>hab</b>	<b>m³/d</b>	<b>m³/d</b>	<b>mg/L</b>	<b>ano</b>	<b>Classe</b>	<b>°C</b>
Ibiporanga	1093	196	235	233	20	2	23
Ecatur-Tanabi	1606	307	368	282	20	2	23
Mirassolândia	5169	1009	1210	266	20	2	22
Lindóia	9534	2352	2664	250	20	2	20
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 DAEE e prefeitura municipal de Vargem Grande do Sul



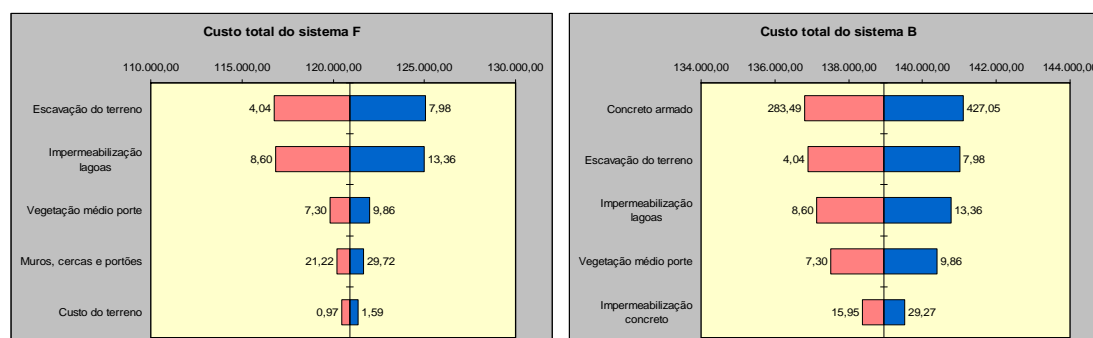
Após os dados iniciais serem coletados, o estudo passou a ser de forma aplicada, preenchendo os campos das variáveis de entrada do modelo Oliveira (2004) e realizando, com o auxílio do software Crystal Ball ®, a análise de sensibilidade. A partir disto, foram gerados os diagramas de tornado para cada uma das duas alternativas que alcançaram o menor custo, para cada uma das treze cidades avaliadas. Os sistemas que compõem as alternativas do modelo Oliveira (2004) podem ser visualizados na tabela 2.

**Tabela 2 – Sistemas e unidades de tratamento contemplados no modelo Oliveira (2004)**

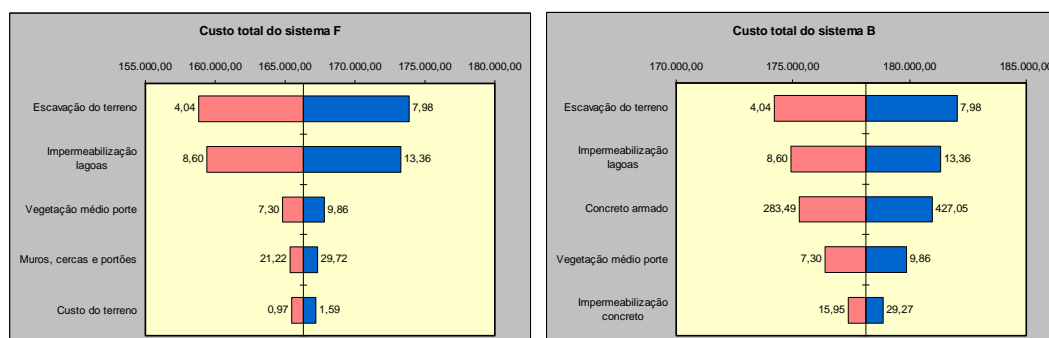
Sistemas do modelo Oliveira (2004)	Unidades de composição dos sistemas	
	Unidade Anaeróbia (1º. Processo)	Unidade Aeróbia (2º. Processo)
Sistema A	UASB	Lodos Ativados (Convencional)
Sistema B	UASB	Lagoa Facultativa
Sistema C	UASB	Filtro Biológico Percolador
Sistema D	UASB	Lagoa Aerada e Lagoa de Decantação
Sistema E	Lagoa Anaeróbia	Lodos Ativados (Convencional)
Sistema F	Lagoa Anaeróbia	Lagoa Facultativa
Sistema G	Lagoa Anaeróbia	Filtro Biológico Percolador
Sistema H	Lagoa Anaeróbia	Lagoa Aerada e Lagoa de Decantação

## RESULTADOS OBTIDOS

Após a realização da análise de sensibilidade com o software Crystal Ball ®, foram gerados diagramas de tornados para as duas alternativas mais baratas propostas pelo modelo Oliveira (2004) de cada cidade. Pode-se observar que algumas variáveis são altamente relevantes na maioria das melhores alternativas. Verificou-se que variáveis como “escavação do terreno” e “impermeabilização das lagoas” estiveram dentre as cinco variáveis de maior relevância em vinte e quatro casos, dos vinte e seis analisados. Outra variável de alta relevância é “concreto armado”, que esteve entre as cinco variáveis em vinte e uma vezes dos casos. As figuras 1 à 13 apresentam os diagramas de tornado gerados para cada uma das treze cidades, com as duas melhores opções (na esquerda a mais barata) de sistemas e suas variáveis mais significativas.



**Figura 1 – Diagramas de tornados para Ibiboranga (na esquerda a mais barata)**



**Figura 2 – Diagramas de tornados para Ecatu-Tanabi (na esquerda a mais barata)**

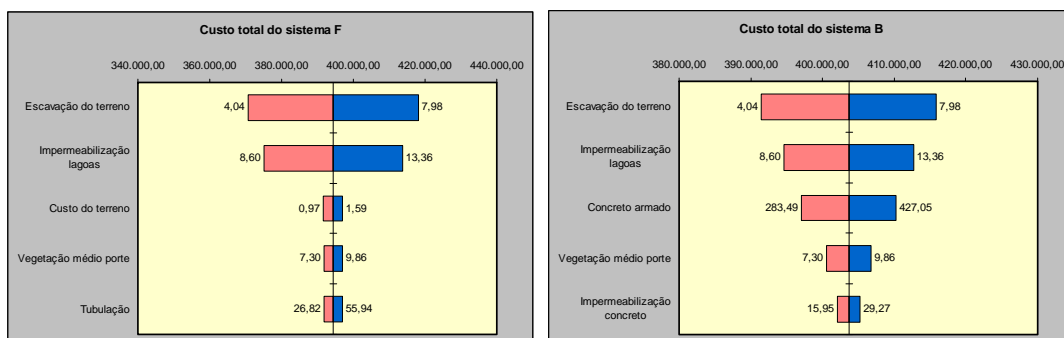


Figura 3 – Diagramas de tornados para Mirassolândia (na esquerda a mais barata)

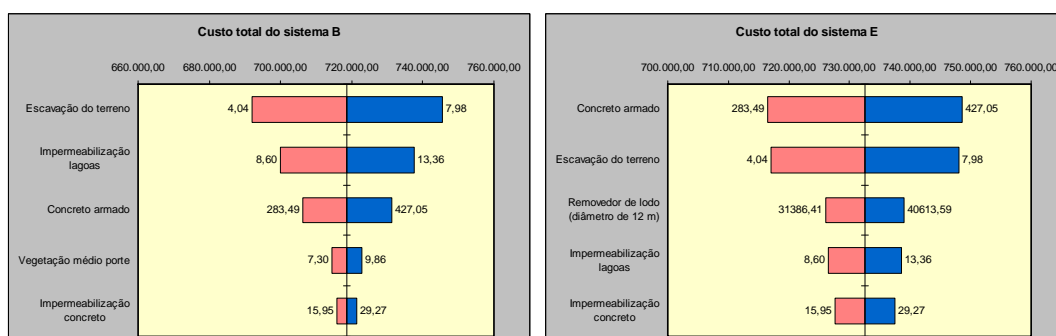


Figura 4 – Diagramas de tornados para Lindóia (na esquerda a mais barata)

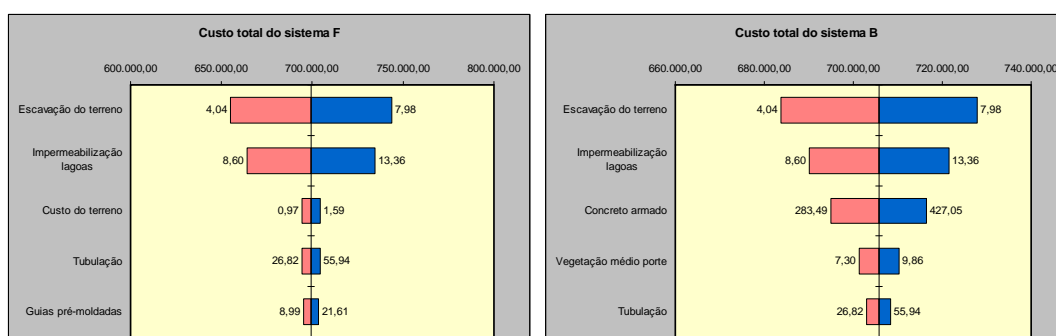


Figura 5 – Diagramas de tornados para Cruz das Posses (na esquerda a mais barata)

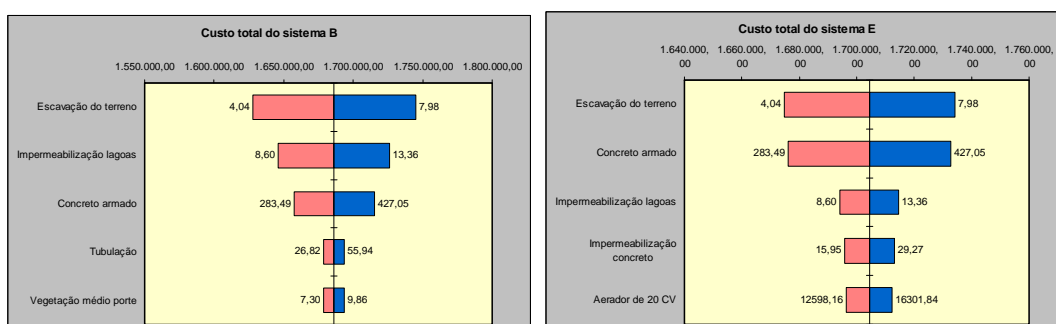


Figura 6 – Diagramas de tornados para Caconde (na esquerda a mais barata)

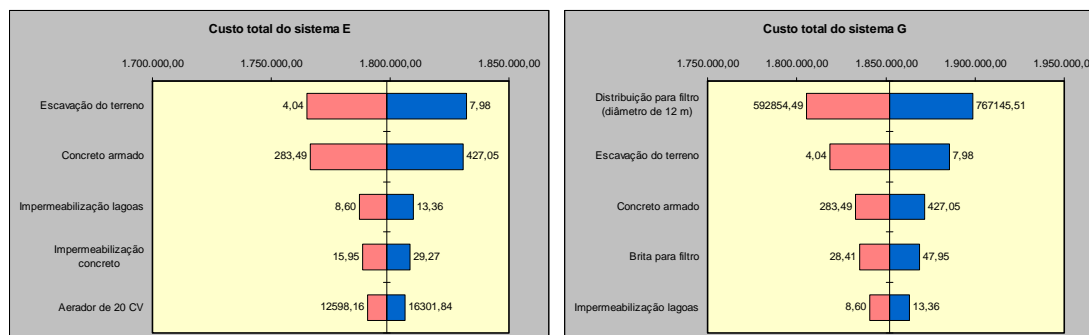


Figura 7 – Diagramas de tornados para Casa Branca (na esquerda a mais barata)

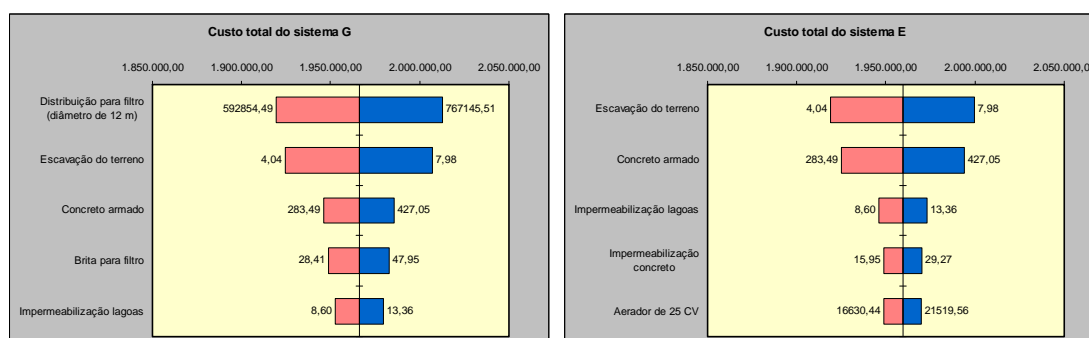


Figura 8 – Diagramas de tornados para Rio das Pedras (na esquerda a mais barata)

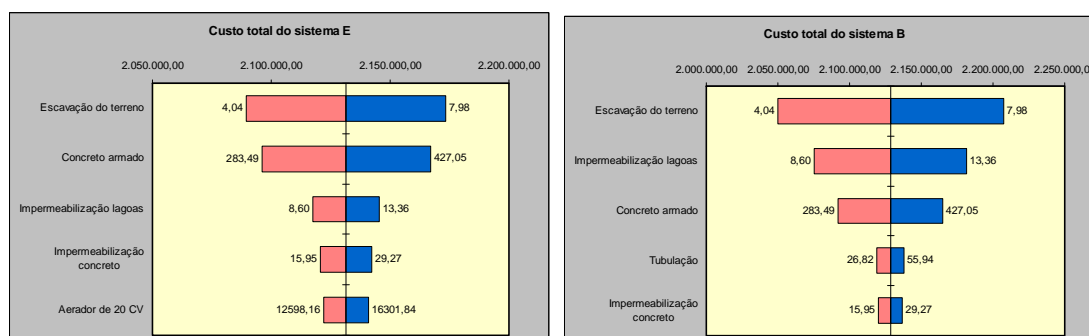


Figura 9 – Diagramas de tornados para Descalvado (na esquerda a mais barata)

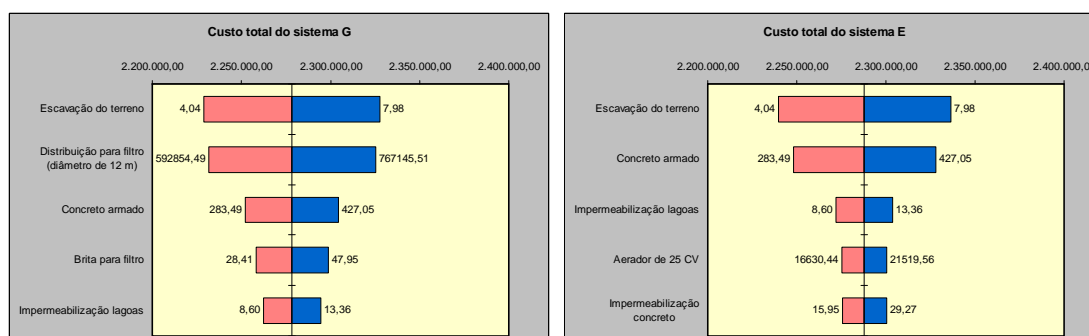


Figura 10 – Diagramas de tornados para Barrinha (na esquerda a mais barata)

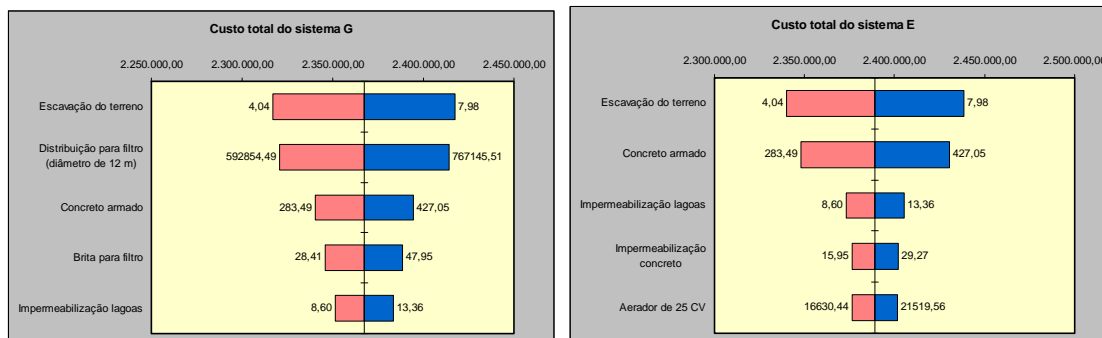


Figura 11 – Diagramas de tornados para Ituverava (na esquerda a mais barata)

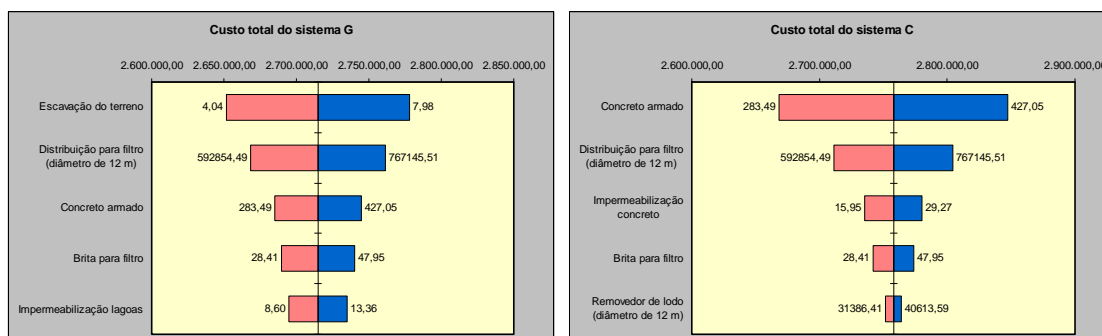


Figura 12 – Diagramas de tornados para Américo Brasiliense (na esquerda a mais barata)

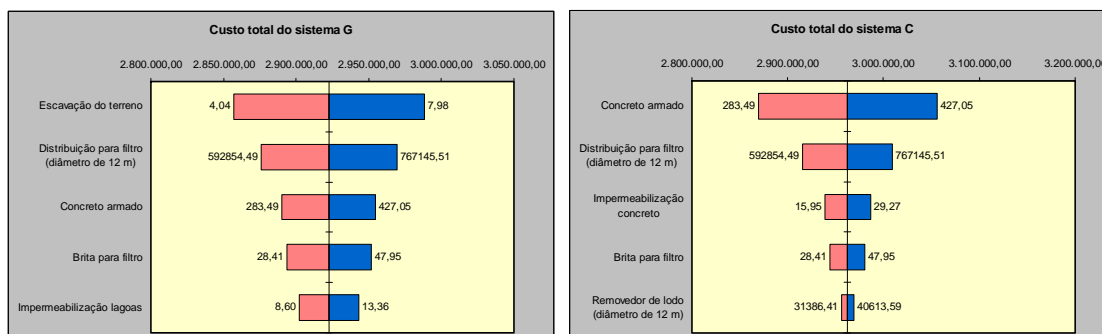


Figura 13 – Diagramas de tornados para Vargem Grande do Sul (na esquerda a mais barata)

Pode-se observar que no caso de Américo Brasiliense (figura 12), as duas principais variáveis que tem maior impacto no custo total do “Sistema G” são “escavação do terreno” e “distribuição para filtro (diâmetro 12m)”. No caso do “Sistema C”, as variáveis “concreto armado” e “distribuição para filtro (diâmetro 12m)”. Da mesma forma pode-se analisar os melhores sistemas das outras cidades.

Para as cidades que continham valores mais baixos para as variáveis: população, vazão afluyente média e vazão afluyente máxima, verificou-se que as respostas do modelo Oliveira (2004) tendiam ao “Sistema F”, provavelmente pois é um sistema que possui os custos de implantação, operação e manutenção por afluyente são mais baixos. Na medida em que os valores para a população, a vazão afluyente média e a vazão afluyente máxima aumentaram, as respostas foram migrando aos poucos para os sistemas “G” e “C”, sistemas onde o custo de implantação, operação e manutenção por afluyente são mais elevados, mas a eficiência no tratamento é maior. Foi também verificado que as cidades com as mesmas características tendem a ter sistemas de tratamento de esgoto muito próximos, fazendo com que estes sistemas sejam enquadrados em faixas de parâmetros semelhantes. Dentre as treze cidades, o sistema que mais vezes foi escolhido foi o “Sistema G”, que foi o melhor sistema para cinco destas cidades, seguido do “Sistema F”, com quatro cidades.

A tabela 3 apresenta, para a primeira e a segunda alternativa mais econômica proposta pelo modelo Oliveira (2004), as variáveis mais significativas, reveladas pela aplicação da análise de sensibilidade e do diagrama de tornado, para cada uma das treze cidades.



Tabela 3 – Variáveis mais significativas para cada sistema

<b>Américo Brasiliense</b>	<b>1ª alternativa: Sistema G</b>	<b>2ª alternativa: Sistema C</b>
	Escavação do terreno; Distribuição para filtro (diâm. de 12 m); Concreto armado Brita para filtro; Impermeabilização lagoas	Concreto armado; Distrib. para filtro (diâm. de 12 m); Impermeab. concreto; Brita para filtro; Removedor de lodo (diâm. de 12 m)
<b>Barrinha</b>	<b>1ª alternativa: Sistema G</b>	<b>2ª alternativa: Sistema E</b>
	Escavação do terreno; Distribuição para filtro (diâm. de 12 m); Concreto armado Brita para filtro; Impermeabilização lagoas	Escavação do terreno; Concreto armado Impermeabilização lagoas; Aerador de 25 CV; Impermeabilização concreto
<b>Caconde</b>	<b>1ª alternativa: Sistema B</b>	<b>2ª alternativa: Sistema E</b>
	Escavação do terreno; Impermeabilização lagoas; Concreto armado; Tubulação; Vegetação médio porte	Escavação do terreno; Concreto armado Impermeabilização lagoas; Impermeab. concreto; Aerador de 20 CV
<b>Casa Branca</b>	<b>1ª alternativa: Sistema E</b>	<b>2ª alternativa: Sistema G</b>
	Escavação do terreno; Concreto armado Impermeabilização lagoas; Impermeab. concreto; Aerador de 20 CV	Distribuição para filtro (diâm. de 12 m); Escavação do terreno; Concreto armado Brita para filtro; Impermeabilização lagoas
<b>Cruz das Posses</b>	<b>1ª alternativa: Sistema F</b>	<b>2ª alternativa: Sistema B</b>
	Escavação do terreno; Impermeabilização lagoas; Custo do terreno; Tubulação; Guias pré-moldadas	Escavação do terreno; Impermeabilização lagoas; Concreto armado; Vegetação médio porte; Tubulação
<b>Descalvado</b>	<b>1ª alternativa: Sistema E</b>	<b>2ª alternativa: Sistema B</b>
	Escavação do terreno; Concreto armado Impermeabilização lagoas; Impermeab. concreto; Aerador de 20 CV	Escavação do terreno; Impermeabilização lagoas; Concreto armado; Tubulação; Impermeabilização concreto
<b>Ecatu-Tanabi</b>	<b>1ª alternativa: Sistema F</b>	<b>2ª alternativa: Sistema B</b>
	Escavação do terreno; Impermeabilização lagoas; Vegetação médio porte; Muros, cercas e portões; Custo do terreno	Escavação do terreno; Impermeabilização lagoas; Concreto armado; Vegetação médio porte; Impermeabilização concreto
<b>Ituverava</b>	<b>1ª alternativa: Sistema G</b>	<b>2ª alternativa: Sistema E</b>
	Escavação do terreno; Distribuição para filtro (diâm. de 12 m); Concreto armado; Brita para filtro; Impermeabilização lagoas	Escavação do terreno; Concreto armado; Impermeabilização lagoas; Impermeab. concreto; Aerador de 25 CV
<b>Lindoia</b>	<b>1ª alternativa: Sistema B</b>	<b>2ª alternativa: Sistema E</b>
	Escavação do terreno; Impermeabilização lagoas; Concreto armado; Vegetação médio porte; Impermeab. concreto	Concreto armado; Escavação do terreno; Removedor de lodo (diâm. de 12 m); Impermeab. lagoas; Impermeab. concreto
<b>Mirassolandia</b>	<b>1ª alternativa: Sistema F</b>	<b>2ª alternativa: Sistema B</b>
	Escavação do terreno; Impermeabilização lagoas; Custo do terreno; Vegetação médio porte; Tubulação	Escavação do terreno; Impermeabilização lagoas; Concreto armado; Vegetação médio porte; Impermeab. concreto
<b>Rio das Pedras</b>	<b>1ª alternativa: Sistema G</b>	<b>2ª alternativa: Sistema E</b>
	Distribuição para filtro (diâm. de 12 m); Escavação do terreno; Concreto armado; Brita para filtro; Impermeabilização lagoas	Escavação do terreno; Concreto armado; Impermeabilização lagoas; Impermeab. concreto; Aerador de 25 CV
<b>Ibiporanga</b>	<b>1ª alternativa: Sistema F</b>	<b>2ª alternativa: Sistema B</b>
	Escavação do terreno; Impermeabilização lagoas; Vegetação médio porte; Muros, cercas e portões; Custo do terreno	Concreto armado; Escavação do terreno; Impermeabilização lagoas; Vegetação Médio Porte; Impermeab. concreto
<b>Vargem Grande do Sul</b>	<b>1ª alternativa: Sistema G</b>	<b>2ª alternativa: Sistema C</b>
	Escavação do terreno; Distribuição para filtro (diâm. de 12 m); Concreto armado; Brita para filtro; Impermeabilização lagoas	Concreto armado; Distrib. para filtro (diâm. de 12 m); Impermeab. concreto; Brita para filtro; Remov. de lodo (diâm 12m)





## **CONCLUSÕES**

Por meio da análise de sensibilidade e do diagrama de tornado, foi possível identificar, dentre as vinte e uma variáveis utilizadas no modelo de Oliveira (2004), algumas variáveis críticas, que são mais significativas do que a grande maioria das outras variáveis, ou seja, que podem alterar sobremaneira o custo do sistema de tratamento de esgoto e, portanto, devem receber uma maior atenção dos gestores.

Pode-se concluir que essas três variáveis são extremamente significantes na hora de escolher qual é o melhor sistema de tratamento para uma cidade, ou seja, o preço dessas variáveis é extremamente relevante na hora da escolha da melhor alternativa e variações bruscas nos seus valores poderão influenciar sobremaneira na melhor alternativa. Seria importante dar uma maior atenção a esses tipos de variáveis quando no projeto de um sistema de tratamento de esgoto para municípios.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.L. Introdução à pesquisa operacional. 8. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006. 828 p.
2. 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.
3. WINSTON, W.L. Operations Research: applications and algorithms. 3. ed. Belmont: Thomson, 1994, 1318 p.