UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

ALEXANDRE BEVILACQUA LEONETI

**Teoria dos Jogos e Sustentabilidade na Tomada de Decisão: Aplicação a
Sistemas de Tratamento de Esgoto**

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos
2012

ALEXANDRE BEVILACQUA LEONETI

**Teoria dos Jogos e Sustentabilidade na Tomada de Decisão: Aplicação a
Sistemas de Tratamento de Esgoto**

Tese apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São
Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em Ciências,
Programa de Engenharia Hidráulica e
Saneamento

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Cleto Pires

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Sonia Valle
Walter Borges de Oliveira

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos
2012

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.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Atendimento ao
Usuário do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

L583t Leoneti, Alexandre Bevilacqua.
Teoria dos jogos e sustentabilidade na tomada de
decisão: aplicação a sistemas de tratamento de esgoto. /
Alexandre Bevilacqua Leoneti; orientador Eduardo Cleto
Pires; co-orientador Sonia Valle Walter Borges de
Oliveira. São Carlos, 2012.

Tese - Doutorado (Programa de Pós-Graduação e Área de
Concentração em Engenharia Hidráulica e Saneamento)–
Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São
Paulo, 2012.

1. Métodos multicritérios. 2. Tomada de decisão em
grupos. 3. Sistemas de tratamento de esgoto. 4.
Sustentabilidade. 5. Teoria dos jogos. 6. Equilíbrio de
Nash. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **ALEXANDRE BEVILACQUA LEONETI**.

Título da tese: "Teoria dos jogos e sustentabilidade na tomada de decisão: aplicação a sistemas de tratamento de esgoto".

Data da defesa: 11/06/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Eduardo Cleto Pires** (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Titular **José Roberto Campos**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **René Bañares-Alcántara**
(University of Oxford)

Aprovado

Prof. Dr. **Fernando Pigeard de Almeida Prado**
(Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **Marcelo Seido Nagano**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Prof. Titular **Edson Cezar Wendland**

Suplente do Presidente da Comissão de Pós-Graduação em Exercício:

Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de ter cursado e vivido a experiência do doutorado.

Aos meus pais João e Mércia, pelo amor dedicado em cada gesto, palavra, carinho e à Valquiria, minha esposa, pelo amor e por ter sido minha inspiração.

Agradeço ao Prof. Eduardo, pela amizade, confiança e pela oportunidade de cursar o doutorado na Escola de Engenharia de São Carlos e de fazer o estágio no exterior. Agradeço também a Profa. Sonia, como sempre, pela amizade e co-orientação.

Agradeço ao Prof. René e toda sua família (Arantza Aldea, Sandra e Arantza) pelos momentos agradáveis em Oxford e pela amizade. De modo especial, agradeço ao Prof. René, que me aceitou para realizar o estágio de doutorado e tornou possível esta experiência para toda a vida.

Agradeço também à Mirosława, minha companheira de sala, pela amizade, paciência e por ter me apresentado a cidade. Da mesma forma, agradeço ao meu amigo Julian, pelas partidas de futebol e pelas conversas acadêmicas. À Robert, Juanda Jaya e Ping-Jen pela amizade.

Aos meus irmãos Marcelo e Gerusa, aos amigos Daniel Benez, José Rafael, Vinicius, Ronaldo, Wilson, Marcelo Castro, Hosny, Anderson, Michele, Regiane, Ana Carolinne, Elizandra, Leonardo, Diego, Matheus, Daniel, André, Pe. Julio, Pe. Valentin, Pe. Marcos e Pe. Lauro, que me ajudaram a não vacilar na fé durante o tempo de doutorado. Aos amigos Marcos Sareta, Marcelo Santos, Danilo Porfírio, Daniel Anijar, Érico, Glauco, Dayane, Margareth, Patrícia e Daniel, Junior e Silvia, John e Denise, Daniel e Elen, Toninho e Aline, Josi e Adriano pela amizade e pelo apoio. Aos meus tios e primos, que sempre torceram por mim e que, de alguma forma, sempre estiveram presentes. À família Aragão, especialmente a Dirce e Valdemar.

À Escola de Engenharia de São Carlos, instituição que me acolheu e que me deu todo o suporte para cursar o doutorado. Também a todos os colaboradores do Departamento de Hidráulica e Saneamento, especialmente a Sá, Pavi, André e Rose. Aos professores, e, em especial, ao Prof. José Roberto Campos e ao Prof. Marcius Giorgetti, pelas preciosas contribuições ao trabalho.

Agradeço também ao Prof. Fernando Pigeard pelas importantes considerações em minha banca de qualificação e pelas discussões sobre a Teoria do Jogo e o Equilíbrio de Nash.

Meus sinceros agradecimentos ao CNPq (seis primeiros meses) e à FAPESP (do sexto até o último mês), pela confiança e pelo o apoio financeiro que foi fundamental para realizar esta pesquisa.

RESUMO

LEONETI, A.B. **Teoria dos Jogos e Sustentabilidade na Tomada de Decisão:** Aplicação a Sistemas de Tratamento de Esgoto. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012

Para auxiliar os gestores das organizações em seu processo decisório, o emprego de métodos de apoio à tomada de decisão é utilizado desde o século passado, a partir da década de 1950, havendo forte ênfase nas questões econômico-financeiras e operacionais das alternativas. Atualmente, o uso de métodos que consideram as questões relativas à sustentabilidade ambiental das alternativas é um assunto que tem despertado interesse, conforme se observa na literatura recente, ainda que relativamente escassa. Contudo, a prática da maioria dos métodos multicritério existentes tem embasamento no tomador de decisão como um indivíduo ao invés de um grupo e a ampla diferença entre o comportamento de um indivíduo e de um grupo é negligenciado. Neste novo tipo de abordagem, soluções para resolver os conflitos que inevitavelmente surgem da necessidade de atender os diferentes critérios dos agentes envolvidos devem ser propostas. Para estes casos, a Teoria dos Jogos é reconhecidamente uma abordagem que permite a resolução de conflitos por meio da avaliação de diferentes cenários com diferentes alternativas. Neste sentido, a presente pesquisa apresenta um método multicriterial, baseado em indicadores de sustentabilidade em conjunto com a Teoria dos Jogos e o equilíbrio de Nash, para que seja uma das ferramentas de apoio na escolha do sistema de tratamento de esgoto sanitário para municípios. Para tornar possível a metodologia proposta, indicadores de sustentabilidade foram selecionados para serem usados como critérios na avaliação de alternativas de sistema de tratamento de esgoto. Além disto, vetores de pesos para os critérios foram definidos para representar perfis de jogadores. A partir disto, foi proposta uma função de pagamentos e um exemplo foi gerado a partir da definição do jogo e seus jogadores, tendo sido o *software* Gambit utilizado para encontrar o equilíbrio de Nash do jogo. Como resultado, a aplicação da metodologia proposta permite tratar o processo de escolha de ETE como um processo de escolha em grupo, ao invés de uma escolha individual, e visa contribuir para quebrar o paradigma da busca pela eficiência baseada nos critérios formados pelo binômio técnico e econômico na escolha de sistemas de tratamento de esgoto. Desta forma, a aplicação do novo método visa proporcionar meios para se enxergar o mesmo problema sobre diferentes focos e, com a utilização de diferentes critérios, poderia facilitar o processo da tomada de decisão para a escolha da alternativa técnica, econômica, ambiental e socialmente mais adequada.

Palavras-chave: métodos multicritério; tomada de decisão em grupos; sistemas de tratamento de esgoto; sustentabilidade; teoria dos jogos; equilíbrio de Nash.

ABSTRACT

LEONETI, A.B. **Game Theory and Sustainability in Decision Making:** Application to Wastewater Treatment Systems. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012

To assist the managers of organizations in their decision making, the use of methods to support the decision are used since the last century, from the 1950s, with a strong emphasis on economic issues, financial and operational details of the treatment plants sewage. Currently, the use of methods to consider issues relating to the environmental sustainability of wastewater treatment plants is a subject that has attracted attention, as shown in recent studies, although relatively scarce. However, the practice of most existing methods are based on multicriteria decision-maker as an individual instead of a group and the wide difference between the behavior of an individual and a group is neglected. In this new approach, solutions to resolve the conflicts that inevitably arise from the need to meet the various criteria of the parties involved must be proposed. For these cases, game theory is admittedly an approach that allows the resolution of conflicts through the evaluation of different scenarios with different alternatives. With this research we sought to develop a measurement methodology based on indicators of sustainability in conjunction with game theory and Nash equilibrium, that is one of tools to support the choice of system of sewage treatment for a particular municipality . For the proposed new methodology, sustainability indicators were selected to be used as criteria in the evaluation of alternative system of sewage treatment and weight vectors for the criteria were defined as profiles of players. From this, we choose a function of reward and an example was generated from the definition of the game and its players, the software Gambit was used to find the Nash equilibrium of the game. The proposed methodology allows us to treat the process of choosing ETE as a selection process in group, rather than an individual choice, and aims to deconstruct the paradigm of the quest for efficiency based on criteria formed the duo in the technical and economic choice of systems for wastewater treatment. Thus, applying the new method aims at providing means to see the same problem on different sides, and with the use of different criteria, could facilitate the process of decision making for the choice of alternative technical, economic, environmental and socially suitable.

Keywords: multicriteria methods; group decision-making; sewage treatment systems; sustainability; game theory; Nash equilibrium.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Estado da arte e método proposto nesta pesquisa.....	22
Figura 2.1 – Estrutura geral da modelagem tradicional de problemas multicritério	33
Figura 2.2 – Exemplo de configuração de um bloco de simulação e suas funções	51
Figura 2.3 – Dos dados até a informação	56
Figura 2.4 – As diferentes dimensões da sustentabilidade.....	59
Figura 2.5 – Exemplo de um jogo na forma estratégica	72
Figura 2.6 – Exemplo de um jogo na forma estendida.....	72
Figura 4.1 – Estrutura geral dos blocos de sistemas (exemplo do sistema preliminar) .	107
Figura 4.2 – Fluxograma da escolha das alternativas iniciais	109
Figura 5.1 – Tela de solução do <i>software</i> Gambit	127
Figura 6.1 – Participantes do processo decisório.....	131
Figura 6.2 – Exemplo do gráfico influência <i>versus</i> poder dos atores.....	132
Figura 6.3 – Fluxograma das etapas do método multicriterial	136
Figura 6.4 – Tela de solução do <i>software</i> Gambit	143

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Principais diferenças entre o paradigma construtivista e racionalista	33
Quadro 2.2 – Métodos multicritérios mais conhecidos	35
Quadro 2.3 – Exemplo de atores e interesses na escolha de sistemas de tratamento	61
Quadro 4.1 - Critérios escolhidos para compor o indicador de sustentabilidade	100
Quadro 4.2 – Sistemas criados a partir da biblioteca de tecnologias	110
Quadro 6.1 – Estratégias para serem utilizadas nas entrevistas	133
Quadro 6.2 – Alternativas consideradas no exemplo	137
Quadro 6.3 – Comparação entre as características do AHP e do método proposto	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Arranjos considerados por Tecle, Fogel e Duckstein (1988).....	82
Tabela 2.2 – Métodos e critérios considerados por Peniwati (2007)	95
Tabela 4.1 – Principais tipos de sistemas de tratamento nos municípios brasileiros	98
Tabela 4.2 – Funções para os critérios econômicos	102
Tabela 4.3 – Funções para os critérios ambientais	103
Tabela 4.4 – Funções para os critérios sociais	106
Tabela 5.1 – Matriz de decisão	112
Tabela 5.2 – Matriz de decisão normalizada.....	113
Tabela 5.3 – Definição do perfil de dois jogadores: ambiental e econômico.....	116
Tabela 5.4 – Matriz de decisão do exemplo.....	118
Tabela 5.5 – Matriz de decisão normalizada do exemplo	119
Tabela 5.6 – Matriz de decisão do jogador ambiental.....	119
Tabela 5.7 – Matriz de decisão do jogador econômico.....	119
Tabela 5.8 – Matriz de similaridades para o jogador ambiental	120
Tabela 5.9 – Matriz de similaridades para o jogador econômico	120
Tabela 5.10 – Ganhos nas trocas para o jogador ambiental.....	121
Tabela 5.11 – Ganhos nas trocas para o jogador econômico.....	121
Tabela 5.12 – Conjunto de estratégias dos jogadores	122
Tabela 5.13 – Similaridades entre as alternativas e a alternativa ideal.....	123
Tabela 5.14 – Tabela de pagamentos para o jogador ambiental.....	125
Tabela 5.15 – Tabela de pagamentos para o jogador econômico.....	125
Tabela 5.16 – Equilíbrio de Nash encontrados e pagamentos dos jogadores.....	128
Tabela 6.1 – Matriz de decisão	139
Tabela 6.2 – Perfis dos jogadores considerados no jogo	139
Tabela 6.3 – Ganhos nas trocas para o jogador ambiental.....	140
Tabela 6.4 – Ganhos nas trocas para o jogador econômico.....	141
Tabela 6.5 – Ganhos nas trocas para o jogador social	141
Tabela 6.6 – Conjunto de estratégias dos jogadores	142
Tabela 6.7 – Similaridades entre as alternativas e a alternativa ideal.....	142
Tabela 6.8 – Equilíbrio de Nash encontrados e pagamentos dos jogadores.....	144
Tabela 6.9 – Comparação dos resultados entre o AHP e o método proposto	145

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AHP: *Analytical Hierarchy Process* (Método de Análise Hierárquica)

ANA: Agência Nacional de Águas

ASSEMAE: Associação Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento

DAEE: Departamento de Águas e Energia Elétrica

DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO: Demanda Química de Oxigênio

ELECTRE: *Elimination et Choice Traduisant la Réalité* (Eliminação e escolha que traduz a realidade)

IWA: *International Water Association* (Associação Internacional da Água)

LCA: *Life Cycle Assessment* (Análise do Ciclo de Vida)

MAUT: *Multiattribute Utility Theory* (Teoria da Utilidade Multiatributo)

OECD: *Organization for Economic Co-Operation and Development* (Organização para a Cooperação Económica e Desenvolvimento)

PROMETHEE: *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (Método de organização de preferências para o enriquecimento de avaliações)

TOPSIS: *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (Técnica para ordem de preferências pela similaridade ideal)

UNCSD: *United Nations Commission on Sustainable Development* (Comissão das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável)

UNCED: *United Nations Conference on Environment and Development* (Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento)

WCED: *World Commission on Environment and Development* (Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Justificativa.....	22
1.2	Objetivos.....	29
1.3	Estrutura do trabalho	30
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	32
2.1	Decisão multicritério	32
2.1.1	Medidas de similaridade.....	36
2.1.2	A problemática da classificação das alternativas	38
2.1.3	Aplicações em recursos hídricos e saneamento.....	47
2.2	Indicadores de sustentabilidade.....	54
2.2.1	Características e dimensões da sustentabilidade	57
2.2.2	Aplicações em recursos hídricos e saneamento.....	60
2.3	Teoria dos Jogos	68
2.3.1	Modelagem de jogos.....	71
2.3.2	Solução para jogos utilizando o equilíbrio de Nash	75
2.3.3	Aplicações em recursos hídricos e saneamento.....	80
2.4	Tomada de decisão em grupos.....	88
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	96
4	BIBLIOTECA DE TECNOLOGIAS	98
4.1	Escolha dos critérios.....	99
4.2	Definição das funções.....	100
4.3	Composição dos sistemas	108
5	MÉTODO MULTICRITERIAL	111
5.1	Criação da matriz de decisão	111
5.2	Normalização da matriz de decisão	112
5.3	Definição do perfil dos jogadores.....	114
5.4	Criação das matrizes de similaridades.....	117
5.5	Definição das estratégias	120
5.6	Criação das tabelas de pagamento	124
5.7	Solução do jogo com base no equilíbrio de Nash.....	126
6	APLICAÇÃO DO MÉTODO	130
6.1	Procedimentos iniciais.....	130

6.2	Síntese das etapas para a aplicação do método.....	133
6.3	Escolha de sistema de tratamento de esgoto.....	137
6.4	Comparação dos resultados	144
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	148
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154
	APÊNDICE A – Métodos multicritério mais conhecidos	161
	APÊNDICE B – Equilíbrio de Nash	166

1 INTRODUÇÃO

Para auxiliar os gestores das organizações em seu processo decisório, o emprego de modelos de apoio à tomada de decisão vem sendo utilizado desde a década de 1950, havendo forte ênfase na avaliação das questões econômico-financeiras e operacionais das alternativas em análise. Diversos métodos foram desenvolvidos com este objetivo, tendo sido a otimização matemática predominantemente utilizada no princípio, como o método da programação linear, chegando por fim à família de métodos multicritério incluindo *Elimination et Choice Traduisant la Realité* – ELECTRE (ROY, 1968), *Analytical Hierarch Process* – AHP (SAATY, 1980), *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* – PROMETHEE (BRANS; VINCKE, 1985), *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* – TOPSIS (HWANG; YOON, 1981), *Multiattribute Utility Theory* – MAUT (KEENEY; RAIFFA, 1976) entre outros (FARAHANI et al., 2010; KIKER et al., 2005; ZANAKIS et al., 1998).

A práxis da maioria desses modelos multicritério desenvolvidos teve como base o tomador de decisão como um indivíduo ao invés de um grupo (KOCHER; SUTTER, 2005). No entanto, a maior parte das decisões nas organizações, principalmente aquelas que envolvem problemas complexos como os ambientais, ocorrem na presença de vários agentes, ao invés de ocorrer no âmbito individual (MAASER, 2010). Assim, além do fato de exigirem considerável esforço de cada tomador de decisão, seja para a definição de pesos para os critérios, tais como a preferência, a indiferença e os limiares de veto, como nos métodos ELECTRE da escola francesa, ou pela extensiva comparação par a par entre as alternativas incluindo a especificação de vários parâmetros preferenciais, como no método AHP da escola americana (WANG; TRIANTAPHYLLOU, 2008; KARSAK; AHISKA, 2008; ZOPOUNIDIS; DOUMPOS, 2002; BUEDE; MAXWELL, 1995), estes métodos podem ter sua eficiência reduzida para apoiar decisões em grupo, pois não permite ao tomador de

decisão escolher qual é a melhor estratégia a adotar quando um conflito com outros agentes está sendo considerado (YUE, 2010; BUCHANAN; CORNER, 1997; SAMUELSON; ZECKHAUSER, 1988).

A possível utilização dos métodos multicriteriais até então desenvolvidos na tomada de decisão em grupos tem sido proposta com o auxílio da média aritmética ou geométrica. Este procedimento visa uma agregação entre as diferentes preferências de atendimento aos critérios definidos por cada tomador de decisão do grupo em um único vetor de pesos (MORAIS; ALMEIDA, 2012; BOLLOJU, 2001; FORMAN; PENIWATI, 1998). Todavia, Segundo Srdjevic (2007), esta agregação depende do pressuposto de que o princípio da homogeneidade entre os agentes é válido, ou seja, de que as preferências entre os membros do grupo não sejam significativamente diferentes. Além disto, apesar de ser uma prática comum, a agregação pode não representar o que cada um dos agentes envolvidos imagina como peso ideal para o critério, dissimulando assim os conflitos existentes.

Ao invés da agregação dos pesos para os critérios uma outra abordagem para o problema da escolha de alternativas em grupos seria considerar a opinião de todos os tomadores de decisão envolvidos no processo decisório (SRDJEVIC, 2007). Nesta outra abordagem, os pesos que os diferentes tomadores de decisão adotam para os vários critérios considerados na avaliação das alternativas representam suas preferências individuais. Em outras palavras, o processo de ponderação dos critérios poderia revelar o perfil de cada tomador de decisão em um ambiente onde os possíveis conflitos que emergem das diferentes preferências quanto ao atendimento aos diversos critérios da sustentabilidade fazem com que as escolhas sejam tratadas como interações estratégicas com outros agentes envolvidos, o que nos remeteria à Teoria dos Jogos.

Amplamente conhecida em vários campos da ciência, a Teoria dos Jogos foi consolidada pelo matemático Jon Von Neuman e pelo economista Oskar Morgenstern em

1944 no livro “A Teoria dos Jogos e o Comportamento Econômico” (NEUMAN; MORGENTERN, 1944), publicado pela Universidade de Princeton. A Teoria dos Jogos também é conhecida por ser uma teoria que trata das características gerais de situações competitivas que coloca ênfase nos processos de tomada de decisão dos jogadores (HILLIER; LIEBERMAN, 2006). Neste outro campo do conhecimento, ao invés de procurar por uma alternativa otimizada ou por aquela que melhor se posiciona em uma classificação, a Teoria dos Jogos é comumente aplicada para encontrar equilíbrios que potencializem um contrato entre os envolvidos, o que é frequentemente melhor do que um resultado otimizado para resolver conflitos entre os jogadores (CARRARO; MARCHIORI; SGOBBI, 2005; LAHDELMA et al., 2000; SIMON et al., 1987). Além disto, a Teoria dos Jogos é também conhecida por permitir a avaliação de diferentes cenários com diferentes alternativas, o que leva os jogadores a uma compreensão mais abrangente das possíveis soluções e, desta forma, motiva a escolha de alternativas que tenham maior chance de serem aceitas por outros jogadores de um grupo através da negociação (BLOUNT; BAZERMAN, 1996). Outro fato relevante é que, teoricamente, jogos permitem envolver diferentes tipos de jogadores que podem variar desde os que dão maior peso aos critérios econômicos, passando pelos que dão maior peso aos critérios ambientais, chegando aos que dão maior peso aos critérios sociais (STARKL; BRUNNER, 2004).

Portanto, a vantagem da aplicação da Teoria dos Jogos no processo de tomada de decisão em grupo seria que, dentre os conflitos que surgem devido aos diferentes pesos dados aos diversos critérios escolhidos para medir a sustentabilidade das alternativas, seria possível propor um equilíbrio envolvendo todas as dimensões do jogo aumentando as chances de se encontrar uma solução mais sustentável que satisfaça as preferências da maioria dos envolvidos.

Szidarovszky e Duckstein (1984) já demonstravam que os conceitos da Teoria dos

Jogos poderiam ser usados para desenvolver uma metodologia de solução para determinada classe de problemas multicritério e que seus pontos de equilíbrio seriam pontos de solução mínima, ou o resultado da escolha subjetiva do tomador de decisão (SZIDAROVSKY; DUCKSTEIN, 1984). Teclé, Fogel e Duckstein (1988) também apresentaram a resolução de um problema multicritério envolvendo a aplicação da Teoria dos Jogos.

Em estudo semelhante, Carraro et al. (2005) apontaram que muitos dos problemas ambientais são mais bem tratados dentro de uma abordagem de jogos, por meio da Teoria dos Jogos. Por exemplo, em muitas questões relacionadas à gestão de recursos naturais, as características de um jogo Dilema do Prisioneiro¹ estão presentes. Em outras questões a modelagem assume um jogo de puro conflito, no qual o pagamento a um indivíduo implica uma redução dos pagamentos de seus oponentes. Nestas situações, os jogadores devem encontrar uma estratégia para dividir os recursos de uma forma que seja aceitável para todas as partes (CARRARO; MARCHIORI; SGOBBI, 2005). Os autores concluíram que dada a complexidade dos processos e das questões ambientais, a Teoria dos Jogos tem um elevado potencial para ajudar no processo de encontrar um acordo plausível entre as partes envolvidas. Desta forma, a teoria permite apoiar o processo de negociação direta ou indiretamente, pelo encurtamento do período de tempo necessário para chegar a um acordo por meio da identificação teórica de um “espaço de aceitabilidade”, ou seja, a identificação das propostas que tenham maiores chances de serem aceitas pelo grupo e o prévio descarte das propostas que seriam quase ou certamente rejeitadas pelo grupo (CARRARO; MARCHIORI; SGOBBI, 2005).

Assim, se na modelagem tradicional os métodos multicritérios visam encontrar uma solução que maximize a utilidade dos tomadores de decisão ou, onde há uma incerteza,

¹ O jogo do dilema dos prisioneiros ilustra os processos de interação estratégica nos quais cada jogador, agindo por seus próprios interesses, conduzirá o resultado para uma situação pior do que agindo cooperativamente.

maximize sua utilidade esperada, na modelagem baseada na Teoria dos Jogos o objetivo seria encontrar um equilíbrio de Nash² (WEIRICH, 1998). No equilíbrio de Nash os jogadores têm o conhecimento sobre as estratégias dos seus concorrentes e escolhem 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 (NASH, 1951). Inúmeros pesquisadores têm dedicado suas pesquisas na busca de meios de se alcançar este equilíbrio em jogos através de algoritmos (PORTER et al., 2008). Por sua vez McKelvey et al. (2007) propuseram o *software* Gambit para encontrar a solução para jogos não-cooperativos. Este *software* inclui uma interface gráfica interativa para a construção e análise de jogos na forma extensiva ou na forma estratégica e um grande número de ferramentas para computar os equilíbrios de Nash ou outras soluções para os jogos.

Somado a este fato, principalmente após a publicação do Relatório de Brundtland “Nosso Futuro Comum”, pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, em 1987, e da realização da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED), em 1992, o conceito de sustentabilidade passou a ser incorporado na pauta das decisões da maioria das organizações no mundo inteiro (RAMETSTEINER et al., 2011). Assim, uma maior preocupação sobre os impactos a nível local e global das alternativas e a necessidade de melhorar os índices de qualidade de vida das populações, passou a exigir que os critérios utilizados na sua avaliação fossem ampliados e recebessem um balanceamento entre os aspectos ambientais, econômicos e sociais da sustentabilidade (MUGA; MIHELICIC, 2008). Este passou a ser um desafio para os tomadores de decisão que estão acostumados a medir o desempenho dos projetos apenas em termos econômicos, financeiros e físicos (MADANI, 2010).

² Definido pelo matemático John F. Nash Jr. (NASH, 1951) como o equilíbrio alcançado quando cada jogador adota sua melhor estratégia em resposta às estratégias dos demais jogadores.

Desta forma, o uso de métodos que considerem as questões relativas à sustentabilidade das alternativas é um assunto que tem despertado interesse. Este maior interesse proveio da necessidade da avaliação das alternativas considerando diferentes pontos de vista, tais como: impactos sociais e ambientais, restrições econômicas, legislação entre outros (BRUNNER; STARKL, 2004). Tal diversidade de fatores requer a aplicação de métodos que possam propor soluções aos conflitos que inevitavelmente surgem da necessidade de atender os diferentes critérios do problema, principalmente quando há mais de um agente envolvido no processo de escolha (MAKROPOULOS et al., 2008; SRDJEVIC, 2007; KIKER et. al., 2005).

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho foi propor um método multicriterial baseado no perfil de jogadores com suas diferentes preferências de atendimento aos critérios e modelar a interação estratégica que entre eles ocorre como um jogo no intuito de encontrar as alternativas que satisfaçam as condições do equilíbrio de Nash. Diferentemente dos tradicionais métodos multicritério que consideram apenas as decisões individuais dos tomadores de decisão, o método proposto neste trabalho modela o conflito de interesses no processo decisório em ambiente de um grupo. Além disto, incorpora as estratégias adotadas pelos tomadores de decisão para tentar estabelecer sua alternativa preferida, ou outra mais próxima dela, sem se utilizar da tradicional forma de agregação dos pesos.

Em um primeiro momento, uma tabela de pagamentos baseada na utilidade e na medida de similaridades entre todas as alternativas é criada com base no perfil de cada tomador de decisão. Em seguida, para tratar o conflito que surge da necessidade de atender concomitantemente cada critério, por exemplo, aumentar eficiência e diminuir custos, um espaço de aceitabilidade contendo os pagamentos das alternativas que satisfazem o equilíbrio de Nash é proposto para favorecer uma solução de compromisso. Finalmente, a principal contribuição deste trabalho é oferecer apoio à tomada de decisão em grupos por meio de um método multicritério proposto com a utilização da Teoria dos Jogos, considerando as

diferentes preferências de atendimento aos critérios da sustentabilidade sem se utilizar da agregação dos vetores de pesos. A figura 1.1 mostra onde o método proposto se encaixa dentro do estado da arte.

Figura 1.1 – Estado da arte e método proposto nesta pesquisa

Ao estabelecer um vínculo entre a tomada de decisão com a Teoria dos Jogos, as soluções do método aqui proposto são mais próximas das decisões da vida real, que tendem a dar preferência às soluções mais balanceadas entre os agentes envolvidos. Assim, o método visa proporcionar aos tomadores de decisão meios para se enxergar o mesmo problema sobre diferentes pontos de vista e, por meio da avaliação de diferentes cenários e critérios, poderia ampliar as possibilidades de agir estrategicamente nas decisões em grupo. Esta nova abordagem poderia tornar mais eficiente o processo da tomada de decisão para a escolha da alternativa que mais se aproxime dos conceitos de sustentabilidade.

1.1 Justificativa

Devido à integração de diferentes aspectos da sustentabilidade na solução de

problemas complexos, principalmente os ligados ao saneamento, estudos acadêmicos têm demonstrado a necessidade do uso de métodos adequados para auxiliar neste tipo de decisão.

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 tradicionais 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 Americano – *U.S. Army Corps of Engineers* (COE) – e a Agência de Proteção Ambiental – *Environmental 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.

No Brasil, os primeiros trabalhos remontam da década de 1980, quando foi demonstrada pela primeira vez uma preocupação sobre a questão ambiental, com a criação da Secretaria Especial do Meio Ambiente (SEMA) e da avaliação de impactos com o intuito de planejar o ambiente, através da criação do Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA) e do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (ZUFFO, 1998). Até recentemente, diversos métodos foram desenvolvidos no mesmo sentido.

Como uma contribuição de um modelo que prioriza a otimização de custo, Oliveira (2004) desenvolveu um modelo que utiliza as técnicas de análise de sensibilidade e árvore de decisão para auxiliar a escolha de uma estação de tratamento mais econômica para municípios. Esse modelo, composto por oito planilhas de cálculo de diferentes sistemas de

tratamento, com cada um dos oito sistemas possuindo uma planilha geral com o dimensionamento do primeiro processo (anaeróbio), seguido do dimensionamento do segundo processo (aeróbio), faz a estimativa dos custos de cada um dos oito sistemas. Dados específicos do município em estudo, como população estimada, vazão de esgoto, classe do rio receptor, dentre outros, podem ser inseridos em uma planilha única utilizada pelos oito sistemas. A alternativa de menor custo trazido a valor presente é apresentada por meio de uma árvore de decisão.

O modelo Oliveira (2004) foi avaliado e validado por Leoneti (2009), que o considerou adequado para realizar estudos de planejamento em bacias-hidrográficas e em projetos de concepção de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), considerando os cálculos dos custos de implantação apresentados pelo modelo. Por fim, o modelo recebeu o nome de ETEX e foi utilizado por Oliveira (2009) para estimar os gastos para a implantação de sistemas de tratamento de esgoto em 5539 municípios brasileiros.

Como exemplo de um método que prioriza os critérios ambientais, cita-se o modelo proposto por Giannetti et al. (2006) que desenvolveram um procedimento para tomada de decisão em processos ambientais baseado em diagramas ternários e balanço de *emergia*³. É um modelo que pode ser adaptado para avaliação de ETEs e que gera índices de emergia e representa graficamente as vantagens e desvantagens entre os sistemas avaliados.

Fora do Brasil o uso de modelos para análise de custos de tratamento de águas residuárias também é um assunto que, há algum tempo, tem despertado interesse conforme foi observado na literatura.

Fraas (1982) propôs equações de regressão, baseadas em parâmetros fornecidos pela

³ Emergia é o conceito introduzido por Odum (1996) que representa “a soma de todas as entradas de energia necessárias, diretamente ou indiretamente, para a produção de qualquer produto ou serviço” (GIANNETTI et.al, 2006, p. 202). É um sistema de medida, de base científica, para representar valores ambientais e econômicos.

EPA, para estimar o custo marginal da remoção de cada um dos poluentes encontrados no afluente das estações de tratamento de esgoto em municípios dos Estados Unidos. Estas equações foram desenvolvidas a partir das relações entre os custos envolvidos na remoção de cada um desses poluentes e suas respectivas concentrações no efluente final com a finalidade de se encontrar um nível adequado de eficiência ao menor custo possível.

Vanrolleghem et al. (1999) e Gillot et al. (1999) desenvolveram procedimentos de simulação para auxiliar no projeto de estações de tratamento de águas residuárias, incorporando ao processo funções custo de instalação e operação. As funções custo foram estabelecidas para a região de Flandres, Bélgica, considerando-se volumes e vazões para custo de investimento, população equivalente e volumes para custos operacionais fixos e volumes, vazões, taxas de transferência de oxigênio, lodo em excesso e características físico-químicas do esgoto para determinar os custos operacionais variáveis. A simulação da operação da ETE foi feita para regime permanente e para estado dinâmico empregando o simulador WEST++ . Os resultados dessa simulação foram empregados como entrada no modelo de custo operacional. Para estudar a aplicação do procedimento de projeto os autores determinaram o impacto da concentração de nitrogênio sobre o custo de tratamento em uma instalação industrial.

Na etapa de simulação operacional Vanrolleghem et al. (1999) e Gillot et al. (1999) investigaram se uma estação de menor porte, portanto de menor custo de instalação, seria capaz de tratar a águas residuais com a máxima concentração de nitrogênio esperada, concluindo que a menor ETE permitiria atingir os requisitos legais. Quando os custos de operação foram incorporados à simulação, o modelo econômico mostrou que, considerando-se o investimento total ao longo da vida esperada da estação, a ETE de maior porte seria mais econômica se as cargas de nitrogênio se mantivessem sempre elevadas. É um resultado importante, pois mostra que a intuição pode falhar em casos como esse, visto que o esperado

seria que a menor ETE mantivesse também o menor custo operacional.

Um problema que constantemente é mencionado em estudos econômicos é a incerteza na estimativa dos custos de construção de estações de tratamento de águas residuárias. Esse problema foi estudado por Chen e Chang (2002) que aplicaram três métodos de estimação de custo de construção: método convencional de regressão por mínimos quadrados, método de regressão linear usando lógica *fuzzy* e método de regressão usando lógica *fuzzy* com objetivo. Com uma coleção de dados obtidos em 48 estações de tratamento de esgoto doméstico e 29 industriais, todas localizadas em Taiwan os autores concluíram que o método de regressão empregando lógica *fuzzy* com objetivo, em geral, fornece resultados com maior precisão, quando comparado com as outras técnicas. O estudo mostrou que as incertezas podem ser grandes, portanto chegam a interferir no processo de decisão quando se avalia a escolha entre sistemas centralizados e descentralizados sem elaboração dos projetos completos, o que é o procedimento usual nos estudos preliminares. Há indicação por parte dos autores da necessidade de uma avaliação mais ampla nestes casos. Os modelos também confirmaram que existe economia de escala, com efeito moderado, tanto para estações de tratamento de esgoto doméstico quando industriais.

Finalmente, merecem citação os trabalhos de Malik e Datta (2005); Huang et al. (2006); Fine, Halperin e Hadas (2006) e Lawhon e Schwartz (2006). Os primeiros avaliaram a viabilidade de o setor privado investir em estações de tratamento de efluentes na Índia. No entanto, os autores restringiram o estudo apenas ao caso de instalações industriais, o que diminui significativamente a abrangência dos resultados, em especial considerando-se o projeto aqui proposto. Por sua vez, Huang e colaboradores elaboraram, para o caso de um distrito residencial na China, uma análise de otimização de uso de um sistema descentralizado de tratamento de água com posterior reuso. Fine, Halperin e Hadas (2006) e Lawhon e Schwartz (2006) examinaram, para a situação existente em Israel, o custo de alternativas para

melhora da qualidade de água residuária tratada considerando o reuso. Para os primeiros autores, seria um desperdício de recursos tratar todos os efluentes até os níveis requeridos para irrigação irrestrita enquanto Lawhon e Schwartz (2006) mostram que o tratamento pode ser feito, mas que é necessária uma compensação econômica para os fazendeiros. Esses trabalhos mostram aspectos que devem ser considerados quando se faz um estudo que envolva a economia e a sustentabilidade de sistemas de tratamento de águas residuárias.

Assim, na medida em que os problemas se tornam complexos, a utilização de apenas um critério, por exemplo, o econômico, pode levar o tomador de decisão a uma escolha que não seja a mais adequada, dissimulando outras possibilidades de arranjos que sejam tão ou mais adequados, quando levados em consideração outros aspectos. Dentre outros fatores, a preferência dada à utilização de critérios econômicos em detrimento de outros tipos de critérios é em grande parte devido à: não divisibilidade dos recursos (ex. rio); não exclusividade dos recursos (ex. pesca no rio); intangibilidade dos recursos (ex. contribuições dos pântanos para a estabilização climática); e, principalmente, por não serem facilmente identificados os direitos de propriedades dos recursos (ex. direitos de propriedades de um ecossistema ribeirinho) (XENARIOS; BITHAS, 2007).

Todavia, os modelos de apoio à tomada de decisão, que se baseiam apenas nos critérios econômicos e/ou técnicos deveriam evoluir para sistemas que utilizam mais critérios e procedimentos apropriados para a sua resolução (CHEN; JAKEMAN; NORTON, 2008). Segundo Butlera e Schutze (2005), este tipo de modelagem permite a construção de vários cenários e seus respectivos impactos no ambiente para que sejam estudados sem ter que, em escala real, alterar o sistema. Além disto, como enfatiza Huesemann (2001), tanto o princípio de conservação de massa quanto a segunda lei da termodinâmica impõem como resultado de qualquer ação, inclusive as de remediação, que ocorram impactos ambientais negativos. Assim, seria de esperar que a questão de sustentabilidade ambiental recebesse uma maior

atenção, o que somente é possível dentro de uma abordagem multicriterial.

A abordagem multicriterial, ou multicritério, é aquela que permite avaliar um problema incorporando seus diversos e diferentes aspectos (GOMES; GOMES; ALMEIDA, 2006). No entanto, esta abordagem multicriterial, de maneira inevitável, irá também exigir a solução de conflitos, que surgem devido às diferentes exigências de cada critério. Por exemplo, para sistemas de tratamento de esgoto, atender os critérios econômicos e ambientais significa escolher o sistema de menor custo possível considerando a maior eficiência requerida legalmente, ou seja, dentro de um contexto micro econômico existe um conflito óbvio entre a eficiência do tratamento e o seu custo (FRAAS, 1984). A tomada de decisão em grupos com auxílio do equilíbrio de Nash (1951) poderia ser aplicada para propor uma solução de compromisso, que atendesse as expectativas de todos os envolvidos, ao invés de uma solução otimizada. Segundo Shimizu (2004, p. 64) “não existe uma solução ótima que satisfaça plenamente a todos os objetivos ou critérios considerados”.

Desta forma, a aplicação da Teoria dos Jogos em conjunto com o equilíbrio de Nash (1951) visa alcançar uma maior aproximação dos modelos de tomada de decisão com a realidade complexa que envolve a escolha de um sistema de tratamento de esgoto sanitário para municípios. Esta aproximação poderia ser alcançada ao tratar este processo de escolha como um processo de escolha em grupo, ao invés de uma escolha individual, geralmente proposta pelos métodos de tomada de decisão multicritério. Esta nova abordagem também permite diminuir a resistência na adoção de novas tecnologias por parte dos projetistas, uma vez que existe uma tendência em utilizar soluções recorrentes, o que é enfaticamente não recomendável para a escolha de sistemas de tratamento de esgoto, visto que cada caso é muito específico, possuindo muitas características particulares.

Dentro deste contexto, esta pesquisa visa contribuir para quebrar o paradigma da busca pela eficiência baseada nos critérios formados pelo binômio técnico e econômico para a

escolha de sistemas de tratamento de esgoto, o qual leva os projetistas a terem receios em mudarem suas soluções para novos projetos, pois os projetos mais utilizados possuem, teoricamente, operações mais controladas do que os demais.

Com o método aqui proposto, espera-se que os projetistas possam usufruir de um método que lhes permita adotar novas soluções tecnológicas com base no equilíbrio de Nash (1951), o que é uma solução capaz de lidar adequadamente com os diversos critérios da sustentabilidade. Assim, buscando clarificar o processo de tomada de decisão, o entrelaçamento de diversos critérios, sendo tratados sob diferentes enfoques, poderia contribuir para o aprimoramento das decisões, principalmente aquelas relacionadas ao setor de saneamento no Brasil, refletindo, assim, na qualidade de vida da população.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa foi propor um método multicriterial, baseado em indicadores de sustentabilidade, técnicos, econômicos, ambientais e sociais, em conjunto com a Teoria dos Jogos e o equilíbrio de Nash, para auxiliar na resolução de conflitos que emergem na escolha de alternativas, considerando o processo de escolha como um processo de decisão em grupos. O desenvolvimento do método foi realizado no âmbito do processo de tomada de decisão para a escolha de ETEs. Os objetivos específicos foram: (i) avaliar modelos e métodos de apoio à tomada de decisão multicritério quanto à sua adequação para a tomada de decisão em grupos; (ii) identificar indicadores e critérios de sustentabilidade de ETEs; (iii) selecionar funções para estimar cada critério; (iv) criar vetores de pesos para os critérios que representem os diferentes agentes envolvidos na tomada de decisão; (v) definir uma função de pagamentos para a tabela de pagamentos do jogo; (vi) selecionar um algoritmo ou *software* para encontrar o equilíbrio de Nash; (vii) propor um método para apoio no

processo de tomada de decisão em grupos.

1.3 Estrutura do trabalho

O Capítulo 2, “Revisão Bibliográfica”, está relacionado com o primeiro objetivo específico e foi dividido em quatro partes. Na primeira delas, uma breve introdução aos métodos de tomada de decisão multicritério é seguida de argumentos sobre as principais deficiências dos mesmos quando são utilizados para as decisões em grupos e quanto à inconsistência aos seus procedimentos para a classificação de alternativas. Aplicações na área de recursos hídricos e saneamento podem ser vistas na sequência.

A segunda parte começa com uma introdução ao conceito de sustentabilidade e uso de indicadores para auxiliar em sua avaliação; segue também com a apresentação de algumas aplicações na área de recursos hídricos e saneamento. A terceira parte trata sobre a integração da Teoria dos Jogos com a tomada de decisão multicritério, além de possíveis aplicações do equilíbrio de Nash (1951) para a resolução de problemas ambientais, sendo alguns específicos para a área de recursos hídricos e saneamento.

Por fim, a quarta parte do Capítulo 2 aborda a tomada de decisão em grupos, expondo os principais desafios e requisitos necessários para que um método de tomada de decisão multicritério seja utilizado nos processos de decisão envolvendo diferentes agentes e considerando o conflito entre eles. Também são citados exemplos e aplicações.

Em seguida, nos capítulos 3, 4 e 5, o método de tomada de decisão proposto nesta pesquisa é apresentado. Esta apresentação foi dividida da seguinte forma: no Capítulo 3, encontram-se, de forma geral, os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa, que foram expandidos nos dois capítulos posteriores. Especificamente, no Capítulo 4 “Biblioteca de Tecnologias”, além dos aspectos metodológicos, é apresentado um indicador de

sustentabilidade que foi proposto com base nos principais indicadores utilizados para medir o desempenho de ETEs, o que contempla o segundo e o terceiro objetivos específicos. Por fim, no Capítulo 5 “Método Multicriterial”, os indicadores e suas respectivas funções de valores são apresentados como base para a construção do método multicriterial, com seus respectivos vetores, função de pagamentos e sua incorporação ao *software* Gambit, que atendem ao quarto, quinto e sexto objetivos específicos, respectivamente.

Na parte final do trabalho (Capítulo 6), um exemplo e a forma de aplicação do método são apresentados, atendendo, enfim, ao último objetivo específico da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Decisão multicritério

No “mundo real” os problemas geralmente são complexos e multi-dimensionais, além de envolverem diversos conflitos entre os agentes que participam da tomada de decisão. Assim, quando o tomador de decisão necessita considerar diversos critérios para avaliar um conjunto finito de alternativas que foram selecionadas para a resolução de um determinado problema, pode-se afirmar que ele se encontra em um processo de decisão multicritério.

A decisão multicritério é distinta da decisão com um único critério basicamente pelo fato de que, enquanto nesta última as alternativas são tratadas como restrições nas variáveis de decisão, na decisão multicritério as diversas alternativas devem ser analisadas com base em critérios que representam os diversos aspectos de um mesmo problema, sendo o conflito parte fundamental de sua natureza (GOMES; GOMES; ALMEIDA, 2006). Portanto, a decisão multicritério se caracteriza como a situação na qual um tomador de decisão deve priorizar ou selecionar uma ou mais alternativas a partir de um conjunto finito de soluções possíveis, em função do atendimento aos critérios selecionados, geralmente conflitantes.

De acordo com Ensslin et al. (2001), métodos para auxiliar a tomada de decisão multicritério são desenvolvidos utilizando basicamente dois paradigmas: o construtivista ou o racionalista. Para Ensslin et al. (2001), métodos construídos com base no paradigma construtivista procuram reconhecer a importância da subjetividade dos decisores, pois consideram que os valores que os tomadores de decisão possuem são capazes de condicionar a formação dos seus objetivos, interesses e aspirações. Já os métodos construídos com base no paradigma racionalista consideram que os tomadores de decisão são racionais, ou seja, que possuem o mesmo nível e tipo de conhecimento e que raciocinam da mesma forma lógica. O quadro 2.1 apresenta as principais diferenças na modelagem baseadas nestes dois paradigmas.

	Construtivista	Racionalista
Usuário	Facilitador	Analista
Característica	Apoio à tomada de decisão	Tomada de decisão
Modelos	Visam ser ferramenta de comunicação	Visam representar a realidade
Resultados	Atendem objetivos e valores (recomendação)	Solução ótima (prescrição)
Objetivo	Geração de conhecimento (separar conclusões robustas de conclusões frágeis)	Encontrar solução ótima (aceitar ou rejeitar a solução)
Validade	Respaldo de uma comunidade científica	Tão mais válido quanto mais próximo da realidade

Quadro 2.1 – Principais diferenças entre o paradigma construtivista e racionalista

Fonte: adaptado de Ensslin et al. (2001)

Não obstante as diferenças existentes, em ambos os casos a modelagem dos problemas multicritério pode ser idealizada com o auxílio de uma matriz envolvendo as alternativas disponíveis e critérios selecionados. Esta matriz é conhecida como matriz de decisão e geralmente é normalizada e posteriormente ponderada, por meio de sua multiplicação por um vetor de pesos. Este vetor de pesos define as preferências do tomador de decisão para o atendimento aos critérios que considera mais importante. A figura 2.1 apresenta a estrutura geral deste tipo de modelagem.

Figura 2.1 – Estrutura geral da modelagem tradicional de problemas multicritério

Detalhadamente, de acordo com Baker et al. (2001), a modelagem de problemas multicritério pode ser mais bem descrita em oito etapas: (i) definição do problema; (ii) determinação das condições mínimas que a solução deve atender; (iii) estabelecimento dos objetivos que a solução deve alcançar; (iv) identificação das alternativas que poderiam

solucionar o problema; (v) definição dos critérios com base nos objetivos; (vi) seleção de um método para o auxílio na tomada de decisão; (vii) aplicação do método para selecionar a alternativa mais adequada; (viii) avaliação das alternativas propostas.

Baker et al. (2001) complementam afirmando que os critérios, também conhecidos como atributos, são selecionados para discriminar as alternativas e, por isto, devem medir o grau em que cada alternativa satisfaz os objetivos. Desta forma, cada objetivo deve ser representado por, pelo menos, um critério, que por sua vez deve possuir capacidade para discriminar as alternativas e apoiar a comparação do desempenho das mesmas, sendo significativo, não redundante e em número reduzido. Consequentemente, o objetivo global da decisão multicritério é priorizar todas as alternativas de decisão no que diz respeito ao seu desempenho com base nos critérios.

Desta forma, é uma característica fundamental dos métodos multicritério o tratamento dispensado para a normalização dos critérios selecionados, visto que, em sua maioria, possuem diferentes escalas de medida entre si. Além disto, na avaliação multicritério as alternativas são geralmente descritas através de critérios quantitativos e qualitativos, o que torna a normalização indispensável para obter escalas comparáveis.

Dado a complexidade no tratamento dos critérios, Baker et al. (2001) argumentam que melhores resultados podem ser alcançados quando todos os envolvidos em um processo decisório utilizam um método de tomada de decisão claramente definido e reconhecido para auxiliar nesta tarefa. Para os autores, a maioria das decisões para problemas cotidianos é baseada na intuição e até podem produzir resultados aceitáveis, pois envolvem poucos tomadores de decisão e objetivos. No entanto, para cenários mais complexos, a maioria das decisões envolve diversos tomadores de decisão, múltiplos objetivos, e estão sujeitas à avaliação externa, fazendo com que seja de fundamental importância a utilização de métodos multicritério de apoio à tomada de decisão para apoiar os decisores em suas escolhas.

Porto e Azevedo (1997) também enriquecem os argumentos afirmando que indivíduos solucionam problemas a partir de informações, que permitem conhecer melhor uma determinada situação, e métodos, que permitem determinar quais são as variáveis de um determinado problema e como elas se interagem. No entanto, os autores ressaltam que estes métodos não visam substituir o tomador de decisão, mas sim apoiar um indivíduo ou grupo de indivíduos na execução desta tarefa (PORTO; AZEVEDO, 1997).

Diversos métodos têm sido propostos para auxiliar no processo de tomada de decisão, sendo os mais conhecidos os métodos multicritério apresentados no quadro 2.2, que possuem uma descrição complementar no Apêndice A.

Nome	Autores	Fundamentos
Elimination et Choice Traduisant la Realité (ELECTRE) / Eliminação e escolha que traduz a realidade	Roy (1968)	A abordagem ELECTRE é baseada nos índices de concordância e discordância definidos entre as alternativas
Analytical Hierarchy Process (AHP) / Método de Análise Hierárquica	Saaty (1980)	A idéia básica da abordagem é converter avaliações subjetivas a um conjunto de escores globais ou pesos
Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE) / Método de organização de preferências para o enriquecimento de avaliações	Brans e Vincke (1985)	O objetivo é maximizar o valor da classificação das alternativas selecionadas, enquanto elas são viáveis aos tomadores de decisão
Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) / Técnica para ordem de preferências pela similaridade ideal	Hwang e Yoon (1981)	Decisão orientada com base em medidas de distância de uma solução ideal e uma solução ideal negativa
Multiattribute Utility Theory (MAUT) / Teoria da Utilidade Multiatributo	Keeney e Raiffa (1976)	Leva em consideração as preferências do tomador de decisão na forma da função utilidade que é definida por um conjunto de atributos

Quadro 2.2 – Métodos multicritérios mais conhecidos

Fonte: ROY, B. Classement et choix en présence de points de vue multiples: La méthode ELECTRE. Revue Francaise d'Informatique et de Recherche Opérationnelle, (1968); SAATY, T.L. The Analytic Hierarchy Process, New York, NY, USA: McGraw Hill, (1980); BRANS, J.P.; VINCKE, P.H. A preference ranking organization method, Management Science, (1985); HWANG, C.L.; YOON, K. Multiple attribute decision making: methods and applications. New York, NY, USA: Springer, (1981); KEENEY R, RAIFFA H Decision with multiple objectives: preferences and value tradeoffs. Wiley, New York, (1976)

De forma geral, segundo Brunner e Starkl (2004), estes métodos de apoio devem ser compatíveis com alguns princípios para auxiliar de forma eficiente no processo de tomada de

decisão, a saber: (i) anonimato, a ordem em que os decisores são considerados não deve afetar o resultado final da avaliação; (ii) neutralidade, a ordem na qual as alternativas são consideradas não deve afetar o resultado final da avaliação; (iii) integralidade, cada alternativa pode ser comparada com uma outra a partir de seus impactos; (iv) *explicabilidade*, a comparação deve ser baseada em uma relação global do impacto de cada projeto; (v) critério de Pareto, se A é melhor do que B então A é melhor do que B em pelo menos um critério e nunca pior em outros; e (vi) transitividade, se A é melhor do que B e B é melhor do que C, então A é melhor do que C.

2.1.1 Medidas de similaridade

No contexto da avaliação multicritério, a medida de similaridade é um ponto crítico utilizado em diversos métodos multicritério de apoio a tomada de decisão. Exemplos de aplicação são encontrados na família de métodos multicritério ELECTRE, os quais utilizam funções próprias para medir a similaridade entre as alternativas com base em escalas para o veto e a preferência entre elas.

Segundo Deng (2007), outro exemplo de abordagem é a técnica da preferência pela ordem de semelhança com a solução ideal (TOPSIS). Deng (2007) descreve que a abordagem TOPSIS foi desenvolvida com base na percepção de que uma alternativa preferencial deve ser a mais próxima da solução ideal positiva e a mais distante da solução ideal negativa. No entanto, em algumas circunstâncias, os resultados propostos por este método podem ser controversos, pois erros de percepção podem ocorrer durante a comparação entre as alternativas simplesmente considerando a distância entre elas e a solução ideal. Matematicamente, a proximidade entre cada alternativa e a solução ideal seria mais bem representada pela magnitude das alternativas e do grau de conflito entre eles (DENG, 2007).

Desta forma, como solução ao problema encontrado no método TOPSIS, Deng (2007) propôs nova abordagem também baseada na similaridade entre as alternativas para resolver problemas da análise multicritério. Todavia, diferentemente do método TOPSIS, o novo método emprega o gradiente das alternativas e sua magnitude como índice de desempenho global de cada alternativa para todos os critérios. Uma análise comparativa entre a abordagem TOPSIS e a nova abordagem proposta foi realizada para demonstrar a sua capacidade de resolução de problemas de análise multicritério discretos.

Primeiramente, Deng (2007) sugere que existem várias maneiras de representar o conflito entre duas alternativas em problemas de análise multicritério. Dentre elas, Deng (2007) sugere que o conceito de gradiente poderia representar o conflito entre alternativas em problemas de análise multicritério considerando o ângulo formado entre elas. Por exemplo, supondo-se que A_i e A_j sejam duas alternativas em análise, assumindo que estas duas alternativas sejam dois vetores no espaço n -dimensional real, o ângulo entre A_i e A_j no espaço n -dimensional real proporcionaria uma boa medida do conflito entre elas.

Com base nesta premissa, Deng (2007) propõe seu método seguindo a abordagem de análise multicritério de alternativas de classificação combinando o gradiente das alternativas e suas magnitudes. O conceito principal deste método é que a alternativa preferível tenha o maior grau de similaridade com a solução ideal positiva e o menor grau de semelhança com a solução ideal negativa. A solução ideal (positiva ou negativa) consiste naquela que possui os melhores e piores valores para cada critério respectivamente (DENG, 2007).

Segundo Deng (2007) o conceito da solução ideal tem sido amplamente utilizado em vários modelos de análise multicritério para a resolução de problemas de decisão. Isto se deve principalmente pela simplicidade e clareza do conceito, além de sua eficiência computacional e capacidade de medir o desempenho entre as alternativas de uma forma matemática simples (DENG, 2007).

Resumidamente, o método de análise multicritério proposto por Deng (2007) pode ser representado por um algoritmo de nove passos: (i) determinação da matriz de decisão; (ii) determinação dos vetores de peso; (iii) normalização da matriz de decisão; (iv) cálculo da matriz de desempenho; (v) determinação da solução ideal positiva e negativa; (vi) cálculo do índice de conflito entre as alternativas (cálculo do ângulo); (vii) cálculo do grau de semelhança entre as alternativas e a solução ideal positiva e negativa; (viii) cálculo do índice de desempenho global de cada alternativa em todos os critérios; e (ix) ordenação das alternativas de forma decrescente (DENG, 2007).

Finalmente, o método proposto foi testado e comparado com o TOPSIS para um caso de compras de caças a jato nos Estados Unidos da América (EUA). Pelo método TOPSIS a comparação das alternativas não pôde ser determinada unicamente pela distância entre as mesmas. Já pelo método desenvolvido por Deng (2007), o grau de semelhança entre as alternativas e a solução ideal foi suficientemente adequado para obter um índice de desempenho global para cada alternativa. Desta forma, o autor defende que a abordagem proposta poderia ser uma opção de uso prático para a resolução de problemas de decisão multicritério.

2.1.2 A problemática da classificação das alternativas

No âmbito da modelagem multicritério, além do problema da similaridade entre as alternativas, também se destaca o problema na classificação das alternativas, que ocorre recorrentemente em diferentes métodos e acarreta em problemas quanto à consistência e robustez da classificação.

Buede e Maxwell (1995) já tinham identificado problemas quanto à classificação final das alternativas analisadas dentro dos modelos multicritérios mais conhecidos. Segundo os

autores, embora os métodos clássicos tenham sido desenvolvidos com base em uma série de diferentes teorias e algoritmos para ajudar os tomadores de decisão a identificar e selecionar a melhor alternativa, eles estão baseados na suposição de que os tomadores de decisão têm o desejo de sempre fazer escolhas racionais, que seria escolher a melhor alternativa disponível, considerando o conjunto de critérios de avaliação (BUEDE; MAXWELL, 1995).

Assim, na pesquisa realizada, Buede e Maxwell (1995) escolheram os métodos MAUT, AHP, o TOPSIS e um algoritmo difuso para verificar se existiam diferenças no resultado em suas aplicações. Segundo os autores, os métodos selecionados possuem duas características comuns: exigem do tomador de decisão um conjunto de dados que contém unidades de medida e pesos diferentes; e produzem classificação das alternativas com a indicação da melhor dentre elas (BUEDE; MAXWELL, 1995).

Buede e Maxwell (1995) levantaram a hipótese de que haveria um risco de erro na má aplicação desses algoritmos. Os autores encontraram na literatura a menção de problemas na ordem de classificação de métodos como o AHP e o MAUT, os quais demonstraram divergências na ordenação das alternativas. Foi então, pelos autores realizada uma série de experiências de simulação que permitiram comparar as melhores opções indicadas por cada um dos algoritmos.

As experiências demonstraram que os métodos MAUT e AHP muitas vezes identificam a mesma alternativa como a melhor. No entanto, as outras técnicas são visivelmente menos consistentes, sendo o algoritmo difuso o pior de todos eles. As situações em que ocorreram as diferenças mais significativas nas respostas foram frequentemente associadas à problemas de classificação dos métodos (BUEDE; MAXWELL, 1995).

Em pesquisa similar, Zanakis et al. (1998) também notaram que diferentes técnicas produzem classificações diferentes quando aplicadas ao mesmo problema, aparentemente sob as mesmas premissas e por um único tomador de decisão. Segundo os autores, esta

inconsistência nos resultados ocorre por que: (i) as técnicas usam o cálculo dos pesos de forma diferente em seus cálculos; (ii) os algoritmos diferem em sua abordagem para selecionar a melhor solução; (iii) muitos algoritmos tentam medir os objetivos, o que afeta os pesos já escolhidos; (iv) alguns algoritmos introduzem parâmetros adicionais, que afetam a solução que será escolhida. Além disto, esta situação pode ser agravada pelas diferenças inerentes ao processamento de informações entre diferentes tomadores de decisão, mesmo sob preferências semelhantes (ZANAKIS et al., 1998).

Assim, segundo Zanakis et al. (1998), a grande variedade de técnicas disponíveis com complexidade e soluções variáveis confunde os potenciais usuários. Em princípio, vários desses métodos multicritério podem parecer adequados para um problema de decisão particular. Assim, segundo os autores, o tomador de decisão deve enfrentar primeiramente a tarefa de selecionar o método mais adequado dentre os vários possíveis.

De acordo com Zanakis et al. (1998), os usuários poderiam comparar estes métodos considerando diferentes dimensões, tais como simplicidade, confiabilidade, robustez e qualidade de cada um. No entanto, uma extensa revisão bibliográfica revelou aos autores que apenas um número limitado de obras foi dedicado para comparar a integração dos diferentes métodos. Além disto, os poucos trabalhos encontrados possuem as seguintes limitações e desvantagens: o tamanho da amostra e a gama de problemas estudados são muito pequenos; os agentes dificilmente são tomadores de decisão reais; a forma como a informação é induzida influencia os resultados mais do que o modelo utilizado; e a existência de vieses do efeito de aprendizagem, especialmente quando um sujeito emprega vários métodos em sequência.

De qualquer forma, Zanakis et al. (1998) concordam que é muito difícil responder a perguntas como: que método é mais apropriado para o tipo de problema? Quais são as vantagens e desvantagens de utilizar um método ao invés de outro? Será que há uma mudança de decisão quando diferentes métodos são utilizados? Se sim, por que e em qual medida?

Portanto, com base em uma matriz de decisão de entrada de “n” pesos de critérios e avaliações das “l” alternativas em cada critério, o problema de pesquisa consistiu na realização da comparação do desempenho entre alguns métodos multicritério para auxiliar na escolha por parte dos tomadores de decisão.

Por meio de simulações, foram investigados os desempenhos de oito métodos: ELECTRE, TOPSIS, produto ponderado, soma ponderada e quatro versões do AHP (original, escala geométrica, autovetor à direita e transformação média). As soluções foram analisadas utilizando doze medidas de similaridade de desempenho. Semelhanças e diferenças no comportamento dos métodos foram investigadas. Os parâmetros de simulação foram os números de alternativas e critérios (ZANAKIS et al., 1998).

Como resultado, Zanakis et al. (1998) identificaram que as diferenças derivadas dos diferentes pesos para os critérios tornam-se ainda mais fortes em problemas com poucas alternativas. No entanto, a classificação final das alternativas variou mais em problemas com muitas alternativas. Portanto, a distribuição dos pesos entre os critérios afeta menos as medidas de desempenho do que o número de alternativas ou o número de critérios. Contudo, ela afeta diferentemente nos métodos analisados.

Em geral, todas as versões AHP se comportam de forma semelhante e mais perto da soma ponderada que os outros métodos. O ELECTRE é o menos semelhante à soma ponderada, seguido pelo produto ponderado. O TOPSIS comporta-se mais parecido com o AHP e mais diferente do ELECTRE e do produto ponderado, exceto para problemas com poucos critérios. O número de critérios teve pouco efeito sobre o AHP, o ELECTRE e o produto ponderado. A classificação do TOPSIS tornou-se mais diferente quando o número de pesos para os critérios aumentava (ZANAKIS et al., 1998).

Com base nos resultados alcançados, Zanakis et al. (1998) afirmam que esses métodos devem auxiliar o usuário a aprender mais sobre o problema e as soluções possíveis para se

chegar à decisão final. Assim, esses métodos multicritério não podem ser considerados como uma ferramenta para descobrir uma verdade objetiva. Além disto, métodos multicritério não devem ser considerados como técnicas de única passagem, sem que haja uma análise da robustez dos resultados *a posteriori* (ZANAKIS et al., 1998).

Em trabalho semelhante, Zopounidis e Doumpos (2002) citam quatro diferentes tipos de análises que podem ser realizadas a fim de proporcionar apoio aos tomadores de decisão: (i) escolher a melhor alternativa ou selecionar um conjunto limitado das melhores alternativas; (ii) ordenar as alternativas, da melhor para as piores; (iii) classificar as alternativas em grupos homogêneos; (iv) identificar as principais características distintivas das alternativas e executar sua descrição com base nestas características.

De acordo com Zopounidis e Doumpos (2002), das três primeiras abordagens, escolher ou ordenar dependem do conjunto de alternativas consideradas, pois são baseadas em juízos relativos, enquanto a classificação requer uma comparação com perfis de referência. A ampla gama de aplicações no mundo real para a abordagem de classificação de um problema constituiu na principal motivação dos pesquisadores no desenvolvimento de metodologias para a construção de modelos de classificação e ordenação.

Em seu trabalho, Zopounidis e Doumpos (2002), estudaram o desenvolvimento de modelos de classificação e ordenação e verificaram sua forte relação com a pesquisa operacional e técnicas de inteligência artificial. A pesquisa verificou os diferentes aspectos no desenvolvimento desses modelos e seus processos de validação e o uso dessas metodologias de classificação e ordenação para analisar problemas do mundo real para fornecer apoio à decisão.

Com base nos resultados da pesquisa, Zopounidis e Doumpos (2002) argumentaram que os métodos multicriteriais não deveriam ser desenvolvidos apenas com base em procedimentos automáticos para a classificação ou ordenação de alternativas. Ao invés disto,

esses métodos deveriam possibilitar uma modelagem de preferências, a qual permitisse incorporar as preferências dos tomadores de decisão no processo de classificação do modelo (ZOPOUNIDIS; DOUMPOS, 2002).

Zopounidis e Doumpos (2002) ainda identificaram que, no desenvolvimento de um modelo multicritério de classificação, a necessidade de especificar valores para os diversos parâmetros preferenciais, incluindo os pesos para os critérios de avaliação, tornam sua utilização muito difícil para tomadores de decisão não familiarizados com a metodologia multicritério (ZOPOUNIDIS; DOUMPOS, 2002). Finalmente, os autores afirmam que, dentro do contexto multicritério, a forma como o modelo considera os critérios, por meio de técnicas de programação matemática para a determinação dos parâmetros do modelo ou pela forma indutiva, é diretamente relacionada com a sua eficiência nas recomendações de alternativas para a tomada de decisão (ZOPOUNIDIS; DOUMPOS, 2002)

Yeh (2002) também concorda que as técnicas de decisão multicritério têm sido amplamente utilizadas na classificação ou seleção de alternativas a partir de um número finito de soluções com base em múltiplos critérios ou atributos, geralmente conflitantes. Desta forma, segundo o autor, apesar de vários métodos terem sido criados, não há melhor método para o problema multicritério e a validade do resultado de classificação permanece uma questão em aberto (YEH, 2002).

Em algumas situações específicas, as soluções produzidas por diferentes métodos multicritério coincidem de serem idênticas entre si. No entanto, em situações de decisão onde a classificação de todas as alternativas é necessária, diferentes métodos podem produzir diferentes resultados para o mesmo problema. Em outras palavras, para um mesmo vetor de pesos dado, a ordem da classificação poderá variar em função do método utilizado, sendo que esta inconsistência aumenta quando o número de alternativas a ser selecionadas ou classificadas aumenta (YEH, 2002).

Portanto, segundo Yeh (2002), a seleção de um método válido para refletir os pesos dados pelos tomadores de decisão é importante, especialmente quando há uma série de métodos multicritério disponíveis e quando as alternativas envolvidas têm desempenho semelhante. Este problema da seleção do método multicritério a ser adotado para a resolução de um problema tem sido abordado em vários contextos de decisão. Vários estudos na literatura propõem a comparação entre métodos multicritério a fim de examinar a sua adequação de uso e ou a sua validade teórica. Desta forma, a grande variedade de métodos multicritério também tornou o problema da escolha de um método para um determinado problema um problema multicritério (YEH, 2002).

Com base nesta constatação, Yeh (2002) realizou um estudo de caso para analisar a seleção de possíveis métodos multicritério para serem aplicados na solução de problemas multicriteriais. Para isto, foi proposta a utilização da análise de sensibilidade para determinar em que grau a classificação das alternativas fornecida pelos métodos avaliados poderia variar quando ocorressem alterações nos pesos dos critérios. Três métodos foram escolhidos para serem aplicados ao estudo do caso de uma faculdade que faz a seleção de alunos para serem contemplados com bolsa de estudo. Os métodos escolhidos foram: o método da soma ponderada, o método do produto ponderado e o TOPSIS. As principais diferenças entre os três métodos encontram-se no processo de normalização que antecede a comparação das avaliações de desempenho e também na agregação do vetor e da matriz normalizada para a obtenção de um valor de preferência global para cada alternativa (YEH, 2002).

No estudo de caso desenvolvido por Yeh (2002) o método que foi identificado como o mais adequado foi o TOPSIS, que é o mais sensível dentre os três métodos e correspondeu melhor às informações embutidas na matriz de decisão. De acordo com o autor, a abordagem proposta é particularmente útil para problemas de grande escala onde os resultados da classificação produzidos por diferentes métodos diferem significativamente (YEH, 2002).

Em uma outra abordagem, Wang e Triantaphyllou (2008) também afirmam que métodos multicritério são recorrentemente utilizados para encontrar a melhor alternativa para um problema complexo e muitos métodos têm sido propostos para analisar os dados de uma matriz de decisão e classificar as alternativas. Também segundo Wang e Triantaphyllou (2008), diferentes métodos multicritério podem fornecer diferentes respostas para exatamente o mesmo problema.

Segundo Wang e Triantaphyllou (2008), alguns desses métodos utilizam fórmulas para calcular a soma das prioridades das alternativas, tais como o método da soma ponderada e o método AHP e suas variantes. Já uma outra família de modelos multicritérios tem base no que é conhecido como relações de classificação. Possui destaque neste grupo o método ELECTRE e seus derivados.

Casos de irregularidades na classificação do AHP têm sido relatados por muitos pesquisadores. Por sua vez, os autores apontam pela primeira vez estas irregularidades também para o ELECTRE (WANG; TRIANTAPHYLLOU, 2008). De acordo com Wang e Triantaphyllou (2008), o método ELECTRE tem sido amplamente utilizado na engenharia civil e ambiental e suas aplicações incluem a avaliação de projetos complexos de engenharia civil, seleção de projetos de rodovias, a seleção de local para a eliminação de resíduos nucleares, planejamento de recursos hídricos e de resíduos de água ou de resíduos sólidos.

As irregularidades na classificação das alternativas acontecem quando o método multicritério não satisfaz as seguintes exigências: (i) manter a indicação da melhor alternativa mesmo quando uma das alternativas é substituída por outra pior e os pesos determinados para os critérios continuam os mesmos; (ii) obedecer a propriedade da transitividade para a classificação final das alternativas; (iii) fornecer a mesma classificação que para o problema original quando o problema de decisão é decomposto em partes (WANG; TRIANTAPHYLLOU, 2008).

Wang e Triantaphyllou (2008) procuraram identificar por que as contradições acima ocorrem no método ELECTRE, principalmente para explicar porque, quando uma alternativa é substituída por uma outra pior, mesmo que seja razoável supor que algumas alternativas que originalmente tivessem classificação inferior possam tornar-se mais preferíveis a ela, a melhor alternativa geralmente também é alterada. Com base nesta constatação, o foco de sua pesquisa foi alertar sobre a existência destas irregularidades para que as recomendações de classificação dos métodos ELECTRE sejam cautelosamente utilizadas, mesmo depois de uma eventual análise de sensibilidade ter sido realizada para verificar a sensibilidade da classificação final, com base em mudanças nos pesos dos critérios (WANG; TRIANTAPHYLLOU, 2008).

Para realizar esse estudo empírico que procurou identificar como essas irregularidades de classificação podem acontecer no âmbito dos métodos ELECTRE II e III, foram desenvolvidos programas de computador escritos em MATLAB® (linguagem de computação de alto nível para desenvolvimentos de algoritmos e visualização de dados), a fim de gerar problemas de decisão simulados e testar o desempenho do ELECTRE II e III no âmbito das três exigências enunciadas (WANG; TRIANTAPHYLLOU, 2008).

Como resultado, constatou-se que a maioria das situações manteve a mesma alternativa ideal, mas a classificação das alternativas não-ideais, sob ambos os métodos, tiveram uma diferença significativa. Como o método AHP multiplicativo alcançou o melhor desempenho, os autores sugerem que um novo método poderia ser concebido, combinando as qualidades do método AHP multiplicativo com os métodos ELECTRE ou algum outro método multicritério, sem sofrer dessas irregularidades de classificação (WANG; TRIANTAPHYLLOU, 2008).

2.1.3 Aplicações em recursos hídricos e saneamento

Diversos exemplos de aplicações utilizando métodos multicritério para apoiar a decisão podem ser encontrados na literatura, principalmente após a década de 1980. Em saneamento, por exemplo, Karagiannidis e Moussiopoulos (1997) utilizaram o método multicritério ELECTRE III para avaliar cinco propostas de sistemas integrados de gestão de resíduos sólidos urbanos para auxiliar no planejamento da região de Atenas, na Grécia. A avaliação de cada uma das alternativas foi realizada com base em 24 critérios. A classificação final foi alcançada utilizando metodologia baseada na abordagem de classificação.

As cinco alternativas consideradas foram baseadas em uma síntese da situação da época, bem como com base em planos de curto e de longo prazo das autoridades competentes. A primeira alternativa considerava a utilização de um aterro sanitário já existente em Liossia, o que representava a situação. A segunda alternativa considerava a construção de três novos aterros. A terceira também considerava a construção dos três novos aterros e mais um mecanismo de reciclagem de materiais em cada um. Na quarta, além dos três novos aterros, foi considerada a implantação da coleta seletiva. Por fim, a quinta alternativa considerou a incineração de 100% dos resíduos remanescentes da área urbana e a coleta seletiva de papel, vidro e alumínio (KARAGIANNIDIS; MOUSSIOPOULOS, 1997).

Os 24 critérios considerados foram divididos em político-sociais, ambientais, financeiros, tecnológicos e de conservação dos recursos. Os critérios político-sociais considerados foram: amplitude da legislação ambiental; aplicação da legislação ambiental; e redução do desemprego. Os critérios ambientais foram: poluição sonora; poluição atmosférica; índices de poluição do solo; poluição da água, tanto subterrâneas como superficiais; e poluição visual. Os critérios financeiros foram: custo da terra; investimento e custo operacional; taxa de juros; utilização de materiais reciclados; desenvolvimento financeiro em outros setores (o critério, por exemplo, aquecimento por efeito estufa do gás de

aterro); e utilização do financiamento. Os tecnológicos foram: operacionalidade; sensibilidade para uma mudança na composição dos resíduos; adaptação às novas exigências; vida operacional; tempo de conclusão da instalação; e confiabilidade da instalação. Por fim, os critérios de conservação de recursos foram: quantidade de materiais reciclados e quantidade de energia recuperada (KARAGIANNIDIS; MOUSSIOPOULOS, 1997).

Segundo Karagiannidis e Moussiopoulou (1997), o método multicritério ELECTRE III foi escolhido para realizar a aplicação, pois em suas opiniões o método envolve alguns aspectos que são muitas vezes negligenciados por outros métodos, tais como a preferência e veto dos tomadores de decisão. Assim, ao usar este método, as incertezas encontradas na idéia básica podem ser levadas em consideração, sendo este recurso de grande importância, especialmente em aplicações ambientais.

Para todos os critérios não mensuráveis na sua unidade real, uma escala ordinal foi usada de acordo com considerações qualitativas, após consultas a especialistas. Os critérios negativos, tais como custos, receberam o prefixo “-”. Em todos os critérios os valores de veto foram definidos suficientemente elevados para eliminar os efeitos da eliminação de alternativas, enquanto a indiferença foi fixada em zero, e a preferência recebeu o valor linear entre zero e um. A partir disto, uma matriz 24 x 5 foi formulada.

Numa primeira aplicação, foram considerados pesos iguais para todos os critérios ambientais e financeiros. Já na segunda, deu-se mais importância aos critérios ambientais, o que seria uma indicação de alta disponibilidade de recursos financeiros.

Como resultado, a quarta alternativa (três novos aterros mais a coleta seletiva) foi a primeira classificada em ambos os casos. No entanto, os autores alertam que a subjetividade não pode ser excluída totalmente do processo, uma vez que as escolhas dependem das preferências do tomador de decisão. Assim, este resultado também poderia gerar conflitos, pois é determinado a partir dos pesos dados aos critérios pelos indivíduos ou grupos

envolvidos. Por isto, os autores sugerem que diferentes cenários sejam avaliados ao invés daqueles formados pela solução ideal (KARAGIANNIDIS; MOUSSIOPOULOS, 1997).

Makropoulos et al. (2008) também concordam com esta afirmação e aprofundam a discussão no âmbito dos problemas ambientais, especificamente aos relacionados à gestão de água, argumentando que as soluções para novos empreendimentos devem levar em consideração os aspectos da sustentabilidade com a exploração de diferentes soluções e resultados além dos óbvios. Para auxiliar os gestores nesta tarefa, os autores afirmam que se torna necessário o desenvolvimento de ferramentas de apoio à tomada de decisão para tratar da natureza mal-estruturada do processo de avaliação da sustentabilidade, devido às suas profundas implicações sociais, econômicas e ambientais.

Assim, o trabalho proposto por Makropoulos et al. (2008) foi desenvolvido no âmbito do Ciclo de Gestão das Águas para Novos Empreendimentos do Reino Unido, no qual foi proposto o desenvolvimento e a aplicação de uma ferramenta de apoio à decisão, denominada *Urban Water Optioneering Tool* (UWOT). Esta ferramenta foi desenvolvida para facilitar o planejamento estratégico de sistemas de gestão sustentável da água e sua estrutura se baseia na utilização de indicadores de sustentabilidade: ambiental, econômica, social e técnico.

De acordo com Makropoulos et al. (2008), a incorporação da avaliação de sustentabilidade nos processos decisórios está se tornando tarefa fundamental para o serviço de água e seus prestadores. No entanto quantificar ou operacionalizar a sustentabilidade é, na maioria das vezes, um conceito discutível e um processo ambíguo de ser tratado com atenção às características específicas do problema. A abordagem adotada no estudo foi a seleção de critérios adequados ligados a indicadores específicos. Os indicadores constituem um meio de se medir o nível em que os critérios estão sendo atendidos e os critérios podem ser definidos como uma medida com a qual uma opção é avaliada em função dos objetivos a serem atingidos (MAKROPOULOS et al., 2008).

O UWOT integra o uso do MATLAB/Simulink[®] e do Microsoft Excel[®] em uma ferramenta computacional de apoio a decisão. O Excel[®] é usado para entrada de dados, armazenamento de características tecnológicas e opções de visualização dos resultados, enquanto o Simulink[®] calcula o modelo de balanço de massa de água, verifica as opções tecnológicas selecionadas para avaliação pelo usuário e processa as saídas em uma forma apropriada para avaliação da sustentabilidade, que é finalmente apresentada em Excel[®] (MAKROPOULOS et al., 2008).

Para auxiliar na escolha da tecnologia mais adequada, dadas as condições de cada caso específico e as restrições em relação aos critérios técnicos, ambientais, sociais e econômicos, uma interface gráfica foi desenvolvida com base em plataformas simples e comumente utilizadas, tais como Excel[®], e a parte de processamento foi desenvolvida no Simulink[®], que faz parte da suíte de ferramentas MATLAB, desenvolvida pela Mathworks. O UWOT foi concebido para permitir a comparação de uma ampla variedade de tecnologias de gestão da água, incluindo o tratamento, a reciclagem e a drenagem em diferentes escalas (MAKROPOULOS et al., 2008).

Segundo Makropoulos et al. (2008), uma biblioteca denominada “Biblioteca de Tecnologia” foi desenvolvida em planilhas do Excel[®]. Esta biblioteca contém blocos individuais que representam as tecnologias de sistemas de abastecimento ou tratamento de água e esgoto ou drenagem de águas pluviais. Cada bloco armazena funções de desempenho dos sistemas, baseados em indicadores ambientais, econômicos, sociais e técnicos. Alguns desses indicadores são quantitativos, por exemplo, custos de instalação; enquanto outros são qualitativos, por exemplo, a aceitação social de um sistema, sendo estes últimos baseados em julgamentos gerados por especialistas (MAKROPOULOS et al., 2008).

De acordo com Makropoulos et al. (2008), cada bloco é uma unidade independente que pode simular o processo de uma tecnologia por meio do cálculo de um conjunto de

funções internas e/ou externas. Além dos já existentes, a Biblioteca de Tecnologia pode ser atualizada com novas tecnologias, sem qualquer necessidade de atualizar a ferramenta. Uma representação esquemática de um bloco pode ser visto na figura 2.2.

Figura 2.2 – Exemplo de configuração de um bloco de simulação e suas funções

Fonte: Makropoulos et al. (2008, p. 1454)

Segundo Makropoulos et al. (2008), vários blocos podem ser agrupados de acordo com a sua funcionalidade para formar novos blocos compostos. Por sua vez, um bloco composto, que pode representar qualquer tipo de sistema, é criado através da agregação de vários componentes e modelagem de suas interações dinâmicas.

Para iniciar a simulação do modelo, o usuário precisa definir os sistemas que devem ser incluídos, especificando o tipo de água a ser tratada e reciclada (água da chuva ou água residual) e a escala espacial de aplicação. Dois tipos de resultados são produzidos pela ferramenta: (i) os valores numéricos da demanda de água potável, águas residuais e escoamento superficial; e (ii) os valores para os indicadores de sustentabilidade para todas as tecnologias presentes na configuração. Em ambos os casos, os valores da solução proposta são padronizados por meio de sistemas de inferência difusa. O algoritmo termina quando o conjunto de critérios finais é atendido. Uma vez que uma solução ótima é atingida, o correspondente conjunto de opções tecnológicas é identificado e as suas notações de sustentabilidade são comunicadas ao tomador de decisão através da interface gráfica do usuário (MAKROPOULOS et al., 2008).

O *software* foi aplicado ao problema de seleção de tecnologias para a gestão das águas em Hampshire, no sudeste da Inglaterra. Uma série de cenários foi desenvolvida para

proporcionar uma base para avaliar as possibilidades de desenvolvimento de sistemas alternativos na área do estudo de caso. A principal vantagem identificada pela aplicação do UWOT foi proporcionar aos tomadores de decisão uma compreensão mais abrangente entre a seleção e as implicações da tecnologia específica. Em outras palavras, o UWOT proporcionou uma visão holística do sistema urbano da água, incluindo o abastecimento e coleta de água e de águas residuais, bem como a drenagem de águas pluviais (MAKROPOULOS et al., 2008).

Desta forma, Makropoulos et al. (2008) sugerem que *softwares* como o UWOT poderiam contribuir para a investigação e estimação das interações e transformações nos três pilares do gerenciamento das águas urbanas dentro de uma mesma estrutura de modelagem. Além disto, poderia facilitar a seleção de combinações de tecnologias de gestão de água e apoiar a execução da gestão integrada em novos desenvolvimentos. A emergência de múltiplos atores com vistas potencialmente conflitantes e sugerem a necessidade de pensar plataformas que podem facilitar o debate e as negociações pela prestação de informações e a avaliação rápida de alternativas de cenários hipotéticos (MAKROPOULOS et al., 2008).

Simonovic e Verma (2008) também trataram sobre a complexidade para a resolução dos conflitos existentes no processo decisório da gestão de recursos hídricos. Os autores classificam como as principais fontes de complexidade: (i) a consideração conjunta de fatores econômicos, ambientais, sociais e técnicos, (ii) a dificuldade em quantificar as consequências na seleção de uma alternativa, e (iii) as incertezas sobre o impacto global das alternativas. Ainda, segundo os autores, existe também a incerteza associada aos valores subjetivos relativos ao problema, principalmente à atribuição dos pesos aos critérios, que geralmente é subjetivo e apresenta um alto nível de incerteza para o mesmo.

Segundo Simonovic e Verma (2008) a aplicação de técnicas de análise multicritério de decisão para auxiliar na gestão dos recursos hídricos teve início no século XX, na década de 1960, quando os problemas de decisão foram formulados como problemas de otimização de

programação linear; na década de 1980 foi proposta pela primeira vez uma aplicação da técnica multicritério de programação estocástica para avaliação de sistemas de recursos hídricos; e já no fim desta mesma década, a programação por compromisso, que é uma técnica baseada em alguma medida de distância entre as alternativas e uma solução ideal, passou a ser utilizada para avaliar alternativas no contexto do planejamento de longo prazo dos recursos hídricos (SIMONOVIC; VERMA, 2008).

Simonovic e Verma (2008) ainda identificaram outros tipos de técnicas multicritério que também são utilizadas na gestão de recursos hídricos, tais como: as técnicas para gerar as soluções ótimas de Pareto; os métodos de articulação prévia de preferências; e os métodos com articulação progressiva de preferências. No entanto, de acordo com os autores, estas técnicas não minimizam a incerteza em problemas de gestão de recursos hídricos, que geralmente é atribuída ao caráter aleatório ou difuso das informações disponíveis. Esta imprecisão é geralmente devido à inclusão das preferências humanas na formulação deste tipo de problemas.

Como contribuição. Simonovic e Verma (2008) propuseram um método multicritério baseado em valores difusos usando ideais positivos (mais otimistas) e negativos (mais pessimistas), pois, como na decisão dos recursos hídricos, os pesos associados aos critérios nem sempre são nítidos. Portanto, os autores sugeriram que se os pesos adotados fossem difusos, a decisão multicritério também se tornaria difusa. Desta forma, os pesos atribuídos aos critérios foram pesos difusos em forma triangular e representavam um conjunto de valores (p, m, o), onde “p” era o valor pessimista, “m” o valor médio e “o” o valor otimista (SIMONOVIC; VERMA, 2008).

Para resolver o problema de decisão multicritério difuso proposto, Simonovic e Verma (2008) consideraram a função objetivo difusa também com uma forma triangular. As melhores decisões seriam aquelas que tivessem a menor distância do ponto otimista e a maior

distância do ponto pessimista. A metodologia proposta foi testada para o caso retirado da literatura sobre o planejamento do tratamento de esgoto sanitário em um município.

Como resultado, os autores chegaram a uma metodologia que gera um conjunto de soluções Pareto para a tomada de decisão multicritério em problemas de recursos hídricos, com diferentes graus de adesão aos pesos difusos. A região da solução é também difusa e de forma triangular. A solução preferida deve ser determinada com base na distância mais curta da solução ideal positiva (otimista) e na distância mais longa a partir da solução ideal negativa (pessimista). As melhores decisões são aquelas que proporcionam maior ganho possível, evitando os riscos o quanto for possível (SIMONOVIC; VERMA, 2008).

2.2 Indicadores de sustentabilidade

Desde a publicação do Relatório de Brundtland, pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, em 1987, e da realização da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED), em 1992, o conceito de sustentabilidade entrou na pauta das decisões da maioria das organizações no mundo inteiro. Segundo Gibson (2005) este conceito é um desafio para o pensamento e prática convencional e aborda o bem-estar no longo e curto prazo cobrindo todas as questões centrais da tomada de decisão com o reconhecimento de suas ligações e interdependências, especialmente entre os seres humanos e as bases biofísicas para a vida.

Assim como o conceito de sustentabilidade, o conceito de desenvolvimento sustentável também se baseia na observação de que o ambiente, a economia e o bem-estar já não podem ser separados. Esta definição de desenvolvimento sustentável é frequentemente citado da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (WCED), como “desenvolvimento que satisfaz as necessidades da geração presente sem comprometer a

capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas” (BALKEMA et al., 2002).

Para Meadows (1998) os conceitos de desenvolvimento e de sustentabilidade são antigos, mas agora vêm juntos em uma escala global e dentro de um prazo urgente. Assim, a pergunta “como fornecer suficiência, segurança e qualidade de vida a todos os povos?”, seria a questão do desenvolvimento; e a outra “como podemos viver dentro das regras e dos limites do ambiente biofísico?”, seria a questão da sustentabilidade (MEADOWS, 1998).

Desta forma, numa era onde é crescente a preocupação sobre os impactos a nível local e global das estratégias ambientais, é grande a necessidade de se alcançar o desenvolvimento de forma mais ambientalmente responsável, através de um balanceamento das escolhas entre os aspectos ambientais, econômicos e sociais da sustentabilidade (MUGA; MIHELICIC, 2008). Com a adoção desta estratégia, a noção política do desenvolvimento sustentável, bem como a necessidade da avaliação de diferentes opções políticas sobre a sustentabilidade, estimula o desenvolvimento de novas ferramentas, com base em indicadores, para a avaliação do impacto da sustentabilidade (RAMETSTEINER et al., 2011).

Para Meadows (1998), indicadores são naturais, estão em todos os lugares e fazem parte da vida de todos. Indicadores surgem a partir de valores e criam valores, também são importantes, pois se encontram no centro do processo de tomada de decisão (MEADOWS, 1998). Os indicadores são reflexos parciais da realidade, baseados em modelos incertos e imperfeitos. Todos os indicadores são pelo menos parcialmente subjetivos e podem ajudar a reduzir as diferenças entre as diferentes visões de mundo que temos. A busca por estes indicadores é evolutiva e o próprio processo é um aprendizado (MEADOWS, 1998).

Além disto, o papel destes indicadores de sustentabilidade é estruturar e comunicar informações sobre questões-chave e tendências consideradas relevantes para o desenvolvimento sustentável. Com base nesses indicadores, cientistas, políticos, cidadãos e tomadores de decisão podem monitorar as alterações nas dimensões da sustentabilidade,

possibilitando identificar tendências para cenários futuros (RAMETSTEINER et al., 2011).

Segundo Alegre et al. (2007), o processo de criação destes indicadores inclui a obtenção de dados elementares, que são filtrados e transformados em variáveis que são combinadas para formar os indicadores (e/ou índices). O seu objetivo final é fornecer informação relevante para ser utilizada no processo de tomada de decisão (figura 2.3).

Figura 2.3 – Dos dados até a informação

Fonte: adaptado de Segnestam (2002)

Desta forma, primeiramente, é necessário que os indicadores sejam baseados em dados confiáveis e exatos ou que estejam mais próximos possíveis de um nível aceitável. Alegre et al. (2007) sugerem larguras de banda para classificar a confiabilidade e a exatidão dos dados. A confiabilidade é tida como “alta” caso os dados sejam extraídos de uma fonte segura, com procedimentos e análises investigatórios bem definidos, adequadamente documentados e reconhecidos como as melhores práticas; como “moderada” caso as fontes não aparentem provir dos meios definidos como de alta confiabilidade; e como “baixa” caso as fontes sejam dificilmente confiáveis, pois se baseiam em extrapolações, limitados casos ou em informações pessoais. Para verificar esta exatidão, Alegre et al. (2007) sugerem que os dados podem ser classificados em função de sua variância. Por exemplo, uma variância entre 0 e 5% será melhor do que uma variância de 5 a 20%, por sua vez melhor do que uma variância entre 20 e 50%, e, por fim, será melhor do que uma variância maior que 50%.

De acordo com Meadows (1998), os indicadores devem também ser simultaneamente significativos em dois domínios diferentes: o da ciência e o da política. Indicadores de sustentabilidade devem ser mais do que os indicadores ambientais, eles devem considerar

tempo e limites. Um indicador ambiental torna-se um indicador de sustentabilidade com a adição do tempo, limite ou objetivo. Indicadores de desenvolvimento devem ser mais do que os indicadores de crescimento, pois devem medir a eficiência, a suficiência e a qualidade e equidade da vida (MEADOWS, 1998).

De forma geral, um indicador deve referir-se a um objetivo específico, ser capaz de indicar o sucesso ou a falha em alcançá-lo e ser sensível e robusto em sua construção (MUGA; MIHELCIC, 2008). Especificamente, para Muga e Mihelcic (2008), os indicadores devem ser: (i) construídos em uma base científica sólida e amplamente reconhecida pela comunidade científica; (ii) transparentes, com seus cálculos e significados óbvios até mesmo para não especialistas; (iii) relevantes, cobrindo aspectos cruciais do desenvolvimento sustentável, (iv) quantificáveis, baseando-se em dados existentes e/ou de fácil coleta e atualização; e (v) em número limitado (MUGA; MIHELCIC, 2008). Para Alegre et al. (2007) devem desejavelmente possuir as seguintes características: (i) ser claramente definido, com significado consistente; (ii) ser factível, o que depende da escolha das variáveis que o compõe; (iii) ser *auditável*; (iv) ser universal; (v) ser simples e de fácil entendimento; (vi) ser *quantificável*, o que evita subjetividade.

2.2.1 Características e dimensões da sustentabilidade

Indicadores de sustentabilidade comumente utilizados são aqueles desenvolvidos pela Organização para a Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OECD) e pela Comissão das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (UNCSD). No entanto, um problema significativo associado à seleção e aplicação desses indicadores é a sua restrição na utilização por outros grupos, pois as diferentes características de avaliação dos indicadores podem não ser aplicáveis para todos os casos (MUGA; MIHELCIC, 2008).

É fácil listar as características ideais dos indicadores, mas não é tão fácil encontrar indicadores que realmente atendam essas características (MEADOWS, 1998). No caso das estações de tratamento de esgoto, os indicadores devem abranger o sistema como um todo, incluindo dados referentes à prestadora de serviços, *stakeholders*, usuários, ambiente e às áreas correlatas avaliadas como importante para a gestão dos recursos (ALEGRE et al., 2007)

Além disso, uma diversidade de soluções sustentáveis deve estar disponível para situações diferentes, de preferência flexíveis para se adaptar às mudanças futuras. As exigências do usuário final devem ser traduzidas em critérios funcionais que sejam cumpridos pela tecnologia. Alguns pesquisadores tentam capturar a sustentabilidade em um único indicador, por exemplo, através da análise econômica. No entanto, outros métodos são frequentemente utilizados, tais como a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) ou análise de sistemas, que também incluem múltiplos indicadores (BALKEMA et al., 2002).

A participação pública é também um aspecto geralmente negligenciado na escolha da tecnologia de tratamento mais adequada de águas residuais para uma determinada comunidade. Enquanto alguns procedimentos indicam tecnologias específicas através da procura da “melhor tecnologia”, as percepções e preferências da população para a seleção e implementação de uma tecnologia particular deixam de receber atenção, reduzindo as chances de escolher uma alternativa mais sustentável (MUGA; MIHELICIC, 2008).

De acordo com Benakouche (1994), as ações desenvolvidas em um dos aspectos necessários para se atingir a sustentabilidade – econômico, social ou ambiental – pode influenciar em outros aspectos. Por exemplo, as ações iniciadas no âmbito ambiental poderão causar efeitos nos âmbitos sociais e econômicos ou as ações iniciadas no âmbito econômico poderão causar efeitos nos âmbitos ambientais e sociais. Pode-se comparar, então, a interação entre estes três aspectos como um triângulo, devido a sua interdependência. A figura 2.4 demonstra a inter-relação entre os elementos que compõe as dimensões da sustentabilidade.

Figura 2.4 – As diferentes dimensões da sustentabilidade

A melhor estratégia deve abranger todas as dimensões de forma equilibrada podendo ser mais bem definida com o auxílio de técnicas e ferramentas de apoio à decisão. Por exemplo, o grande impacto econômico dos sistemas mecânicos provém do seu maior custo de implantação, operação, manutenção e os custos para o usuário final. O impacto ambiental para esta tecnologia tem origem em seu consumo de energia elevado em comparação com outras tecnologias. Além disto, processos mecanizados possuem potencial de formação de odor em maior grau em comparação com as outras tecnologias e contribuem menos para a economia de uma comunidade, pois empregam o menor número de funcionários por capacidade da planta, do que outros sistemas de tratamento (MUGA; MIHELICIC, 2008).

Os sistemas de tratamento de lagoas proporcionam um maior espaço aberto em termos de uso do solo, além de possuírem um baixo custo para o usuário final. Estes sistemas também proporcionam a remoção de nitrogênio e fósforo. O custo de utilização depende se a

lagoa é aerada ou não, o que geralmente reflete em custos operacionais e de manutenção. No entanto, embora sendo estes sistemas menos mecanizados, eles podem contribuir mais para o crescimento econômico de uma comunidade a longo prazo, empregando mais funcionários por capacidade da planta (MUGA; MIHELCIC, 2008).

Os sistemas de tratamento em terra representam o menor impacto global. Vantagens deste tipo de tratamento incluem a diminuição dos custos de implantação e dos custos para o usuário final. Além disto, como os sistemas de lagoas, estes sistemas podem contribuir para o crescimento econômico através do emprego de mais pessoal por capacidade da planta e maior espaço aberto (MUGA; MIHELCIC, 2008).

Assim, a seleção de uma determinada tecnologia de tratamento de esgoto não deve ser baseada principalmente na visão técnica, mas também deve integrar as atividades humanas e ambientais que fazem parte das dimensões da sustentabilidade (MUGA; MIHELCIC, 2008).

2.2.2 Aplicações em recursos hídricos e saneamento

Diversos autores têm dedicado seus estudos na avaliação de alternativas para mitigação de problemas ambientais abrangendo as dimensões da sustentabilidade. Para Starkl e Brunner (2004), o desenvolvimento sustentável deve abranger as questões ambientais, econômicas e sociais e deve se basear na tomada de decisão participativa, democrática, integrada e abrangente. Todavia, a controvérsia emergente sobre a sustentabilidade na gestão das águas pode ser considerada um grande problema, pois os defensores destes novos conceitos enfatizam os benefícios ambientais tais como reciclagem de nutrientes, enquanto seus adversários argumentam que tais conceitos não são compatíveis com as atitudes das pessoas e dificilmente poderiam ser integrados aos sistemas já existentes.

O trabalho proposto por Starkl e Brunner (2004) procurou analisar a conjuntura em

que a gestão das águas urbanas é realizada na Áustria. Para isto, foram identificados e descritos os principais atores da gestão das águas urbanas no país, seus interesses e também os seus processos de tomada de decisão. O quadro 2.3 apresenta o exemplo de alguns dos principais atores envolvidos na escolha dos sistemas de tratamento de esgoto e seus possíveis interesses no âmbito da sustentabilidade, conforme sugerem Starkl e Brunner (2004).

	Técnicos	Econômicos	Ambientais	Sociais
Financiador	Baixo	Minimizar subsídios	Baixo	Baixo
Governo	Baixo	Minimizar custo total para a sociedade	Impor melhor técnica disponível	Considerar os interesses de todos os agentes
Construtor	Baixo (delegado ao projetista)	Evitar custos excessivos	Evitar danos excessivos	Minimizar queixas locais
Projetistas	Alto	Selecionar o projeto mais barato	Considerar melhor técnica disponível	Baixo
Usuários	Baixo	Minimizar taxas de consumo	Baixo (em geral)	Evitar mudanças no comportamento
Empresas	Vender seus próprios produtos	Baixo	Baixo	Baixo
Outros agentes	Minimizar danos em sua propriedade	Baixo	Depende do negócio	Baixo

Quadro 2.3 – Exemplo de atores e interesses na escolha de sistemas de tratamento

Fonte: adaptado de Starkl e Brunner (2004)

Assim, o processo de tomada de decisão identificado por Starkl e Brunner (2004) é válido para sistemas maiores e contempla 13 passos: (i) inicialmente, os desenvolvedores (município, comitês ou empresa privada) observam a demanda para abastecimento de água ou um requisito legal; (ii) então, planejadores (consultores) são selecionados, de acordo com as preferências de alguns administradores ou por concurso; (iii) o planejador prepara um estudo das técnicas ambientalmente viáveis para a eliminação de águas residuais ou para abastecimento de água, geralmente para um município inteiro ou mesmo uma bacia hidrográfica; (iv) se o desenvolvedor concorda com o estudo preliminar, a autoridade executiva precisa aprová-lo; (v) a menos que a autoridade se oponha à proposta (as etapas 2 e

3 serão repetidas), um consultor irá realizar um planejamento mais detalhado, geralmente por meio de um pré-projeto; (vi) depois de elaborar um pré-projeto detalhado, a autoridade executiva precisa aprová-lo, novamente; (vii) se a proposta foi avaliada positivamente, todas as partes que têm direitos legais sobre o projeto passam por uma audiência final; (viii) em seguida, o projeto passa por uma avaliação financeira que irá verificar se a alternativa atende às diretrizes determinadas; (ix) caso positivo, um concurso público será preparado, a fim de determinar quem irá construir o sistema; (x) os consultores avaliarão as propostas; (xi) a autoridade deve aprovar esta seleção; (xii) o desenvolvedor contrata a solução mais barata; (xiii) se houverem problemas durante a fase de construção ou uma alteração do projeto original, a modificação do projeto será avaliada novamente (STARKL; BRUNNER, 2004).

Tendo como base os passos do processo de tomada de decisão identificados, Starkl e Brunner (2004) propuseram uma estrutura para a tomada de decisão que visou facilitar a seleção das soluções para a implantação de sistemas de tratamento de água e esgoto. Para isto, os autores levaram em consideração os dilemas da sustentabilidade nesta estrutura, desenvolvendo uma lista critérios com base em seus diferentes aspectos, que orientam o tomador de decisão na escolha da alternativa mais sustentável, considerando que estes aspectos da sustentabilidade no processo de tomada de decisão podem reduzir a sua viabilidade (STARKL; BRUNNER, 2004).

Assim, de acordo com Starkl e Brunner (2004), uma avaliação das alternativas de forma integrada não deve ser baseada apenas em critérios padronizados, ou mesmo em um método de avaliação determinado. Em vez disso, deve incentivar o tomador de decisão a fazer sua escolha da forma mais transparente possível, na qual a autonomia do tomador de decisão se manifeste por suas preferências, que são baseadas em seus valores individuais. Em outras palavras, ao definir as suas ponderações, o tomador de decisão deve justificar sua escolha à luz da sustentabilidade (STARKL; BRUNNER, 2004).

Starkl e Brunner (2004) concluíram que há consenso de que a sustentabilidade é um conceito muito mais complexo na prática do que é na teoria. No entanto, pesquisadores e profissionais concordam que há uma iminente necessidade de integrar diferentes aspectos da sustentabilidade para a solução de problemas complexos, como os ambientais. Tal avaliação integrada não deve ser baseada apenas em critérios prescritos ou padronizados, ou mesmo em um método de avaliação determinado. Em vez disso, deve incentivar o tomador de decisão a fazer sua escolha da forma mais transparente possível, aumentando as chances de que a solução seja aceita por todas as partes (STARKL; BRUNNER, 2004).

Benedetti et. al. (2008) ampliaram este foco de discussão para a gestão das bacias hidrográficas e desenvolveram uma metodologia para avaliar a sustentabilidade de sistemas integrados de águas residuais urbanas (drenagem, coleta de esgoto, estação de tratamento de águas residuais e fluviais), com base em indicadores sustentáveis. Segundo os autores, as bacias hidrográficas vêm passando por mudanças fundamentais no seu gerenciamento a partir de normas de emissões baseadas em uma abordagem combinada, que consiste em limites a serem aplicados para as emissões de poluição com padrões de qualidade definidos para o receptor. Portanto a nova abordagem proposta poderia ser uma base para o desenvolvimento de um modelo de suporte à decisão que auxilie na sustentabilidade destes sistemas (BENEDETTI et. al., 2008).

Com esta finalidade, Benedetti et. al. (2008) propuseram a análise do fluxo de algumas substâncias, com o auxílio de balanços de massa, como uma ferramenta para destacar os impactos sobre o meio ambiente. As variáveis analisadas no estudo foram: água, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio total (NT), fósforo total (PT) e Zn. Uma lista de indicadores também foi sugerida para definir as características do esgoto e das instalações da ETE em termos ambientais e econômicos.

Os indicadores adotados no estudo foram: (i) cargas de poluentes que entram na ETE

por habitante conectado, por área de drenagem e por densidade populacional; (ii) DQO e NT por população equivalente; (iii) eficiências de remoção de poluentes da ETE; (iv) custo total, operacional e variável, por unidade equivalente de massa dos poluentes removidos; (v) custos por população equivalente; (vi) consumo de energia por volume de efluente tratado; (vii) capacidade da ETE em relação ao efluente tratado; (viii) concentração de poluentes nos efluentes da ETE; (ix) infiltração de água no sistema de esgotos; (x) águas pluviais descarregadas em águas receptoras; (xi) relação dos poluentes medidos na descarga de poluentes; e (xii) índices de qualidade de água (BENEDETTI et. al., 2008).

Benedetti et. al. (2008) selecionaram a bacia do rio Nete, que é situada na parte oriental de Flandres, Bélgica. Esta bacia é caracterizada pela presença de agricultura intensiva e urbanização dispersa, com algumas pequenas cidades. A bacia foi escolhida, pois é a bacia com o maior conjunto de dados disponíveis no país. Além disto, a bacia abrange 29 sub-bacias de esgoto, diversos tipos de tecnologias de ETE estão presentes, sendo que a maioria deles são Valos de Oxidação, apesar de também existirem alguns sistemas de lodos ativados, filtros biológicos e de áreas alagadas construídas como pequenas estações.

Benedetti et. al. (2008) estimaram o consumo de água das famílias a partir do número de habitantes, com base no consumo de água per capita. Uma fração da precipitação também foi incluída, subtraindo-se as taxas de fluxo de água em habitações e indústrias do fluxo de seca meteorológica. O fluxo de águas pluviais tratado foi considerado como o fluxo total de água que entra na ETE menos fluxo de seca meteorológica.

Como conclusões, Benedetti et. al. (2008) argumentam que o estudo sobre a bacia do rio Nete indica que o principal fator de ineficiência operacional na coleta e tratamento de águas residuais urbanas é a infiltração de água que entra na rede de esgoto. A infiltração de água levou a um tratamento adicional considerável, juntamente com os riscos ambientais relacionados, como a contaminação das águas subterrâneas. Quanto à qualidade da água, a

análise dos indicadores escolhidos e seus respectivos impactos permitiram identificar que a principal ação para melhorar a situação da bacia seria a ligação dos domicílios não atendidos com a coleta de esgoto.

Com base nos seus resultados, Benedetti et. al. (2008) defendem que a utilização de indicadores de desempenho pode ser uma ferramenta útil no processo de tomada de decisões, revelando de forma quantitativa quais são os principais impactos e quais os sistemas de águas residuais que merecem mais atenção em uma bacia hidrográfica. Essa análise ampla ajudou também apontar as lacunas de informação e incertezas (BENEDETTI et. al., 2008).

Kellner et al. (2009) também afirmam que indicadores de sustentabilidade têm sido amplamente estudados por pesquisadores em diferentes áreas da ciência. No caso da avaliação de estações de tratamento de esgoto estes indicadores também começaram a receber maior importância do que dada somente a avaliação dos critérios técnicos e econômicos, os quais já possuem muitos métodos desenvolvidos para auxiliar nesta tarefa. A adoção desta nova abordagem permite que estas estações visem não somente aos seus objetivos operacionais, mas também à conservação de todos os recursos envolvidos.

Como contribuição científica, Kellner et al. (2009) desenvolveram um indicador de sustentabilidade para aplicação em lagoas de estabilização considerando as três dimensões básicas da sustentabilidade: ambiental, social e econômica, a qual ele chamou de econômico-financeira. Cada uma dessas três dimensões foi convertida em indicadores de sustentabilidade, que variaram de zero a um. A ponderação dos parâmetros que compõem cada índice foi atribuída com o auxílio do método multicriterial AHP.

A composição do indicador de sustentabilidade ambiental (ISA) foi composta por nove fatores para a determinação da qualidade do efluente final das lagoas de estabilização: DBO, Oxigênio dissolvido (OD), coliformes fecais, pH, N-amoniaco, fósforo total, clorofila-a, gás metano eliminado para a atmosfera (CH_4) e gás sulfídrico eliminado para a atmosfera

(H₂S). Com exceção do parâmetro OD, todos os outros parâmetros do ISA têm efeito crescente, ou seja, quanto maior for o valor do parâmetro, pior será a qualidade do efluente. Assim, o fator de ponderação do parâmetro OD foi multiplicado por (-1). Para a composição do indicador de sustentabilidade social (ISS), foram considerados seis fatores: tarifa média praticada, despesa média por funcionário, número de reuniões com organizações externas, número de acidentes de trabalho, número de autuações do órgão ambiental, porcentagem da população atendida. Finalmente, para a composição do indicador de sustentabilidade econômico-financeiro (ISEF), foram utilizados os parâmetros: horizonte de projeto; vazão de projeto; custo de implantação; custo de operação e manutenção; custo total trazido a valor presente; e receita operacional direta de esgoto (KELLNER et al., 2009).

Um estudo de caso foi realizado na bacia do rio Ribeira do Iguape, da qual 61% pertencem ao Estado de São Paulo e 39% ao Estado do Paraná. Dentro deste sistema, foram escolhidas as microbacias Jacupiranga e Pariquera-Açu, ambas na região do Baixo Ribeira de Iguape, além de dados sobre a característica dos efluentes finais das estações de tratamento de esgoto dos municípios de Cajati, Jacupiranga e Pariquera-Açu, obtidas em três campanhas amostrais, realizadas nos meses de janeiro, abril e julho de 2006 (KELLNER et al., 2009).

Para o ISS, as três estações apresentaram valores muito próximos entre si, sendo 0,280; 0,273 e 0,324 para as unidades de Cajati, Jacupiranga e Pariquera-Açu, respectivamente. Para o ISEF, as ETE de Cajati e Jacupiranga apresentaram valores aproximados, resultando 0,711 e 0,833, respectivamente. Por outro lado, a ETE Pariquera-Açu apresentou ISEF de 0,309, valor mais próximo da condição de equilíbrio, que se deve provavelmente ao menor custo anual com operação e manutenção desta estação em comparação às outras duas ETEs (KELLNER et al., 2009).

Com base nos resultados obtidos no trabalho, Kellner et al. (2009) concluíram que o método proposto para análise da sustentabilidade das três estações de tratamento de esgoto

consideradas apresentou simplicidade nos cálculos e na representação gráfica, além de flexibilidade na determinação dos cenários característicos da sustentabilidade. Ainda segundo os autores, além de serem úteis na gestão ambiental das estações, estes indicadores poderiam ser utilizados também para divulgar à sociedade o quão distante estas estações estariam de um nível aceitável de sustentabilidade, também permitindo a retroalimentação das informações (KELLNER et al., 2009).

Finalmente, segundo Rametsteiner et al. (2011), muitas ferramentas têm sido desenvolvidas para a avaliação de diferentes opções políticas sobre a sustentabilidade, mas estas podem diferir nos processos de sua construção: o processo político-administrativo ou o cientificamente orientado. Neste último, há uma tendência para ignorar ou subestimar a política, colocando ênfase na concepção técnica e separando a ciência da política. Todavia, o desafio fundamental do desenvolvimento de indicadores de sustentabilidade não deveria ser essencialmente o técnico, mas sim o político, pois o conceito de sustentabilidade é normativo e a decisão sobre quem participará e quem decidirá no processo de desenvolvimento do indicador é crucial (RAMETSTEINER et al., 2011).

Para analisar essas diferenças entre os processos de desenvolvimento dos indicadores, Rametsteiner et al. (2011), compararam o processo de desenvolvimento de cinco indicadores de sustentabilidade, sendo: três sob o processo cientificamente orientado e dois por iniciativas governamentais. Foram então abordadas as experiências vividas no desenvolvimento dos indicadores de sustentabilidade EFORWOOD, SENSOR e SEAMLESS e comparadas com os processos no desenvolvimento dos indicadores UE SDI e MCPFE C&I, governamentais. A pesquisa procurou verificar como foram determinados os participantes, como eles foram selecionados, como eles interagiram e como as decisões foram tomadas (RAMETSTEINER et al., 2011).

Rametsteiner et al. (2011) sugerem que o desenvolvimento desses indicadores de

sustentabilidade não deveria ser uma tarefa científica isolada, mas deveria envolver também a negociação política. Portanto, para avaliar esta visão dicotômica, da produção de conhecimento e da criação de normas para o desenvolvimento de indicadores de sustentabilidade, os autores procuraram identificar nos métodos selecionados: os conhecimentos agregados através da participação de cientistas, políticos e partes interessadas; a interdisciplinaridade do conhecimento através da participação de cientistas de diferentes domínios científicos; a intervenção por envolvimento dos respectivos tomadores de decisão; a seleção de conhecimentos emergentes; os ajustes para normas sociais e políticas (RAMETSTEINER et al., 2011).

Com base nos casos estudados os autores constataram que a dimensão sócio-político precisa de um maior reconhecimento e consideração na concepção e implementação do processo de desenvolvimento do indicador de sustentabilidade. Desta forma, Rametsteiner et al. (2011, p. 69) levantaram uma questão: “o que é melhor, um conjunto um pouco mais preciso, mas politicamente menos relevante, ou um conjunto ligeiramente menos preciso, mas politicamente mais relevante?”. No que diz respeito ao balanceamento entre as diferentes áreas do conhecimento, os autores observaram que todos os processos visaram equilibrar as dimensões econômicas, ecológicas e sociais, mas apresentam deficiências quanto à dimensão social. Por fim, os indicadores desenvolvidos são resultados provisórios de um processo de melhoria contínua, nomeadamente no que diz respeito à integração de conhecimentos emergentes (RAMETSTEINER et al., 2011).

2.3 Teoria dos Jogos

Amplamente conhecida em vários campos da ciência, 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).

Segundo Fiani (2006), a maioria das situações de interação estratégica pode ser classificada como “jogos”, nos quais se devem buscar compreender as ações objetivas de cada indivíduo, conhecidos por “jogadores”. As interações entre os jogadores devem ser modeladas para cada caso, ou seja, o ponto de partida da teoria será sempre um modelo, que também será diferente para cada situação de interação.

Sumariamente, segundo os princípios identificados por Neuman e Morgenstern (1944), se os indivíduos envolvidos em uma situação de interação agirem racionalmente⁴, eles procurarão identificar alternativas que atendam não somente seus critérios, mas também que atendam, pelo menos minimamente, aos critérios dos outros indivíduos. Portanto, o interesse da Teoria dos Jogos é avaliar estritamente os jogos de estratégia, onde os agentes tomam decisões estratégicas, visando seus objetivos e também considerando os objetivos dos outros.

As principais vantagens da aplicação da Teoria dos Jogos são entender teoricamente a interação entre jogadores e ajudar o raciocínio estratégico, explorando as possibilidades de interação entre os agentes. Além disto, a aplicação da abordagem de jogos, permite ampliar a visão dos jogadores sobre o problema e encontrar novas possibilidades para a resolução do mesmo, o que seria dificilmente percebido sem o auxílio desta teoria (FIANI, 2006).

No entanto, a Teoria dos Jogos possui algumas limitações, por exemplo, existe uma dificuldade na sua aplicação quando os jogadores não dispõem de informação suficiente antes do processo de interação estratégica. Além disto, a hipótese da racionalidade não é suficiente

⁴ Agir racionalmente é, segundo Bazerman (2004), a capacidade do tomador de decisão definir o problema perfeitamente, identificar todos os critérios, ponderar precisamente todos os critérios segundo suas preferências, conhecer todas as alternativas relevantes, avaliar precisamente cada alternativa com base em cada critério e escolher a de maior valor percebido.

para determinar o comportamento dos jogadores, sendo necessário avaliar o contexto social e cultural em que se encontram. Por isto, Fiani (2006, p.32) afirma que “a Teoria dos Jogos não deve ser utilizada indiscriminadamente com instrumento de previsão do comportamento de agentes em situações de interação estratégica”.

Ainda segundo Fiani (2006), esta teoria da escolha racional visa explicar como os agentes tomam suas decisões em situações de interação estratégica a partir das suas preferências. Para expressar estas preferências, é utilizado o conceito de relação de preferência, que é dado por “ao menos tão bom quanto” ($\succsim$), sendo a escolha considerada racional quando apresenta as seguintes propriedades: ser completa e transitiva. Cabe ressaltar que “ao menos tão bom quanto” é diferente de “estritamente preferível” ($\succ$) ou “indiferente” ($\sim$) (FIANI, 2006). No entanto, apesar de preferências individuais serem transitivas, quando exercidas isoladamente, não implica que também serão transitivas quando exercidas em grupos. Acrescenta-se ainda que os jogadores podem cometer erros e que eles podem não agir de forma idêntica todas às vezes.

Portanto, as condições necessárias, mas não suficientes, para que os agentes possam apresentar um comportamento racional em um jogo seriam que: (i) o jogo seja simples; (ii) os jogadores joguem muitas vezes e aprendam por tentativa e erro; (iii) os incentivos para jogar bem (racionalmente) sejam adequados (FIANI, 2006).

Considerando o que foi exposto até aqui, para ser classificado como um jogo, a situação de interação estratégica deve possuir cinco características: (i) ser um modelo formal; (ii) permitir interações; (iii) envolver mais de um agente; (iv) promover a racionalidade; e (v) priorizar o comportamento estratégico. Além disto, é necessário descobrir os objetivos dos jogadores, pois “uma avaliação incorreta dos objetivos pode levar a um equívoco grave no momento de analisar os possíveis desdobramentos de uma situação de interação estratégica” (FIANI, 2006, p.20). A princípio, qualquer objetivo é passível de modelagem e análise e

racionalidade não é sinônimo de comportamento egoísta, mas sim a coerência entre os meios e os fins dos agentes.

2.3.1 Modelagem de jogos

É consenso que qualquer modelo será apenas uma representação abstrata de uma realidade muito mais complexa. Qualquer jogo também é um modelo, no qual deverá conter elementos sobre a situação de interação estratégica entre os jogadores, principalmente se os mesmos conhecem, ou não, as decisões dos outros agentes. Neste contexto, o jogador pode ser considerado qualquer indivíduo ou organização envolvido no processo de interação estratégica, que tenha autonomia para tomar decisões (FIANI, 2006).

Sucintamente, um jogo deve possuir um número finito de jogadores, que tentam alcançar o melhor resultado possível, dadas suas preferências. Para isto, os jogadores interagem com uma ação, movimento ou escolha em um dado momento do jogo, o que implica que cada jogador terá seu conjunto de ações. Todas estas ações para um jogador “i” podem ser representadas pelo conjunto: $A_i = \{a_j\}$. As possibilidades de interação estratégica dependem de todas as ações relevantes disponíveis. No entanto, o jogador poderá descartar algumas ações que ele considere inadequada para seus objetivos (FIANI, 2006).

Segundo Fiani (2006), também se deve verificar quando os jogadores decidem ao mesmo tempo ou sucessivamente e, neste caso, se ele conhece as decisões anteriores. No caso dos jogadores decidirem ao mesmo, o jogo é conhecido como jogo simultâneo. No caso das decisões ocorrerem sucessivamente, o jogo é conhecido como jogo sequencial.

Jogos simultâneos são aqueles em que cada jogador ignora as decisões dos demais no momento em que toma a sua própria decisão (FIANI, 2006, p. 50). A forma estratégica, no formato de uma tabela, fornece todas as combinações possíveis de ações dos jogadores e seus

resultados para um jogo simultâneo. Um exemplo de jogo na forma estratégica pode ser visualizado na figura 2.5.

		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 2.5 – Exemplo de um jogo na forma estratégica

Jogos sequenciais são aqueles em que os jogadores decidem a partir do que os outros jogadores decidiram no passado, ou seja, quando as decisões são tomadas conhecendo as decisões dos demais jogadores, independente da ordem cronológica. Neste jogo os jogadores realizam seus movimentos em uma ordem predeterminada (FIANI, 2006, p. 53). A forma estendida, no formato de uma árvore de jogos, fornece todos os possíveis cenários do jogo sequencial e seus resultados. Um exemplo de jogo na forma estendida pode ser visualizado na figura 2.6.

Figura 2.6 – Exemplo de um jogo na forma estendida

Algumas regras devem ser adotadas para modelar um jogo na forma estendida com o auxílio da árvore de jogos, a saber: (i) todo nó deve ser precedido por apenas um nó; (ii) o nó

não pode ligar-se a ele mesmo; e (iii) todo nó deve ser sucessor de apenas um nó inicial. A última regra poderia ser violada para estabelecer uma distribuição de probabilidade que permita decidir em qual ponto inicial o jogo se inicia, sendo cada ponto inicial o início de um novo jogo (FIANI, 2006). Geralmente é mais complexo modelar na forma estendida do que na forma estratégica.

Assim, no processo de modelagem de um jogo, decidir entre a forma estratégica ou estendida depende das informações que os jogadores têm sobre as estratégias dos demais. Desta forma, “nem jogo simultâneo é sinônimo de forma estratégica, nem tampouco jogo sequencial é sinônimo de forma estendida” (FIANI, 2006, p. 63). Se em um processo de interação estratégica os jogadores decidem em momentos diferentes do tempo – sendo o sentido da palavra “tempo” mais lógico do que cronológico – e os mesmos não têm como saber o que foi decidido anteriormente, a melhor forma de representar o jogo é a forma simultânea. Em outras palavras, na forma estendida, a ação depende das informações que o jogador possui no momento da escolha e não na distribuição de suas ações no tempo. “Quanto mais informação um jogador possui, melhor ele consegue distinguir em que circunstância do jogo está fazendo as suas escolhas” (FIANI, 2006, p. 59).

Por fim, em ambos os casos, é necessário determinar as recompensas dos jogadores. “Recompensa é aquilo que todo jogador obtém depois de encerrado o jogo, de acordo com suas próprias escolhas e as dos demais jogadores” (FIANI, 2006, p. 47). A recompensa é determinada por uma função denominada função de recompensa (ou função de pagamento), que é apenas um modo de atribuir número às opções mais preferidas, ou seja, é uma forma de descrever as preferências (VARIAN, 2003). Assim, esta função de recompensa denota o pagamento que o jogador “i” recebe quando o jogador 1 adota a estratégia s_1 , o jogador 2 adota a estratégia s_2 , assim por diante, incluindo o fato de que o jogador “i” adota a estratégia s_i . A função de recompensa é dada por $U_i = (s_1, \dots, s_i, \dots, s_n)$.

No caso do jogo simultâneo, a estratégia de cada jogador coincide com as ações que dispõe, pois fazem sua escolha em um único momento. Já em jogos sequenciais os jogadores fazem as escolhas conhecendo as ações dos demais (FIANI, 2006). Assim, a função de recompensa deve atender a desigualdade da fórmula 2.1.

$$f(x) \geq f(y) \text{ sempre que } U(x) \succsim U(y) \quad (2.1)$$

Como regra geral, a função de recompensa não visa “medir” as preferências dos jogadores, da mesma forma que se medem grandezas físicas. Esta função apenas traduz em números a preferência do jogador entre dois resultados possíveis, “x” e “y”, por exemplo. De forma análoga, esses valores poderiam ser obtidos pela utilidade ou pelo valor monetário, pois, a princípio, “qualquer função matemática que atribua valores a resultados do jogo, valores esses que respeitem o ordenamento de preferências do jogador, é válida” (FIANI, 2006, p. 49).

Quando os jogadores não podem estabelecer compromissos garantidos, diz-se que o jogo é “não-cooperativo”, caso contrário, diz-se que é “cooperativo”. Jogos em que as recompensas dos jogadores estão relacionadas de forma inversa, ou seja, o ganho de um jogador implica necessariamente na perda para o outro, constituem os chamados “jogos estritamente competitivos” ou “jogos de soma zero”. Todavia, uma característica comum de todos estes jogos é a presença de decisões estratégicas por parte dos jogadores, o que denomina estes jogos como “jogos de estratégia”. A possibilidade de se estabelecer os compromissos garantidos é o que determinará se o jogo é cooperativo ou não.

Independentemente do tipo de jogo, os jogadores atuarão com suas estratégias e seus conjuntos de informações. Sendo racionais, os agentes não decidem considerando apenas a etapa que se encontram, mas também com base em todo o processo decorrido até o momento de sua escolha e o seu desdobramento futuro. A estratégia é um plano de ações que especifica o conjunto de estratégias dos jogadores em todos os momentos.

Desta forma, conjunto de estratégias, ou espaço de estratégias, é o conjunto de estratégias que cada jogador dispõe. O conjunto de estratégias é dado por: $E_{ji} = \{e_{ji}\}$ e, a partir deste conjunto, o jogo é analisado pelas combinações possíveis de estratégias. Por sua vez, cada combinação de estratégia é dada por $E = (e_1, \dots, e_n)$, onde e_1 é a estratégia do jogador 1, e_2 do jogador 2, até o jogador “n”. Quando um jogador tem certeza de que se encontra em um determinado nó, seu conjunto de informações é um conjunto unitário. Caso contrário, o conjunto de informações conterá todos os nós que ele considerar possíveis de serem alcançados naquela etapa (FIANI, 2006)

Por fim, deve-se considerar que existem dois tipos de situações: jogos com informação perfeita e jogos com informação imperfeita. “Um jogo é dito de informação perfeita quando todos os jogadores conhecem toda a história do jogo antes de fazerem suas escolhas. Se algum jogador, em algum momento do jogo tem de fazer suas escolhas sem conhecer exatamente a história do jogo até aquele momento, o jogo é dito de informação imperfeita.” (FIANI, 2006, p. 61). O modo formal de definir um jogo de informação perfeita é dizer que todos os seus conjuntos de informação são unitários.

Estas informações são utilizadas pelos jogadores e, no caso de jogos com muitos jogadores, os elementos comuns do comportamento racional passam a ser limitados e as estratégias puras frequentemente adotadas. Assim, os jogadores estarão inclinados a escolher a mesma estratégia que os jogadores que ele percebe como semelhantes a si mesmo, não ocorrendo este comportamento para o caso de perceberem que os outros jogadores possuem menos informações (WOODERS; CARTWRIGHT, 2003).

2.3.2 Solução para jogos utilizando o equilíbrio de Nash

Dentre os métodos para solucionar um jogo, o mais conhecido é o equilíbrio proposto

por Nash (1951). No equilíbrio de Nash os jogadores têm o conhecimento sobre as estratégias dos seus concorrentes e escolhem a melhor estratégia possível, levando em consideração as escolhas de todos os outros jogadores. Este tipo de escolha estabelece uma situação na qual nenhum dos participantes terá incentivo a mudar de estratégia. Assim, quando o resultado encontrado for a melhor resposta possível de cada jogador às estratégias dos demais, considera-se que foi encontrado o equilíbrio de Nash para o jogo (BIERMAN; FERNANDEZ, 1998).

Este equilíbrio, ao contrário das teorias econômicas de otimização, não apresenta respostas sob uma forma maximizada ou minimizada, mas uma solução de compromisso que visa contemplar os diferentes interesses envolvidos. Por exemplo, na escolha de um sistema de tratamento de esgoto, um hipotético jogador chamado “econômico” optaria por um sistema de menor custo, enquanto um outro hipotético jogador chamado “ecológico” optaria por um sistema mais eficiente. Se fosse considerada somente a opinião de um desses jogadores, haveria uma decisão do tipo: (i) mais barata, mas não tão eficiente ao ponto de satisfazer às restrições legais, ou (ii) mais eficiente, mas não tão acessível à determinada realidade financeira. A maximização ou a minimização da resposta de um determinado problema proporciona soluções deste tipo. Todavia, o equilíbrio de Nash propõe uma solução que é construída com base na interação entre os jogadores, o que poderia satisfazer razoavelmente os interesses conflitantes.

Segundo Varian (2003), o equilíbrio de Nash é encontrado quando em um jogo existam nas linhas as escolhas $l_1, l_2, \dots, l_L$, e na coluna as escolhas $c_1, c_2, \dots, c_C$, e para cada escolha “l” feita por linha, seja $b_c(l)$ haja uma melhor resposta para coluna, e para escolha “c” feita por coluna, seja $b_l(c)$ haja uma melhor resposta para a linha. De forma geral, o equilíbrio de Nash é um par de estratégias (l^*, c^*) tal que: $c^* = b_c(l^*)$; e $l^* = b_l(c^*)$. De outra forma, para que uma combinação de estratégias seja considerada um equilíbrio de Nash é necessário que,

para cada estratégia e_i^* , tenhamos $f_i(e_i^*, e_{-i}^*) \geq f_i(e_i, e_{-i})$, para todo e_i e todo “i”, onde f_i é a função de recompensa para cada jogador “i” (FIANI, 2006).

A noção de equilíbrio de Nash possui certa lógica, mas também alguns problemas, como a característica de alguns jogos possuírem mais de um equilíbrio de Nash ou nenhum. O primeiro caso pode ocorrer quando os agentes atribuem uma probabilidade para cada estratégia e escolhem uma frequência ótima para jogá-la, o que é conhecido como “estratégia mista”. Quando existem jogadores adotando estratégias mistas sempre existirá pelo menos um equilíbrio de Nash. Todavia, quando os agentes escolhem uma estratégia de forma definitiva, ou seja, cada agente faz uma escolha e a mantém, tem-se o tipo de estratégia chamada “estratégia pura”, na qual, para alguns casos, não existe, de forma absoluta, o equilíbrio de Nash, representando isto o segundo maior problema desta teoria (VARIAN, 2003).

Ademais, o conceito do equilíbrio de Nash não implica que a situação resultante das decisões conjuntas seja a melhor possível. Quando a situação de pelo menos um jogador pode melhorar, sem que a situação de nenhum dos outros jogadores piore, diz-se que houve uma melhoria paretiana, ou uma melhoria no sentido de Pareto. Todavia, o conceito do equilíbrio de Nash permanece útil para a compreensão dos jogos simultâneos, principalmente porque este conceito procura captar as situações em que os agentes não teriam estímulos para mudar suas decisões (FIANI, 2006).

Inúmeros pesquisadores têm dedicado suas pesquisas na busca de meios de se alcançar o equilíbrio de Nash em jogos através de algoritmos ou métodos. Porter, Nudelman e Shoham (2008) apresentaram dois métodos para encontrar este equilíbrio em jogos na forma estratégica ou normal, sendo um para jogos com 2 jogadores e um para jogos de “n” jogadores. Os autores procuraram identificar algoritmos que fossem relativamente simples, mas que contivessem um poder computacional grande suficiente para tornar a aplicação prática. Segundo os autores, este problema tem sido descrito como o mais fundamental na

interface das ciências da computação e da Teoria dos Jogos.

Porter, Nudelman e Shoham (2008) comentam que o padrão recomendável para esses algoritmos é possuir as seguintes características: solidez, integralidade, e baixa complexidade computacional. Para os autores, um algoritmo é considerado sólido quando qualquer solução por ele proposta seja realmente uma solução; é considerado íntegro se sempre que pelo menos uma solução existir, o algoritmo encontra-a; e é considerado de baixa complexidade computacional quando o crescimento do número de iterações necessárias não ultrapasse seja maior do que o crescimento não polinomial. No entanto, os autores afirmam que é muito difícil atender essas três características simultaneamente. No caso dos algoritmos por eles propostos, os autores abriram mão da terceira característica.

Com base na literatura, os autores identificaram que, para os jogos com 2 jogadores, o problema poderia ser formulado como um problema de complementaridade linear (LCP), como no algoritmo de Lemke-Howson. Para jogos com “n” jogadores, os melhores algoritmos existentes foram baseados na idéia não-trivial da estrutura matemática do problema, como no caso do proposto por Govindan-Wilson. Do ponto de vista dos autores, estes algoritmos são todos os sólidos e íntegros, mas complexos. Eles adicionam que a literatura existente também não fornece uma medida útil do desempenho empírico, porque a maioria dos testes é apenas para jogos aleatórios, em que cada pagamento é estabelecido de forma independente a partir de uma distribuição uniforme (PORTER; NUDELMAN; SHOHAM, 2008).

Em seu artigo proposto, Porter, Nudelman e Shoham (2008) divergiram dos tradicionais algoritmos aplicados em Teoria dos Jogos em basicamente dois pontos: construíram um novo algoritmo baseado em heurísticas simples; e testaram o algoritmo proposto contra os algoritmos existentes. O par de algoritmos propostos demonstrou funcionar bem na prática. Especificamente, eles superaram os algoritmos anteriores de Lemke-Howson em jogos de 2 jogadores, e de Govindan-Wilson em jogos de “n” jogadores. Ainda segundo

os autores, o primeiro passo de ambos os algoritmos é verificar se existe no jogo um equilíbrio de estratégia pura. Esta etapa é feita de maneira rápida, mesmo em jogos grandes. Após isto, os algoritmos passam a explorar os perfis dos jogadores e são capazes de encontrar todos os equilíbrios de Nash.

No primeiro conjunto de experimentos, foram comparados o desempenho do primeiro algoritmo com o de Lemke-Howson, para 2 jogadores. Foram definidos 300 jogos, elaborados a partir de dois jogadores e suas 24 distribuições diferentes. O segundo algoritmo teve, em média, um tempo de execução relativamente baixo e encontrou uma solução para a maioria dos jogos contrastando com os resultados propostos pelo algoritmo de Govindan-Wilson. Desta forma, os algoritmos propostos tendem a achar os equilíbrios mais rapidamente do que os outros algoritmos. Em média, o equilíbrio encontrado por Lemke-Howson em jogos de 2 jogadores têm mais de 10 ações por jogador (de um total de 300), enquanto que o equilíbrio encontrado por Govindan-Wilson em jogos de 6 jogadores têm, em média, 2,3 ações por jogador (PORTER; NUDELMAN; SHOHAM, 2008).

Por sua vez, McKelvey et al. (2010) propuseram o *software* Gambit para encontrar a solução para jogos não-cooperativos. Este *software* inclui uma interface gráfica interativa para a construção e análise de jogos na forma extensiva ou na forma estratégica e um grande número de ferramentas para computar os equilíbrios de Nash ou outras soluções para os jogos. Além disto, possui um conjunto de relatórios para comunicar os resultados.

As principais características do Gambit são: ser multi-plataforma; possuir interface gráfica; permitir encontrar o equilíbrio por linha de comando; *extensibilidade* e interoperabilidade. No entanto, algumas limitações podem ser importantes em algumas aplicações, tais como: ser uma aplicação somente para jogos finitos e incorporar somente a Teoria dos Jogos não-cooperativos. Todavia, o Gambit efetivamente contribui para solucionar uma gama extensa de jogos em diversas áreas de pesquisa (MCKELVEY et al., 2010)

2.3.3 Aplicações em recursos hídricos e saneamento

A aplicação da Teoria dos Jogos para resolver problemas ambientais não é recente. Szidarovszky e Duckstein (1984) já demonstravam como um modelo multicritério que representava um problema regional de sistema de águas subterrâneas de um aquífero na Hungria poderia ser resolvido por meio da Teoria dos Jogos. A ideia principal do estudo era fornecer uma análise em conjunto da exploração de recursos minerais, abastecimento de água e proteção ambiental.

Estes três pontos de vista foram representados por três funções objetivo, que dificilmente poderiam ser expressas em unidades mensuráveis e pelas quais a melhor solução para um objetivo geralmente produziria valores longe do ideal para os outros objetivos. Como resultado, os autores propuseram encontrar não uma solução global ótima para todo o sistema, mas uma solução que fosse satisfatória para atender todos os objetivos, considerados conflitantes entre si.

Como resultados desse trabalho, Szidarovszky e Duckstein (1984) concluíram que os conceitos da Teoria dos Jogos poderiam ser usados para desenvolver uma metodologia de solução para uma determinada classe de problemas multiobjetivo, com base em certos axiomas que a solução deve satisfazer. Também afirmaram ser o ponto de equilíbrio de Nash um ponto de solução mínima, ou o resultado da escolha subjetiva do tomador de decisão (SZIDAROVSKY; DUCKSTEIN, 1984).

Outro exemplo de aplicação pode ser visto no trabalho de Krawczak e Zicsakowski (1985), que deram ênfase no controle da qualidade da água de um sistema que continha três subsistemas, a saber: controle de distribuição de água, controle da retenção de água e controle da qualidade da água. Os autores aplicaram a Teoria dos Jogos em conjunto com os conceitos

do equilíbrio de Nash para propor uma solução para o conflito no lançamento de esgoto por parte de agentes poluidores em um reservatório.

Nesse artigo, Krawczak e Zicsakowski (1985) consideraram o reservatório de um rio e vários poluidores ao seu redor. O reservatório ficava no fluxo do rio e cada poluidor foi tratado como um jogador. Foram utilizadas as funções de decaimento propostas por Streeter e Phelps e os conceitos da Teoria dos Jogos a fim de propor estratégias para cada agente poluidor. Para isto, consideraram que o principal objetivo no controle da qualidade da água seria manter os níveis finais de DBO e DQO mais próximos possíveis aos níveis pré-definidos (KRAWCZAK; ZICSAKOWSKI, 1985).

Por fim, com base nos conceitos do equilíbrio de Nash, Krawczak e Zicsakowski (1985) conseguiram delinear estratégias para o controle da poluição no reservatório, o que proporcionou uma solução satisfatória para o conflito entre os jogadores. Assim os autores concluíram que a Teoria dos Jogos poderia ser uma ferramenta também para problemas de otimização (KRAWCZAK; ZICSAKOWSKI, 1985).

Tecle, Fogel e Duckstein (1988) também apresentaram a resolução de um problema multicritério envolvendo a aplicação de Programação por Compromisso (baseado na distância entre as alternativas e uma alternativa ideal), Teoria dos Jogos e ELECTRE I. O estudo de caso teve como base o projeto de tratamento de esgoto da cidade de Nogales, Estados Unidos, que trata das águas residuais provenientes das cidades geminadas de Nogales, Estados Unidos, e Nogales, México.

O procedimento multicritério proposto pelos autores consistiu nos seguintes passos: definição dos objetivos desejados; identificação das restrições para os objetivos; seleção dos critérios de avaliação; determinação das escalas de medida para descrever o intervalo de valores possíveis (quantitativa) ou a posição relativa (qualitativa) para os critérios; geração de esquemas alternativos para atingir os objetivos desejados; formulação de uma matriz de

avaliação, com valores particulares ou posições relativas de uma alternativa em termos de critérios; execução da decisão multicritério e/ou multiobjetivo com posterior análise de sensibilidade; adoção de uma solução de compromisso, que implique uma preferência e não necessariamente a solução ideal; e iteração, no caso em que a solução final não é aceitável para os integrantes (TECLE; FOGEL; DUCKSTEIN, 1988)

Especificamente, para o estudo de caso proposto, cinco objetivos foram identificados, sendo eles: proteção das águas subterrâneas; qualidade dos efluentes; reutilização das águas residuais; confiabilidade do sistema. Também foram considerados 15 diferentes arranjos, consistindo em combinações de sete diferentes tipos de sistemas (tabela 2.1). Os três primeiros para tratar as águas residuais antes do nível secundário. Os quatro outros sistemas para serem adicionados a cada um dos três primeiros, individualmente ou em pares, a fim de elevar a qualidade e a capacidade de tratamento.

Tabela 2.1 – Arranjos considerados por Tecle, Fogel e Duckstein (1988)

Alternativa	Descrição
A1	Lagoas facultativas
A2	Lagoas aeróbicas
A3	Valos de Oxidação
A4	A1 + Remoção química de algas
A5	A2 + Remoção química de algas
A6	A1 + Filtração biológica
A7	A2 + Filtração biológica
A8	A4 + Remoção de nutrientes
A9	A5 + Remoção de nutrientes
A10	A6 + Remoção de nutrientes
A11	A7 + Remoção de nutrientes
A12	A3 + Remoção de nutrientes
A13	A1 + Disposição no solo
A14	A2 + Disposição no solo
A15	A3 + Disposição no solo

Fonte: Tecle, Fogel e Duckstein (1988, p. 385)

As três técnicas de apoio a tomada de decisão selecionadas (Programação por Compromisso, Teoria dos Jogos e ELECTRE I) foram utilizadas para analisar o problema

separadamente. Como resultado, Tecle, Fogel e Duckstein (1988) identificaram que a alternativa A10 foi o sistema mais frequentemente preferido pelas três técnicas. A Programação por Compromisso e a Teoria dos Jogos identificaram forte tendência para a alternativa A10, enquanto o ELECTRE I identificou as alternativas A10 e A13 como as mais frequentemente preferidas no âmbito do problema em questão.

Tecle, Fogel e Duckstein (1988) ainda identificaram diferenças na modelagem da gestão de águas residuais, levando em consideração a complexidade em satisfazer uma série de restrições e atender a uma série de objetivos. Por exemplo, a Programação por Compromisso usa pesos para determinar soluções, a Teoria dos Jogos usa a distância geométrica como função objetivo para chegar à solução, e o ELECTRE I usa comparações par a par entre as alternativas para determinar a sua classificação. Ainda, na Programação por Compromisso e no ELECTRE I o tomador de decisão pode escolher os pesos e especificar o valor dos parâmetros. No entanto, a melhor solução é unicamente determinada uma vez que o tomador de decisão aceitou os axiomas da metodologia (TECLE; FOGEL; DUCKSTEIN, 1988).

Carraro, Marchiori e Sgobbi (2005), em um artigo sobre a negociação e a barganha não-cooperativa para as questões relacionadas com a água, definem que conflitos podem surgir nas situações em que os tomadores de decisão poderiam beneficiar-se mutuamente se chegassem a um acordo, mas não estabelecem uma cooperação devido aos seus interesses serem opostos.

Os autores levantam a questão que, em geral, os modelos teóricos fornecem descrições do processo de negociação e previsões de como os jogadores se comportam. No entanto, como a evidência experimental mostra, as previsões dos modelos teórico muitas vezes não são correspondentes aos processos de negociação real. Portanto, os modelos poderiam não ser tão úteis como ferramentas de apoio à decisão (CARRARO; MARCHIORI; SGOBBI, 2005).

Desta forma, os autores prosseguem afirmando que muitos dos problemas ambientais seriam melhores tratados dentro de uma abordagem de jogos, por meio da Teoria dos Jogos, como, por exemplo, as questões relacionadas à gestão de recursos naturais. Em outras questões a modelagem assumiria um jogo de puro conflito, no qual o pagamento a um indivíduo implicaria em uma redução no pagamento de seus oponentes. Nestas situações, os jogadores devem encontrar uma estratégia para dividir os recursos de uma forma que seja aceitável para todas as partes (CARRARO; MARCHIORI; SGOBBI, 2005).

Ainda nesta direção, Carraro, Marchiori e Sgobbi (2005) defendem que a decisão negociada é cada vez mais aceita como a melhor abordagem na gestão dos recursos naturais. Além disto, afirmam que essas soluções negociadas são mais facilmente aceitas e, portanto, possivelmente mais fáceis de serem implantadas. No entanto, o processo de negociação deve envolver não somente a apresentação de propostas e compromissos, mas também prever as preferências dos jogadores e suas prováveis estratégias.

Após realizar uma extensa revisão bibliográfica sobre a aplicação da Teoria dos Jogos e negociação na gestão da qualidade das águas, Carraro, Marchiori e Sgobbi (2005) constataram que a maioria da literatura econômica apresenta a solução a esses problemas do ponto de vista da otimização, especificamente a eficiência econômica. Alternativamente, também identificaram outros estudos que utilizam a Teoria dos Jogos para auxiliar na procura de soluções não necessariamente mais eficientes do ponto de vista econômico, mas também a que seja socialmente ou politicamente mais viável.

Carraro, Marchiori e Sgobbi (2005) concluíram que, dada a complexidade dos processos e das questões ambientais envolvidas, a Teoria dos Jogos apresenta um elevado potencial para ajudar no processo de um acordo aceitável para todas as partes. A abordagem proposta pode apoiar o processo de negociação direta ou indiretamente, pelo encurtamento do período de tempo necessário para chegar a um acordo por meio da identificação (teórica) de

um “espaço de aceitabilidade”. Ou seja, as propostas que tenham mais chances de serem aceitas são identificadas e as propostas que seriam (quase) certamente rejeitadas são descartadas logo de início (CARRARO; MARCHIORI; SGOBBI, 2005).

Semelhantemente, Madani (2010) também contribui para esta discussão ao defender que os conflitos sobre as questões da água não estão apenas limitados a custos ou benefícios, no que muitos estudiosos em saneamento estão focados. Para Madani (2010) esses conflitos também podem surgir a partir de aspectos sociais e políticos da concepção, exploração e gestão de projetos ambientais. Portanto, ao analisar, operar ou conceber um projeto de saneamento, um tomador de decisões deveria garantir que o projeto não fosse apenas técnico, ambiental, financeira ou economicamente viável, mas também social e politicamente. Para o autor, este é um desafio para engenheiros que estão acostumados a medir o desempenho dos projetos apenas em termos econômicos, financeiros e físicos.

Ainda segundo Madani (2010), técnicas de otimização, tais como a programação linear, podem encontrar os valores ótimos das variáveis de decisão. No entanto, se o problema não for formulado corretamente, poderá deixar de fornecer informações mais abrangentes sobre os comportamentos estratégicos dos tomadores de decisão que estão envolvidos no processo de escolha.

Assim, como uma contribuição, Madani (2010) ilustra a utilidade da Teoria dos Jogos não-cooperativos em conjunto com estratégias puras na análise de sistemas de água e foca na resolução de conflitos através da discussão dos conceitos básicos da Teoria dos Jogos. Também discutem a forma como a estrutura dinâmica dos problemas de recursos hídricos e a evolução do jogo podem afetar o comportamento dos agentes em diferentes períodos do conflito.

Três tipos de jogos, dois por dois foram apresentados, e seus equilíbrios foram introduzidos. Em cada jogo foram encontradas algumas correspondências entre a Teoria dos

Jogos e a gestão de recursos hídricos, as quais foram discutidas com base em cada exemplo. Além disso, os resultados do tipo ótimo de Pareto foram introduzidos para mostrar como os resultados da Teoria dos Jogos podem diferir dos resultados dos métodos de engenharia de sistemas (MADANI, 2010).

Como conclusão, Madani (2010) afirma que a Teoria dos Jogos fornece meios para a compreensão e resolução de conflitos de água, que muitas vezes são multicritérios, com vários tomadores de decisão envolvidos. Ainda segundo o autor, esta teoria poderia prever se as resoluções ideais são alcançáveis e esclarecer o comportamento dos tomadores de decisão em condições específicas (MADANI, 2010).

Por sua vez, Wei et al. (2010) concordam que a administração de recursos hídricos geralmente envolve interação entre diferentes autores com diferentes pontos de vistas e deve lidar com a difícil tarefa de atender satisfatoriamente aos anseios de todos os envolvidos. Os autores evidenciam os conflitos entre qualidade e quantidade de água, que são geralmente causados por: escassez de água devido à precipitação irregular; vários usuários e fontes poluentes; diferentes graus de poluição a montante restringindo o uso da água na bacia hidrográfica a jusante; e a transferência de água entre bacias.

Para solucionar estes conflitos, foi sugerida por Wei et al. (2010) a criação de mercados de água, como os existentes em alguns países, como a Austrália, Estados Unidos, Chile, Índia e Espanha, em conjunto com a Teoria dos Jogos, como uma abordagem apropriada para modelar e propor soluções para resolver esses conflitos.

Foi proposto também um estudo de caso que teve como objetivo estabelecer um jogo com modelos teóricos para analisar a alocação de água e os conflitos de poluição de nitrogênio existentes na rota Sul-Norte do Projeto de Transferência de Água na China (WEI et al., 2010). Para isto, foi feita uma descrição detalhada das cidades envolvidas e os principais interesses e problemas de cada uma delas.

Para criar este jogo, Wei et al. (2010) propuseram funções de regressões, que foram utilizadas para definir o pagamento dos jogadores, e quatro cenários foram desenvolvidos para analisar as incertezas da simulação. O primeiro cenário foi considerado o mais conservador, que contemplava as práticas já utilizadas pelos agentes. Os outros três cenários foram projetados de acordo com as possíveis mudanças de restrições e variáveis de entrada no primeiro cenário, sendo: o segundo cenário (otimista), em que a situação é melhor do que no primeiro cenário em termos econômicos e ambientais. Em contrapartida, o quarto cenário é o mais pessimista, sendo que o terceiro cenário situa-se entre os cenários dois e quatro.

A partir disto, Wei et al. (2010) definiram o jogo em dois níveis, sendo um grande jogo e quatro sub-jogos. O jogo principal foi chamado como jogo de perda-benefício, no qual foi possível comparar os benefícios e perdas de diferentes atores no âmbito da cooperação e não-cooperação. O primeiro sub-jogo (jogo 2) é um jogo de obtenção de água, onde os sub-jogadores fazem decisão de como obter a sua água. Os outros três sub-jogos (jogos 3, 4 e 5) são classificados como jogo de redução, onde os sub-jogadores irão decidir se devem reduzir a descarga poluente de nitrogênio no rio. A ordem de resolução dos jogos é a partir do jogo principal, e depois o jogo 2, jogo 3, e assim por diante.

Como conclusão, Wei et al. (2010) revelam que o jogo dificilmente seria resolvido sem a cooperação entre os jogadores, mesmo sob um cenário otimista, tendo identificado ainda que a cooperação com os outros jogadores é a estratégia dominante do jogo. O estudo também provou que a cooperação traz algumas perdas para alguns jogadores, mas produz mais benefícios coletivos. No entanto, os jogadores normalmente não estão dispostos a cooperar, porque eles terão de enfrentar os riscos de perdas, resultado parecido com o jogo do Dilema do Prisioneiro (WEI et al., 2010).

2.4 Tomada de decisão em grupos

Devido a diferentes fatores, a maioria das decisões, principalmente aquelas que envolvem problemas complexos, como os ambientais, ocorrem na presença de vários agentes, que decidem a partir de uma quantidade bem definida de alternativas viáveis em um comitê (MAASER, 2010).

Kiker et al. (2005) concordam que as decisões ambientais muitas vezes são problemas complexos que envolvem diferentes agentes, com suas respectivas prioridades ou objetivos, sendo estes problemas os do tipo que os seres humanos estão mal equipados para resolver sem o auxílio de uma ferramenta de apoio. Segundo Kiker et al. (2005), a maioria das pessoas, quando confrontado com tais problemas, tentará usar abordagens intuitivas ou heurísticas como uma tentativa de simplificar o problema. Neste processo, informações importantes podem ser perdidas, pontos de vista opostos podem ser descartados e os elementos de incerteza podem ser ignorados.

Devido a este fato, e também do compartilhamento dos recursos ambientais, os processos de decisão em grupo estão se tornando cada vez mais necessários. A decisão em grupo poderia proporcionar algumas vantagens sobre os processos individuais. Em especial, mais perspectivas do problema poderiam ser consideradas, além do benefício da presença de mais pensadores, o que frequentemente leva os grupos a aprenderem mais sobre o problema em questão (KIKER et al., 2005).

Seguindo na mesma linha de investigação, de acordo com Kocher e Sutter (2005), muitos tipos de decisões, tais como política monetária ou estratégias de negócio de empresas, geralmente é tomada em grupos ao invés de apenas um indivíduo. Baseando neste fato os autores ampliam a discussão ao verificarem que nas situações cotidianas os tomadores de decisão são mais requisitados para resolver problemas do que indivíduos. Como ilustração, eles citam reuniões de família até reuniões de comitês, também lembrando das decisões

tomadas por diretores de empresas e legisladores.

Neste cenário, Kocher e Sutter (2005) afirmam ser extremamente negligente desconsiderar a diferença de comportamento entre indivíduos e grupos, o que frequentemente ocorre nos modelos tradicionais, dada a importância das decisões em grupos. Por exemplo, se existe um equilíbrio de Nash ou se existe uma escolha otimizada para um determinado problema, a teoria econômica prevê serem estas as melhores estratégias a serem escolhidas. Se, no entanto, os tomadores de decisão não agem de acordo com as previsões de equilíbrio, explicações comportamentais ganham importância nas decisões (KOCHER; SUTTER, 2005).

Em extensa revisão bibliográfica, Kocher e Sutter (2005) encontraram evidências de que grupos são jogadores mais racionais do que os indivíduos (em Teoria dos Jogos) e que grupos comportam-se mais em linha com maximização, mas seus resultados consideram mais os terceiros do que a si próprios. Assim, as decisões do grupo são, em média, superiores às decisões individuais em cerca de 4%.

No entanto, Kocher e Sutter (2005) afirmam que nenhum artigo pôde fornecer fortes evidências de que as decisões em grupo podem cumprir significativamente melhor com a teoria da utilidade esperada. Em contraponto, citam que embora grupos e indivíduos se desviem do pensamento racional, quando lidam com informações excessivas, os grupos são mais atingidos por esta desvantagem de informações, podendo ser os grupos responsáveis pelas decisões menos racionais do que indivíduos nestas situações.

Tendo também identificado que tomadores de decisão são geralmente modelados como indivíduos e que as decisões do grupo não podem ser adequadamente explicadas por simples agregação das preferências individuais ou por simples teorias de decisão em grupo, a pesquisa realizada procurou verificar se os grupos de tomadores de decisão seriam realmente mais racionais e se as decisões em grupo poderiam superar os resultados das decisões feitas por indivíduos (KOCHER; SUTTER, 2005).

Para analisar as diferenças entre as decisões realizadas por grupos e indivíduos, Kocher e Sutter (2005) escolheram um concurso de beleza como jogo, onde “n” tomadores de decisão, sejam eles indivíduos ou grupos, escolhem uma nota “x” entre 0 e 100. A média de todas as escolhas para a rodada “i” é denotada “x*”. O vencedor é o tomador de decisão cuja nota está mais próxima de “x*”. Segundo os autores, ao estender a configuração experimental a um grupo contra outro grupo e a um grupo contra um indivíduo, seria possível analisar as escolhas do tomador de decisão em uma situação interativa. Além disso, poderia verificar a perda ou a aversão ao risco, o que torna este, portanto, um excelente quadro para responder as perguntas da pesquisa proposta.

Como um resultado preliminar, os autores consideraram que a literatura da psicologia é ambígua ao procurar estabelecer se os grupos são melhores ou piores no raciocínio ou aprendizagem do que os indivíduos. No entanto, resultados recentes de experimentos econômicos sugerem que grupos poderiam comportar-se relativamente mais em linha com as previsões da Teoria dos Jogos do que os indivíduos (KOCHER; SUTTER, 2005).

Ainda com relação ao concurso de beleza, Kocher e Sutter (2005) afirmam ser difícil indicar diferenças entre grupos e indivíduos na primeira rodada do jogo. No entanto, quando o jogo é repetido, os grupos aprendem a dinâmica muito mais rapidamente e aumentam a sua capacidade de raciocínio. Baseados nestas evidências, os autores sugerem que decisões importantes e recorrentes nas sociedades sejam confiadas a grupos, especialmente quando se trata de um grupo de especialistas (KOCHER; SUTTER, 2005).

Não somente a Teoria dos Jogos poderia ser aplicada para avaliar ou auxiliar a tomada de decisão em grupos. De acordo com Srdjevic (2007), outras duas metodologias distintas também são comumente usadas para modelar essas decisões. A primeira são os métodos de tomada de decisão multicritério, que são particularmente úteis no tratamento de problemas estruturados. A outra é a teoria da escolha social, com seus sistemas de votos, que é utilizada

quando as informações são mínimas ou altamente qualitativas para o grupo.

Srdjevic (2007) argumenta que, se a metodologia multicritério é necessária na tomada de decisão em grupo, o AHP seria provavelmente uma das melhores escolhas. Por outro lado, se a metodologia da escolha social é selecionada como mais favorável para a tomada de decisão em grupo, várias abordagens têm sido propostas para agregar as respostas dos eleitores em uma classificação de compromissos. Métodos de eleição conhecidos são a pluralidade de voto, o sistema de Hare, a contagem de Borda, o voto, comparações par a par e votação de aprovação (SRDJEVIC, 2007).

Segundo Srdjevic (2007), nas aplicações multicritério, o tamanho de um grupo pode tornar-se crítico porque a maioria dos métodos multicritério se baseia no pressuposto de que o princípio da homogeneidade é válido. Por outro lado, quando se consideram as aplicações da teoria da escolha social, as questões mais importantes são a justiça e o grau de manipulação do sistema de votação utilizado. Em um contexto de grupo de decisão, métodos multicritério e escolha social possuem desempenhos diferentes com relação a questões como justiça, equidade, transparência ou a manipulação em várias fases de implementação. Vários autores relatam que o uso de um ou outro tipo de método podem facilmente declarar vencedores diferentes (SRDJEVIC, 2007).

Em sua pesquisa, Srdjevic (2007) propõe uma metodologia para combinar o método multicritério com a teoria da escolha social na tomada de decisão em grupo. O problema analisado foi a seleção do plano de gestão da água mais desejável em longo prazo para um comitê de bacia hidrográfica. O comitê foi considerado como um grupo global, que poderia se dividir em um determinado número de subgrupos de interesse. Supondo-se que certas decisões seriam feitas nos subgrupos, a decisão final deveria certamente ser feita no nível global e de maneira democrática. Foi escolhido o Comitê de Água da Bacia do Rio São Francisco no Brasil como caso para o estudo.

Segundo o autor, em grandes comitês de bacias hidrográficas, como, por exemplo, o Rio São Francisco com mais de 60 membros, o processo de tomada de decisões relacionado ao planejamento e a gestão dos recursos hídricos é, em geral, realizado com a participação de conselheiros. Estes conselheiros trazem interesses particulares e, sobretudo, os interesses dos ambientes sociais, políticos ou econômicos de onde estão vindo (SRDJEVIC, 2007).

A metodologia proposta por Srdjevic (2007) foi organizada como um processo de duas fases. Na primeira fase o AHP foi aplicado dentro de cada subgrupo para determinar as preferências de um determinado conjunto de planos de gestão. Na segunda etapa, duas possibilidades foram propostas para tratar os resultados obtidos no AHP. A primeira era continuar dentro de um contexto multicritério e matematicamente agregar os pesos prioridade, tal como foram recebidos dos subgrupos. Esta agregação poderia ser feita por qualquer método de média ponderada ou método geométrico médio. A segunda opção seria executar uma agregação pelos métodos de escolha social usando as preferências obtidas pela AHP em cada subgrupo e algum dos métodos de votação para simular a eleição dos planos.

Como resultado do trabalho, Srdjevic (2007) encontrou uma boa concordância entre os resultados obtidos através das duas abordagens diferentes. Empregando a metodologia baseada no AHP foi possível controlar e preservar a coerência do processo decisório. A decisão final foi obtida por agregação matemática. Foi também identificado que a redução de informação poderia levar a resultados diferentes para os distintos métodos de votação. No entanto, a compensação para essa desvantagem é que poderia haver uma boa chance de que a meta final fosse alcançada.

Srdjevic (2007) também indica haver indícios de que a abordagem AHP em conjunto com uma ou outra técnica de voto teria potencial e flexibilidade para alcançar uma melhor adaptação aos problemas de tomada de decisão da vida real, como os presentes nos comitês de água, ou instâncias de decisão semelhantes. Além disto, a utilização dessas duas ferramentas

em conjunto assegura a homogeneidade e coerência global do processo de decisão, bem como garantem que a equidade do processo não seja violada (SRDJEVIC, 2007).

Finalmente, Peniwati (2007) realizou um estudo para o desenvolvimento de critérios técnicos, físicos, lógicos e científicos para a avaliação de métodos de apoio de tomada de decisão em grupo. Para isto, o autor procurou identificar semelhanças e diferenças entre os métodos, com o objetivo de mostrar quais seriam as vantagens na utilização de cada um.

Com base em alguns critérios para julgar os métodos de decisão em grupos existentes na literatura, novos critérios foram selecionados e incorporados para o estabelecimento de 16 novos critérios. Em seguida, cada um dos métodos de tomada de decisão foi avaliado, atribuindo uma intensidade que o descrevesse melhor para cada critério (PENIWATI, 2007).

Os critérios escolhidos por Peniwati (2007), foram: (i) eficácia na participação, classifica melhor os métodos que possibilitam interações com o tomador de decisão; (ii) aprendizagem, classifica melhor os métodos que facilitam a aprendizagem aos membros do grupo; (iii) escopo, classifica melhor os métodos que possuem claramente definidas a técnica de decisão utilizada; (iv) desenvolvimento de alternativas, são melhores classificados os métodos que possibilitam a construção das alternativas pelo tomador de decisão; (v) amplitude, são melhores classificados os métodos que são multicritério; (vi) profundidade, os métodos que permitem a quebra de alternativas em sub-alternativas; (vii) a fidelidade dos julgamentos, um método é mais bem classificado se incluir a intensidade das preferências; (viii) amplitude e profundidade da análise, classificam melhor os métodos que facilitam um pensamento cuidadoso e sua revisão; (ix) separação cardinal de alternativas, um método de agregação é mais bem avaliado se ele usa uma escala de intervalo, de razão, ou absoluta; (x) priorização dos membros do grupo, é classificado como melhor o método que permite determinar os pesos para os membros como o grupo desejar; (xi) consideração de outros atores e interessados, são melhores os métodos que consideram outros agentes envolvidos na

decisão que não estão no grupo; (xii) científico e matemático, são melhores conceituados os métodos que utilizam axiomas matemáticos para a geração dos seus resultados; (xiii) aplicabilidade aos valores intangíveis, classifica o método quanto sua medição em relação aos bens intangíveis e apresenta uma avaliação da sua importância relativa, quer em termos absolutos ou relativos (xiv) aplicabilidade psicofísica, se for psicofisicamente aplicável; (xv) aplicabilidade na resolução de conflitos, se um método tem uma abordagem ou padrões normativos para encontrar a melhor solução para um grupo em conflito, que seja compreensível, aceitável, prático, flexível, e que tenha sido demonstrado que funciona bem na prática; e (xvi) validade dos resultados ou previsões, que classifica melhor os métodos que possuem resultados mensuráveis (PENIWATI, 2007).

Os métodos de tomada de decisão em grupo escolhidos por Peniwati (2007) podem ser classificados como métodos de estruturação, métodos de ordenação e classificação ou métodos de estruturação e medição. Os métodos de estruturação escolhidos foram: Analogia e Associação de Atributos; Exame de Fronteira; Conexão Morfológica; *Brainstorming*; e “O que-Porte está nos detendo”. Os métodos de ordenação e classificação escolhidos foram: Votação; Técnica Nominal de Grupo; Método Delphi; Incrementalismo Disjunto; Avaliações de Matrizes; Programação por Metas, Medição de Conjunto; e Sobre-classificação. Os métodos de estruturação e medição escolhidos foram: Análise Bayesiana; MAUT; e AHP.

Como resultado do trabalho, os métodos foram comparados com base nos 16 critérios escolhidos e uma tabela foi criada para obter a classificação global dos métodos (tabela 2.2). Os autores concluíram que, devido à emergência de múltiplos atores, com pontos de vista conflitantes, passou a existir a necessidade de se pensar em plataformas que também considerem as interações estratégicas que ocorrem entre os tomadores de decisão como sendo um dos passos do processo de modelagem de problemas multicritério.

Tabela 2.2 – Métodos e critérios considerados por Peniwati (2007)

Métodos		Critérios															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Estruturação	Analogia e Associação de Atributos	b	m	m	b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Exame de Fronteira	m	m	a	b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Conexão Morfológica	b	b	b	m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Brainstorming</i>	b	m	a	ma	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Oque-Porteque está nos detendo	m	m	a	ma	a	a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ordenação e classificação	Votação	b	b	-	-	b	b	b	b	b	b	-	m	-	-	-	b
	Técnica Nominal de Grupo	m	m	m	a	b	b	b	b	-	-	-	m	-	-	-	b
	Método Delphi	m	m	m	a	b	b	b	b	-	-	-	m	-	-	-	b
	Incrementalismo Disjunto	m	a	m	m	a	b	m	m	-	-	m	b	b	b	-	m
	Avaliações de Matrizes	m	m	m	b	a	b	m	m	-	-	m	b	b	b	-	m
	Programação por Metas	b	b	m	b	a	b	ma	m	a	-	b	m	m	-	-	b
	Medição de Conjunto	b	b	m	b	b	b	ma	m	a	-	-	m	m	-	-	b
	Sobre-classificação	m	a	m	a	a	b	m	a	a	a	b	m	m	m	-	m
Estruturação e	Análise Bayesiana	m	a	m	b	b	b	ma	m	a	-	b	a	m	b	-	m
	Teoria da Utilidade	m	a	m	a	a	b	a	a	a	a	m	a	m	m	m	m
	Multiatributo																
	Método de Análise	a	ma	m	ma	a	a	ma	ma	a	ma	a	a	ma	ma	a	a
	Hierárquica																

Legenda:(-) não se aplica; (b) baixo; (m) médio; (a) alto; (ma) muito alto

Fonte: adaptado de Peniwati (2007)

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente estudo é uma pesquisa aplicada com a utilização da Teoria dos Jogos e do equilíbrio de Nash para desenvolver um método multicriterial para auxiliar na escolha das alternativas que mais se aproximam dos conceitos de sustentabilidade no processo de tomada de decisão em grupo, especificamente no processo de escolha de sistemas de tratamento de esgoto sanitário. Na parte exploratória da pesquisa, foi realizado um levantamento bibliográfico, tanto a nível nacional como internacional, referente à tomada de decisão e à Teoria dos Jogos, com suas possíveis aplicações na escolha de sistemas de tratamento de esgoto em grupos de tomada de decisão. Na parte aplicada da pesquisa, duas etapas foram definidas para propor o método acima mencionado, as quais possuem os procedimentos metodológicos mais detalhadamente explicados nos capítulos 4 e 5.

De forma geral, a primeira etapa da pesquisa aplicada (detalhada no Capítulo 4) contemplou a criação de uma Biblioteca de Tecnologias desenvolvida com o auxílio do *software* Excel[®], onde foram definidos blocos de sistemas individuais de tratamento de esgoto, como proposto por Makropoulos et al. (2008), considerando indicadores de sustentabilidade, técnicos, econômicos, ambientais e sociais. A escolha do Excel[®] se deveu, principalmente, ao fato de este *software* ser amplamente disseminado e por possuir uma interface em Visual Basic, que foi utilizada para a definição das funções.

A segunda etapa (detalhada no Capítulo 5) compreendeu a estruturação do método multicriterial com base nos blocos dos sistemas e suas respectivas funções definidos na primeira etapa. Basicamente, o método consistiu na proposição de uma função de pagamentos baseada na similaridade entre as alternativas (sistemas). Esta função foi utilizada como forma de integrar a Teoria dos Jogos e a tomada de decisão em grupos, considerando os critérios de sustentabilidade das estações de tratamento, presente nos blocos individuais. Após o cálculo dos pagamentos para os jogadores, é proposta uma verificação por meio da integração com o

software Gambit, especializado na procura do equilíbrio de Nash. A escolha deste *software* se deveu à possibilidade de importação das tabelas de pagamento, que são utilizadas para compor o jogo, por meio de uma rotina em Excel[®]. Caso algum equilíbrio seja encontrado, as alternativas que compõem o equilíbrio passam a fazer parte de um espaço de aceitabilidade, o qual pode ser utilizado pelo tomador de decisão como parâmetro para a escolha mais sustentável.

4 BIBLIOTECA DE TECNOLOGIAS

Esta etapa da pesquisa, que precede a apresentação do método no próximo capítulo, apresenta a criação de uma Biblioteca de Tecnologias, que foi formada pela agregação de blocos individuais com funções estimando os diversos aspectos dos sistemas de tratamento. Para compor esta Biblioteca de Tecnologias, os sistemas individuais de tratamento foram selecionados principalmente a partir dos dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2008), onde foram levantados os tipos de sistemas de tratamento mais utilizados no Brasil. A tabela 4.1 mostra os principais tipos de sistemas de tratamento empregados nos municípios brasileiros.

Tabela 4.1 – Principais tipos de sistemas de tratamento nos municípios brasileiros

Sistema	Quantidade
Lagoa facultativa	672
Reator anaeróbio	565
Lagoa anaeróbia	431
Filtro biológico	317
Lagoa de maturação	238
Lodo ativado	188
Lagoa aeróbia	131
Fossa séptica	109
Lagoa aerada	93
Lagoa mista	65
Valo de oxidação	27
<i>Wetland</i>	20
Outros	129

Fonte: adaptado de IBGE (2008).

Dentre os doze principais sistemas de tratamentos empregados nos municípios brasileiros, nove foram incorporados à biblioteca, não tendo sido incorporados o sistema de Fossa Séptica, por se tratar de um sistema descentralizado, ou seja, que não permitiria a sua interação com outros sistemas individuais da biblioteca. Além deste, também não foram incorporados o Valo de Oxidação e a Lagoa Mista, devido à pequena representatividade na amostra destes dois últimos sistemas.

Embora possuindo também uma baixa representatividade, o sistema *Wetland* foi incorporado à biblioteca, pois representa um dos tipos de pós-tratamento que pode ser adicionado ao final dos tratamentos convencionais para aumentar o desempenho do sistema como um todo. Ainda, também foi inserida uma variação do sistema de Filtro Biológico e outra do sistema de Lodos Ativados e, por fim, foi adicionado um sistema de tratamento preliminar, que completou os doze sistemas considerados na Biblioteca de Tecnologias: (i) Preliminar; (ii) Filtro biológico (baixa carga); (iii) Filtro biológico (alta carga); (iv) Lodo ativado (convencional); (v) Lodo ativado (aeração prolongada); (vi) Reator anaeróbio (UASB); (vii) Lagoa anaeróbia; (viii) Lagoa aerada (facultativa); (ix) Lagoa aerada (aeróbia); (x) Lagoa facultativa; (xi) Lagoa de maturação; e (xii) *Wetland*.

4.1 Escolha dos critérios

Não somente a seleção dos sistemas é suficiente para arranjar a Biblioteca de Tecnologias. Um outro aspecto necessário é a escolha dos parâmetros ou critérios que serão utilizados para serem utilizados como base de avaliação *a posteriori*. Aqui, é importante enfatizar que uma consulta prévia aos tomadores de decisão envolvidos em um processo de escolha seria necessária para definir quais seriam estes critérios a serem considerados na avaliação da sustentabilidade das alternativas. No entanto, para esta aplicação prática, que tem como intuito a apresentação do método, os critérios considerados para cada sistema foram selecionados a partir da identificação de critérios recorrentes entre os sistemas de indicadores de sustentabilidade para estações de tratamento de esgoto propostos por Alegre et al. (2007), Muga e Mihelcic (2008), Vidal et al. (2002), Kellner, Calijuri e Pires (2009) e Makropoulos et al. (2008).

Assim, a composição destes critérios recorrentes serviu para a criação de um indicador

de sustentabilidade, que foi selecionado para servir como base de comparação entre as alternativas, tendo sido considerado os critérios sociais, ambientais e econômicos, e um balanceado de variáveis entre as dimensões de sustentabilidade. O quadro 4.1 apresenta os critérios escolhidos com base nos indicadores de sustentabilidade propostos.

Muga and Mihelcic (2008)	Alegre et al. (2007)	Vidal et al. (2002)	Makropoulos et al. (2008)	Kellner et al. (2009)	Critérios escolhidos
Critérios econômicos					
Custo de implantação	Custo de implantação	Investimento	Custo de implantação	Custo total	Custo de implantação
Operação e manutenção	Operação e manutenção	Operação e manutenção	Custos operacionais	-	Custo de operação e manutenção
Custo para o usuário	-	-	Capacidade de pagamento	Tarifa med. praticada	Custo para o usuário
Critérios ambientais					
Uso de energia	Consumo de energia	Consumo de energia	Uso de energia	-	Consumo de energia
DBO	DBO	DBO	Desempenho	DBO	Remoção DBO
N	Nitrogênio total	-	-	N	Remoção N
P	Fósforo total	-	-	P	Remoção P
-	Produção de lodo	Geração de lodo	-	-	Produção de lodo
Critérios sociais					
Nível de odor	Odor	Odor	-	-	Nível de odor
Espaço livre disponível	-	-	Uso do espaço	-	Espaço necessário
Pessoal necessário	Empregados/população	-	-	-	Funcionários requeridos

Quadro 4.1 - Critérios escolhidos para compor o indicador de sustentabilidade

4.2 Definição das funções

Após a definição dos critérios que servirão para avaliar as alternativas, funções devem ser nomeadas para estimar os valores para estes critérios selecionados. Para isto, as funções para os critérios foram selecionadas na literatura a partir de, basicamente, duas maneiras: (i)

por meio de funções ou modelos determinísticos; ou (ii) por meio de funções ou modelos heurísticos, através de funções de transformação empíricas. Em ambas as formas, dado, por exemplo, a quantidade de uma determinada variável de entrada (afluente), a função estima o seu valor após o tratamento (efluente).

Dentre os critérios escolhidos para compor este indicador de sustentabilidade, os indicadores “custo de implantação”, “custo de operação e manutenção” e “custo para o usuário” foram selecionados para representar a dimensão econômica das estações de tratamento de esgoto. O indicador “Custo de implantação” representa o custo em reais estimado para instalar cada sistema individualmente em um município baseado no tamanho da população. De forma semelhante, o indicador “Custo de operação e manutenção” estima o custo anual em reais para a operação e manutenção de cada sistema individual, também em função do tamanho da população. Finalmente, o indicador “Custo para o usuário” estima, em reais, qual o valor médio da tarifa ou taxa que o município cobra por cada sistema individual ao ano.

Em sua maior parte, os indicadores econômicos foram encontrados na literatura em forma de funções determinísticas. Especificamente, para estimar o indicador “Custo para o usuário”, foi necessário utilizar dados consolidados do relatório Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto 2009 do Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS, 2009), fazendo-se uma regressão entre a variável independente “População total do município” e a variável dependente “Receita operacional direta de esgoto” deste relatório. As funções das variáveis “Custo de implantação” e “Custo de operação e manutenção” foram facilmente encontradas e receberam valores médios entre os mínimos e máximos sugeridos na literatura. A tabela 4.2 apresenta as funções escolhidas para os critérios econômicos e suas versões originais, além da quantidade de casos analisados e o índice R^2 (coeficiente de determinação

na amostra) alcançado pela regressão para o caso específico da variável “Custo para o usuário”.

Tabela 4.2 – Funções para os critérios econômicos

Sistema	Função original	Função adaptada	Fonte
Custo de implantação			
Preliminar	30-50 R\$/hab	40 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Filtro biológico (baixa carga)	120-150 R\$/hab	135 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Filtro biológico (alta carga)	120-150 R\$/hab	135 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lodo ativado (convencional)	100-160 R\$/hab	130 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lodo ativado (aeração prolong.)	90-120 R\$/hab	105 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Reator anaeróbio (UASB)	30-50 R\$/hab	40 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa anaeróbia	30-75 R\$/hab	52,5 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa aerada (facultativa)	50-90 R\$/hab	70 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa aerada (aeróbia)	65-100 R\$/hab	82,5 R\$/hab	Jordão; Pessoa (2009, p. 852)
Lagoa facultativa	30-75 R\$/hab	52,5 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa de maturação	20-25 R\$/hab	22,5 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
<i>Wetland</i>	50-80 R\$/hab	65 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Custo de operação e manutenção			
Preliminar	1,5-2,5 R\$/hab	2 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Filtro biológico (baixa carga)	10-15 R\$/hab	12,5 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Filtro biológico (alta carga)	10-15 R\$/hab	12,5 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lodo ativado (convencional)	10-20 R\$/hab	15 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lodo ativado (aeração prolong.)	10-20 R\$/hab	15 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Reator anaeróbio (UASB)	2,5-3,5 R\$/hab	3 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa anaeróbia	2-4 R\$/hab	3 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa aerada (facultativa)	5-9 R\$/hab	7 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa aerada (aeróbia)	5-9 R\$/hab	7 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa facultativa	2-4 R\$/hab	3 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa de maturação	0,5-1 R\$/hab	0,75 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
<i>Wetland</i>	2,5-4 R\$/hab	3,25 R\$/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Custo para o usuário			
Preliminar	130% lagoa matur.	11,23 R\$/hab	SINIS (2009)
Filtro biológico (baixa carga)	63 casos; $R^2=0,45$	17,94 R\$/hab	SINIS (2009)
Filtro biológico (alta carga)	63 casos; $R^2=0,45$	17,94 R\$/hab	SINIS (2009)
Lodo ativado (convencional)	45 casos; $R^2=0,96$	54,72 R\$/hab	SINIS (2009)
Lodo ativado (aeração prolong.)	45 casos; $R^2=0,96$	54,72 R\$/hab	SINIS (2009)
Reator anaeróbio (UASB)	179 casos; $R^2=0,63$	24,92 R\$/hab	SINIS (2009)
Lagoa anaeróbia	18 casos; $R^2=0,86$	10,87 R\$/hab	SINIS (2009)
Lagoa aerada (facultativa)	10 casos; $R^2=0,94$	21,38 R\$/hab	SINIS (2009)
Lagoa aerada (aeróbia)	10 casos; $R^2=0,93$	27,32 R\$/hab	SINIS (2009)
Lagoa facultativa	117 casos; $R^2=0,59$	22,67 R\$/hab	SINIS (2009)
Lagoa de maturação	7 casos; $R^2=0,75$	8,64 R\$/hab	SINIS (2009)
<i>Wetland</i>	Média dos 3 casos	20,41 R\$/hab	SINIS (2009)

Para representar a dimensão ambiental das estações de tratamento de esgoto, foram escolhidos os indicadores consumo de energia, eficiência de remoção medida pela Demanda

Bioquímica de Oxigênio (DBO), eficiência de remoção de Nitrogênio (N), eficiência de remoção de Fósforo (P) e produção de lodo. O indicador “Consumo de energia” representa uma estimativa do consumo de energia anual, em kilowatts/hora, para o tratamento do esgoto de cada município, ou seja, como todos os indicadores econômicos apresentados, este indicador varia também em função da população. O mesmo ocorre com o indicador “Produção de lodo”, que fornece uma estimativa de produção em litros de lodo por ano para cada sistema individual, com base na quantidade de habitantes do município. Por sua vez, os indicadores “Eficiência de remoção de DBO”, “Eficiência de remoção de N” e “Eficiência de remoção de P”, representam uma estimativa de remoção, em porcentagem, da DBO, do Nitrogênio e do Fósforo, que são encontrados no afluente de cada sistema individual, respectivamente. Desta forma, as variáveis de entrada passaram a ser, até aqui: (i) população; (ii) DBO afluente; (iii) N afluente; e (iv) P afluente.

Os valores para os critérios ambientais foram mais facilmente encontrados na literatura, possuindo apenas algumas variações entre os diferentes autores e também receberam valores médios entre os mínimos e máximos sugeridos. A tabela 4.3 apresenta as funções definidas para os critérios ambientais e suas versões originais.

Tabela 4.3 – Funções para os critérios ambientais

Sistema	Função original	Função adaptada	Fonte
Consumo de energia			
Preliminar	0 kWh/hab	0 kWh/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Filtro biológico (baixa carga)	0 kWh/hab	0 kWh/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Filtro biológico (alta carga)	0 kWh/hab	0 kWh/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lodo ativado (convencional)	18-26 kWh/hab	22 kWh/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lodo ativado (aeração prolong.)	20-35 kWh/hab	27,5 kWh/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Reator anaeróbio (UASB)	0 kWh/hab	0 kWh/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa anaeróbia	0 kWh/hab	0 kWh/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa aerada (facultativa)	11-18 kWh/hab	14,5 kWh/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa aerada (aeróbia)	20-24 kWh/hab	21 kWh/hab	Jordão; Pessoa (2009, p. 852)
Lagoa facultativa	0 kWh/hab	0 kWh/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa de maturação	0 kWh/hab	0 kWh/hab	Von Sperling (2006, p. 340)
<i>Wetland</i>	0 kWh/hab	0 kWh/hab	Von Sperling (2006, p. 340)

Eficiência de remoção de DBO			
Preliminar	30-35% DBO	32,5% DBO	Von Sperling (2006, p. 339)
Filtro biológico (baixa carga)	85-93% DBO	89% DBO	Von Sperling (2006, p. 339)
Filtro biológico (alta carga)	80-90% DBO	85% DBO	Von Sperling (2006, p. 339)
Lodo ativado (convencional)	85-93% DBO	89% DBO	Von Sperling (2006, p. 339)
Lodo ativado (aeração prolong.)	90-97% DBO	93,5% DBO	Von Sperling (2006, p. 339)
Reator anaeróbio (UASB)	60-75% DBO	67% DBO	Von Sperling (2006, p. 339)
Lagoa anaeróbia	50-85% DBO	65% DBO	Metcalf; Eddy (1991, p. 645)
Lagoa aerada (facultativa)	75-85% DBO	80% DBO	Von Sperling (2006, p. 339)
Lagoa aerada (aeróbia)	50-60% DBO	55% DBO	Jordão; Pessoa (2009, p. 797)
Lagoa facultativa	75-85% DBO	80% DBO	Von Sperling (2006, p. 339)
Lagoa de maturação	60-80% DBO	70% DBO	Metcalf; Eddy (1991, p. 645)
<i>Wetland</i>	80-90% DBO	85% DBO	Von Sperling (2006, p. 339)
Eficiência de remoção de N			
Preliminar	5-10% N	7,5% N	Metcalf; Eddy (1991, p. 692)
Filtro biológico (baixa carga)	15-50% N	32,5% N	Metcalf; Eddy (1991, p. 170)
Filtro biológico (alta carga)	15-50% N	32,5% N	Metcalf; Eddy (1991, p. 170)
Lodo ativado (convencional)	15-50% N	32,5% N	Metcalf; Eddy (1991, p. 170)
Lodo ativado (aeração prolong.)	15-50% N	32,5% N	Metcalf; Eddy (1991, p. 170)
Reator anaeróbio (UASB)	60% N	60% N	Von Sperling (2006, p. 339)
Lagoa anaeróbia	60% N	60% N	Von Sperling (2006, p. 339)
Lagoa aerada (facultativa)	30% N	30% N	Von Sperling (2006, p. 339)
Lagoa aerada (aeróbia)	30% N	30% N	Jordão; Pessoa (2009, p. 797)
Lagoa facultativa	60% N	60% N	Von Sperling (2006, p. 339)
Lagoa de maturação	50-65% N	57,5% N	Von Sperling (2006, p. 339)
<i>Wetland</i>	60% N	60% N	Von Sperling (2006, p. 339)
Eficiência de remoção de P			
Preliminar	10-20% P	15% P	Metcalf; Eddy (1991, p. 695)
Filtro biológico (baixa carga)	35% P	35% P	Von Sperling (2006, p. 339)
Filtro biológico (alta carga)	35% P	35% P	Von Sperling (2006, p. 339)
Lodo ativado (convencional)	10-25% P	17,5% P	Metcalf; Eddy (1991, p. 695)
Lodo ativado (aeração prolong.)	10-25% P	17,5% P	Metcalf; Eddy (1991, p. 695)
Reator anaeróbio (UASB)	35% P	35% P	Von Sperling (2006, p. 339)
Lagoa anaeróbia	35% P	35% P	Von Sperling (2006, p. 339)
Lagoa aerada (facultativa)	35% P	35% P	Von Sperling (2006, p. 339)
Lagoa aerada (aeróbia)	35% P	35% P	Von Sperling (2006, p. 339)
Lagoa facultativa	35% P	35% P	Von Sperling (2006, p. 339)
Lagoa de maturação	50% P	50% P	Von Sperling (2006, p. 339)
<i>Wetland</i>	35% P	35% P	Von Sperling (2006, p. 339)
Produção de lodo			
Preliminar	110-360 L/hab.a	235 L/hab.a	Von Sperling (2006, p. 340)
Filtro biológico (baixa carga)	360-1100 L/hab.a	730 L/hab.a	Von Sperling (2006, p. 340)
Filtro biológico (alta carga)	500-1900 L/hab.a	1200 L/hab.a	Von Sperling (2006, p. 340)
Lodo ativado (convencional)	1100-3000 L/hab.a	2050 L/hab.a	Von Sperling (2006, p. 340)
Lodo ativado (aeração prolong.)	1200-2000 L/hab.a	1600 L/hab.a	Von Sperling (2006, p. 340)
Reator anaeróbio (UASB)	70-220 L/hab.a	145 L/hab.a	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa anaeróbia	55-160 L/hab.a	107,5 L/hab.a	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa aerada (facultativa)	30-220 L/hab.a	125 L/hab.a	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa aerada (aeróbia)	55-360 L/hab.a	207,5 L/hab.a	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa facultativa	55-160 L/hab.a	107,5 L/hab.a	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa de maturação	55-160 L/hab.a	107,5 L/hab.a	Von Sperling (2006, p. 340)
<i>Wetland</i>	0 L/hab.a	0 L/hab.a	Von Sperling (2006, p. 340)

Por fim, os indicadores “nível de odor”, “espaço necessário” e “funcionários requeridos” foram escolhidos para representar a dimensão social das estações de tratamento de esgoto. O indicador “nível de odor” não possui uma escala quantitativa como os outros critérios vistos até aqui e por isto foi estabelecido a partir da opinião de dois especialistas (coletadas por meio de entrevista) utilizando-se de uma escala entre 1 e 4 pontos, sendo um a melhor pontuação e quatro a pior pontuação possível. Quando considerados dois ou mais sistemas, a média entre as notas de cada sistema é utilizada como padrão. Também neste caso, quanto menor a pontuação alcançada, melhor será o sistema. O indicador “Espaço necessário” representa a área necessária em metros quadrados estimada para a instalação de cada sistema individual, com base no número de habitantes. Por fim, o indicador “Funcionários requeridos” representa o total de funcionários necessários para operar a estação de tratamento de esgoto com base na vazão afluyente, em metros cúbicos. Esta é a quinta variável de entrada do sistema: (i) população; (ii) DBO afluyente; (iii) N afluyente; e (iv) P afluyente; (v) vazão média afluyente.

Os valores para os indicadores sociais foram os de maior dificuldade de obtenção por falta na literatura de trabalhos especializados. Com exceção do indicador “Espaço necessário”, que foi facilmente encontrado na literatura, os indicadores “nível de odor” e “Funcionários requeridos” exigiram uma busca maior, tendo sido o último de maior complexidade. Assim, o indicador que estima o nível de odor foi definido com base em opiniões de dois especialistas, por meio de entrevista. Todavia, o mesmo não pôde ser replicado para estimar a quantidade de trabalhadores. Desta forma, a quantidade de trabalhadores foi determinada empiricamente, utilizando-se do *software* em planilha eletrônica *WWTPStaffing* (GESELBRACHT, 2006), que permite o cálculo de operários em uma estação de tratamento de esgoto baseado na publicação “*Estimating Staffing for Municipal Wastewater Treatment Facilities*”, de março de 1973, da *Environmental Protection*

Agency (EPA). A tabela 4.4 apresenta as funções definidas para os critérios sociais e suas versões originais.

Tabela 4.4 – Funções para os critérios sociais

Sistema	Função original	Função adaptada	Fonte
Nível de odor			
Preliminar	-	1 pt	Opinião de especialistas
Filtro biológico (baixa carga)	+-	2 pt	Opinião de especialistas
Filtro biológico (alta carga)	+-	2 pt	Opinião de especialistas
Lodo ativado (convencional)	-	1 pt	Opinião de especialistas
Lodo ativado (aeração prolong.)	-	1 pt	Opinião de especialistas
Reator anaeróbio (UASB)	++	4 pt	Opinião de especialistas
Lagoa anaeróbia	++	4 pt	Opinião de especialistas
Lagoa aerada (facultativa)	+	3 pt	Opinião de especialistas
Lagoa aerada (aeróbia)	+	3 pt	Opinião de especialistas
Lagoa facultativa	+	3 pt	Opinião de especialistas
Lagoa de maturação	+-	2 pt	Opinião de especialistas
<i>Wetland</i>	-	1 pt	Opinião de especialistas
Espaço necessário			
Preliminar	0,03-0,05 m ² /hab	0,04 m ² /hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Filtro biológico (baixa carga)	0,15-0,3 m ² /hab	0,22 m ² /hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Filtro biológico (alta carga)	0,12-0,25 m ² /hab	0,18 m ² /hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lodo ativado (convencional)	0,12-0,25 m ² /hab	0,18 m ² /hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lodo ativado (aeração prolong.)	0,12-0,25 m ² /hab	0,18 m ² /hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Reator anaeróbio (UASB)	0,03-0,1 m ² /hab	0,07 m ² /hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa anaeróbia	1,5-3 m ² /hab	2,25 m ² /hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa aerada (facultativa)	0,25-0,5 m ² /hab	0,37 m ² /hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa aerada (aeróbia)	0,2-0,4 m ² /hab	0,3 m ² /hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa facultativa	2-4 m ² /hab	3 m ² /hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Lagoa de maturação	1,5-2 m ² /hab	1,75 m ² /hab	Von Sperling (2006, p. 340)
<i>Wetland</i>	3-5 m ² /hab	4 m ² /hab	Von Sperling (2006, p. 340)
Funcionários requeridos			
Preliminar	0,00001 f/m ³ /d	0,00001 f/m ³ /d	Geselbracht (2006)
Filtro biológico (baixa carga)	0,00005 f/m ³ /d	0,00005 f/m ³ /d	Geselbracht (2006)
Filtro biológico (alta carga)	0,00005 f/m ³ /d	0,00005 f/m ³ /d	Geselbracht (2006)
Lodo ativado (convencional)	0,00009 f/m ³ /d	0,00009 f/m ³ /d	Geselbracht (2006)
Lodo ativado (aeração prolong.)	0,00009 f/m ³ /d	0,00009 f/m ³ /d	Geselbracht (2006)
Reator anaeróbio (UASB)	0,00003 f/m ³ /d	0,00003 f/m ³ /d	Geselbracht (2006)
Lagoa anaeróbia	0,00001 f/m ³ /d	0,00001 f/m ³ /d	Geselbracht (2006)
Lagoa aerada (facultativa)	0,00002 f/m ³ /d	0,00002 f/m ³ /d	Geselbracht (2006)
Lagoa aerada (aeróbia)	0,00002 f/m ³ /d	0,00002 f/m ³ /d	Geselbracht (2006)
Lagoa facultativa	0,00001 f/m ³ /d	0,00001 f/m ³ /d	Geselbracht (2006)
Lagoa de maturação	0,00001 f/m ³ /d	0,00001 f/m ³ /d	Geselbracht (2006)
<i>Wetland</i>	0,00001 f/m ³ /d	0,00001 f/m ³ /d	Geselbracht (2006)

Sendo assim, os critérios considerados para a avaliação de sustentabilidade dos sistemas foram os seguintes: CPC = Custo de implantação; OAM = Custo de operação e

manutenção; USC = Custo para o usuário; ENE = Consumo de energia; DBO = Eficiência remoção DBO; NEF = Eficiência remoção Nitrogênio; PEF = Eficiência remoção Fósforo; SLU = Produção de lodo; ODO = Nível de odor; SPA = Espaço necessário; STA = Mão de obra requerida.

A partir da definição das funções para cada critério, a Biblioteca de Tecnologias pôde ser concluída com a utilização dos blocos individuais e suas respectivas funções selecionadas para os sistemas preliminares, primários, secundários e terciários (polimento). Os blocos criados foram: (i) Preliminar; (ii) Filtro biológico (baixa carga); (iii) Filtro biológico (alta carga); (iv) Lodo ativado (convencional); (v) Lodo ativado (aeração prolongada); (vi) Reator anaeróbio (UASB); (vii) Lagoa anaeróbia; (viii) Lagoa aerada (facultativa); (ix) Lagoa aerada (aeróbia); (x) Lagoa facultativa; (xi) Lagoa de maturação; e (xii) *Wetland*. A figura 4.1 apresenta a estrutura geral de um destes blocos que passaram a compor a biblioteca.

Figura 4.1 – Estrutura geral dos blocos de sistemas (exemplo do sistema preliminar)

CPC = custo de implantação; OAM = custo de oper. e manutenção; USC = custo para o usuário; ENE = consumo de energia; DBO = eficiência remoção DBO; NEF = eficiência remoção Nitrogênio; PEF = eficiência remoção Fósforo; SLU = produção lodo; ODO = odor; SPA = espaço necessário; STA = mão de obra requerida

4.3 Composição dos sistemas

Após a definição da Biblioteca de Tecnologia, os sistemas completos de estação de tratamento de esgoto, com seus diferentes tipos de arranjos, a saber: tratamento preliminar, primário, secundário e/ou terciário, podem ser construídos com base nos blocos individuais de tratamento de esgoto que a compõe.

É necessário enfatizar que a necessidade de se compor arranjos maiores ou menores depende da adequação do efluente às características requeridas. Por exemplo, se o atendimento a todos os critérios considerados ocorrer para um sistema de tratamento com apenas um bloco, como em uma estação de tratamento preliminar, este sistema seria adicionado como uma alternativa de solução. Caso contrário, outros blocos de tratamento são incluídos até que o sistema, como um todo, atenda os valores mínimos estabelecidos tecnicamente ou por legislação para cada critério. A figura 4.2 apresenta um fluxograma para a construção destes sistemas.

Esta possibilidade da criação de novos arranjos e, portanto, alternativas com base na Biblioteca de Tecnologia, foi motivada pelo potencial de proporcionar uma maior interação entre o método e o usuário, permitindo-lhe escolher qual a estratégia pretende adotar. Por exemplo, o tomador de decisão pode compor alternativas que priorizem os aspectos econômicos para um município com menor capacidade de pagamento ou outras que priorizem os aspectos ambientais para um município em melhores condições financeiras, mas com maiores exigências quanto à qualidade do efluente. Esta possibilidade de interação com o modelo advém de uma visão construtiva do processo de tomada de decisão, valorizando a utilização desta ferramenta como apoio no processo decisório (ENSSLIN et al., 2001).

Figura 4.2 – Fluxograma da escolha das alternativas iniciais

Nesta pesquisa, os sistemas que foram considerados tiveram como base os sistemas apresentados no modelo ETEX (OLIVEIRA, 2004; LEONETI, 2009), devido ao fato de terem sido eles constatados como os que figuram entre os mais utilizados no Brasil (LEONETI, 2009). Além disto, houve a inclusão de sete novos sistemas (do I ao N), os quais foram utilizados para criar o arranjo de 14 sistemas, que podem ser visualizados no quadro 4.2.

Nome do sistema	Pré-tratamento	1º Processo	2º Processo	Polimento
Sistema A	Preliminar	UASB	Lodo ativado (convencional)	
Sistema B	Preliminar	UASB	Lagoa facultativa	
Sistema C	Preliminar	UASB	Filtro biológico (alta carga)	
Sistema D	Preliminar	UASB	Lagoa aerada (aeróbia)	
Sistema E	Preliminar	UASB	Lagoa aerada (facultativa)	
Sistema F	Preliminar	Lagoa anaeróbia	Lagoa facultativa	
Sistema G	Preliminar	Lagoa anaeróbia	Lagoa aerada (aeróbia)	
Sistema H	Preliminar	Lagoa anaeróbia	Lagoa aerada (facultativa)	
Sistema I	Preliminar	UASB	Lodo ativado (aeração prolongada)	
Sistema J	Preliminar	UASB	Filtro biológico (baixa carga)	
Sistema K	Preliminar	UASB	Lagoa facultativa	Lagoa de maturação
Sistema L	Preliminar	Lagoa anaeróbia	Lagoa facultativa	Lagoa de maturação
Sistema M	Preliminar	UASB	Lodo ativado (convencional)	<i>Wetland</i>
Sistema N	Preliminar	UASB	Lodo ativado (aeração prolongada)	<i>Wetland</i>

Quadro 4.2 – Sistemas criados a partir da biblioteca de tecnologias

5 MÉTODO MULTICRITERIAL

Diferentemente dos tradicionais meios de avaliação multicritério, que consideram apenas as decisões individuais dos tomadores de decisão, o método proposto nesta pesquisa visa modelar o processo decisório considerando as decisões no ambiente de um grupo de tomadores de decisão e das estratégias por eles adotadas para tentar estabelecer sua alternativa preferida, com base em indicadores de sustentabilidade.

Em um primeiro momento, cada tomador de decisão idealiza seu sistema, baseando suas escolhas em diferentes indicadores e critérios. Ao serem obrigados a decidirem em conjunto, cada jogador escolhe a estratégia que pode levar o grupo a escolher o sistema de sua preferência. Com base no equilíbrio de Nash as alternativas são avaliadas em função das preferências de todos os jogadores.

A seguir, estão detalhados os passos necessários para a aplicação do método proposto. A seleção dos participantes do processo decisório e a seleção das alternativas e critérios que compõe a Biblioteca de Tecnologias é um passo preliminar à aplicação do modelo e será mais detalhadamente discutido no Capítulo 6.

5.1 Criação da matriz de decisão

O primeiro passo do método multicriterial proposto nesta pesquisa é a criação de uma matriz de decisão por meio da utilização dos blocos criados e armazenados na Biblioteca de Tecnologia ou pela entrevista com os tomadores de decisão para definir quais as alternativas e critérios que deverão ser considerados no processo de avaliação.

Como discutido no capítulo anterior, para definir estes critérios a serem ponderados na avaliação das alternativas, é necessário levar em consideração as dimensões econômicas, ecológicas e sociais da sustentabilidade e um balanceamento entre elas (RAMETSTEINER et

al., 2011). Em outras palavras, estes critérios deverão contemplar não somente os aspectos técnicos e financeiros das alternativas, mas também os impactos sociais e ambientais que eles possam representar.

Após a seleção das alternativas e critérios, de uma ou outra maneira, o arranjo final dessa matriz de decisão, que comumente possui em suas linhas as alternativas e em suas colunas os critérios considerados, deverá ser semelhante como ilustrado na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Matriz de decisão

	Critério 1	Critério 2	...	Critério n
Alternativa 1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{1n}
Alternativa 2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{2n}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Alternativa m	a_{m1}	a_{m2}	a_{m3}	a_{mn}

Todavia, além da escolha balanceada dos critérios, é necessário identificar a direção em que cada um deles leva às alternativas, seja a maximização ou a minimização delas. Por exemplo, na escolha de uma estação de tratamento de esgoto alguns dos principais objetivos poderiam ser: eficiência na remoção da carga orgânica medida como demanda bioquímica de Oxigênio (DBO), eficiência na remoção de Nitrogênio (N), custo de implantação e custo de manutenção ou outros similares. Em uma avaliação multicritério, a melhor alternativa seria aquela que maximiza a eficiência na remoção de DBO e N enquanto minimiza os custos de implantação e manutenção. Assim, é importante que seja realizada uma normalização dos valores estimados para os critérios que compõe a matriz de decisão.

5.2 Normalização da matriz de decisão

Seguindo os procedimentos para a modelagem do problema, após a definição das

alternativas e das variáveis que compõem a matriz de decisão, é necessário que uma normalização entre os critérios escolhidos seja realizada, pois eles geralmente possuem unidades de medida diferentes, além de possuírem diferentes direções. Esta normalização pode ser realizada por meio de uma fórmula que compare cada um dos critérios com todos os outros e forneça uma medida entre zero e um. Como exemplo, cita-se a função de normalização proposta por Deng (2007), que pode ser visualizada na equação 5.1. Outros exemplos de função de normalização podem ser vistos em Zavadskas e Turskis (2008).

$$n_{ij} = \frac{a_{ij}}{(\sum_{k=1}^n a_{ik}^2)^{1/2}} \quad (5.1)$$

Na equação acima, n_{ij} é o valor da alternativa a_{ij} normalizada para o critério “j” quando pretende-se maximizá-lo. No caso de minimização, por exemplo, no caso do critério de custos de implantação, para o qual o objetivo é minimizar a quantidade de recursos necessários para instalar a alternativa, utiliza-se a equação 5.1 na forma $1-n_{ij}$. Para ilustrar esta normalização, se para quatro hipotéticas alternativas os valores para o custo de implantação fossem 153, 49, 78 e 128 milhares de Euros, os valores normalizados por meio da equação 5.1 seriam os que podem ser vistos na tabela 5.2. Nesta tabela, a melhor escolha seria a alternativa 2, caso fosse considerado somente o critério “Custo de implantação” na avaliação das alternativas.

Tabela 5.2 – Matriz de decisão normalizada

	Custo de implantação (€)	Custo de implantação normalizado
Alternativa 1	153	0,303
Alternativa 2	49	0,777
Alternativa 3	78	0,645
Alternativa 4	128	0,417

5.3 Definição do perfil dos jogadores

No exemplo citado no item anterior, uma alternativa recebeu a melhor avaliação em comparação com as outras, pois ela atingiu a maior pontuação para o critério normalizado. No entanto, a abordagem multicriterial exige que sejam considerados na avaliação das alternativas todos os outros critérios e também a ponderação de cada um deles. Esta ponderação é geralmente definida pelo tomador de decisão, que pode, eventualmente, gerar inconsistências na classificação dos resultados. Além disto, quanto maior o número de tomadores de decisão envolvidos em uma escolha, maior serão os conflitos que poderão emergir dos diferentes pesos aos critérios que são por eles adotados. Este problema está presente na maioria dos métodos multicriteriais existentes, que são modelados para indivíduos e não para grupos (KOCHER; SUTTER, 2005; SRDJEVIC, 2007).

Portanto, a possibilidade da incorporação de diferentes vetores de pesos na avaliação das alternativas faz com que o método proposto nesta pesquisa se difira fundamentalmente de outros métodos multicritério de apoio à tomada de decisão. Enquanto em outros métodos multicritério é necessária uma agregação dos diferentes vetores de pesos para os critérios, aqui os pesos dos critérios variam de acordo com as preferências dos agentes envolvidos na tomada de decisão. Para ilustrar a importância deste diferencial, supondo que o critério “Custo de implantação” recebesse de um tomador de decisão um peso 80, de 0 à 100, para representar o seu grau de sua preferência para este critério em relação aos outros, enquanto outro tomador de decisão definisse o peso para este mesmo critério como 20. Consequentemente, a média aritmética para agregar a opinião destes dois tomadores de decisão em um mesmo vetor seria 50, o que é uma prática comum para utilizar os métodos multicritério tradicionais. No entanto, esta média não representa a real opinião sobre este critério por parte de nenhum dos tomadores de decisão envolvidos e também não permitiria uma negociação entre eles.

Este conjunto de critérios definidos por cada tomador de decisão será aqui chamado de

perfil do jogador, pois representa suas preferências. Sendo assim, temos que a definição dos perfis dos tomadores de decisão é equivalente a definição de diferentes conjuntos de pesos para os critérios. Por exemplo, considerando os critérios acima descritos: eficiência na remoção de carga orgânica medida pela DBO, eficiência na remoção de N, custo de implantação e custo de manutenção seria possível identificar pelo menos dois tipos de jogadores com base em seus diferentes interesses. O primeiro jogador poderia estar mais preocupado com os custos financeiros e o segundo poderia estar mais preocupado com os impactos ambientais. Assim, o jogador ambiental preferiria maximizar a eficiência na remoção da carga orgânica medida pela DBO e N, enquanto o jogador econômico preferiria minimizar os custos de instalação e manutenção.

Assim, para ponderar os critérios eficiência na remoção de carga orgânica medida pela DBO, eficiência na remoção de N, custo de implantação e custo de manutenção, o jogador ambiental poderia definir, por exemplo, os seguintes pesos para o conjunto de critérios [35, 40, 20, 5], enquanto o jogador econômico poderia definir o seguinte vetor de pesos [15, 10, 30, 45] para os mesmos critérios, ambos em uma escala onde zero fosse o mínimo e cem o máximo. Outros perfis de jogadores com seus respectivos interesses podem ser conferidos em Starkl e Brunner (2004).

É importante notar que, após definidos os perfis dos jogadores, quanto mais forte for o coeficiente de correlação negativa entre eles mais provável será o surgimento de conflitos entre os mesmos. Para esta verificação o Coeficiente de Correlação Produto-Momento de Pearson pode ser usado para fornecer uma medida de correlação entre as variáveis. Quanto mais este coeficiente estiver próximo de 1 mais as variáveis variam semelhantemente, quanto mais próximo de -1 mais as variáveis variam em oposto uma a outra, e quando próximo de zero indica que as variáveis não são linearmente dependentes. A equação 5.2 apresenta o cálculo deste coeficiente, que se baseia na covariância e variância das variáveis.

$$\rho = \frac{\text{cov}(A_i, A_j)}{\sqrt{\text{var}(A_i) \cdot \text{var}(A_j)}} \quad (5.2)$$

Para o exemplo acima, o coeficiente de correlação encontrado para os jogadores ambiental e econômico foi -1, o que significa que os jogadores têm pontos de vistas fortemente diferentes sobre o mesmo problema. Isto implica que utilizar a média aritmética para agregar os vetores de pesos seria inapropriado. De fato, se a média aritmética fosse usada, o conjunto de pesos agregados seria [25, 25, 25, 25], o que não reflete as verdadeiras preferências dos jogadores. O resumo para a definição dos perfis dos jogadores deste exemplo com o coeficiente de correlação e o vetor agregado pode ser visto na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Definição do perfil de dois jogadores: ambiental e econômico

Crítérios	Jogador Ambiental	Jogador Econômico	Média matemática
Remoção DBO	35	15	25
Remoção N	40	10	25
Custo de implantação	20	30	25
Custo de manutenção	5	45	25
Correlação -1			

Quando existe um coeficiente de correlação negativo muito amplo entre os jogadores a presença de mais jogadores sem uma correlação tão forte como a dos primeiros é encorajada, pois é esperado que um sub-conjunto de jogadores esteja pronto para formar coalizões enquanto o conflito estiver ativo. Assim, jogadores adicionais são bem-vindos para dar aos jogadores originais a possibilidade de desenvolver coalizões ou alianças (MEISTER; FRASER, 1993). No entanto, para facilitar a visualização dos cálculos na forma de tabelas, outros jogadores não foram incorporados ainda neste exemplo, mas será demonstrada a aplicação do método com três jogadores em sua aplicação no próximo capítulo.

5.4 Criação das matrizes de similaridades

Este passo do procedimento é o elo que une a abordagem multicritério com a Teoria dos Jogos. Aqui, uma função de pagamentos é proposta com base nas preferências dos jogadores, obedecendo aos princípios da transitividade (WANG; TRIANTAPHYLLOU, 2008; VARIAN, 2003). Esta função de pagamentos utiliza um valor estimado para determinar o quão semelhante são as alternativas, sendo esta medida fornecida por algum método que permita estimar similaridades.

Neste ponto é importante enfatizar que muitos métodos de decisão multicritério compartilham procedimentos semelhantes para compararem alternativas e encontrar similaridades entre elas (KIKER et al, 2005). Entretanto, neste trabalho foi adotada a medida de similaridade do método proposto por Deng (2007), pois este método utiliza-se do ângulo entre os vetores para calcular a similaridade entre as alternativas, o que pode ser considerado uma boa medida para representar os conflitos existentes (DENG, 2007).

Desta forma, o primeiro passo para a criação das matrizes de similaridades, que serão posteriormente transformadas em tabelas de pagamento, com a utilização da função de pagamento (detalhada nos próximos tópicos), inicia-se com a aplicação das equações 5.3 e 5.4 (DENG, 2007) na matriz de decisão normalizada, onde θ_{ij} é o ângulo entre as alternativas a_i e a_j , S_{ij} a similaridade de uma com a outra e $(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$ e $(a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jn})$ seus vetores.

$$\cos \theta_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m a_{ik} a_{jk}}{\left[\left(\sum_{k=1}^m a_{ik}^2 \right) \left(\sum_{k=1}^m a_{jk}^2 \right) \right]^{1/2}} \quad (5.3)$$

$$S_{ij} = \frac{\left(\sum_{k=1}^m a_{ik}^2 \right)^{1/2} \cos \theta_{ij}}{\left(\sum_{k=1}^m a_{jk}^2 \right)^{1/2}} \quad (5.4)$$

As similaridades definidas pela equação 5.4 variam em função de alterações no conjunto de peso dos critérios. Desta forma, perfis de jogadores diferentes produzirão matrizes de similaridades diferentes. Assim, na metodologia multicriterial proposta nesta pesquisa, cada jogador terá sua própria matriz de similaridade que é calculada a partir da matriz de decisão normalizada e das similaridades entre as alternativas. Para compor esta matriz de decisão, além dos valores definidos para o critério “Custo de implantação” da tabela 5.2, é necessário ainda uma estimativa para os critérios eficiência na remoção de carga orgânica media pela DBO, eficiência na remoção de N e custo de manutenção. Para isto, valores usualmente adotados para estes critérios em sistemas de tratamento de esgoto foram coletados na literatura e podem ser visualizados na tabela 5.4 (METCALF; EDDY, 1991).

Tabela 5.4 – Matriz de decisão do exemplo

	Remoção de DBO (%)	Remoção de N (%)	Custo de implantação (€)	Custo de manutenção (€)
Alternativa 1	97	99	153	3,9
Alternativa 2	80	75	49	2
Alternativa 3	91	95	78	3,1
Alternativa 4	86	70	128	1,5

É importante ressaltar que neste exemplo os critérios possuem valores semelhantes e podem ser avaliados pelos dois jogadores simultaneamente. No caso da inclusão de uma variável qualitativa, por exemplo, uma que medisse o aspecto visual da estação de tratamento, seria provável que os valores para este critério não fossem iguais para os diferentes jogadores envolvidos, o que tornaria necessário a criação de uma matriz de decisão e sua respectiva normalização para cada jogador. Como este não é o caso, a matriz de decisão normalizada que servirá como base para a criação das matrizes de similaridade de ambos os jogadores pode ser vista na tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Matriz de decisão normalizada do exemplo

	Remoção de DBO	Remoção de N	Custo de implantação	Custo de manutenção
Alternativa 1	<i>0,546</i>	<i>0,577</i>	<i>0,303</i>	<i>0,300</i>
Alternativa 2	<i>0,450</i>	<i>0,437</i>	<i>0,777</i>	<i>0,641</i>
Alternativa 3	<i>0,512</i>	<i>0,554</i>	<i>0,645</i>	<i>0,443</i>
Alternativa 4	<i>0,484</i>	<i>0,408</i>	<i>0,417</i>	<i>0,730</i>

A matriz normalizada da tabela 5.5 ainda deve ser ponderada com base no perfil dos jogadores para gerar as matrizes de decisão normalizadas para cada jogador. No exemplo, estamos considerando que existe um jogador com perfil ambiental que estaria representado pelo vetor de pesos [35, 40, 20, 5] para os critérios remoção de carga orgânica medida pela DBO, eficiência na remoção de N, custo de implantação e custo de manutenção. Por outro lado, também estamos considerando que o jogador com perfil econômico estaria representado pelo seguinte vetor de pesos [15, 10, 30, 45] para os mesmos critérios. Assim, as tabelas 5.6 e 5.7 apresentam as duas matrizes de decisão, com cada jogador possuindo a sua própria matriz, que foram geradas por meio da ponderação dos vetores de perfil dos jogadores com a matriz de decisão normalizada.

Tabela 5.6 – Matriz de decisão do jogador ambiental

	Remoção de DBO	Remoção de N	Custo de implantação	Custo de manutenção
Alternativa 1	<i>0,1913</i>	<i>0,2311</i>	<i>0,0607</i>	<i>0,0150</i>
Alternativa 2	<i>0,1578</i>	<i>0,1751</i>	<i>0,1554</i>	<i>0,0321</i>
Alternativa 3	<i>0,1795</i>	<i>0,2218</i>	<i>0,1290</i>	<i>0,0222</i>
Alternativa 4	<i>0,1696</i>	<i>0,1634</i>	<i>0,0835</i>	<i>0,0365</i>

Tabela 5.7 – Matriz de decisão do jogador econômico

	Remoção de DBO	Remoção de N	Custo de implantação	Custo de manutenção
Alternativa 1	<i>0,0820</i>	<i>0,0578</i>	<i>0,0911</i>	<i>0,1351</i>
Alternativa 2	<i>0,0676</i>	<i>0,0438</i>	<i>0,2331</i>	<i>0,2885</i>
Alternativa 3	<i>0,0769</i>	<i>0,0555</i>	<i>0,1935</i>	<i>0,1997</i>
Alternativa 4	<i>0,0727</i>	<i>0,0409</i>	<i>0,1252</i>	<i>0,3289</i>

A partir das matrizes normalizadas de cada jogador, uma matriz de similaridades foi gerada para ambos, o que é realizado conforme os procedimentos vistos em Deng (2007), mais especificamente com a utilização das equações 5.3 e 5.4 reproduzidas neste trabalho. De acordo com Deng (2007), quando comparada uma alternativa com ela própria o valor de sua similaridade deve ser igual a 1 e será maior do que 1 apenas quando a primeira alternativa sobrepõe a segunda e menor do que 1 quando a primeira é sobreposta pela segunda. Desta forma, nas tabelas 5.8 e 5.9 são apresentadas as matrizes de similaridades para os jogadores ambiental e econômico, que foram geradas com a utilização das equações 5.3 e 5.4. Estas matrizes de similaridade para os jogadores servirão como base para a criação das estratégias do jogo.

Tabela 5.8 – Matriz de similaridades para o jogador ambiental

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	<i>1,000</i>	<i>0,998</i>	<i>0,952</i>	<i>1,189</i>
Alternativa 2	<i>0,858</i>	<i>1,000</i>	<i>0,892</i>	<i>1,090</i>
Alternativa 3	<i>0,998</i>	<i>1,089</i>	<i>1,000</i>	<i>1,227</i>
Alternativa 4	<i>0,807</i>	<i>0,861</i>	<i>0,794</i>	<i>1,000</i>

Tabela 5.9 – Matriz de similaridades para o jogador econômico

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	<i>1,000</i>	<i>0,474</i>	<i>0,627</i>	<i>0,491</i>
Alternativa 2	<i>1,865</i>	<i>1,000</i>	<i>1,278</i>	<i>1,000</i>
Alternativa 3	<i>1,478</i>	<i>0,766</i>	<i>1,000</i>	<i>0,747</i>
Alternativa 4	<i>1,752</i>	<i>0,908</i>	<i>1,133</i>	<i>1,000</i>

5.5 Definição das estratégias

Devido à emergência de múltiplos atores com vistas potencialmente conflitantes, a incorporação da sustentabilidade no processo de avaliação de alternativas traz a necessidade

de se pensar em plataformas que também considerem a negociação entre tomadores de decisão como um dos passos do processo de modelagem de problemas multicritério. Assim, como principal contribuição deste trabalho, é proposto que as possíveis estratégias dos jogadores sejam estabelecidas, considerando o fato de que os jogadores sempre desejam maximizar ou pelo menos manter seus ganhos em uma troca.

No caso da decisão em grupos, em poucos casos uma alternativa satisfaz plenamente todos os jogadores envolvidos e trocas de alternativas não são necessárias (VARIAN, 2003). De forma geral, trocas poderão ocorrer entre os participantes para possibilitar uma solução de consenso. Desta forma, utilizando as matrizes de similaridades criadas, agora na forma $I-S_{ij}$, onde S_{ij} é o valor da similaridade entre as alternativas “i” e “j” para cada jogador, os possíveis ganhos nas trocas poderão ser visualizados mais claramente nas tabelas 5.10 e 5.11.

Tabela 5.10 – Ganhos nas trocas para o jogador ambiental

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	0,000	0,002	0,048	-0,189
Alternativa 2	0,142	0,000	0,108	-0,090
Alternativa 3	0,002	-0,089	0,000	-0,227
Alternativa 4	0,193	0,139	0,206	0,000

Tabela 5.11 – Ganhos nas trocas para o jogador econômico

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	0,000	0,526	0,373	0,509
Alternativa 2	-0,865	0,000	-0,278	0,000
Alternativa 3	-0,478	0,234	0,000	0,253
Alternativa 4	-0,752	0,092	-0,133	0,000

É importante notar que a utilização das matrizes de similaridades permitiu a criação das tabelas de ganhos de troca principalmente pelo fato de que, se uma alternativa é considerada semelhante com uma outra, é de se esperar que não exista ganho nesta troca, enquanto que, caso a alternativa seja considerada inferior, ou seja, com valores estimados para

a similaridade menores do que um, exista uma perda em realizar a troca e, caso a alternativa seja considerada superior, com valores estimados para a similaridade maiores do que um, exista um ganho em realizar a troca. Assim, a posse dessas tabelas faria com que o jogador ambiental soubesse que, por exemplo, caso ele tivesse escolhido inicialmente a alternativa 1 (linha) e que fosse proposta uma troca pela alternativa 4 (coluna), haveria uma perda de - 0,189 pontos. Da mesma forma, o jogador econômico saberia que trocar a alternativa 1 (linha) pela 4 (coluna) faria com que ele ganhasse 0,509 pontos. Portanto, é de se esperar que o jogador econômico aceite esta troca enquanto o jogador ambiental a recuse. Portanto, com base nos ganhos das trocas, os conjuntos de estratégias para os jogadores poderiam ser definidos como na tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Conjunto de estratégias dos jogadores

Se o jogador possui...	...então o jogador ambiental trocaria pela(s) alternativa(s)...	...e o jogador econômico trocaria pela(s) alternativa(s)...
...alternativa 1...	{2,3}	{2,3,4}
...alternativa 2...	{1, 3}	{Ø}
...alternativa 3...	{1}	{2,4}
...alternativa 4...	{1,2,3}	{2}

Com base nestas estratégias, definidas por meio do ganho das trocas entre as alternativas, pode-se afirmar que a melhor alternativa no ponto de vista do jogador ambiental seria a 3 enquanto para o jogador econômico seria a 2, pois para ambos não haveria nenhuma troca que aumentasse significativamente seus ganhos. Para verificar esta afirmação, uma nova alternativa chamada alternativa “ideal”, que incorpora os melhores valores de cada um dos critérios, é criada para serem novamente comparadas as similaridades entre todas as alternativas, mas desta vez não entre elas, mas sim entre as que estão sendo avaliadas e a alternativa ideal. Esta verificação é proposta na metodologia de Deng (2007) e visa distinguir quais alternativas estariam mais próximas do melhor resultado possível.

Seguindo os procedimentos para a criação desta alternativa “ideal”, para o jogador ambiental o vetor com os melhores valores seria [0,1913; 0,2311; 0,1554; 0,0365], conforme pode ser visto na tabela 5.6, lembrando que estes são os critérios remoção de carga orgânica, remoção de N, custo de implantação e custo de manutenção. Por sua vez, para o jogador econômico, o vetor da alternativa ideal seria [0,0820; 0,0578; 0,2331; 0,3289], com base na tabela 5.7. Novamente utilizando as equações 5.3 e 5.4, as similaridades são calculadas e podem ser visualizadas na tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Similaridades entre as alternativas e a alternativa ideal

	Similaridades para o jogador ambiental	Similaridades para o jogador econômico
Alternativa 1	<i>0,866</i>	<i>0,439</i>
Alternativa 2	<i>0,831</i>	<i>0,912</i>
Alternativa 3	<i>0,922</i>	<i>0,697</i>
Alternativa 4	<i>0,732</i>	<i>0,844</i>

De acordo com as similaridades encontradas entre as alternativas em avaliação com a alternativa ideal, pode-se verificar que a alternativa 3 para o jogador ambiental é a que mais se assemelha com sua alternativa ideal, enquanto o mesmo ocorre com a alternativa 2 para o jogador econômico, o que confirma os resultados encontrados por meio das estratégias.

Desta forma, é proposto neste trabalho que as similaridades apresentadas na tabela 5.13 poderiam representar a função de utilidade de ambos os tomadores de decisão, pois, dado que não é possível atingir a alternativa ideal com nenhuma das alternativas, o que seria apenas possível com a própria alternativa ideal com similaridade igual a 1, verifica-se o quanto as alternativas podem satisfazer o tomador de decisão com base na similaridade de cada uma com a alternativa ideal. Essa dedução se baseia em Varian (2003) que afirma ser a função de utilidade apenas um modo de atribuir número às opções mais preferidas, ou seja, uma forma de descrever as preferências, permitindo a ordenação das alternativas. Ainda segundo Varian (2003), pode haver infinitas formas de atribuir utilidade às mesmas opções ou alternativas.

A mesma dedução será também utilizada na criação da função de pagamento, utilizada para criar as tabelas de pagamento no próximo tópico.

5.6 Criação das tabelas de pagamento

Finalmente, após a definição dos ganhos nas trocas e suas respectivas estratégias é possível a criação das tabelas de pagamento com as quais os tomadores de decisão poderão avaliar estrategicamente as trocas visando alcançar a alternativa mais viável.

Para isto, uma função de pagamentos deve ser definida com base no valor das similaridades entre as alternativas e entre as alternativas com a alternativa ideal. Esta função de pagamentos, como também no caso da equação para estimar as similaridades, irá apenas especificar um valor numérico para traduzir a preferência do jogador entre dois resultados possíveis, pois a função de pagamento é também uma função matemática que somente traduz numericamente as preferências individuais de um jogador.

Assim, a função de pagamentos proposta nesta pesquisa é baseada nas estratégias definidas do jogo com uma característica a mais: penaliza os jogadores quando eles partem de soluções mais distantes em relação à alternativa ideal. Isto, pois se espera que seja maior a quantidade de esforço para atingir uma alternativa mais preferível a partir de uma menos preferível. Além disto, esta função penaliza as trocas quando o ganho de troca é muito próximo de zero, pois se considera que existe um esforço real para efetuar as trocas. Desta forma, a equação 5.5 apresenta a função de pagamento definida neste trabalho.

$$\varphi(a_i | a_j, \dots, a_n) = \frac{\left(a_i - \frac{\sum_{k=2}^n |1 - C_{ik}|}{n-1} \right) + \frac{\sum_{k=2}^n a_k}{n-1}}{2} \quad (5.5)$$

Ressalta-se que outras funções de pagamento poderiam substituir esta proposta⁵. No entanto, segundo Varian (2003) as funções que representam os pagamentos dos jogadores devem respeitar as propriedades do ordenamento de preferências dos jogadores. Especificamente para o método proposto estas funções devem também satisfazer as seguintes condições: (i) apresentar valor igual ao da similaridade encontrada entre a alternativa com a alternativa ideal; e (ii) estabelecer valores intermediários com base nos ganhos de troca e estratégias quando comparada com outra alternativa. Deste modo, as tabelas de pagamento foram criadas a partir da equação 5.5 e podem ser visualizadas nas tabelas 5.14 e 5.15, para os jogadores ambiental e econômico respectivamente.

Tabela 5.14 – Tabela de pagamentos para o jogador ambiental

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	<i>0,8660</i>	<i>0,8470</i>	<i>0,8700</i>	<i>0,7040</i>
Alternativa 2	<i>0,7770</i>	<i>0,8310</i>	<i>0,8220</i>	<i>0,7360</i>
Alternativa 3	<i>0,8930</i>	<i>0,8320</i>	<i>0,9220</i>	<i>0,7130</i>
Alternativa 4	<i>0,7030</i>	<i>0,7120</i>	<i>0,7240</i>	<i>0,7320</i>

Tabela 5.15 – Tabela de pagamentos para o jogador econômico

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	<i>0,4390</i>	<i>0,4120</i>	<i>0,3820</i>	<i>0,3870</i>
Alternativa 2	<i>0,2430</i>	<i>0,9120</i>	<i>0,6650</i>	<i>0,8780</i>
Alternativa 3	<i>0,3290</i>	<i>0,6870</i>	<i>0,6970</i>	<i>0,6440</i>
Alternativa 4	<i>0,2650</i>	<i>0,8320</i>	<i>0,7040</i>	<i>0,8440</i>

De acordo com a tabela de pagamentos do jogador ambiental, se este jogador escolhesse a alternativa 3 (linha) e o outro jogador também escolhesse a alternativa 3 (coluna), a função de pagamento faria com que o seu ganho fosse o maior possível, pois esta é

⁵ Além da equação 6.5, foram testadas outras equações, com destaque para aquelas pertencentes ao método ELECTRE II, mas não apresentaram melhores resultados do que a desta proposta.

a alternativa de maior similaridade com a alternativa ideal e, portanto, a de maior valor da função utilidade. Caso seu oponente escolhesse a alternativa 4 (coluna) e o jogador ambiental aceitasse realizar a troca, a função de pagamento faria com que seu ganho passasse a ser de apenas 0,713, pois a alternativa 4 é a de menor similaridade com a alternativa ideal e, portanto, o menor valor da função utilidade. Apesar desta hipótese, esta última troca dificilmente ocorreria, pois não faz parte da estratégia do jogador ambiental. No entanto, caso esta troca realmente ocorresse, é importante notar que a função de pagamento estabelecida neste trabalho faz com que o pagamento do jogador ambiental seja menor do que se ele tivesse escolhido a alternativa 4 e seu adversário também. Isto ocorre, pois no último caso ele escolheu sua pior alternativa e terminou com a própria, enquanto naquele primeiro ele iniciou a negociação com sua melhor alternativa e terminou com sua pior, refletindo uma sensação de perda.

Por sua vez, o maior ganho possível para o jogador econômico seria quando este escolhesse a alternativa 2 (linha) e o ambiental a alternativa 2 (coluna). Como as melhores escolhas dos jogadores não são as mesmas, a proposição de um equilíbrio para o jogo e a composição de um espaço de aceitabilidade é o diferencial do método apresentado neste trabalho para propor uma solução que seja satisfatória para ambos.

5.7 Solução do jogo com base no equilíbrio de Nash

Após a criação das tabelas de pagamento, o próximo passo consiste na exploração dos equilíbrios do jogo. É também importante levar em consideração qual o tipo de jogo e o equilíbrio envolvido. Neste caso, o jogo é não cooperativo e o equilíbrio pode ser encontrado por meio de estratégias puras ou mistas (Apêndice B). O equilíbrio por meio das estratégias puras se dá quando uma alternativa é escolhida por um jogador e os outros escolhem uma

alternativa para maximizar seus pagamentos. O equilíbrio por meio das estratégias mistas somente é adotado se os jogadores forem indiferentes às estratégias puras. Se somente um equilíbrio de Nash é encontrado, ele representa a única possibilidade de negociação recomendada para os jogadores. Além disto, uma das características do equilíbrio de Nash é que ele pode não existir, pode ser apenas um ou pode ser mais de um (VARIAN, 2003).

Para o exemplo aqui apresentado, o equilíbrio de Nash foi encontrado com o auxílio do *software* Gambit, que foi instalado em um computador com o sistema operacional Windows XP, com as seguintes características: processador Intel Pentium Dual Core de 1,6GHz e memória RAM de 1GB. A figura 5.1 apresenta a tela de solução do Gambit, alcançada na média de 5 segundos de processamento, e a tabela 5.16 apresenta os pagamentos do jogador ambiental e do jogador econômico.

The screenshot shows the Gambit software interface. On the left, it identifies the players: 'Jogador Ambiental' (Player 1) with a payoff of 0.8521 and 'Jogador Econômico' (Player 2) with a payoff of 0.6183. The main area displays a 4x4 game matrix with strategies A, B, C, and D for both players. The bottom section, titled 'Profiles 1', shows three equilibrium profiles with their respective strategy probabilities for both players.

	A		B		C		D	
A	0.866	0.439	0.847	0.412	0.87	0.382	0.704	0.387
B	0.777	0.243	0.831	0.912	0.822	0.665	0.736	0.878
C	0.893	0.329	0.832	0.687	0.922	0.697	0.713	0.644
D	0.703	0.265	0.712	0.832	0.724	0.704	0.732	0.844

#	1: A	1: B	1: C	1: D	2: A	2: B	2: C	2: D
1	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
2	0.9299	0.0000	0.0701	0.0000	0.3571	0.6429	0.0000	0.0000
3	0.2500	0.0000	0.7500	0.0000	0.0000	0.7761	0.2239	0.0000

Figura 5.1 – Tela de solução do *software* Gambit

De acordo com os equilíbrios apresentados na tabela 5.16, as alternativas que teriam maiores chances de serem aceitas em uma negociação são as alternativas 1 e 3, pois são equilíbrios formados por estratégias pura ou mista que garantem pagamentos mais elevados e mais balanceados entre os jogadores, diferentemente do que ocorre no equilíbrio 2. Segundo

Kujawski (2005), nas experiências da vida real, os tomadores de decisão tendem a escolher soluções balanceadas, ao invés de otimizadas. Desta forma, as alternativas 1 e 3 comporiam o espaço de aceitabilidade enquanto as alternativas 2 e 4 seriam menos interessantes para serem apresentadas em uma rodada de negociação, visto que dificilmente haveria um acordo sem grandes perdas para algum dos envolvidos.

Tabela 5.16 – Equilíbrio de Nash encontrados e pagamentos dos jogadores

	Alternativas		Pagamentos	
	Jog. Ambien.	Jog. Econo.	Jog. Ambien.	Jog. Econo.
Equilíbrio 1	{3:1,00}	{3:1,00}	0,9220	0,6970
Equilíbrio 2	{1:0,93,3:0,07}	{1:0,36,2:0,64}	0,8538	0,4313
Equilíbrio 3	{1:0,25,3:0,75}	{2:0,78,3:0,22}	0,8521	0,6183

Realmente, nota-se que a escolha da alternativa 2 pelo jogador econômico faz sempre com que o jogador ambiental escolha a alternativa 1, pois em sua avaliação as alternativas 1 e 2 seriam similares ao passo que para o jogador econômico a alternativa 1 seria sua pior opção. Este fato pode ser explicado pelo comportamento do jogador econômico que, dada a sua intenção em estabelecer sua melhor alternativa, levaria seu oponente a um resultado menos satisfatório, pois quando jogadores recebem ofertas que favorecem em muitas vezes o proponente, eles tendem a rejeitar a proposta, preferindo levar o jogo para uma situação de perdas mútuas (BLOUNT; BAZERMAN, 1996). Assim, ao tentar estabelecer a melhor alternativa (alternativa 2) o jogador econômico não somente levaria os jogadores para um pior resultado, mas também levaria a solução do jogo para uma situação de não sustentabilidade na visão dos outros jogadores. Esta constatação se baseia no fato de que, embora a escolha do jogador econômico viesse a atender satisfatoriamente seus critérios, a alternativa não estaria dentro dos padrões esperados pelo jogador ambiental.

Assim, as alternativas que irão compor o espaço de aceitabilidade devem ser avaliadas com base nas estratégias que os jogadores podem adotar, principalmente quando existe a

possibilidade de coalizões serem exercidas. Se, no entanto, os tomadores de decisão não agem de acordo com as previsões de equilíbrio, explicações comportamentais ganham importância nas decisões (KOCHER; SUTTER, 2005).

6 APLICAÇÃO DO MÉTODO

Os impactos ambientais e sociais das alternativas é um tema que tem despertado interesse, dado a emergência de novas teorias com diferentes visões da tradicional avaliação técnico-financeira. Assim, procurou-se nesta pesquisa contemplar critérios que estão direta ou indiretamente envolvidos no processo de tomada de decisão e que são relativos aos conceitos da sustentabilidade. Além disto, o paradigma no qual se baseou o método proposto nesta pesquisa é o construtivista, que necessita de uma participação ativa dos tomadores de decisão, e sugere-se que, antes de sua aplicação, sejam contemplados os procedimentos que se seguem.

6.1 Procedimentos iniciais

O processo de tomada de decisão norteado pelo paradigma construtivista, deve incluir, inicialmente, a identificação dos tomadores de decisão no município, comitês ou empresas privadas, que serão responsáveis por conduzir o processo decisório. Para Starkl e Brunner (2004), estes agentes são selecionados de acordo com as preferências de alguns administradores ou por concurso e serão os responsáveis por preparar e escolher as alternativas viáveis para o problema ambiental que enfrenta um município ou mesmo uma bacia hidrográfica. De acordo com Ensslin et al. (2001), esses participantes do processo decisório devem representar todos os agentes direta ou indiretamente envolvidos no processo de escolha e podem ser distinguidos em intervenientes e atingidos. A figura 6.1 apresenta um resumo dos possíveis agentes participantes do processo decisório (ENSSLIN et al., 2001).

De forma geral, os atores intervenientes são os que participam diretamente do processo decisório agindo de modo a fazer prevalecer as alternativas mais próximas dos seus sistemas de valores. Podem ser distinguidos em: decisores, a quem é formalmente delegado o

poder de decisão; representantes, ator incumbido pelo decisor para representá-lo no processo de apoio a decisão; e os facilitadores, que têm como função facilitar e apoiar o processo de tomada de decisão através de métodos ou modelos. Finalmente, os atingidos são aqueles que recebem as consequências das escolhas (ENSSLIN et al., 2001).

Figura 6.1 – Participantes do processo decisório

Fonte: adaptado de Ensslin et al. (2001, p. 19)

Segundo Ensslin et al. (2001), esses diferentes atores têm interesses diversos e irão procurar influenciar o processo de tomada de decisão de acordo com suas preferências, que são baseadas em valores. Ao contrário dos métodos tradicionais, que geralmente consideram um único decisor com suas preferências, o método aqui proposto considera os tomadores de decisão como jogadores, que no curso de estabelecer suas preferências, procuram agir estrategicamente ao defender e representar seus valores dentro do processo de decisão.

De forma prática, Ensslin et al. (2001) aconselham que se deve fazer uma lista junto ao contratante de quais serão os atores que podem estar envolvidos direta ou indiretamente ligados ao processo de tomada de decisão. Esta lista servirá para a identificação do tipo de atores (intervenientes ou atingidos), seus graus de interesse e o poder que podem exercer. Para isto, Ensslin et al. (2001) sugere que, após a criação desta lista inicial, os atores sejam posicionados em um plano onde no eixo das abscissas esteja representado o poder relativo que o ator possui sobre a tomada de decisão e no eixo das ordenadas o grau de interesse que o ator tem sobre a mesma. Desta forma, quanto mais próximo do canto superior direito estiver o

ator, mais importância e influência ele possui no processo de tomada de decisão (ENSSLIN et al., 2001).

A figura 6.2 apresenta um exemplo deste gráfico para um problema de escolha de sistema de tratamento de esgoto, onde: a população é o ator atingido, com pouco poder, mas com grande interesse social na escolha; a prefeitura é o ator que deliberará a escolha, ou seja, o que possui um grande interesse e o maior poder para a escolha; o projetista é o representante da prefeitura, que também tem grande poder de decisão, mas não será seu responsável final; e, finalmente, o consultor é o facilitador, que utilizará o método proposto ou qualquer outra ferramenta disponível para auxiliar os demais atores na tomada de decisão.

Figura 6.2 – Exemplo do gráfico influência *versus* poder dos atores

Fonte: adaptado de Ensslin et al. (2001, p. 63)

Nesta fase, é necessário que o facilitador realize entrevistas separadamente com cada membro do grupo para compreender melhor como enxergam o contexto decisório. A aplicação desta entrevista pode contar com perguntas-chaves que podem servir para auxiliar a identificar o maior número de informações (ENSSLIN et al., 2001). O quadro 6.1 apresenta algumas perguntas que podem ser utilizadas nestas entrevistas.

Estratégia	Sugestão de pergunta
Aspectos desejáveis	Quais são os aspectos que você gostaria de levar em conta em seu problema?
Ações	Quais características distinguem uma alternativa boa e uma ruim?
Dificuldades	Quais são as maiores dificuldades com relação ao estado atual?
Consequências	Quais consequências das alternativas são boas/ruins/inaceitáveis?
Metas/restrições/linhas gerais	Quais são as metas/restrições/linhas gerais adotadas por você?
Objetivos estratégicos	Quais são os objetivos estratégicos neste contexto?
Perspectivas diferentes	Quais são para você, segundo a perspectiva de um outro decisor, os aspectos desejáveis/dificuldades etc.?

Quadro 6.1 – Estratégias para serem utilizadas nas entrevistas

Fonte: adaptado de Ensslin et al. (2001)

Após a identificação dos jogadores que participarão do processo de tomada de decisão, a escolha das alternativas, que representam os objetos de estudo da análise multicritério, deverá ser realizada. Para isto, é importante que as alternativas representem uma forma autônoma em relação ao processo decisório, ou seja, devem ter a característica de poder ser isoladas de todas as demais alternativas. Ao contrário da visão racionalista, a definição das alternativas pelo paradigma construtivista permite a criação de alternativas com a finalidade de estimular a criatividade dos decisores para gerar um maior entendimento do processo decisório (ENSSLIN, 2001). Assim, o papel do facilitador nestes casos é ajudar a formalizar as alternativas em termos qualitativos e quantitativos, auxiliando os decisores a obter informações sobre elas, para que, em seguida, seja possível a aplicação do método multicritério para auxiliar na tomada de decisão.

6.2 Síntese das etapas para a aplicação do método

Após os procedimentos iniciais e a escolha das alternativas que serão avaliadas com a

ajuda do método multicritério, o primeiro passo do método aqui proposto é a criação de uma matriz de decisão por meio de um segundo processo de negociação entre os agentes. Neste segundo processo o objetivo é definir quais serão os critérios que devem ser considerados na avaliação da sustentabilidade das alternativas. Para definir estes critérios, é necessário levar em consideração as dimensões econômicas, ecológicas e sociais e um balanceamento entre elas. Em outras palavras, as variáveis deverão contemplar não somente os aspectos técnicos e financeiros das alternativas, mas também os impactos sociais e ambientais que eles possam representar.

Seguindo os procedimentos para a modelagem do problema, após a definição das alternativas e dos critérios que irão compor a matriz de decisão, é necessário que uma normalização entre estes critérios escolhidos seja realizada, pois eles geralmente possuem unidades de medida diferentes, além de possuírem diferentes direções. Esta normalização pode ser realizada por meio de uma fórmula que compare cada um dos critérios com todos os outros e forneça uma medida entre zero e o um.

O terceiro passo do método proposto é a incorporação de diferentes vetores de pesos para ponderar os critérios na avaliação das alternativas, o que difere fundamentalmente o método proposto de outros métodos multicritério de auxílio à tomada de decisão. Nestes outros métodos, quando mais de um tomador de decisão está envolvido na escolha, a sua utilização se torna possível por meio da agregação dos diferentes vetores de pesos em um único vetor de pesos, fazendo com que os conflitos que emergem dos diferentes pesos aos critérios não sejam incorporados à avaliação dos problemas. Todavia, o método aqui proposto permite que todos os vetores possam ser considerados no processo decisório, o que torna o processo de tomada de decisão semelhante a um jogo, onde os participantes possuem estratégias que poderão levar o grupo a decidir pelas alternativas de sua preferência.

Assim, o passo final do procedimento, que une a abordagem multicritério com a

Teoria dos Jogos, é proposta por meio de uma função de pagamentos que é baseada em um método que estima as similaridades entre as alternativas. Esta função é utilizada para definir as estratégias dos jogadores que serão incorporadas a uma tabela de pagamentos. Por sua vez, estas tabelas serão utilizadas pelos tomadores de decisão que poderão avaliar estrategicamente o ganho das possíveis trocas com outros jogadores, visando alcançar a adoção da alternativa de sua preferência. Portanto, a função de pagamentos deve ser definida com base no valor das similaridades entre as alternativas e na função utilidade dos tomadores de decisão.

Finalmente, tendo sido as tabelas de pagamento criadas, o próximo e último passo para a aplicação do método consiste na exploração dos equilíbrios de Nash. A figura 6.3 apresenta o fluxograma do método com as etapas do processo, e o próximo tópico apresenta um exemplo de sua aplicação para auxiliar na escolha de um sistema de tratamento de esgoto a ser instalado em um município considerando três tomadores de decisão.

Figura 6.3 – Fluxograma das etapas do método multicriterial

6.3 Escolha de sistema de tratamento de esgoto

O exemplo aqui apresentado considera um município fictício, com aproximadamente 40 mil habitantes, que necessita implantar uma estação de tratamento de esgoto para atender a demanda de tratamento de esgoto sanitário produzido, e que será utilizado para ilustrar a aplicação do método multicritério proposto nesta pesquisa.

Como primeiro passo para a aplicação do método, é necessário selecionar as alternativas que serão avaliadas. Neste ponto, a participação dos tomadores de decisão é necessária para identificar e selecionar quais as alternativas deveriam ser inicialmente consideradas. Esta consulta prévia tem o objetivo de selecionar somente alternativas que atendam aos requisitos técnicos elementares, ou seja, se uma alternativa não é tecnicamente capaz de atender a determinado requisito técnico então ela não poderia fazer parte do processo de tomada de decisão.

Todavia, com o intuito de testar a aplicação, esta consulta prévia junto aos tomadores de decisão foi descartada e, como critério para eleger as alternativas, foram selecionadas as seis alternativas mais comumente utilizadas na faixa de população de 40 mil habitantes, de acordo com dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico no Brasil (IBGE, 2008). Desta forma, as seis alternativas selecionadas estão apresentadas no quadro 6.2, lembrando que todas as seis constam na Biblioteca de Tecnologia, que serve como base para o método.

Nome do sistema	Pré-tratamento	1º Processo	2º Processo
Sistema A	Preliminar	UASB	Lodo ativado (convencional)
Sistema B	Preliminar	UASB	Lagoa facultativa
Sistema C	Preliminar	UASB	Filtro biológico (alta carga)
Sistema D	Preliminar	UASB	Lagoa aerada (aeróbia)
Sistema E	Preliminar	UASB	Lagoa aerada (facultativa)
Sistema F	Preliminar	Lagoa anaeróbia	Lagoa facultativa

Quadro 6.2 – Alternativas consideradas no exemplo

Após as alternativas serem selecionadas, é necessário definir os diferentes critérios que serão utilizados para a avaliação das mesmas. Estes critérios devem, preferencialmente, abranger os diferentes critérios que compõe a sustentabilidade. No caso da tomada de decisão em grupo, também seria importante realizar uma consulta prévia a todos os tomadores de decisão envolvidos para selecionar quais deveriam ser os critérios a serem considerados.

No entanto, para esta aplicação prática, foram escolhidos seis dos dez critérios propostos por Muga e Mihelcic (2008), que compõe seu indicador de sustentabilidade de estações de tratamento de esgoto. A escolha destes critérios teve apenas a finalidade de possibilitar a aplicação do método e, por isto, alguns critérios importantes, que não constavam no indicador, como por exemplo: geração de energia, disposição de lodo e depreciação, não foram incorporados. Assim, os critérios selecionados, foram: custo de implantação (CC) e custo de operação e manutenção (OC) para representar o aspecto econômico; eficiência remoção DBO (BOD) e eficiência remoção Nitrogênio (N) para representar o aspecto ambiental; e espaço necessário (OS) e mão-de-obra requerida (STA) para representar o aspecto social.

A partir da definição das alternativas e dos critérios para a sua avaliação, uma matriz de decisão poderá ser gerada utilizando as funções coletadas na literatura (já presentes na Biblioteca de Tecnologias) para estimar cada parâmetro ou critério em análise. Assim, as funções apresentadas nas tabelas 4.2, 4.3 e 4.4, em conjunto com os dados técnicos do município, a saber: população de 40 mil habitantes; concentração de DBO afluente de 350 mg/L; concentração de Nitrogênio afluente de 100 mg/L; concentração de Fósforo afluente de 50 mg/L; e vazão afluente de 14 mil m³/d, foram utilizados para gerar a matriz de decisão que pode ser visualizada na tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Matriz de decisão

	Sistema A	Sistema B	Sistema C	Sistema D	Sistema E	Sistema F
CC (€mil)	8400	5300	8600	6500	6000	5800
OC (€mil)	800	320	700	480	480	320
BOD (mg/L)	38,50	15,59	11,69	35,08	15,59	16,54
N (mg/L)	67,50	14,80	24,98	25,90	25,90	14,80
OS (m2)	11600	12440	11600	16400	19200	21160
STA	1,82	0,70	1,26	0,84	0,84	0,42

Legenda: CC = custo de implantação; OC = custo de operação e manutenção; BOD = eficiência remoção DBO; N = eficiência remoção Nitrogênio; OS = espaço necessário; STA = mão-de-obra requerida

Após a definição desta matriz, o próximo passo é a sua normalização e a definição dos perfis dos jogadores para a posterior criação da matriz de similaridade. Neste exemplo, serão considerados três jogadores: o ambiental, que é preocupado com os parâmetros de eficiência no tratamento; o econômico, que escolhe a alternativa em termos dos menores custos; e o social, que se preocupa em aumentar o número de mão-de-obra requerida e espaço livre. Para cada um dos três jogadores foi definido um vetor de pesos para os critérios. Portanto, é de se esperar que o jogador ambiental, por exemplo, dê um peso maior aos critérios BOD e N em relação aos outros.

Desta forma, cada jogador recebeu um vetor de pesos que, em outras palavras, representa as suas preferências na prioridade do atendimento aos critérios que considera mais relevante. É importante notar que estes vetores podem ser configurados ou reconfigurados a partir de valores esperados para um determinado perfil, tal como sugerido acima, ou podem ser abastecidos, através de entrevistas, com as opiniões de tomadores de decisão reais. A tabela 6.2 apresenta o perfil dos três jogadores para este exemplo.

Tabela 6.2 – Perfis dos jogadores considerados no jogo

Jogador	<i>CC</i>	<i>OC</i>	<i>BOD</i>	<i>N</i>	<i>OS</i>	<i>STA</i>	
Ambiental	15	15	30	30	5	5	100
Econômico	30	25	5	15	15	10	100
Social	15	10	20	5	25	25	100

É interessante notar que estes jogadores possuem opiniões moderadamente diferentes um aos outros, fato que pode ser verificado com o auxílio do coeficiente de correlação de Pearson. Entre os jogadores ambiental e econômico, o coeficiente calculado foi de (-0,22), entre os jogadores ambiental e social, foi de (-0,63), e finalmente, entre os jogadores econômico e social, foi de (-0,43). Esta constatação já é suficiente para prever possíveis conflitos e coalizões durante o jogo.

Seguindo com as etapas do procedimento, o passo seguinte é a definição das matrizes de similaridades, que é realizado com o auxílio das equações 5.3 e 5.4, reportadas neste trabalho. Esta similaridade também pode ser calculada com o auxílio de outros métodos, que, dada à preferência dos tomadores de decisão por um ou outro, é por si só um problema multicritério de escolha (YEH, 2002). Todavia, a despeito do fato de que poderiam ser utilizadas outras funções de similaridade, a escolha do método proposto por Deng (2007) se mostrou adequado para ser incorporado ao exemplo aqui proposto devido sua facilidade de utilização e por ser baseado no ângulo entre os vetores para o cálculo dos conflitos.

Desta forma, com base nas similaridades calculadas para cada jogador, foram construídas as matrizes de similaridade para os mesmos na forma $1-S_{ij}$, onde S_{ij} é o valor da similaridade entre as alternativas “i” e “j”, representando, assim, os ganhos nas trocas (como explicado no item 5.5 “Definição das estratégias” do capítulo anterior), os quais podem ser visualizados nas tabelas 6.3, 6.4 e 6.5.

Tabela 6.3 – Ganhos nas trocas para o jogador ambiental

	Sistema A	Sistema B	Sistema C	Sistema D	Sistema E	Sistema F
Sistema A	0,000	0,605	0,571	0,495	0,555	0,607
Sistema B	-1,095	0,000	-0,070	-0,303	-0,096	-0,006
Sistema C	-0,919	0,097	0,000	-0,148	-0,005	0,095
Sistema D	-0,520	0,261	0,228	0,000	0,199	0,258
Sistema E	-0,946	0,097	0,019	-0,164	0,000	0,095
Sistema F	-1,056	0,008	-0,057	-0,289	-0,082	0,000

Tabela 6.4 – Ganhos nas trocas para o jogador econômico

	Sistema A	Sistema B	Sistema C	Sistema D	Sistema E	Sistema F
Sistema A	<i>0,000</i>	<i>0,441</i>	<i>0,189</i>	<i>0,312</i>	<i>0,329</i>	<i>0,492</i>
Sistema B	<i>-0,463</i>	<i>0,000</i>	<i>-0,361</i>	<i>-0,161</i>	<i>-0,129</i>	<i>0,045</i>
Sistema C	<i>-0,064</i>	<i>0,318</i>	<i>0,000</i>	<i>0,173</i>	<i>0,194</i>	<i>0,374</i>
Sistema D	<i>-0,278</i>	<i>0,177</i>	<i>-0,171</i>	<i>0,000</i>	<i>0,031</i>	<i>0,241</i>
Sistema E	<i>-0,320</i>	<i>0,151</i>	<i>-0,210</i>	<i>-0,028</i>	<i>0,000</i>	<i>0,218</i>
Sistema F	<i>-0,419</i>	<i>-0,018</i>	<i>-0,332</i>	<i>-0,141</i>	<i>-0,110</i>	<i>0,000</i>

Tabela 6.5 – Ganhos nas trocas para o jogador social

	Sistema A	Sistema B	Sistema C	Sistema D	Sistema E	Sistema F
Sistema A	<i>0,000</i>	<i>0,228</i>	<i>0,168</i>	<i>0,021</i>	<i>0,248</i>	<i>0,343</i>
Sistema B	<i>0,179</i>	<i>0,000</i>	<i>0,078</i>	<i>-0,095</i>	<i>0,083</i>	<i>0,098</i>
Sistema C	<i>0,048</i>	<i>0,008</i>	<i>0,000</i>	<i>-0,095</i>	<i>0,073</i>	<i>0,133</i>
Sistema D	<i>0,217</i>	<i>0,177</i>	<i>0,235</i>	<i>0,000</i>	<i>0,211</i>	<i>0,229</i>
Sistema E	<i>0,085</i>	<i>-0,050</i>	<i>0,013</i>	<i>-0,202</i>	<i>0,000</i>	<i>0,018</i>
Sistema F	<i>0,199</i>	<i>-0,036</i>	<i>0,075</i>	<i>-0,177</i>	<i>0,016</i>	<i>0,000</i>

Os valores das tabelas de ganho de troca são baseados na similaridade entre as alternativas da linha com as da coluna. Desta forma, a leitura da tabela indica que para ganhos negativos, existiria pouca possibilidade do jogador aceitar trocar uma alternativa pela outra, pois a primeira (linha) seria superior à segunda (coluna), enquanto para ganhos positivos, existiria grande possibilidade de o jogador aceitar a troca. A diagonal principal representa a troca da alternativa por ela mesma, o que não acrescenta ganho algum.

A partir da tabela de ganhos nas trocas é possível definir as estratégias dos jogadores que pretendem sempre maximizar ou pelo menos manter seus ganhos em uma troca. Portanto, com base nos ganhos das trocas entre os jogadores os seus conjuntos de estratégias para o jogo poderiam ser definidos como visto na tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Conjunto de estratégias dos jogadores

Se o jogador possui...	...então o jogador ambiental trocaria pelo(s) sistema(s)...	... o jogador econômico trocaria pelo(s) sistema(s)...	...e o jogador social trocaria pelo(s) sistema(s)...
...sistema A...	{B,C,D,E,F}	{B,C,D,E,F}	{B,C,D,E,F}
... sistema B...	{ $\emptyset$ }	{F}	{A,C,E,F}
... sistema C...	{B,F}	{B,D,E,F}	{A,B,E,F}
... sistema D...	{B,C,E,F}	{B,E,F}	{A,B,C,E,F}
... sistema E...	{B,C,F}	{B,F}	{A,C,F}
... sistema F...	{B}	{ $\emptyset$ }	{A,C,E}

Após a definição do conjunto de estratégias dos jogadores, o próximo passo é criação da tabela de pagamentos e a posterior exploração dos equilíbrios de Nash. Primeiramente, com base nestas estratégias definidas por meio do ganho das trocas entre as alternativas, uma nova alternativa, chamada alternativa “ideal”, deve incorporar os melhores valores de cada um dos critérios para novamente serem comparadas as similaridades entre as alternativas, mas desta vez entre as que estão sendo avaliadas e a nova alternativa ideal. Novamente utilizando as equações 5.3 e 5.4, as similaridades foram calculadas e a tabela 6.7 apresenta as similaridades entre as alternativas e a nova alternativa ideal para de cada jogador.

Tabela 6.7 – Similaridades entre as alternativas e a alternativa ideal

	Similaridades para o jogador ambiental	Similaridades para o jogador econômico	Similaridades para o jogador social
Sistema A	0,389	0,588	0,679
Sistema B	0,960	0,946	0,696
Sistema C	0,878	0,698	0,751
Sistema D	0,710	0,837	0,621
Sistema E	0,876	0,869	0,766
Sistema F	0,950	0,947	0,719

Como não é possível visualizar as tabelas de pagamento, pois o jogo envolve mais de dois jogadores, a sua solução foi encontrada com a utilização do *software* Gambit, proposto por McKelvey et al. (2007), que foi instalado em um computador com processador Intel Pentium Dual Core de 1,6GHz. Para sua utilização, os dados foram importados ao *software*

com o auxílio de uma macro do Excel[®], utilizando os dados das matrizes de similaridades dos jogadores e da função de pagamentos, conforme a equação 5.5. Desta forma, a figura 6.4 apresenta o jogo já estruturado no *software* Gambit na forma estratégica. As cores verdes representam os pagamentos para o jogador ambiental, as cores laranja para o econômico e, finalmente, as cinzas para o social.

The screenshot shows the Gambit software interface. On the left, there are three player profiles: Jogador Ambiental (Payoff: 0.8759), Jogador Econômico (Payoff: 0.8684), and Jogador Social (Payoff: 0.7622). The main area displays a game matrix with two players, A and B, each having six strategies (A-F). The matrix cells contain three values: green for the environmental player, orange for the economic player, and grey for the social player. Below the matrix, there is a table of Nash equilibria.

A		B	
	A	B	
A	0.389, 0.679, 0.588	0.382, 0.626, 0.576	0.369
B	0.382, 0.626, 0.576	0.374, 0.574, 0.564	0.361
C	0.369, 0.655, 0.57	0.361, 0.602, 0.558	0.349
D	0.346, 0.659, 0.573	0.338, 0.607, 0.561	0.326
E	0.373, 0.639, 0.575	0.365, 0.586, 0.563	0.352
F	0.379, 0.603, 0.575	0.372, 0.551, 0.563	0.359
A	0.133, 0.598, 0.551	0.546, 0.647, 0.748	0.509
B	0.546, 0.647, 0.748	0.96, 0.696, 0.946	0.922
C	0.509, 0.641, 0.601	0.922, 0.691, 0.798	0.884
D	0.409, 0.605, 0.688	0.823, 0.654, 0.886	0.785
E	0.502, 0.644, 0.707	0.916, 0.693, 0.905	0.878
F			

#	1: A	1: B	1: C	1: D	1: E	1: F	2: A	2: B	2: C	2: D	2: E	2: F	3: A	3: B	3: C	3: D	3: E	3: F
1	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
4	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.9149	0.0000	0.0000	0.0851	0.0000	0.0000	0.5395	0.4605	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.1064	0.0000	0.0000	0.8936	0.0000	0.0000	0.0870	0.0000	0.0000	0.9130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
7	0.9097	0.0000	0.0000	0.0903	0.0000	0.0000	0.5459	0.0000	0.0000	0.0000	0.4541	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9130	0.0870	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9250	0.0750	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000

Figura 6.4 – Tela de solução do *software* Gambit

Finalmente, a tabela 6.8 apresenta os equilíbrios de Nash localizados com o auxílio do Gambit, que encontrou a solução dentro de 25 segundos de processamento em média, bem como os pagamentos para os jogadores em cada equilíbrio. Com base na tabela dos pagamentos, quatro possíveis equilíbrios poderiam ser alcançados por meio de estratégias puras e quatro outros através de estratégias mistas. As alternativas que teriam maiores chances de serem negociadas são as alternativas B, E e F, pois são as que levam os pagamentos aos maiores níveis, além de serem os mais balanceados entre os jogadores.

Tabela 6.8 – Equilíbrio de Nash encontrados e pagamentos dos jogadores

	Alternativas			Pagamentos		
	Jog. Ambien.	Jog. Econo.	Jog. Social	Jog. Ambien.	Jog. Econo.	Jog. Social.
Equilíbrio 1	{A:1,00}	{A:1,00}	{A:1,00}	0,3890	0,5880	0,6790
Equilíbrio 2	{F:1,00}	{F:1,00}	{E:1,00}	0,9110	0,9040	0,7270
Equilíbrio 3	{E:1,00}	{E:1,00}	{E:1,00}	0,8760	0,8690	0,7660
Equilíbrio 4	{B:1,00}	{B:1,00}	{B:1,00}	0,9600	0,9460	0,6960
Equilíbrio 5	{A:0,91,D:0,09}	{A:0,54,B:0,46}	{A:1,00}	0,3858	0,5866	0,6455
Equilíbrio 6	{B:0,10,E:0,90}	{B:0,09,E:0,91}	{E:1,00}	0,8758	0,8684	0,7556
Equilíbrio 7	{A:0,91,E:0,09}	{A:0,55,E:0,45}	{A:1,00}	0,3817	0,5865	0,6510
Equilíbrio 8	{E:0,91,F:0,09}	{E:0,92,F:0,08}	{E:1,00}	0,8759	0,8684	0,7622

Como exemplo, vemos no equilíbrio 3 que os três jogadores poderiam fechar um acordo na escolha da alternativa E e os mesmos alcançariam um pagamento satisfatório que, ao considerarmos que cada um dos jogadores analisa as alternativas enfatizando um aspecto da sustentabilidade, poderia ser considerada uma alternativa mais próxima dos conceitos sustentáveis. No entanto, os jogadores ambiental e econômico por possuírem um coeficiente de correlação que sugere um menor conflito entre suas opiniões (-0,22) poderiam acordar em uma coalizão para aumentar seus pagamentos levando o jogo ao equilíbrio 2. Assim, as alternativas que comporiam o espaço de aceitabilidade seriam as alternativas B, E e F enquanto as alternativas A, C e D seriam menos interessantes para serem apresentadas em uma rodada de negociação, pois poderiam levar o resultado do jogo para uma situação de perdas mútuas como no equilíbrio 1, onde os pagamentos são os menores possíveis e os menos balanceados entre os jogadores.

6.4 Comparação dos resultados

Para comparar os resultados da aplicação do método, os vetores de pesos dos três jogadores, apresentados na tabela 6.2, foram transformados em vetores de prioridades do

método AHP, sendo os resultados finais apresentados na tabela 6.9.

Tabela 6.9 – Comparação dos resultados entre o AHP e o método proposto

	Jogador ambiental		Jogador econômico		Jogador social	
	AHP	Método	AHP	Método	AHP	Método
Sistema A	<i>0,06 / 6°</i>	<i>0,389 / 6°</i>	<i>0,08 / 6°</i>	<i>0,588 / 6°</i>	<i>0,14 / 5°</i>	<i>0,679 / 5°</i>
Sistema B	<i>0,26 / 1°</i>	<i>0,960 / 1°</i>	<i>0,26 / 2°</i>	<i>0,946 / 2°</i>	<i>0,17 / 4°</i>	<i>0,696 / 4°</i>
Sistema C	<i>0,20 / 3°</i>	<i>0,878 / 3°</i>	<i>0,10 / 5°</i>	<i>0,698 / 5°</i>	<i>0,18 / 2°</i>	<i>0,751 / 2°</i>
Sistema D	<i>0,10 / 5°</i>	<i>0,710 / 5°</i>	<i>0,12 / 4°</i>	<i>0,837 / 4°</i>	<i>0,10 / 6°</i>	<i>0,621 / 6°</i>
Sistema E	<i>0,15 / 4°</i>	<i>0,876 / 4°</i>	<i>0,17 / 3°</i>	<i>0,869 / 3°</i>	<i>0,18 / 3°</i>	<i>0,766 / 1°</i>
Sistema F	<i>0,24 / 2°</i>	<i>0,950 / 2°</i>	<i>0,27 / 1°</i>	<i>0,947 / 1°</i>	<i>0,23 / 1°</i>	<i>0,719 / 3°</i>

Na tabela 6.9, as colunas referentes ao método AHP contêm os vetores de prioridades de cada um dos jogadores e indicam a classificação final das alternativas por este método. As colunas restantes contêm as similaridades entre cada uma das alternativas e a alternativa ideal, também representando uma forma classificação. Ainda nesta tabela, observa-se que as alternativas melhores classificadas (em primeiro e segundo lugares para os jogadores ambiental e econômico e a primeira e terceira para o jogador social) são aquelas que compõem o espaço de aceitabilidade, a saber: as alternativas B, E e F. Conseqüentemente, o método proposto alcançou classificação de alternativas semelhante ao do método AHP, que é um dos mais conhecidos e aplicados método multicritério na atualidade (SRDJEVIC, 2007).

No entanto, apesar de ter alcançado resultados semelhantes, o método aqui proposto se difere fundamentalmente na forma de apresentação e interpretação dos resultados. Enquanto no método AHP os resultados são apresentados na forma de um vetor de prioridades, representando a classificação das alternativas, no método aqui proposto, as melhores alternativas são apresentadas dentro de um espaço de aceitabilidade, que deve passar pelo crivo dos decisores com base em seus objetivos e valores. Desta forma, no método AHP os resultados são considerados prescritivos e visam encontrar uma solução ótima enquanto no método proposto os resultados são como uma recomendação, com o intuito de separar as

alternativas mais robustas das alternativas mais frágeis.

Outra característica do método aqui proposto é a possibilidade de incorporar o vetor de pesos dos diversos especialistas em cada aspecto da sustentabilidade e tomar a decisão em um ambiente de grupo, sem a necessidade da agregação. Desta forma, o método se apresenta como um meio de superar os problemas da agregação dos critérios, que estão presentes em metodologias semelhantes ao do AHP, principalmente pelo fato de que as soluções são apresentadas como um espaço de aceitabilidade e não como uma classificação. Destarte, outra vantagem do novo método em relação a outros métodos multicritério é a possibilidade de avaliar diferentes cenários. Esta característica permite aos jogadores atuar com diferentes estratégias para, então, alcançar a concordância pela alternativa de sua preferência, com base nas preferências dos jogadores durante o processo de negociação.

Há ainda uma outra característica do método proposto, que poderá ser comprovada em estudos futuros, conhecida como estabilidade. Enquanto os métodos multicritério tradicionais são sensíveis a pequenas alterações nas preferências dos jogadores, é provável que no método proposto exista uma maior estabilidade nas soluções, devido ao fato de que as respostas estão baseadas em equilíbrios.

Por fim, uma característica não favorável ao método é com relação ao tempo de execução e sua complexidade computacional. Devido ao fato de que o método deve utilizar um algoritmo para a procura do equilíbrio de Nash, e sendo esta procura considerada de nível complexo na literatura, o método apresenta como principal limitação o considerável aumento de iterações do algoritmo à medida que o número de jogadores aumenta. No caso do AHP ou de outro método multicritério tradicional, a capacidade computacional e o tempo de execução geralmente não são os maiores problemas. Todavia, ressalta-se que, enquanto no método proposto este maior esforço pode exigir mais dos equipamentos, nos outros métodos um maior esforço e precisão são exigidos do usuário.

Sumariamente, o quadro 6.3 apresenta a comparação entre as principais características do método proposto com o AHP.

Características	AHP	Método
Método	Multicritério	Multicritério
Paradigma	Racionalista	Construtivista
Resultados	Ordenamento das alternativas, com apresentação de uma solução ótima	Procura e apresentação de um espaço de aceitabilidade
Complexidade	Baixa complexidade computacional	Alta complexidade computacional devido ao algoritmo para a procura dos equilíbrios
Principal limitação	Comparação par a par das alternativas pode exigir grande esforço e precisão do usuário	Procura dos equilíbrios pode exigir maior capacidade computacional
Permite ponderar as alternativas?	Não. É necessária uma comparação par a par entre todas as alternativas, sendo esta uma das principais críticas ao método	Sim. As alternativas são ponderadas diretamente por cada jogador
Permite considerar a opinião de mais de um jogador?	Não, apesar de existirem técnicas para agregar vetores de pesos para diversos jogadores	Sim, sendo esta a principal inovação do método
Permite incluir indicadores de sustentabilidade?	Sim	Sim
Permite analisar conflitos com base em estratégias?	Não	Sim

Quadro 6.3 – Comparação entre as características do AHP e do método proposto

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um método multicriterial, baseado em indicadores de sustentabilidade, é proposto nesta pesquisa para apoiar a tomada de decisão na escolha de estações de tratamento de esgoto dentro de um ambiente de negociação em grupo, sendo sua base de resolução o equilíbrio proposto por Nash (1951).

Para isto, primeiramente, foi realizado um levantamento bibliográfico para verificar o estado da arte da aplicação dos métodos multicritério na tomada de decisão em grupo. Nesta etapa da pesquisa, diversos métodos multicriteriais foram avaliados quanto à sua possível aplicação no contexto de grupos, tais como o ELECTRE e o AHP. No entanto, não se observou na literatura uma recomendação para o uso destes métodos para apoiar a decisão de grupos, com a exceção dos casos quando se considera a agregação de vetores. Ademais, vários autores apontaram limitações quanto ao ordenamento das alternativas propostas por estes métodos quando sujeitos a variação na ponderação dos critérios.

Desta forma, na modelação do método proposto, ao invés de procurar agregar as preferências individuais, como nos métodos multicritério tradicionais, procurou-se definir perfis de jogadores em termos de suas preferências no atendimento aos critérios dentro de um grupo de tomada de decisão. Assim, o método modela a interação estratégica que ocorre entre os jogadores no curso de estabelecer a sua alternativa preferida evitando o problema de agregação por meio da análise da tomada de decisão em conjunto com a de Teoria dos Jogos.

Apesar do fato de que o uso da Teoria dos Jogos na tomada de decisões em grupo já tenha sido relatado anteriormente, a literatura existente também não fornece um método para tratar da tomada de decisão como um jogo que considera a negociação entre os jogadores em busca de alternativas que atendam às suas preferências. Além disto, não se identificou um método que, de forma explícita, considere as preferências dos jogadores abrangendo os aspectos econômico, social e ambiental da sustentabilidade.

O vínculo proposto entre a tomada de decisão e a Teoria dos Jogos, considerando os critérios que representam os três aspectos da sustentabilidade: ambientais, sociais e econômicos, foi proposto em duas etapas. Na primeira, blocos agregados são criados para formar as alternativas que serão avaliadas com base em critérios de sustentabilidade em uma matriz de decisão.

Para compor estes blocos, foram selecionados diferentes critérios a partir de vários indicadores de sustentabilidade encontrados na literatura, que são usados na avaliação de alternativas de sistema de tratamento de esgoto. Cada um destes critérios recebeu uma função para estimar o desempenho de sistemas de tratamento preliminares, primários, secundários e terciários, e foram agrupados para formar os sistemas individuais. Por sua vez, os sistemas individuais foram adicionados a uma Biblioteca de Tecnologias para a criação de sistemas de tratamento completos, por meio da agregação de blocos de sistemas individuais.

Dentre os critérios selecionados para a avaliação de sustentabilidade, as funções para representar o aspecto social foram as de maior dificuldade de obtenção, sendo as funções para os critérios econômicos obtidas com dificuldade intermediária e as funções para os critérios ambientais mais facilmente obtidas, contudo possuindo algumas variações entre diferentes autores na literatura. Os sistemas de tratamento adotados no Brasil foram encontrados nas tabelas da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico e foram utilizados como referência para definir os blocos individuais para compor a Biblioteca de Tecnologias.

É importante ressaltar que as funções e os critérios considerados neste trabalho não tiveram o propósito de esgotar todas as possibilidades. Em modelos mais completos (complexos) poderão ser incorporados indicadores relacionados com a recuperação de produtos como o fosfato, lodo fertilizante, compostos nitrogenados fertilizantes, metano para a produção de energia entre outros. Outras funções para estimar os critérios também podem ser incluídos na biblioteca, como, por exemplo, os modelos complexos de simulação ADM1

(*Anaerobic Digestion Model*) além dos modelos ASM, ambos propostos por grupos de trabalho da IWA (*International Water Association*).

Todavia, a utilização da Biblioteca de Tecnologia demonstrou ser um meio adequado para a avaliação da sustentabilidade das estações de tratamento de esgoto, pois permite considerar diferentes critérios (econômicos, ambientais e/ou sociais), evidenciando as principais vantagens e desvantagens das diversas alternativas no processo de tomada de decisão. Além disto, a biblioteca demonstrou ser facilmente adaptável para a inclusão de novos blocos de sistemas, o que lhe confere um potencial para ser utilizada nas avaliações de sustentabilidade ou como ponto de partida para outros trabalhos nesta mesma linha, tornando possível uma discussão mais objetiva sobre os conceitos de sustentabilidade. Assim, a Biblioteca de Tecnologia criada foi utilizada como base para a criação da matriz de decisão utilizada na segunda etapa da pesquisa.

Na segunda etapa, a matriz de decisão criada com os blocos individuais da Biblioteca de Tecnologia, é o ponto inicial da aplicação do método multicriterial. Nesta matriz de decisão, que contém os valores medidos em diferentes unidades, é realizada uma normalização e os vetores de pesos para os critérios são definidos como perfis de jogadores, os quais definem as prioridades de atendimento aos diferentes pontos de vistas na avaliação da sustentabilidade das estações de tratamento de esgoto. A partir disto, é definida uma função de pagamentos para criar uma tabela de pagamentos para cada jogador. Esta função de pagamentos respeita as propriedades do ordenamento de preferências dos jogadores e visa medir e simular a interação estratégica que ocorre entre os diferentes agentes no curso de estabelecer sua alternativa preferida.

Neste trabalho, algumas funções para medir a similaridade entre as alternativas, como a adotada no ELECTRE II, foram testadas para serem utilizadas como base da função de pagamentos. Todavia, nenhuma das funções testadas foi capaz de gerar uma tabela de

pagamentos que refletisse as estratégias dos jogadores no curso de estabelecer suas preferências, considerando os critérios em avaliação. Consequentemente, esta etapa da pesquisa foi a que exigiu o maior esforço no sentido de propor uma nova função que penalizasse os jogadores quando eles partissem de soluções mais distantes em relação à alternativa ideal e quando o ganho de troca fosse muito próximo de zero, pois se considera que existe um esforço real para efetuar as trocas. Assim, a solução para a função de pagamentos proposta nesta pesquisa, teve como base a média entre o pagamento inicial, caso o jogador entre em uma negociação e mantenha a sua escolha pela alternativa inicial, e o pagamento a receber, caso aceite realizar uma troca. Todavia, estudos futuros devem demonstrar se a utilização da média seria a mais adequada para este tipo de função.

Por fim, um exemplo foi gerado para um município fictício, com aproximadamente 40 mil habitantes, a partir da definição do jogo e seus jogadores, tendo sido utilizado o *software* Gambit para encontrar o equilíbrio de Nash do jogo, finalizando assim os procedimentos do método multicriterial.

Com base nos resultados obtidos, oito possíveis equilíbrios foram encontrados e poderiam ser alcançados por meio de estratégias puras ou estratégias mistas. Três das seis alternativas em avaliação foram identificadas como tendo maiores chances de serem negociadas entre os três jogadores (com perfil social, ambiental e econômico), pois foram as que levaram os pagamentos dos jogadores aos maiores níveis. Além disto, proporcionaram um maior balanceamento entre os mesmos. Assim, três alternativas foram consideradas adequadas para compor um espaço de aceitabilidade enquanto as outras três alternativas foram consideradas menos interessantes para serem apresentadas em uma rodada de negociação, pois poderiam levar o resultado do jogo para uma situação de perdas mútuas, onde os pagamentos são os menores possíveis e os menos balanceados entre os jogadores.

Os resultados alcançados pelo método proposto são semelhantes a recomendações, de

acordo com o paradigma construtivista, e visam apenas servir como apoio para os tomadores de decisão em seu processo de tomada de decisão em grupos, diferentemente dos métodos tradicionais, que apresentam resultados ótimos, de forma prescritiva (como no paradigma racionalista).

O objetivo principal desta pesquisa foi elaborar e testar um método multicriterial, baseado em indicadores de sustentabilidade técnicos, econômicos, ambientais e sociais, em conjunto com a Teoria dos Jogos e o equilíbrio de Nash. Pretendeu-se contribuir com um método para auxiliar na resolução de conflitos na escolha da alternativa de sistema de tratamento de esgoto sanitário mais adequado para os municípios, considerando o processo de escolha como um processo de escolha em grupo. Além disto, esta pesquisa visou contribuir para a quebra do paradigma da busca pela eficiência baseada nos critérios formados pelo binômio técnico e econômico.

Ao estabelecer uma ligação entre a tomada de decisões com Teoria dos Jogos, o método torna possível aos jogadores escolherem as estratégias que lhes darão o maior retorno, levando em consideração a preferência dos outros jogadores envolvidos, e, portanto, promove escolhas sustentáveis com base nas alternativas que compõem o espaço de soluções aceitáveis. Algumas das vantagens do método proposto nesta pesquisa são que: (a) considera vários critérios e decisores sem agregação, (b) permite a consideração de comportamentos estratégicos, (c) requer um esforço mínimo do decisor para definir os vetores de preferência; e (d) permite verificar e avaliar vários cenários. Como principal limitação identificada, está o fato de que os algoritmos utilizados na procura do equilíbrio de Nash pode exigir um elevado poder computacional, dado o aumento do número de iterações quando novos jogadores são incorporados.

Por fim, salienta-se aqui que não somente na escolha de sistemas de tratamento de esgoto para município, mas também em diversas situações nas quais os tomadores de decisão

sejam obrigados a decidirem em conjunto, o método aqui proposto apresenta um potencial para auxiliá-los na escolha de estratégias que lhes proporcionem o maior pagamento, considerando a preferência dos outros jogadores envolvidos, favorecendo a sustentabilidade da escolha com base nas alternativas que compõe o espaço de aceitabilidade. Este é o tema principal para pesquisas futuras, que deverão ser conduzidas para a consolidação do método.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEGRE, Helena; BAPTISTA, Jaime Melo; CABRERA JR., Enrique; CUBILLO, Francisco; DUARTE, Patrícia; HIRNER, Wolfram; MERKEL, Wolf; PARENA, Renato. Performance Indicators for Water Supply Services: Manual of Best Practice. 2 ed. London: IWA Publishing, 2007
- BAKER, D., BRIDGES, D., HUNTER, R., JOHNSON, G., KRUPA, J., MURPHY, J. SORENSON, K. Guidebook to Decision-Making Methods, Department of Energy, USA. Dezembro, 2001, Disponível em: <<http://ckmportal.eclacpos.org/caribbean-digital-library/industrial-development/xfer-949>>
- BALKEMA, Annelies J.; PREISIG, Heinz A.; OTTERPOHL, Ralf; LAMBERT, Fred J.D. Indicators for the sustainability assessment of wastewater treatment systems. Urban Water 4 (2002) 153–161
- BAZERMAN, M.H. **Processo decisório**. Para cursos de Administração, Economia e MBAs. São Paulo: Elsevier, 2004. 232 p.
- BENAKOUCHE, R.; CRU, R.S. Avaliação monetária do meio ambiente. São Paulo: Makron Books, 1994.
- BENEDETTI, L.; DIRCKX, G.; BIXIO, D.; THOEYE, C.; VANROLLEGHEM, P.A. Environmental and economic performance assessment of the integrated urban wastewater system. Journal of Environmental Management, v. 88, 2008, p. 1262–1272
- BIERMAN, H.S.; FERNANDEZ, L. Game theory with economic applications. 2.ed. United States: Addison-Wesley, 1998.
- BINMORE, K.; VULKAN, N. Applying game theory to automated negotiation. Netnomics (1999) 1–9
- BLOUNT, S. and BAZERMAN, M.H. The inconsistent evaluation of absolute versus comparative payoffs in labor supply and bargaining Journal of Economic Behavior & Org. 30 (1996) 227-240
- BORNSTEIN, G.; KUGLER, T.; ZIEGELMEYER, A. Individual and group decisions in the centipede game: Are groups more “rational” players? Journal of Experimental Social Psychology 40 (2004) 599–605
- BRASIL. Constituição (1988). Lex: legislação federal e marginália, Brasília, p. 1966, out./dez. 1988.
- BRUNNER, Norbert; STARKL, Markus. Decision aid systems for evaluating sustainability: a critical survey. Environmental Impact Assessment Review 24 (2004) 441–469
- BUEDE, Dennis M. ; MAXWELL, Daniel T. Rank Disagreement: A Comparison of Multi-criteria Methodologies. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, Vol. 4, 1-21 (1995)

BUTLERA, D.; SCHÜTZE, M. Integrating simulation models with a view to optimal control of urban wastewater systems. *Environmental Modelling & Software*, 20 (2005), 415-426

CARRARO, C.; MARCHIORI, C.; SGOBBI, A. Applications of Negotiation Theory to Water Issues (2005). Artigos da Fondazione Eni Enrico Matt FEEM. Disponível em <<http://ssrn.com/abstract=722362>>

CHEN, H.W.; CHANG, N.B. A comparative analysis of methods to represent uncertainty in estimating the cost of constructing wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, 65 (2002) 383-409.

CHEN, S. H.; JAKEMAN, A. J., NORTON, J. P. Artificial Intelligence techniques: An introduction to their use for modelling environmental systems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 78 (2008), 379-400

DENG, Hepu. A Similarity-Based Approach to Ranking Multicriteria Alternatives. *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. Lecture Notes in Computer Science*, 2007, Volume 4682/2007, 253-262

ENSSLIN, Leonardo; MONTIBELLER NETO, Gilberto; NORONHA, Sandro MacDonald. Apoio à Decisão: Metodologias para Estruturação de Problemas e Avaliação Multicritério de Alternativas. Editora Insular, 2001

EKAMA, G.A.; WENTZEL, M.C.; SÖTEMANN, S.W. Mass balance-based plant-wide wastewater treatment plant models – Part 1: Biodegradability of wastewater organics under anaerobic conditions. *Water SA*, 32 (2006a) 269-276

_____. Mass balance-based plant-wide wastewater treatment plant models – Part 2: Tracking the influent inorganic suspended solids. *Water SA*, 32 (2006b) 277-286

_____. Mass balance-based plant-wide wastewater treatment plant models – Part 3: Biodegradability of activated sludge organics under anaerobic conditions. *Water SA*, 32 (2006c) 287-296

_____. Mass balance-based plant-wide wastewater treatment plant models – Part 4: Aerobic digestion of primary and waste activated sludges. *Water SA*, 32 (2006d) 297-306

FINE, P.; HALPERIN, R.; HADAS, E. Economic considerations for wastewater upgrading alternatives: An Israeli test case. *Journal of Environment Management*, 78 (2006) 163-169.

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

FINE, P.; HALPERIN, R.; HADAS, E. Economic considerations for wastewater upgrading alternatives: An Israeli test case. *Journal of Environment Management*, 78 (2006) 163-169.

FRAAS, A. G. Municipal Wastewater Treatment Cost. *Journal of Environmental Economics and Management*, 11, (1984), 28-38

GESELBRACHT, J. WWTPStaffing. Water Works Engineers, Version 1.01 (2006). <http://www.wwengineers.com>

GIBSON, Robert B.; HASSAN, Selma; HOLTZ, Susan, TANSEY, James; WHITELAW, Graham. Sustainability Assessment: Criteria, Processes and Applications. Earthscan, 2005

GIANNETTI, B.F.; BARRELLA, F.A.; ALMEIDA, C.M.V.B. A combined tool for environmental scientists and decision makers: ternary diagrams and emergy accounting. *Journal of Cleaner Production*, 14 (2006) 201-210.

GILLOT, S.; DE CLERCQ, B.; DEFOUR, D.; SIMOENS, F.; GERNAEY, K. e VANROLLEGHEM, P. A. Optimization of wastewater treatment plant design and operation using simulation and cost analysis. In *Proceedings of the 72nd Annual WEF Conference and Exposition*, New Orleans, USA – October, 9-13, 1999.

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.

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

HUANG, Ting-Lin; XU, Zhi-Qiang; WANG, Xiaochang C. e ZHANG, Hui Optimization analysis of decentralised sanitation and re-use system. *Water Science and Technology*. 53 (9) (2006) 221-228.

HUESEMANN, Michael H. Can pollution problems be effectively solved by environmental science and technology? An analysis of critical limitations. *Ecological Economics*, 37 (2001) 271-287.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. Tratamento de Esgotos Domésticos. 5. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009

KARAGIANNIDIS, A.; MOUSSIOPOULOS, N. Application of ELECTRE III for the integrated management of municipal solid wastes in the Greater Athens Area. *European Journal of Operational Research*, v. 97, 1997, p. 439-449

KARSAK, E. Ertugrul; AHISKA, S. Sebnem. Improved common weight MCDM model for technology selection. *International Journal of Production Research*, v. 46, 2008, p. 6933–6944

KELLNER, Erich; CALIJURI, Maria do Carmo; PIRES, Eduardo Cleto. Aplicação de indicadores de sustentabilidade para lagoas de estabilização. *Eng. Sanit. Ambient.* [online]. 2009, vol.14, n.4, pp. 455-464. ISSN 1413-4152

KIKER, Gregory A.; BRIDGES, Todd S.; VARGHESE, Arun; SEAGER, Thomas P.; LINKOV, Igor. Application of Multicriteria Decision Analysis in Environmental Decision Making. *Integrated Environmental Assessment and Management*, v 1, (2005) p. 95-108

KOCHER, M.; SUTTER, M. The decision maker matters: individual versus group behaviour in experimental beauty contest games. *The Economic Journal*, 115 (2005), 200–223

KRAWCZAK, M.; ZICSAKOWSKI, A. Nash model of water reservoir pollution. *Annual Review in Automatic Programming*. Volume 12, Part 2, 1985, Pages 181-184

KUJAWSKI E. A reference-dependent regret model for deterministic tradeoff studies. *Systems Engineering* 2005;8:119–37.

LAWHON, P. e SCHWARTZ, M. Linking environmental and economic sustainability in establishing standards for wastewater re-use in Israel. *Water Science and Technology*. 53 (9) (2006) 203-212.

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

MAASER, Nicola F. *Decision-Making in Committees: Game-Theoretic Analysis*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010

MADANI, K. Game theory and water resources. *Journal of Hydrology* 381 (2010), 225–238

MAKROPOULOS, C.K.; NATSIS, K.; LIU, S.; MITTAS, K.; BUTLER, D. Decision support for sustainable option selection in integrated urban water management. *Environmental Modelling & Software*, v. 23, 2008, p. 1448–1460

MALIK, P.K.; DATTA, S. (2005) Financial sustainability of environmental investment under an empirical pollution abatement policy instrument in India: the case of wastewater treatment. *Environmental Science and Policy*, 8 (2005) 67-85.

MCKELVEY, Richard D.; MCLENNAN, Andrew M.; TUROCY, Theodore L. (2010). *Gambit: Software Tools for Game Theory*, Version 0.2010.09.01. <http://www.gambit-project.org>.

MEADOWS, Donella. *Indicators and Information Systems for Sustainable Development*. A report to the Balaton Group. The Sustainability Institute, 1998

MEISTER, D. B.; FRASER, N. M. Multiattribute Coalition Formation Analysis. *Systems Engineering in the Service of Humans, International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 1993, Conference Proceedings.

METCALF, A.; EDDY, M. S., *Wastewater Engineering. Treatment, Disposal and Reuse*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

MORAIS, Danielle C.; ALMEIDA, Adiel Teixeira de. Group decision making on water resources based on analysis of individual rankings. *Omega* 40 (2012)42–52

MUGA, Helen E.; MIHELICIC, James R. Sustainability of wastewater treatment technologies. *Journal of Environmental Management* 88 (2008) 437–447

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

NEUMAN, J.V.; MORGENSTERN, O. *Theory of games and economic behavior*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1944.

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. 293f. Tese (Doutorado em Administração). Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

OLIVEIRA, S.V.W.B. Esgoto Sanitário no Brasil: avaliação de alternativas de tratamento e valores de investimento para auxílio à tomada de decisão. 2009. 293f. Tese (Livre Docência). Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

PEARSON, Virginia M. S.; STEPHAN, Walter G. Preferences for styles of negotiation: a comparison of Brazil and the U.S. *International Journal of Intercultural Relations*. Vol. 22, N. 1, p. 67-83, 1998

PENIWATI, K. Criteria for evaluating group decision-making methods. *Mathematical and Computer Modelling* 46 (2007) 935–947

POHEKAR, S.D.; RAMACHANDRAN, M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8 (2004) 365–381

PORTER, R.; NUDELMAN, E.; SHOHAM, Y. Simple search methods for finding a Nash equilibrium. *Games and Economic Behavior*, v. 63, 2008, p. 642–662

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.

RADJEF, M.S.; FAHEM, K. A note on ideal Nash equilibrium in multicriteria games. *Applied Mathematics Letters* 21 (2008) 1105–1111

RAMETSTEINER, Ewald; PÜLZL, Helga; ALKAN-OLSSON, Johanna; FREDERIKSEN, Pia. Sustainability indicator development—Science or political negotiation? *Ecological Indicators* 11 (2011) 61–70

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

SEGNESTAM, Lisa. *Indicators of Environment and Sustainable Development: Theories and Practical Experience*. The International Bank for Reconstruction and Development. Washington, Dezembro 2002
Manufactured in the United States of America

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

SIMON, Herbert A.; DANTZIG, George B.; HOGARTH, Robin; PLOTT, Charles R., RAIFFA, Howard; SCHELLING, Thomas C.; SHEPHERD, Kenneth A.; THALER, Richard;

TVERSKY, Amos; WINTER, Sidney. Decision Making and Problem Solving. Interfaces, Vol. 17, No. 5 (1987), p. 11-31

SIMONOVIC, S. P.; VERMA, R. A new methodology for water resources multicriteria decision making under uncertainty. Physics and Chemistry of the Earth 33 (2008) 322–329

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES EM SANEAMENTO (2009). Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 30 out. 2011.

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

SRDJEVIC, B. Linking analytic hierarchy process and social choice methods to support group decision-making in water management. Decision Support Systems 42 (2007) 2261–2273

STARKL, Markus e BRUNNER, Norbert. Feasibility versus sustainability in urban water management. Journal of Environmental Management, 71 (2004) 245-260.

SZIDAROVSKY, F.; DUCKSTEIN, L. Multiobjective management of mining under water hazard by game theory. European Journal of Operational Research 15 (1984) 251-258

TECLE, A.; FOGEL, M.; DUCKSTEIN, L. Multicriterion selection of wastewater management alternatives. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 114, No. 4, July, 1988

VANROLLEGHEM, Peter A.; JEPPSSON, Ulf; CARSTENSEN, Jacob; CARLSSON, Bengt e Olsson, Gustaf. Integration of wastewater treatment plant design and operation – a systematic approach using cost functions. Water Science and Technology, 34 (3-4) (1999) 159-171.

VARIAN, H.R. Microeconomia: princípios básicos. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2003.

VIDAL, N.; BAÑARES-ALCÁNTARA, R.; RODRÍGUEZ-RODA, I.; POCH, M. Design of Wastewater Treatment Plants Using a Conceptual Design Methodology, v 41, Ind. Eng. Chem. Res. 2002, p. 4993-5005

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.

WANG, Xiaoting; TRIANTAPHYLLOU, Evangelos . Ranking irregularities when evaluating alternatives by using some ELECTRE methods. Omega 36 (2008) 45 – 63

WEI, S.; YANG, H.; ABBASPOUR, K.; MOUSAVI, J.; GNAUCK, A. Game theory based models to analyze water conflicts in the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project in China. Water Research, v. 44, 2010, p. 2499–2516

WEIRICH, Paul. *Equilibrium and Rationality: Game Theory Revised by Decision Rules*. Cambridge University Press, New York, 1998, p. 235

WOODERS, M. H.; CARTWRIGHT, E. Conformity and Bounded Rationality in Games with Many Players (2003). Artigos da Fondazione Eni Enrico Matt FEEM. Disponível em <<http://ssrn.com/abstract=486843>>

XENARIOS, S.; BITHAS, K. Extrapolating the benefits arising from the compliance of urban wastewater systems with the Water Framework Directive. *Desalination*, 211 (2007), 200–211

YEH, C. H. A problem-based selection of multi-attribute decision-making methods. *Intl. Trans. in Op. Res.* 9 (2002) 169-181

ZANAKIS, S. H.; SOLOMON, A.; WISHART, N.; DUBLISH, S. Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods. *European Journal of Operational Research* 107 (1998) 507-529

ZAVADSKAS, E.K.; TURSKIS, Z. A New Logarithmic Normalization Method in Games Theory. *Informatica*, 2008, Vol. 19, No. 2, 303–314 303

ZOPOUNIDIS, Constantin; DOUMPOS, Michael. Multicriteria classification and sorting methods: A literature review. *European Journal of Operational Research* 138 (2002) 229–246

APÊNDICE A – Métodos multicritério mais conhecidos

O presente apêndice traz de forma resumida as principais características dos mais conhecidos métodos multicriteriais até então desenvolvidos, iniciando pelo mais comentado e aplicado atualmente, o Método de Análise Hierárquica – *Analytic Hierarchy Process* (AHP).

O AHP é um método multicritério de apoio a tomada de decisão desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1970, que permite a modelagem de problemas não-estruturados nas atividades econômicas, sociais e gerenciais. Basicamente, este método consiste em hierarquizar “n” alternativas de acordo com “m” objetivos. 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 $m(B,A) = 1/m(A,B)$. 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.

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.

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.

Detalhes de sua aplicação podem ser conferidos no livro *The Analytic Hierarchy Process*, New York, NY, USA: McGraw Hill, (SAATY, 1980).

Por sua vez, o *Elimination et Choice Traduisant la Réalité* (ELECTRE) é um método capaz de lidar com critérios distintos, tanto quantitativos como qualitativos, e fornece ordenação completa das alternativas. Neste método as alternativas preferíveis são aquelas que têm um desempenho melhor para a maior parte dos critérios e não causam um nível inaceitável ou de descontentamento para qualquer um dos mesmos (POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2004).

Os procedimentos do ELECTRE prevêm o estabelecimento de um nível de concordância, discordância e de indiferença para serem usados no estabelecimento das relações entre as alternativas. Estes índices são definidos pelo tomador de decisão e variam no intervalo entre zero e um estabelecendo os limites para cada relação. Por exemplo, no ELECTRE III os valores para vetar (v), dar preferência (p) ou indicar indiferença (q) entre as alternativas podem ser definidos conforme a equação 1.

$$S(a,b) = \begin{cases} C(a,b), & \text{if } d_j(a,b) \leq C(a,b) \forall j \\ C(a,b) \cdot \prod_{j \in J(a,b)} \frac{1 - d_j(a,b)}{1 - C(a,b)}, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

onde, $C(a,b)$ é o índice de concordância, $d_j(a,b)$ é o índice de discordância e $J(a,b)$ é o conjunto de critérios tal que $d_j(a,b) > C(a,b)$. As equações 2 e 3 são usadas para calcular os índices de concordância e discordância, respectivamente.

$$C(a,b) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^r k_j c_j(a,b), \text{ onde } k = \sum_{j=1}^r k_j \quad (2)$$

e,

$$\begin{aligned}
c_j(a,b) &= \begin{cases} 1, \text{ if } g_j(a) + q_j \geq g_j(b) \\ 0, \text{ if } g_j(a) + p_j \leq g_j(b) \\ \frac{p_j + g_j(a) - g_j(b)}{p_j - q_j}, \text{ caso contrário} \end{cases}, \quad j = 1, \dots, r \\
d_j(a,b) &= \begin{cases} 0, \text{ if } g_j(a) + p_j \geq g_j(b) \\ 1, \text{ if } g_j(a) + v_j \leq g_j(b) \\ \frac{g_j(b) - g_j(a) - p_j}{v_j - p_j}, \text{ caso contrário} \end{cases}, \quad j = 1, \dots, r
\end{aligned} \tag{3}$$

Finalmente, o método ELECTRE produz um índice de concordância global que apóia a ordenação das alternativas sob a hipótese de que uma supera a outra, produzindo um núcleo de alternativas principais, eliminando as menos favoráveis. Além disto, o método ELECTRE é, por vezes, capaz de identificar a alternativa preferida. Assim, este método permite uma visão mais clara sobre as alternativas, o que é especialmente conveniente ao lidar com um grande número de alternativas em um problema de tomada de decisão (POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2004). Maiores detalhes podem ser conferidos na sua publicação original *Classement et choix en présence de points de vue multiples: La méthode ELECTRE*. *Revue Francaise d'Informatique et de Recherche Opérationnelle* (ROY, 1968).

Enquanto o ELECTRE possui certa complexidade na ordenação das alternativas o método *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (PROMETHEE) utiliza outras formas de classificação com o intuito de facilitar sua utilização. Para isto, é realizada uma comparação de pares de alternativas, a fim de classificar-las com considerando um número maior de critérios. O método também utiliza uma função de preferência, que é uma função da diferença entre duas alternativas para qualquer critério. A indiferença e os limiares de preferência também são definidos dependendo do tipo de função critério. Duas alternativas são indiferentes para um critério enquanto não exceda o limite de

indiferença (POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2004). Outros detalhes podem ser conferidos em *A preference ranking organization method* (BRANS; VINCKE, 1985)

Finalmente, merecem destaque os métodos *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) e *Multiattribute Utility Theory* (MAUT). O TOPSIS foi desenvolvido sobre o conceito de que a melhor alternativa deverá ser a mais próxima da alternativa ideal e possuir a maior distância da solução negativa em sentido geométrico. Assim, a ordem de preferência das alternativas é produzida através de comparação das distâncias euclidianas. Já o MAUT leva em consideração as preferências do decisor, sob a forma da função de utilidade que é definida ao longo de um conjunto de atributos. O valor da utilidade pode ser determinado por funções de utilidades seguidas por verificação das preferenciais (POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2004). Detalhes sobre os métodos acima podem ser obtidos em *Multiple attribute decision making: methods and applications*, Springer (HWANG; YOON, 1981) e *Decision with multiple objectives: preferences and value tradeoffs*. Wiley (KEENEY; RAIFFA, 1976).

APÊNDICE B – Equilíbrio de Nash

O equilíbrio conhecido como Equilíbrio de Nash é uma solução para jogos simultâneos que não possuem estratégias estritamente dominadas e não podem ser resolvidos pela eliminação iterativa destas estratégias. Assim, ao invés de exigir que, para um determinado jogador, sua escolha seja a melhor alternativa para toda e qualquer escolha dos demais jogadores, espera-se que sua escolha seja apenas a melhor alternativa, dada a melhor alternativa para os outros jogadores (VARIAN, 2003). Segundo Varian (2003, pg 537), diz-se “que um par de estratégias constitui um equilíbrio de Nash se a escolha de A for ótima, dada a escolha de B, e a escolha de B for ótima dada a escolha de A”. Em outras palavras, diz-se que um equilíbrio de Nash é encontrado quando cada estratégia se torna a melhor resposta possível às estratégias dos demais jogadores, sendo isto verdade para todos os jogadores (FIANI, 2006).

De forma geral, em jogos nenhuma pessoa sabe o que a outra fará quando for obrigada a escolher sua própria estratégia, por isto o equilíbrio de Nash é mais bem interpretado como um par de expectativas sobre as escolhas, de modo que, quando as escolhas forem reveladas, nenhum jogador terá incentivo de mudá-la, caso venha a seguir o equilíbrio (VARIAN, 2003). Assim, segundo Fiani (2006) dada uma estratégia e_i^* de um jogador i ela será considerada a melhor resposta desse jogador frente a uma dada estratégia e_{-i} dos demais jogadores se: $\pi_i(e_i^*, e_{-i}) \geq \pi_i(e'_i, e_{-i})$ para algum e_{-i} e todos $e'_i \neq e_i^*$. Em outras palavras, ela será a melhor estratégia se não houver outra disponível para o jogador i que produza uma recompensa mais elevada do que e_i^* (FIANI, 2006).

Para Varian (2003), apesar de possuir certa lógica, a noção de equilíbrio de Nash possui algumas limitações, tais como: (i) o jogo pode ter mais de um equilíbrio de Nash; (ii) o jogo pode não ter, em absoluto, equilíbrio de Nash na forma de estratégias puras. Entretanto, se forem ampliadas a definição de estratégias, pode-se encontrar equilíbrios de Nash para

jogos sem equilíbrio na forma pura, ou seja, com cada agente escolhendo uma estratégia definitiva.

Segundo Varian (2003), outra forma de encontrar equilíbrios de Nash é considerar que os agentes escolham probabilisticamente suas estratégias, ou seja, que atribuam uma probabilidade para cada alternativa e façam suas escolhas de acordo com as probabilidades. Por exemplo, um jogador pode escolher jogar 50% das vezes em uma alternativa e 50% nas restantes, assim como seu oponente pode adotar probabilidades na escolha de suas estratégias. Este tipo de estratégia é chamado estratégia mista.