

## RETROSPECTIVA E PROSPECTIVA DA ANÁLISE TECNOLÓGICA DAS ALTERNATIVAS PARA PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REATORES ANAERÓBIOS

Oscar de Moraes Cordeiro Netto<sup>(1)</sup>, Marco Antonio Almeida de Souza<sup>(1)</sup> e Reynaldo Pena Lopes Júnior<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Universidade de Brasília – UnB, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70.910-090 Brasília – DF, Brasil

### RESUMO

Apresenta-se uma visão panorâmica da pesquisa cujo objetivo principal foi a análise tecnológica, utilizando métodos multiobjetivo, das alternativas para pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios pesquisadas pela Rede 2 do PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, da FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos. Remete-se o leitor para as bases filosóficas e metodológicas da presente pesquisa, apresentadas anteriormente em SOUZA e CORDEIRO NETTO (2000). Discutem-se os principais resultados e produtos obtidos, dentre eles a produção de um SAD – Sistema de Apoio à Decisão, que automatiza a análise tecnológica das alternativas estudadas. Finalmente, são postulados os rumos que devem ser seguidos em pesquisas futuras no tema, e formulam-se cenários de avanços esperados na pesquisa do tema.

### PALAVRAS CHAVE

Análise Tecnológica; Reatores Anaeróbios; Pós-Tratamento; Esgotos; Tecnologia Apropriada

### INTRODUÇÃO

No campo de Pesquisa e Desenvolvimento (*P&D*), os temas de Ciência e Tecnologia foram muito pesquisados e utilizados. Desses estudos derivaram-se alguns conceitos, como Tecnologia Apropriada, Escolha Tecnológica (do inglês *Technology Choice*), e Ajuste Tecnológico (*Technology Fitness*), que formam a base conceitual da abordagem científica do tema (WILLOUGHBY, 1990). No presente trabalho, preferiu-se inserir os termos *Análise Tecnológica* e *Avaliação Tecnológica*, sem ferir as bases conceituais assentadas, mas indicando diferentes aspectos e aplicações mais amplas.

Assim, define-se a *Análise Tecnológica* de alternativas de tratamento de águas residuárias municipais, e, de forma mais restrita, de alternativas de pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, como o conjunto de ações que tem o objetivo de prognosticar, para uma dada situação real, quais das alternativas apresentam melhor desempenho quando definitivamente

implantadas em um determinado local ou situação. O dado local ou situação constituem-se no que se convencionou chamar, classicamente, de *contexto tecnológico*.

A *Análise Tecnológica* vem suprir um anseio de muitos especialistas em diferentes áreas de conhecimento, que chegaram à constatação de que algumas tecnologias não funcionam sob determinadas condições, e, mais importante que isso, não funcionam por motivos cuja explicação transcende o aspecto meramente técnico. Na verdade, muitos especialistas concluíram que os “defeitos” ou inadequações das tecnologias implantadas localizam-se, principalmente, nas outras dimensões da Tecnologia, como nas dimensões ambiental, econômica, social, cultural, axiológica, etc.

A política de pesquisa também deve ser considerada nessa discussão. É certo que o processo de rápida industrialização que vem ocorrendo nas últimas décadas nos países em desenvolvimento, utilizando a transferência tecnológica dos países desenvolvidos, não tem conseguido proporcionar a sua independência tecnológica e, muito menos, tem conseguido propiciar um desenvolvimento capaz de contornar os principais problemas econômicos e sociais que afligem esses países. A razão disso é que a tecnologia estrangeira, na maioria dos casos, não é adaptada às condições do local de importação e, uma vez que é elaborada e espelhada nos padrões de desenvolvimento dos países industrializados, permanece como um corpo estranho, não contribuindo de forma significativa para a evolução e o desenvolvimento de uma base tecnológica local (BUARQUE, 1983; CARNEIRO *et al.*, 2001).

As limitações observadas na política de desenvolvimento dos países importadores de tecnologia geraram uma corrente de pensamento defensora do que se convencionou chamar de Tecnologia Apropriada (SCHUMACHER, 1973). Essa corrente considera a escolha tecnológica como um caminho necessário para o alcance de um ou mais objetivos, observando-se a adequação da tecnologia ao meio sócio-econômico-cultural e biofísico local, evitando-se, assim, a visão de que o desenvolvimento tecnológico seja um fim em si mesmo.

No entanto, apesar da comprovação empírica das vantagens da implementação da Tecnologia Apropriada em vários setores de atividades industriais, de infra-estrutura e outros, observados em casos registrados por todo o mundo (McROBIE, 1981; FLEISSNER, 1983), e a despeito de seus fundamentos promissores, a sua difusão e implementação têm sido pouco expressivos (WILLOUGHBY, 1990).

De acordo com os princípios de Tecnologia Apropriada, uma alternativa tecnológica deve se ajustar ao contexto em vários aspectos e de forma concomitante. Por muitos anos, perseguiu-se esse postulado sem, contudo, empregar uma ferramenta científica adequada. Com o advento das Ciências de Decisão, e, de forma específica, da Análise Multiobjetivo e Multicritério, tornou-se natural o seu emprego nas questões de planejamento e de implantação das políticas de ciência e tecnologia. Essa constatação parte do conceito de “ótimo de Pareto”, que afirma a impossibilidade de se atingir um ponto ótimo quando se perseguem, ao mesmo tempo, vários objetivos, como é o caso da Tecnologia Apropriada. Além disso, com a Análise Multiobjetivo pode-se inserir o fator humano na decisão, administrando-se conflitos de interesses e de preferências.

## OBJETIVOS E ESCOPO

Levando em conta essas observações, a presente pesquisa buscou resgatar alguns importantes conceitos e corolários de Tecnologia Apropriada, inserindo-os em uma metodologia racional, baseada na utilização de métodos de análise multiobjetivo e multicritério, capaz de proceder à tarefa da escolha tecnológica de processos de tratamento de águas residuárias para diferentes contextos tecnológicos presentes no território brasileiro.

Objetivou-se, de forma mais específica e restrita, utilizar métodos de análise multiobjetivo e multicritério para avaliação do desempenho de alternativas tecnológicas para tratamento de efluentes de reatores anaeróbios.

Para a consecução desse objetivo maior, foram postos alguns objetivos específicos, quais sejam:

- (1) Avaliar a experiência existente com o uso de métodos multiobjetivo para análise de alternativas tecnológicas de processos de tratamento de efluentes;
- (2) Identificar indicadores e critérios de avaliação de desempenho das alternativas de pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios; e
- (3) Produzir um sistema de suporte à decisão, capaz de auxiliar na seleção de alternativas de pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios.

Por estar a presente pesquisa inserida em uma rede de pesquisa maior, ela adquiriu algumas vantagens, como poder contar com o concurso de dados e informações da rede, mas, ao mesmo tempo, teve o seu escopo limitado pela temática e pela experiência e conhecimento dos participantes da rede. Além disso, existem as próprias limitações das alternativas tecnológicas estudadas, com a sua aplicabilidade peculiar a instalações de pequeno e médio porte. A pesquisa limita-se, também, ao tratamento exclusivo de esgotos sanitários sob condições existentes no Brasil.

## TECNOLOGIA APROPRIADA

O termo “Tecnologia Apropriada” foi primeiramente empregado pelo economista Ernst Friedrich Schumacher em uma conferência na Universidade de Oxford, na Inglaterra, em 1968 (WILLOUGHBY, 1990). Entretanto, foi somente em 1973 que o termo tornou-se bem conhecido e popularizado pelo livro escrito por Schumacher com o título “*Small is Beautiful – A Study of Economics as If People Mattered*” (SCHUMACHER, 1973). Este livro foi reeditado em 1974 (SCHUMACHER, 1974) e re-impresso várias vezes, além de ter sido traduzido para várias línguas, inclusive a portuguesa.

Na prática de vários campos profissionais, mormente nos de Engenharia e Arquitetura, tem-se utilizado o termo *Tecnologia Apropriada* no sentido léxico mais amplo, sem preocupação com o seu real significado científico. A adoção desse termo por diversas correntes de pensamento gerou uma certa confusão – e um certo menosprezo dedicado por alguns pesquisadores –, tendo estimulado indagações do tipo: - “Tecnologia apropriada para onde? - Por que ela é apropriada? - Para quem ela é apropriada?”.

Porém, para os estudiosos da matéria, a palavra “apropriada” no termo *Tecnologia Apropriada* não deve ser considerada como uma mera definição qualificativa da palavra tecnologia. Segundo eles, o termo Tecnologia Apropriada, como um todo, representa um nome próprio que abrange um imenso apanhado de estratégias de desenvolvimento econômico e tecnológico, ideologias, críticas político-econômicas, que praticam a escolha tecnológica como um caminho viável para a utilização da tecnologia em favor do bem-estar social (DAGNINO, 1978; FLEISSNER, 1983).

A idéia da possibilidade de se poder selecionar tecnologia de forma mais adequada é fruto de algumas constatações, tais como: (1) existem alternativas disponíveis mais eficazes que outras; (2) é possível definir critérios e métodos de avaliação de projetos que permitam a seleção de tecnologias mais apropriadas aos casos estudados; (3) pode-se realizar, não somente uma melhor seleção tecnológica, mas também uma adaptação às condições locais de tecnologias disponíveis (BUARQUE, 1983).

Nesse contexto, a Tecnologia Apropriada surge como um importante movimento de crítica e revisão de alguns postulados básicos da ciência e teoria econômica de desenvolvimento. Esse movimento é reforçado por impactos detectados no meio ambiente, nas relações sociais e liberdades individuais, decorrentes da imposição massiva de inovações tecnológicas nos meios de vida modernos. Dessa forma, o conceito da avaliação tecnológica, entendido como uma metodologia de análise para seleção de tecnologias, que leva em consideração também os efeitos indiretos e secundários, permite uma decisão mais ampla e integrada, e uma atitude antecipatória e prospectiva das intenções de uma intervenção.

Alguns autores reconhecem a existência de três grandes ramos nas raízes da Tecnologia Apropriada como um movimento social, a saber: (1) o sócio-político; (2) o consumista-ambiental; e (3) o econômico-desenvolvimentista (*e.g.* KAPLINSKY, 1990). Sua origem é considerada como uma reação comum à fórmula ortodoxa e global de desenvolvimento econômico no período pós-guerra, que se baseava de forma primária em dois alicerces: uma fonte barata de energia e em um meio ambiente robusto – ambos tratados como “bens de capital” (SCHUMACHER, 1974).

O ramo sócio-político da Tecnologia Apropriada explorou as relações existentes entre as formas de relacionamentos sociais e os tipos de tecnologia que podem favorecer a qualidade de vida, o trabalho criativo, a participação social, e a descentralização das decisões. O ramo consumista-ambiental reagiu contra a crença na existência de fontes ilimitadas de matérias primas e de energia, e contra a demanda cega por bens de consumo. O ramo econômico-desenvolvimentista defrontou-se com o problema de produção em larga escala, “baseada em tecnologias sofisticadas, altamente intensivas em capital, dependentes de grandes consumos de energia, e com baixa demanda de mão-de-obra” (SCHUMACHER, 1974).

Na literatura, são encontradas utilizações do termo Tecnologia Apropriada, relacionado a diversos conceitos. Nesse sentido, destacam-se associações do termo com as expressões: tecnologia alternativa, tecnologia ótima, tecnologia adequada, tecnologia intermediária, tecnologia modesta, tecnologia de baixo custo, entre outros (BUARQUE, 1983). Diante dessa diversidade de interpretações, será considerada no presente estudo a denominação apresentada por WILLOUGHBY (1990): “*Uma tecnologia apropriada é definida como aquela que melhor se ajusta ao contexto psico-social e biofísico prevalecente em um local e um período particular*”. Essa definição não abrange todos os aspectos da Tecnologia Apropriada, mas é suficientemente abrangente para incorporar a maioria das definições presentes na literatura.

Segundo essa definição, podem ser identificadas diversas dimensões de análise, a serem consideradas durante o processo de escolha tecnológica. Primeiramente, deve ser considerada a *dimensão técnica*, que representa as considerações de eficiência desejadas para as situações demandantes de intervenção tecnológica. Em segundo lugar, pode ser identificada a *dimensão ambiental*, ressaltando-se a preferência por alternativas tecnológicas que favoreçam a utilização de fontes renováveis disponíveis localmente, economia de fontes não renováveis, aproveitamento de resíduos e minimização da degradação do meio ambiente. Por outro lado, é identificada a *dimensão sócio-cultural*, onde se busca a adaptação da tecnologia às formas de vida locais,

adaptação ao habitat, minimização de transferência de mão-de-obra e utilização descentralizada das técnicas envolvidas. Destaca-se também a *dimensão política*, defendendo a utilização e o desenvolvimento de tecnologia de origem nacional, na busca de uma estruturação tecnológica autônoma. Finalmente, pode ser destacada a *dimensão econômica*, onde se insere a intenção pela minimização dos custos de acesso e utilização da tecnologia e o retorno social do investimento.

Com base nessas múltiplas dimensões, a escolha tecnológica deve representar um ponto de convergência e harmonização de diferentes variáveis técnicas, econômicas, sociais, ambientais e culturais, constituindo-se em um instrumento para se alcançar a melhor aplicabilidade das tecnologias envolvidas. Assim, os fatores que implicam a escolha tecnológica devem ir além daqueles que são normalmente levados em consideração por engenheiros e administradores, sob os alvos de “eficiência” e “lucro”.

## ANÁLISE DE DECISÃO

A idéia principal utilizada na pesquisa é a de que o problema de análise e escolha tecnológica pode ser descrito como uma decisão a ser tomada, e, como tal, pode ser analisada. Os processos de hierarquização de alternativas de tratamento de águas residuárias caracterizam-se, de fato, como processos decisórios.

Muitas são as abordagens para a análise de decisão, segundo o que se pode chamar de Ciências da Decisão. Desde os métodos clássicos, como os Métodos Estatísticos Descritivos e os Métodos Estocásticos, passando pela simulação determinística, até os métodos econômicos e de otimização clássicos, todos podem ser considerados como métodos de análise de decisão. Entretanto, atualmente, são considerados métodos clássicos de análise de decisão os métodos multiobjetivo e multicritério, os sistemas de Inteligência Artificial e Sistemas Especialistas (“expert systems”), e os métodos baseados na teoria dos conjuntos difusos (“fuzzy sets”). Na realidade, nenhum desses métodos é conflitante entre si, podendo ser estrategicamente acoplados para a construção de uma solução aceitável para um problema determinado.

As metodologias propostas para análise tecnológica têm lançado mão de várias dessas abordagens de análise de decisão, mas, ao considerar o problema de seleção tecnológica em sua essência, a partir dos princípios de Tecnologia, pode-se concluir que ele é naturalmente uma decisão com múltiplos objetivos, múltiplos critérios, e múltiplos agentes decisores. Embora se possa tratar um problema dessa natureza por meio de outras técnicas, o emprego da análise de decisão com múltiplos objetivos e múltiplos critérios torna-se mais fácil e promissor.

## ANÁLISE MULTIOBJETIVO E MULTICRITÉRIO

Uma revisão das técnicas de análise multiobjetivo e multicritério pode ser encontrada em publicações anteriores da presente pesquisa (SOUZA e CORDEIRO NETTO, 2000; CORDEIRO NETTO *et al.*, 2000; SOUZA *et al.*, 2001a; SOUZA *et al.*, 2001b).

As teorias multicritério de auxílio à decisão propõem abordagens que permitem tratar de problemas decisórios que apresentam mais de um objetivo, e que são caracterizados por apresentarem vários tipos e níveis de incerteza, um quadro complexo de objetivos, com difícil identificação do decisor e diversificação de alternativas.

A análise multicritério pode também ser empregada em casos em que não se tem apenas um elemento decisor, mas um grupo de decisores, cada um com objetivos, critérios próprios, frequentemente conflitantes. O agente decisor pode ser composto por grupos maiores da sociedade, organizações, agências de meio ambiente, bancos de fomento, etc.

Para o caso específico de avaliação da performance de unidades de tratamento de efluentes, a análise multicritério mostra-se bastante indicada. Em primeiro lugar, são vários os objetivos a serem atingidos: sanitários, ambientais, econômicos e financeiros. Em segundo lugar, podem ser vários os agentes decisores: o prestador de serviços de saneamento, o órgão ambiental, etc. Em terceiro lugar, deve-se considerar o caráter holístico e multidimensional da Escolha Tecnológica.

### **Métodos de análise de decisão com múltiplos objetivos**

São muitos e variados os métodos existentes aplicáveis ao caso, uns mais adequados, outros menos. Muitos métodos, contudo, trabalham com alternativas no espaço contínuo, mas o problema em questão é mais facilmente tratável quando se empregam os métodos que trabalham, preferencialmente ou alternativamente, com alternativas discretas.

As metodologias concebidas para utilizarem os métodos de análise de alternativas discretas invariavelmente apresentam uma fase de avaliação do comportamento das várias alternativas consideradas viáveis como solução, segundo cada um dos diferentes critérios participantes da análise, formando uma “matriz de resultados”, que é conhecida como “*pay-off matrix*” ou “matriz de consequências”, “matriz de resultantes”, ou ainda, “matriz de avaliação”. A forma de avaliação das alternativas admite as mais diferentes técnicas, podendo essa variar ao longo dos critérios considerados.

Os métodos selecionados para realizar a análise multicritério trabalham com os valores da matriz de consequências formada, produzindo geralmente, como resposta, uma ordenação de preferência ou dominação das alternativas. Para continuar a análise, esses resultados devem ser apresentados e discutidos com os agentes de decisão. Daí pode surgir que o resultado seja satisfatório, e o problema termina. Caso contrário, retorna-se aos pontos de avaliação das alternativas e de introdução dos dados, executa-se todos os passos metodológicos previstos, até que seja atingido o ponto de satisfação dos agentes de decisão.

Diante da profusão de métodos multiobjetivo e multicritério, muitos deles com concepções e bases matemáticas diferentes, paira sempre a dúvida sobre qual deles utilizar. A experiência do grupo da Universidade de Brasília com esses métodos aplicados a saneamento por mais de uma década, mostra que existem alguns métodos que foram empregados com sucesso em problemas semelhantes, e que esses métodos geram respostas que divergem muito pouco em sua essência. Contudo, a experiência mostra, também, a necessidade de se utilizar mais de um método, preferivelmente dois ou três deles, com o intuito de verificar a compatibilidade das suas respostas.

Entre os métodos de análise multiobjetivo e multicritério aplicáveis ao caso, podem ser citados:

(1) Método da Ponderação Aditiva Simples (WOLF, 1987; GOICOECHEA *et al.*, 1982);

(2) Métodos da série ELECTRE:

- ELECTRE-I (BENAYOUN *et al.* (1966); ROY (1971);
- ELECTRE-II (HOKKANEN *et al.*, 1995);
- ELECTRE-III (ROY, 1991; DUCKSTEIN *et al.*, 1994);
- ELECTRE-IV e IV-A (ROY, 1991); e
- ELECTRE-TRI (YU e ROY, 1992).

- (3) Método “Compromise Programming” ou da Programação de Compromisso (ZELENY, 1973, 1974, 1982; DUCKSTEIN *et al.*, 1994; TECLE *et al.*, 1988; DUCKSTEIN e OPRICOVIC (1980);
- (4) Método PROMETHEE (BRIGGS *et al.*, 1990); e
- (5) Método da função utilidade multidimensional – FUM (KENNEY e RAIFFA, 1976; DUCKSTEIN *et al.*, 1994).

O primeiro desses métodos citados, o Método da Ponderação Aditiva, é o mais simples e o que pode conduzir a respostas menos precisas. Contudo, recomenda-se a sua manutenção para os casos que incluem o exame público das respostas, como em audiências públicas, pois é o que, pela sua própria simplicidade extrema, o público leigo consegue entender. A série ELECTRE compõe o rol dos métodos que permitem maior precisão, em situações de grande incerteza. O ELECTRE-I não permite, originalmente, a hierarquização completa das alternativas, mas SOUZA (1992) propôs um algoritmo simples que permite isso e que foi verificado em aplicações práticas produzir resultados consistentes. O Método ELECTRE-III é o mais preciso dentre os métodos da série testados para problemas similares ao de Análise Tecnológica. O Método da Programação de Compromisso, embora mais simples que os métodos ELECTRE, tem produzido resultados compatíveis.

Na realidade, esses métodos que apresentam soluções mais precisas baseiam-se em algoritmos que apresentam maior complicação em sua execução, o que torna factível a sua utilização por meio de programas computacionais. A presente pesquisa tratou, por isso, de produzir algoritmos e programas computacionais para execução automática de alguns desses métodos multiobjetivo.

## METODOLOGIAS E MODELOS EXISTENTES

O que foi realizado no campo da Análise Tecnológica na área de saneamento e, de forma mais restrita, em tratamento de águas residuárias? O estado da arte das metodologias e modelos que foram propostos para isso pode ser encontrada nas revisões bibliográficas de trabalhos anteriores, que foram sendo atualizadas (SOUZA, 1992; SOUZA e FORSTER, 1996; SOUZA, 1997; SOUZA, 1998; SOUZA e CORDEIRO NETTO, 2000; CORDEIRO NETTO *et al.*, 2000; SOUZA *et al.*, 2001a; CARNEIRO *et al.*, 2001).

O que se pode depreender da literatura é que ocorreu um avanço das técnicas, passando dos métodos de otimização monoobjetivo, e dos métodos econômicos, invariavelmente os mais simples, com base no mínimo custo, passando para os métodos multiobjetivo. Finalmente, pode-se constatar que foram feitas algumas tentativas, ainda no terreno experimental, de utilização de sistemas especialistas.

Fundamentalmente, pode-se distinguir duas maiores abordagens metodológicas: (1) a abordagem econômica; e (2) a abordagem de Tecnologia Apropriada. As metodologias com base em otimização (denominadas na literatura como as que realizam “síntese de processos de tratamento”, “seleção preliminar”, “planejamento ótimo”, “projeto ótimo”) empregam a abordagem econômica, com o custo sendo normalmente o fator decisório. Os mais importantes modelos que usam a abordagem de Tecnologia Apropriada são os Modelos USAID-REID (REID e DISCENZA, 1976), WBANK (KALBERMATTEN *et al.*, 1982b) e PROSEL-I (SOUZA, 1992; SOUZA e FORSTER, 1996). Com o Modelo PROSEL-I abriu-se uma linha de desenvolvimento em análise tecnológica multiobjetivo multicritério, da qual decorre uma série de trabalhos. Na linha de Inteligência Artificial e *Expert Systems*, aparece o sistema especialista

para seleção de processos de tratamento de águas residuárias de indústrias de carne desenvolvido por SILVEIRA (1999), como um caminho a trilhar.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Com os fundamentos teóricos conhecidos, ao lado da experiência dos pesquisadores com esse tipo de metodologia, tornou-se óbvio que o trabalho fosse encaminhado para o emprego de métodos multiobjetivo e multicritério. Tratou-se, então, de construir uma proposta de metodologia conducente a uma matriz de avaliação das alternativas, que pudesse ser operada por um dos métodos multiobjetivo descritos.

O problema transformou-se, então, na criação de um sistema que fosse capaz de considerar o universo das alternativas disponíveis e seus dados, e, a partir daí, criasse o conjunto de alternativas viáveis, isto é, das alternativas que, para um dado caso específico, se constituíssem em solução para o problema. Era necessário, também, adotar uma base filosófica de pensamento que desse apoio a se considerar um conjunto de objetivos que as diversas alternativas haviam de cumprir, e reescrever esses objetivos em termos de uma série de critérios de fácil mensuração. Com esse conjunto e com a base de dados disponíveis, o sistema teria que ser apto a avaliar o desempenho de cada alternativa em relação a cada um dos critérios selecionados.

Com o caminho traçado, tratou-se de adquirir e gravar o conhecimento especializado humano retido, por meio de duas vias. Uma primeira via foi a consulta ao conhecimento especializado escrito, o que os diversos autores escreveram sobre o assunto, levada a cabo por meio de pesquisa e levantamento bibliográfico orientado.

A segunda via adotada foi, oportunizada pela participação de várias pessoas trabalhando em rede, a consulta direta aos pesquisadores e consultores, realizada presencialmente, nas diversas reuniões da Rede 2 do PROSAB, e virtualmente, pela comunicação eletrônica via Internet. Para tanto, três séries de questionários foram distribuídas, preenchidas, recolhidas e tiveram a sua informação trabalhada. Os relatórios técnicos parciais das reuniões, com os seus dados, também foram utilizados.

Por que se necessitaria de processar a metodologia proposta muitas vezes, e de maneira rápida, optou-se por elaborar uma versão computacional de toda a metodologia, com a construção de uma base de dados acessível. Isso foi feito, o programa computacional elaborado primeiro em linguagem *Visual Basic* e depois reescrito em linguagem *Delphi*, e a base de dados construída primeiro em *Excel* e depois em *Access*.

Havia, para a metodologia geral proposta, dois caminhos que poderiam ser seguidos, que correspondiam a duas abordagens diferentes, a saber: (1) uma abordagem participativa, chamada pela equipe de *'soft'*, em que a maioria dos critérios e avaliações é obtida a partir da consulta aos atores previamente definidos; e (2) uma abordagem assistida, chamada de *'hard'*, na qual recorre-se a princípios fundamentais, conceitos, postulados e corolários de escolha tecnológica, para se atingir uma solução para o problema. Na versão chamada de *'hard'* os dados são gerados pelos próprios analistas a partir dos corolários básicos de Escolha e Ajuste Tecnológico. Na versão chamada de *'soft'*, a participação dos analistas é limitada a coletar os dados fornecidos e, no máximo, escoimá-los. O caminho da abordagem participativa ou *'soft'* foi o caminho escolhido para o desenvolvimento da metodologia em seu estágio atual, escolha em muito favorecida pela oportunidade de, com baixos custos, consultar especialistas trabalhando na Rede 2 de pesquisa do PROSAB.



Na medida em que se optou pela abordagem participativa na metodologia sendo proposta, e como a avaliação das alternativas leva em conta o seu grau de ajuste tecnológico ao contexto, precisava-se exprimir, de forma simples e discreta, a variabilidade dos diferentes contextos das comunidades, regiões, e municípios brasileiros. Optou-se, então, por definirem-se apenas quatro tipos de contexto, definidos por um painel de especialistas, com base em apenas duas variáveis de definição: o porte da comunidade servida pelo sistema, e o que se convencionou chamar de grau de risco ambiental e epidemiológico envolvido no caso. Na verdade, adotou-se um tratamento reducionista para viabilizar a dificuldade que têm os especialistas de julgar combinações complexas entre uma dada alternativa e um certo tipo de contexto, o que torna constantes as outras variáveis possivelmente definidoras de contexto.

## RESULTADOS E PRODUTOS

Os resultados da pesquisa podem ser divididos em seis partes, a saber:

- (1) proposta de uma metodologia de análise tecnológica;
- (2) obtenção de uma lista de critérios de avaliação;
- (3) elaboração de um *software* de suporte da metodologia proposta;
- (4) formação da base de dados necessária e acessível;
- (5) elaboração de um SAD – Sistema de Apoio à Decisão; e
- (6) realização de simulações de análise tecnológica com a metodologia proposta.

Descrevem-se, a seguir, de forma sucinta, esses resultados.

### Metodologia de análise tecnológica

Como principal resultado do trabalho, chegou-se à proposição de uma metodologia geral de análise que é composta de quatro fases, que são:

- Fase I - Instruções gerais e informação de dados
- Fase II - Pré-seleção de alternativas viáveis ao caso
- Fase III - Avaliação tecnológica.
- Fase IV - Análise Tecnológica Global (Multiobjetivo)

A metodologia, como apresentada em trabalhos anteriores, era composta de mais uma fase, mas, sem modificar a sua essência, optou-se por um ângulo mais didático, reunindo as avaliações técnica e sócio-econômica, que constavam nas apresentações anteriores, em uma só, com o título de “avaliação tecnológica”.

A Figura 1 representa o fluxograma das ações previstas na execução da metodologia de análise tecnológica. A seguir, descrevem-se as fases da metodologia proposta.

*Fase I - Instruções Gerais e Informação de Dados.* São selecionadas as opções que determinam as instruções gerais de procedimento. Podem ser selecionados os arquivos de dados existentes. É também possível introduzirem-se os pesos para cada critério de decisão sendo considerado (o que significa que também é possível eliminar alguns critérios da análise, se desejado).

Os dados necessários para dar prosseguimento à metodologia são: (1) dados de especificação do caso a ser estudado; (2) dados das variáveis de projeto e planejamento; (3) dados das condições locais e do terreno onde será instalada a Estação de Tratamento de Águas Residuárias; (4) dados da capacidade local em suprimento de recursos necessários; (5) dados de qualidade da água

residuária bruta (a tratar); (6) dados da qualidade mínima desejada para o efluente tratado (que será lançado em um corpo receptor definido); (7) pesos para os diferentes critérios que serão utilizados nos algoritmos de análise de decisão (podendo o usuário optar por um dos conjuntos de pesos pré-definidos pelo painel de especialistas e contidos na base de dados do sistema).

*Fase II – Pré-seleção de alternativas viáveis ao caso.* Nesta fase, identificam-se as alternativas contidas no universo de alternativas de pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Todas essas alternativas possuem um banco de dados próprio que está integrado ao *software* desenvolvido. A partir disso, verifica-se se as alternativas consideradas inicialmente atendem às restrições técnicas impostas a elas, em função das condições locais. Através de um procedimento de exclusão usando restrições técnicas, forma-se o conjunto de alternativas viáveis para o caso sendo estudado.

*Fase III – Avaliação Tecnológica.* Se houver mais do que uma alternativa exequível, avalia-se a eficiência com que cada alternativa exequível cumpre alguns critérios pré-fixados de Tecnologia Apropriada, que podem ser escolhidos pelo usuário. A partir de determinados conceitos, podem ser mensurados os fatores técnicos, econômicos, sociais, culturais e ambientais da escolha tecnológica.

Nesta fase da análise, são estimados os graus de influência, sobre a decisão, de fatores tais como a produção de impactos ambientais negativos, a aceitação pública, a produção e dificuldade de gerenciamento de resíduos e subprodutos indesejáveis, o consumo de energia, a dificuldade de construção, a dificuldade de operação e manutenção, os custos de implantação e de operação e manutenção.

*Fase IV - Análise Tecnológica Global (Multiobjetivo).* Nesta fase, forma-se a matriz de eficiências, a que o usuário pode dar livre utilização: (1) ou pode ser utilizada para escolher diretamente as alternativas considerando ou não os vários critérios constantes da matriz; (2) ou pode ser introduzida em qualquer algoritmo aplicável para realizar a análise de decisão multicritério e multiobjetivo. Logicamente, a metodologia sugere fortemente que não se faça a análise sem a utilização de alguns dos algoritmos disponíveis para aplicação de métodos multiobjetivo na forma computacional, como aqueles correspondentes aos métodos da “Ponderação Aditiva”, “Compromise Programming”, e o Método ELECTRE-III.

Os resultados obtidos são informados e discutidos com os responsáveis pela decisão. A metodologia, neste ponto, admite a retroalimentação de alternativas, critérios, pesos, outros dados, informações, considerações e hipóteses formuladas no decorrer da execução da metodologia, até que seja produzida uma resposta que possa ser considerada satisfatória.

Em resumo, ao final, a metodologia proposta é capaz de hierarquizar as alternativas viáveis para um determinado contexto tecnológico. Em tese, as alternativas melhor classificadas são aquelas virtualmente mais aceitáveis sob todas as dimensões da Tecnologia e do ponto-de-vista das pessoas atuando na decisão.

### **Lista de critérios utilizados**

Um dos produtos importantes, associados com a proposta metodológica, é o conjunto de critérios que deve ser considerado na análise. Como há forte influência do conhecimento e da cultura própria de cada especialista, notou-se que a obtenção direta da lista de critérios a partir dos especialistas poderia tornar tendenciosa a análise.

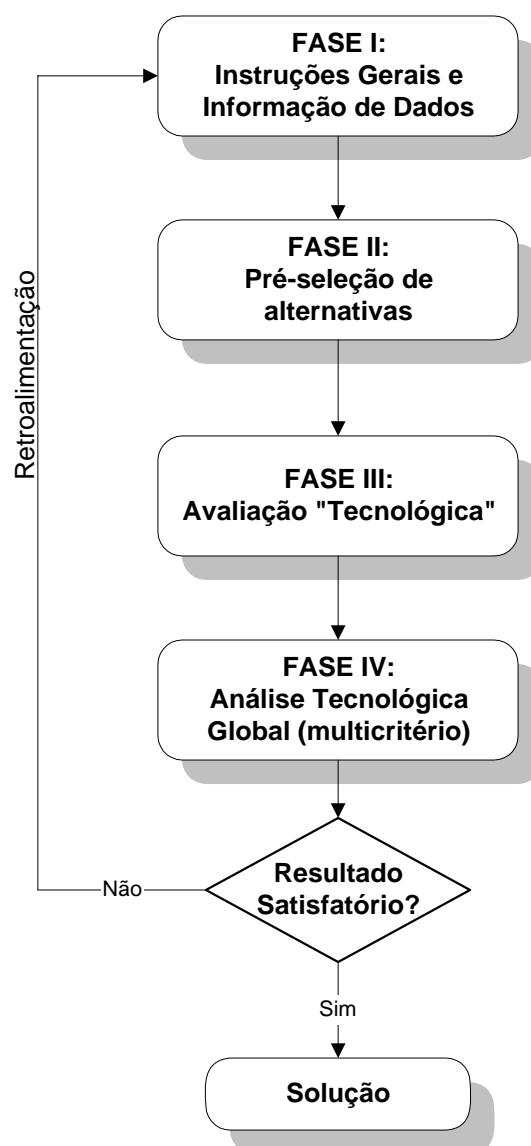


Figura 1 - Fluxograma representativo da metodologia de análise tecnológica proposta

Assim, optou-se por iniciar por uma revisão bibliográfica sistemática, tendo-se levantado todos os critérios que foram citados por autores nacionais e estrangeiros. Essa lista foi submetida aos especialistas três vezes, na primeira apenas para que eles indicassem quais os critérios que cada um deles, pessoalmente considerava importantes. Na segunda vez, sugeriu-se que, com a lista dos mais importantes, obtida do levantamento anterior, indicassem os graus de importância dos critérios contidos na lista. Na terceira vez, a média dos graus dos critérios, obtida pela avaliação anterior, foi submetida a um painel de especialistas, tendo-se solicitado que chegassem a valores de consenso. O resumo final dos resultados pode ser visto nas Tabelas 1 e 2.

### **Software de suporte da metodologia proposta**

Para auxiliar e tornar rápida e automática a aplicação da metodologia proposta, foram elaboradas subrotinas para processamento computacional dos dados obtidos em relação às alternativas de

tratamento estudadas. As sub-rotinas foram inicialmente criadas em linguagem de programação *Visual Basic* e, posteriormente, reescritas em *Delphi*, por se ter considerado que esta opera melhor com bancos de dados.

Este sistema computacional é de uso interno à pesquisa, e possibilita processamento rápido de dados arquivados, modificações de base de dados, passagens de uma base de dados para outra, etc.

Tabela 1 - Lista de critérios para pré-seleção (eliminatórios) considerados na metodologia

Nº Critério	Critérios de Pré-Seleção
1	Graus de Tratamento
2	Concentrações do Efluente
3	Área Requerida
4	Demanda de energia elétrica
5	Declividade
6	Condutividade Hidráulica
7	Nível do Lençol Freático
8	Profund. Mín. da Camada Impermeável
9	Afloramento de Rochas no Local
10	Espessura Mínima de Solo
11	Custo de Implantação
12	Custo de Operação e Manutenção

Tabela 2 - Lista de critérios de avaliação e seus graus de importância (como considerados na metodologia proposta)

Nº Critério	Critérios de Avaliação
1	Requisito de área para construção*
2	Custo de implantação e construção*
3	Custo de operação e manutenção*
4	Dificuldade de construção*
5	Dificuldade de operação e manutenção*
6	Produção de resíduos sólidos
7	Dificuld. de condicionamento de resíduos sólidos
8	Impacto ambiental que pode causar
9	Consumo de energia*
10	Exigência de equipam. Importados
11	Resistência a choques de carga*
12	Nível de instrução exigido para O & M*
13	Rejeição do público em geral*
14	Dificuldade em realizar ampliações*

OBS.: Os critérios marcados (\*) são aqueles utilizados pelo SAD desenvolvido para o PROSAB

### Base de dados

O banco de dados acessível ao sistema computacional executor da metodologia proposta foi construído a partir das seguintes fontes de dados primárias:

- (1) diversos relatórios parciais produzidos pelos diferentes subprojetos participantes da Rede 2 do PROSAB;
- (2) séries de três questionários elaborados especialmente para formação da base de dados e distribuídos para resposta pelos integrantes da Rede 2 do PROSAB;
- (3) dados retirados da literatura dos processos, mormente aqueles relativos aos critérios eliminadores; e
- (4) indicações diretas em painéis de especialistas.

Os dados constantes dos diversos relatórios da Rede 2 foram analisados, processados e digitalizados de forma que podem ser acessados pelo sistema computacional construído. Os questionários foram distribuídos para os diversos subprojetos e as informações do preenchimento desses questionários foram coletadas via Internet, facilitando e baixando os custos de obtenção dos dados. Foram disponibilizados para a Rede 2 três questionários.

O banco de dados, mesmo considerado isoladamente, se constitui em um acervo raro e importante, pois poderá ser utilizado para outras pesquisas e utilizado em sistemas com objetivos diferentes.

### **SAD – Sistema de Apoio à Decisão**

Foi produzido um SAD – Sistema de Apoio à Decisão, que se utiliza da metodologia proposta, como descrita anteriormente, escrito em linguagem computacional *Delphi*, com uma base de dados em *Access*.

O SAD construído foi apresentado em detalhes em SOUZA *et al.* (2001b) e encontra-se disponibilizado na página do PROSAB-FINEP na Internet, como um sistema de suporte à decisão destinado ao pessoal técnico que trabalha em prefeituras, órgãos, agências, e instituições que trabalham com saneamento. Entretanto, tem-se o cuidado de recomendar que o uso do SAD seja assistido por um especialista na área de tratamento de águas residuárias.

### **Simulações de análise tecnológica**

Para verificar a acuidade da metodologia proposta e para demonstrar a viabilidade do seu emprego, foram realizados três conjuntos de simulações. O primeiro conjunto de simulações considerou uma comparação das alternativas estudadas sem a interferência do meio, ou contexto tecnológico e foi apresentado em SOUZA e CORDEIRO NETTO (2000). O segundo conjunto de simulações utilizou um caso real, a concepção da ETE – Estação de Tratamento de Esgotos – da Cidade de Santa Maria, no Distrito Federal, e foi apresentado em SOUZA *et al.* (2001b). O terceiro conjunto de simulações considera a influência do contexto tecnológico, e mostra os resultados que seriam obtidos nos quatro contextos considerados pelo painel de especialistas utilizado na pesquisa, e será apresentado a seguir.

### **Terceiro conjunto de simulações**

Nesse terceiro conjunto de simulações com a metodologia proposta para análise tecnológica, foram utilizados os pesos relativos dos critérios de avaliação e os métodos de Ponderação Aditiva, Programação de Compromisso e ELECTRE III.

Nessa fase de simulações, então, o que se tornou mais importante foi a consideração de que os pesos dos critérios sofrem influência do contexto tecnológico, ou seja, os pesos variam com cada caso sendo simulado.

Sendo assim, foram criados quatro conjuntos de pesos para os critérios de avaliação. Cada um desses conjuntos de pesos foi extraído dos questionários, e reflete a média aritmética dos pesos atribuídos pelos participantes da Rede 2 a cada critério de avaliação, para cada contexto tecnológico pré-definido. Para tanto, foram definidos e descritos quatro tipos de contexto que representariam a maioria das situações brasileiras. Os conjuntos de pesos, então, correspondem aos quatro contextos criados para a entrada de dados no questionário:

Contexto 1 - Sistema de pequeno porte em local de alto risco ambiental-epidemiológico;

Contexto 2 - Sistema de pequeno porte em local de baixo risco ambiental-epidemiológico;

Contexto 3 - Sistema de médio porte em local de alto risco ambiental-epidemiológico; e

Contexto 4 - Sistema de médio porte em local de baixo risco ambiental-epidemiológico.

Em um segundo conjunto de simulações, a análise tecnológica multicritério e multiobjetivo foi realizada também com o emprego dos métodos de Ponderação Aditiva, Programação de Compromisso e ELECTRE III.

No conjunto de simulações, foram analisadas dez alternativas, dentre os sub-projetos de cinco instituições respondentes aos questionários, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Alternativas analisadas no terceiro conjunto de simulações

No.	Instituição	Sub-projeto	Alternativa
1	CAESB	1	Lagoa de alta taxa seguida de escoamento superficial
2	UFPE	1	Reator EGSB anaeróbio
3	UFPE	3	Lagoa de estabilização (polimento)
4	UNICAMP	1	Escoamento superficial
5	UNICAMP	2	Vala de filtração
6	UFRN	1	Filtro anaeróbio 1 (leito de brita d=38mm)
7	UFRN	5	Bacia de infiltração
8	UFRN	7	Escoamento superficial 2 (declividade 6%)
9	UFRN	6	Escoamento superficial 1 (declividade 1%)
10	UFRGS	1	Lagoa de Alta Taxa

Como na simulação não interessava um caso específico, mas a verificação do comportamento das alternativas de uma forma geral, eliminou-se a realização da fase de pré-seleção de alternativas. Com isso, passou-se diretamente para a fase de avaliação tecnológica, e, portanto, deve-se ter consciência de que, para certos casos específicos, algumas alternativas não são aceitáveis.

Na fase de avaliação, foi gerada, a partir da própria avaliação dos responsáveis pelas pesquisas, a matriz de avaliação (alternativas *versus* critérios).

Os pesos dos vários critérios foram obtidos a partir dos dados coletados junto aos participantes da Rede 2, e forneceu os conjuntos de pesos que são mostrados na Tabela 4.

Os resultados da análise tecnológica, pelos três métodos utilizados, podem ser vistos nas Tabelas 5, 6, e 7. Torna-se interessante notar a convergência dos três métodos adotados, e a pequena divergência dos resultados entre os quatro contextos diferentes.

Deve-se, contudo, ressaltar que são comparadas todas as alternativas para um caso genérico não especificado. Observa-se que as diversas alternativas estão sendo pesquisadas em diferentes escalas, e que, em escalas menores (escala de bancada, escala-piloto), não podem ser observados muitos efeitos que aparecem em escala real. A avaliação de cada alternativa parte de uma análise

do próprio pesquisador da alternativa, e, portanto, pode conter erros, o que deverá ser corrigido. Procurou-se respeitar a opinião de cada pesquisador, não se tendo, ainda, questionado certos dados e informações prestadas pelos participantes da Rede 2.

Tabela 4 - Conjuntos de pesos que serão usados na avaliação das alternativas

CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	Contexto	Contexto	Contexto	Contexto
	1	2	3	4
1. Eficiência na remoção de matéria orgânica	11,75	13	12	11
2. Eficiência na remoção de nitrogênio	5,5	3	4,5	4,75
3. Eficiência na remoção de fósforo	5,75	2,25	4,75	3,75
4. Eficiência na remoção de organismos patogênicos	10,75	6,75	11	5,75
5. Demanda por área de implantação/construção	5,75	7	5	4,25
6. Custo de implantação/construção	6	9	5,25	8
7. Custo de operação/manutenção	6,75	9,75	6	8
8. Simplicidade/facilidade de implantação/construção	4,5	8,5	4,25	7,25
9. Simplicidade/facilidade de operação/manutenção	5,5	8,75	4,5	7
10. Resistência a choques de carga	5,25	3,5	5,5	4
11. Flexibilidade e possibilidade de expansão	3	2,25	5	3,75
12. Produção de impacto ambiental negativo	6,5	4,75	6	6,25
13. Quantidade produzida de resíduos sólidos (lodos, etc.)	4,25	4,25	5,5	6,75
14. Disposição adequada/reaproveitamento dos sólidos	5,25	4,25	5,75	6,25
15. Exigência em capacitação de recursos humanos	3,25	5	4,75	4,25
16. Utilização preferencial de recursos materiais locais	2	3,25	1,75	3
17. Nível de rejeição do público ao tratamento	5	2,25	3,75	3,25
18. Confiabilidade no fornecimento de energia	3,25	2,5	4,75	2,75

Para elaborar a matriz de conseqüências, foi utilizado um sistema de pontuação e todas as avaliações dos critérios foram convertidas para essa mesma escala, para evitar possíveis distorções entre os vários métodos de análise multiobjetivo. Os dados foram coletados diretamente da avaliação feita pelos participantes da Rede 2 do PROSAB, mas foram aferidos por meio da avaliação pelo mesmo avaliador de duas alternativas de referência, a de lodos ativados e de lagoa de estabilização, contra as quais todas avaliações das alternativas foram relacionadas. Desse modo, retirou-se da análise o efeito do erro de cada avaliador.

A Tabela 5 mostra os resultados finais da análise quando se utiliza o método mais simples de avaliação, que é o da Ponderação Aditiva. A Alternativa 9 foi a melhor classificada em todos os quatro contextos tecnológicos simulados.

Quando se empregou o Método de Programação de Compromisso com a modificação proposta por SOUZA (1992), obteve-se o resultado que é mostrado na Tabela 6. Assim, pode-se notar que, segundo o Método de Programação de Compromisso, as alternativas 9 e 10 podem ser consideradas superiores, para todos os quatro contextos considerados. A Alternativa 8, que será melhor classificada pelo Método ELECTRE-III, ocupa entre o sétimo e oitavo lugares na classificação da Método de Programação de Compromisso.

O método ELECTRE III foi utilizado com valores de coeficiente de indiferença de 5%, coeficiente de preferência restrita de 15%, e coeficiente de veto de 99%. A explicação para esse alto coeficiente de veto reside no fato de que o interesse dessa análise é realizar a hierarquização das alternativas de pós-tratamento pesquisadas pelo PROSAB através da comparação de todos os critérios, desconsiderando-se a amplitude da diferença entre alternativas para um mesmo critério.

Os resultados do emprego do Método ELECTRE-III estão mostrados na Tabela 7, onde se pode ver que a Alternativa 8 ficou melhor classificada nos quatro contextos considerados. Apenas no Contexto 1 as alternativas 6 e 8 dividem a preferência. Pode-se notar que houve uma alteração substancial nos resultados do Método ELECTRE-III, nesse conjunto de simulações, quando comparado com os resultados obtidos pelos outros dois métodos anteriores. Como o Método ELECTRE-III é considerado mais refinado do que os outros dois métodos empregados, esse fato deve merecer um estudo mais aprofundado para conhecer as causas dessa diferença.

Tabela 5 – Resultados finais da avaliação de desempenho das alternativas segundo o método de análise multiobjetivo da Ponderação Aditiva  
(as alternativas são referidas ao seu número de ordem na Tabela 3)

Classificação das alternativas	Contextos analisados – Método Ponderação Aditiva			
	Contexto 1	Contexto 2	Contexto 3	Contexto 4
1 <sup>a</sup>	9	9	9	9
2 <sup>a</sup>	10	6	6	6
3 <sup>a</sup>	6	10	10	10
4 <sup>a</sup>	7	7	7	7
5 <sup>a</sup>	2	2	2	2
6 <sup>a</sup>	3	3	5	3
7 <sup>a</sup>	5	8	3	5
8 <sup>a</sup>	8	5	8	8
9 <sup>a</sup>	4	4	4	4
10 <sup>a</sup>	1	1	1	1

Tabela 6 – Resultados finais da avaliação de desempenho das alternativas segundo o método de análise multiobjetivo Programação de Compromisso  
(as alternativas são referidas ao seu número de ordem na Tabela 3)

Classificação das alternativas	Contextos analisados – Método Programação de Compromisso			
	Contexto 1	Contexto 2	Contexto 3	Contexto 4
1 <sup>a</sup>	10	9	9	9
2 <sup>a</sup>	9	6	10	10
3 <sup>a</sup>	6	10	6	6
4 <sup>a</sup>	7	7	7	7
5 <sup>a</sup>	3	3	3	3
6 <sup>a</sup>	2	2	5	2
7 <sup>a</sup>	5	8	2	5
8 <sup>a</sup>	8	5	8	8
9 <sup>a</sup>	4	1	4	4
10 <sup>a</sup>	1	4	1	1

Tabela 7 – Resultados finais da avaliação de desempenho das alternativas segundo o método de análise multiobjetivo ELECTRE III  
(as alternativas são referidas ao seu número de ordem na Tabela 3)

Classificação das alternativas	Contextos analisados – Método ELECTRE III			
	Contexto 1	Contexto 2	Contexto 3	Contexto 4



1 <sup>a</sup>	6, 8	8	8	8
2 <sup>a</sup>	10	6, 10	6, 10	10
3 <sup>a</sup>	5, 2	5, 7	5, 2	6
4 <sup>a</sup>	4, 3	2, 4, 3	4, 7, 3	5, 3
5 <sup>a</sup>	7	9	9	4, 7, 9, 2
6 <sup>a</sup>	9	1	1	1
7 <sup>a</sup>	1	-	-	-

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### Sobre os resultados das simulações

A metodologia proposta e o sistema computacional que a assiste revelaram-se capazes de hierarquizar as alternativas participantes da análise, para um caso previamente definido. Os resultados obtidos nas três séries de simulação puderam ser considerados satisfatórios, mas não foi possível realizar-se um estudo de verificação da metodologia. Os resultados foram submetidos aos especialistas participantes da rede e não houve questionamentos significativos.

A idéia para o futuro será propor um mapeamento tecnológico do território brasileiro, com melhor tipificação dos casos representativos de aplicações do pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios no Brasil.

### Sobre a metodologia adotada

Como decisão estratégica, decidiu-se implementar antes a abordagem participativa (*'soft'*) da metodologia proposta. Embora acertada, essa decisão gerou uma grande limitação na pesquisa, pois tornou-se difícil medir o efeito da variação do contexto tecnológico na decisão a partir da consulta a especialistas. Os especialistas demonstraram grande dificuldade em avaliar esse efeito dentro das escalas de avaliação de cada critério, e, o efeito sobre os pesos de cada critério teve que ser reduzido aos quatro tipos de contextos utilizados.

Com a implantação da abordagem assistida (*'hard'*) da metodologia, tais problemas seriam resolvidos. Poder-se-ia ter escalas contínuas de mensuração dos efeitos da variabilidade do contexto tanto sobre os pesos quanto sobre a avaliação das alternativas segundo os vários critérios. Para essa abordagem, poderiam ser utilizadas outras técnicas acopladas, como as de avaliação de impacto ambiental, estudos de confiabilidade e risco, lógica difusa, etc.

### Sobre o auxílio computacional

Tornou-se inegável que tanto o *software* elaborado como o seu banco de dados desempenharam papel importante para a obtenção dos resultados. O SAD – Sistema de Apoio à Decisão produzido certamente será utilizado e criticado pelos seus usuários. A experiência com a sua utilização disseminada, e as críticas e sugestões feitas, deverão, na continuidade da pesquisa, fornecer subsídios para remodelação do SAD em atualizações da versão atual.

### Sobre o potencial de utilização

O futuro deve reservar um lugar especial para esse tipo de metodologia. Ela não ficará restrita ao campo do tratamento de águas residuárias, mas será utilizada em todas as áreas de saneamento, e em outras áreas da engenharia. A análise tecnológica em campo restrito, como a realizada no

presente trabalho, poderá ser utilizada de forma mais ampla para a elaboração das políticas de pesquisa nas agências de fomento e nos órgãos de planejamento. A pesquisa em rede, se alimentada por uma metodologia do tipo da proposta neste trabalho, pode conduzir à aplicação prática dos resultados de forma mais direta, a um novo comportamento dos pesquisadores, tão afeitos a detalhes de pesquisa que se esquecem de aspectos tão importantes quanto custo da tecnologia sendo produzida.

## AGRADECIMENTOS

Expressa-se especial reconhecimento ao esforço da Coordenação da Rede 2, aos coordenadores de sub-redes, e aos consultores participando da Rede 2 do PROSAB, no auxílio e fornecimento de dados que permitiram viabilizar a utilização da metodologia proposta.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENAYOUN, R.; ROY, B.; e SUSSMAN, B. ELECTRE: Une Méthode pour guider le choix en presence de points de vue multiples. Note de Travail 49, SEMA (METRA INTERNATIONAL), Direction Scientifique, Paris, France, 1966.
- BRIGGS, T.; KUNSCH, P. L.; e MARESCHAL, B. Nuclear Waste Management: An Application of the Multicriteria PROMETHEE Methods. *European Journal of Operational Research*, **44**, 1-10, 1990.
- BUARQUE, C. *Tecnologia Apropriada: Uma Política para la Banca de Desarrollo de America Latina*. Lima, Peru: ALIDE, 1983.
- CARNEIRO, G. A., BARBOSA, R. F. M., e SOUZA, M. A. A. Tecnologia Apropriada em Saneamento: Uma Nova Abordagem com o Emprego de Análise Multiobjetivo e Multicritério. In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa. Anais. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.
- CORDEIRO NETTO, O. M., SOUZA, M. A. A., CARNEIRO, G. A., NERI, L. L., LOPES JÚNIOR, R. P. Uma metodologia para análise tecnológica de sistemas com reatores biológicos anaeróbios para tratamento de águas residuárias municipais. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre. Anais. AIDIS - Associação Interamericana de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000.
- DAGNINO, R. P. Tecnologia Apropriada – Uma Alternativa? Dissertação de Mestrado, Departamento de Economia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1978, 257p.
- DUCKSTEIN, L.; e OPRICOVIC, S. Multiobjective Optimization in River Basin Development. *Water Resources Research*, **16**, (1), 14-20, 1980.
- DUCKSTEIN, L.; TREICHEL, W. Ç.; e MAGNOUNI, S. E. Ranking Ground-water Management by Multicriterion Analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **120**(4), 546-565, July/August, 1994.
- FLEISSNER, P. (Ed.) (1983) *Systems Approach to Appropriate Technology Transfer*. Proceedings of the IFAC Symposium. Vienna, Austria: IFAC – International Federation of Automatic Control – Pergamon Press.
- GOICOECHEA, A.; HANSEN, D.R.; e DUCKSTEIN, L. *Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Applications*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1982.
- HOKKANEN, J. Ç.; SALMINEN, P.; TOSSI, E. Ç.; e ETTALA, M. Choice of a Solid Waste Management System Using the ELECTRE-II Decision-aid Method. *Waste Management & Research*, **13** (2), 175-193, April, 1995.
- KALBERMATTEN, J. M.; JULIUS, D.; e GUNNERSON, C. G. *Appropriate Sanitation Alternatives: A Technical and Economic Appraisal*. World Bank Studies in Water Supply and Sanitation, N. 1. John Hopkins University Press, Baltimore, USA, 1982.
- KAPLINSKY, R. *The Economics of Small: Appropriate Technology in a Changing World*. IT – Intermediate Technology Publications, London, UK, 1990.

- McROBIE, G. (1981) *Small is Possible*. UK: Jonathan Cape Ltd.
- REID, G. W.; e DISCENZA, R. *Prediction Methodology for Suitable Water and wastewater Processes*, Technical Papers Series N. 8. WHO International Reference Centre for Community Water Supply, The Hague, 1976.
- ROY, B. The Outranking Approach and the Foundations of ELECTRE Methods. *Theory and Decision*, **31**, 49-73, 1991.
- ROY, B. Problems and Methods with Multiple Objective Functions, *Mathematical Programming*, **1** (2), 1971.
- SCHUMACHER, E. F. *Small is Beautiful: A Study of Economics as if People Mattered*. Abacus / Sphere Books, London, UK, 1974.
- SCHUMACHER, E. F. *Small is Beautiful: A Study of Economics as if People Mattered*. Blond and Briggs Ltd., London, UK, 1973.
- SILVEIRA, D. D. Modelo para Seleção de Sistemas de Tratamento de Efluentes de Indústrias de Carne. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Departamento de Engenharia de Produção, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 1999.
- SOUZA, M. A. A. Um Modelo para Seleção de Processos de Tratamento de Águas Residuárias Municipais. In: *Anais do XXVI Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, AIDIS*. Lima, Peru, Novembro, 1998 (meio eletrônico).
- SOUZA, M. A. A. Metodología de Analisis de Decisiones para Seleccionar Alternativas de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales. *Hojas de Divulgación Tecnica*. CEPIS - Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Lima, Peru, (68), 1-6, Abril, 1997.
- SOUZA, M. A. A.; e FORSTER, C. F. Metodologias para Seleção de Processos de Tratamento de Águas Residuárias. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, ABES, Ano I, **2**, 19-31, Abril/Junho, 1996.
- SOUZA, M. A. A. Methodology for Selection of Wastewater Treatment Processes. PhD Thesis. School of Civil Engineering, The University of Birmingham, Birmingham, UK, 1992.
- SOUZA, M. A. A., CARNEIRO, G. A., LOPES JÚNIOR, R. P., e CORDEIRO NETTO, O. M. Análise tecnológica de alternativas para pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa. Anais. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001a.
- SOUZA, M. A. A., CORDEIRO NETTO, O. M., e LOPES JÚNIOR, R. P. Capítulo 10 - Sistema de Apoio à Decisão (SAD) para Seleção de Alternativas de Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios In: PROSAB, Finep. *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios*. Rio de Janeiro, 2001b.
- SOUZA, M. A. A., CORDEIRO NETTO, O. M. Análise tecnológica multiobjetivo de alternativas para pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. In: Organizado por PROSAB, Finep. *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios: Coletânea de trabalhos técnicos*. Volume 1. Rio de Janeiro, 2000, 70-86.
- TECLE, A.; FOGEL, M.; e DUCKSTEIN, L. Multicriterion Selection of Wastewater Management Alternatives. *Journal of Water Resources Planning and Management Division*, Proceedings of ASCE, **114** (4), 383-398, 1988.
- WILLOUGHBY, K.W. (1990) *Technology Choice: A Critique of the Appropriate Technology Movement*. London, UK: Intermediate Technology Publications.
- WOLF, P. Auswahl-und Bewertungskriterien für Kleine Klaranlagen. *Abwassertechnik*, **38** (2), 5-7, 1987.
- YU, W. e ROY, B. *ELECTRE TRI: Aspects méthodologiques et manuel d'utilisation*. Document N° 74, version 1.0, Université de Paris XI, Paris, France, 1992.
- ZELENY, M. Compromise Programming. In: COCHRANE, J. L.; e ZELENY, M. eds. *Multiple Criteria Decision Making*. University of South Carolina Press, Columbia, SC, USA, 263-301, 1973.