

## **10 SISTEMA DE APOIO À DECISÃO (SAD) PARA SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS DE PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REATORES ANAERÓBIOS**

**Marco Antônio Almeida de Souza, Oscar de Moraes Cordeiro Netto, Reynaldo Pena Lopes Júnior**

### **10.1 INTRODUÇÃO**

Apresenta-se, neste capítulo, a descrição de desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Decisão (SAD), para avaliação tecnológica de alternativas de pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, estudadas na Rede 2 do PROSAB, consideradas como tecnologias consolidadas. Na elaboração do SAD, foram desenvolvidas três etapas:

- formulação de uma metodologia de análise tecnológica;
- elaboração de um aplicativo para execução automatizada da metodologia proposta;
- formação da base de dados necessária ao processamento do SAD.

Uma versão atualizada do *software* desenvolvido, correspondente ao SAD, encontra-se disponibilizada na página do PROSAB – FINEP, na Internet, para livre utilização pelos potenciais usuários, feitas as devidas restrições, normais a um sistema de auxílio à decisão, principalmente a de não dispensar a contribuição de um bom especialista no tema.

### **10.2 AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA DE ALTERNATIVAS**

A bibliografia relativa às metodologias de avaliação mostra que há vários modelos de avaliação tecnológica de alternativas que levam em consideração métodos multiobjetivo e multicritério de análise. A Tabela 10.1 apresenta informações sobre as principais metodologias propostas pela seleção de processos de tratamento de águas residuárias.

Tabela 10.1 - Metodologias de seleção de processos de tratamento de águas residuárias

Metodologia	Referência(s)	Aplicação	Abordagem	Alternativas
EPA-Bechtel	VAN NOTE et al. (1975)	Tratamento de águas residuárias	Analítica, usando critério econômico de mínimo custo	Alternativas geradas pelo modelo
CAPDET	COE-EPA (1981) CULLINAME (1980)	Tratamento de águas residuárias (incluindo lodos)	Analítica, usando critério econômico de mínimo custo	Alternativas geradas pelo modelo
EXEC-OP	ROSSMAN (1980)	Tratamento de águas residuárias [(incluindo reciclo de fluxos laterais)] esclarecer	Analítica, usando combinação de critérios técnicos e econômicos	Alternativas geradas pelo modelo
MAPMAT	ARNOLD (1982)	Abastecimento de água e saneamento (para países em desenvolvimento)	Analítica, usando critérios de eficiência em abordagem de tecnologia apropriada	Alternativas geradas pelo modelo
Câmara	CÂMARA (1982)	Tratamento de águas residuárias (incluindo lodos)	Analítica, usando abordagem de custo-efetividade	Alternativas geradas pelo modelo
USAID-Reid	REID (1982) REID & DISCENZA (1975 e 1976) REID & COFFEY (1978)	Tratamento de água e saneamento (para países em desenvolvimento)	Analítica, usando abordagem de tecnologia apropriada	Alternativas contidas no modelo
WBANK (do Banco Mundial)	KALBERMATTEN et al. (1982a e 1982b) PRATT & BOYDEN (1985)	Saneamento de baixo custo	Analítica, usando critérios técnicos e econômicos em abordagem de tecnologia apropriada	Alternativas contidas no modelo
Newman	NEWMAN (1987)	Saneamento de baixo custo	Analítica, abordagem semelhante ao Modelo WBANK	Alternativas contidas no modelo
Wolf	WOLF (1987)	Tratamento de águas residuárias	Analítica, utilizando variáveis de decisão em abordagem de Tecnologia Apropriada	Alternativas alimentadas pelo usuário em função do caso em estudo
Tecle e colaboradores	TECLE et al. (1988)	Sistema de águas residuárias (incluindo tratamento)	Analítica, usando critérios de eficiência em abordagem de análise de decisão	Alternativas alimentadas pelo usuário, em função do caso em estudo
PROSEL-I	SOUZA (1992)	Tratamento de águas residuárias	Analítica, usando critérios de eficiência para medir graus de tecnologia apropriada	Alternativas contidas no modelo ou alimentadas pelo usuário, em função do caso em estudo
Arora e colaboradores	ARORA et al. (1980)	Tratamento de águas residuárias	Experimental, utilizando apenas critérios técnicos de eficiência	Alternativas alimentadas pelo usuário em função do caso em estudo
Silveira	SILVEIRA (1999)	Tratamento de águas residuárias (indústria de carnes)	Analítica, usando abordagem de custo-efetividade	Alternativas contidas no modelo

Os modelos de avaliação tecnológica utilizam-se de uma série de critérios pré-definidos para a avaliação de alternativas, que não são, necessariamente, os mesmos para todos os modelos. Assim, cada autor lista os critérios mais importantes para a avaliação de alternativas, utilizando-se do modelo por ele proposto. Uma discussão mais detalhada sobre esses modelos pode ser encontrada em CARNEIRO & BARBOSA (1999) e CARNEIRO et al. (2000).

Para subsidiar a discussão relativa ao desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão (SAD) para avaliação tecnológica, são ressaltados dois desses métodos: o de Tecle e colaboradores (TECLE et al., 1988) e o PROSEL-I (SOUZA, 1992).

A metodologia de análise proposta por TECLE et al. (1988) utiliza-se da Teoria dos Jogos Cooperativos e dos métodos de análise multicritério “Compromise Programming” (Programação de Compromisso) e ELECTRE-I, para seleção de alternativas de tratamento de águas residuárias. Trata-se de uma abordagem em nove passos, assim descritos:

- (1) Definição dos objetivos que o sistema deve cumprir.
- (2) Identificação dos requisitos a serem alcançados, especificações desejadas e restrições para os objetivos.
- (3) Seleção dos critérios de avaliação.
- (4) Determinação das escalas de mensuração.
- (5) Geração da lista preliminar de alternativas que atendem aos objetivos desejados.
- (6) Formulação de uma matriz de avaliação “alternativas versus critérios”.
- (7) Aplicação do método multicritério de auxílio à decisão e realização de estudos de sensibilidade.
- (8) Aceitação da solução gerada, que indica uma alternativa preferível e não a solução ótima.
- (9) Realização de outras iterações, caso a alternativa não seja aceita pelo agente decisor, introduzindo outras informações e retornando ao passo 2 até que a solução seja satisfatória.

SOUZA (1992) desenvolveu o Modelo PROSEL-I para avaliação de processos de tratamento de águas residuárias, usando princípios de tecnologia apropriada e análise de decisão com múltiplos objetivos. Segundo SOUZA (1998), o Modelo PROSEL-I pode ser dividido em seis fases.

Na Fase I, chamada de “Instruções gerais”, o processo de seleção deve ser totalmente planejado. Isso significa que todos os passos a serem realizados devem ser conhecidos desde o início e, então, todos os requisitos e dados para se obter um resultado devem ser preenchidos. As necessidades, requisitos e restrições de uma situação particular devem ser ajustados quando se escolhe um procedimento específico dentro do Modelo ou um certo tipo de dado.

Na Fase II, que é a fase de “Informação dos dados requeridos”, vários dados relacionados ao caso particular são pesquisados e alimentados ao Modelo.

Na Fase III, que é a fase de “Pré-seleção técnica”, são selecionadas as alternativas tecnicamente aceitáveis para tratamento de águas residuárias, no caso específico, e que sofrerão a análise posterior no Modelo. As outras alternativas são descartadas do estudo nessa fase.

Na Fase IV, a fase de “Avaliação tecnológica”, as alternativas selecionadas como tecnicamente viáveis são analisadas do ponto de vista de seus respectivos graus de adaptabilidade às condições específicas do caso em estudo, com o objetivo de avaliar o grau com que cada alternativa se ajusta ao contexto existente no caso dado.

Na Fase V, que é a fase de “Análise econômica”, o Modelo estima os custos das alternativas, de acordo com uma abordagem que considera os custos de estações de tratamento existentes. São estimados, em uma base comparativa, tanto os custos de construção como os custos de operação

e manutenção. São também estimados os benefícios de cada alternativa, de acordo com o efeito de redução das concentrações de contaminantes que seriam descarregados no ambiente, se eles não fossem removidos do efluente por cada uma das alternativas de tratamento.

Na Fase VI, chamada de “Seleção final”, são analisados, em conjunto, todos os resultados para cada alternativa viável de cada fase anterior. É nessa fase que podem ser utilizados os métodos multicritério e multiobjetivo de Análise de Decisão propostos, para se atingir uma solução de hierarquização das alternativas viáveis. Ao lado dos resultados de eficiências, com que as alternativas viáveis ao caso atendem aos diversos critérios, deve-se optar por um conjunto de pesos dos critérios, que reflita a sua importância relativa, em função do contexto tecnológico do caso em estudo. Nesse ponto, a abordagem pode requerer uma consulta aos agentes interessados na decisão, para apresentar os resultados do modelo e para avaliar se há concordância quanto aos resultados obtidos a aos dados utilizados. Se não se atinge um consenso, está prevista a retroalimentação do modelo, alterando-se algumas opções metodológicas e alguns dados, sendo que o processo de retroalimentação continua, até que seja alcançada uma decisão satisfatória.

### **10.3 PRINCÍPIOS DA ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

Com a existência de mais atributos de comparação entre alternativas, a determinação da superioridade de uma sobre outra alternativa pode não se tornar clara, isto é, pode não haver uma situação chamada de “dominância”, onde a totalidade dos atributos de uma alternativa tem superioridade em relação aos atributos da outra. Também pode não se tornar clara a transitividade entre alternativas comparadas, pois poderá ocorrer a dominância, em relação a um critério, entre alternativas que não necessariamente se verifique em outro. Torna-se, assim, necessário o uso de ferramentas capazes de resolver esse tipo de questão. Essas ferramentas podem ainda abranger novos tipos de relações entre ações, tais como a indiferença e a incomparabilidade. Dentro desse grupo, aplicam-se os métodos chamados de multiobjetivo, que tendem a buscar a otimização de vários aspectos e os interesses de vários grupos. No caso da existência de vários atributos a serem avaliados, medidos em diferentes escalas, essa análise assume também o caráter multicritério.

Consideram-se, nessa análise multicritério, vários fatores para medir o grau em que cada alternativa atende ou cumpre os vários objetivos que devem ser especificados pelos agentes interessados na escolha, havendo, dessa forma, um “grupo de regras de decisão”. A metodologia pode também ser empregada em casos em que não se tem apenas um tomador de decisão, mas um grupo de decisores, cada um com objetivos, critérios e valores próprios, freqüentemente conflitantes.

Um dos aspectos vantajosos desses métodos é que eles conseguem refletir melhor os objetivos e analisar com detalhe as particularidades introduzidas nas alternativas comparadas. Permitem, também, quantificar custos implícitos, não traduzíveis por análises custo-benefício, e estabelecer uma lista das prioridades de projeto. Como desvantagens, pode-se ressaltar a necessidade de um grande número de informações, para cada alternativa avaliada. O valor do resultado é dependente dos critérios avaliados e de sua aplicabilidade à problemática em questão e dos agentes decisores, o que torna a análise mais subjetiva.

#### **10.3.1 Classificação dos métodos**

São tantos os métodos multicritério e tão variadas as suas características, que se torna muito difícil a elaboração de uma classificação de aceitação geral. Citam-se aqui duas dessas classificações mais simples, e de aceitação difundida, a primeira proposta por VINCKE (1982) e

a segunda utilizada por BARBOSA (1997), em seu levantamento sobre utilização de estudos multicritério no Brasil.

Os métodos multicritério existentes foram divididos em três grandes famílias, assim estruturadas:

- métodos baseados na teoria de utilidade-multiatributo;
- métodos seletivos;
- métodos interativos.

GOICOECHEA et al. (1982) e, posteriormente, BARBOSA (1997) adotaram uma denominação equivalente, porém um pouco mais detalhada em sua nomenclatura:

- técnicas de geração de soluções não-dominadas;
- técnicas com articulação de preferências;
- técnicas com articulação progressiva de preferências.

Essas famílias podem ser brevemente caracterizadas a seguir, apresentando-se, também, alguns dos métodos mais conhecidos:

### **Métodos baseados na teoria utilidade-multiatributo**

Essa família é de utilização mais difundida na América do Norte, consistindo na agregação de diferentes atributos por uma única função, sendo o objetivo básico desses métodos obter a alternativa que possa otimizar essa função. Sua teoria baseia-se em um axioma fundamental: *qualquer decisor procura, consciente ou inconscientemente, maximizar uma função de utilidade ou minimizar uma função custo.*

Essa função a otimizar consiste em uma síntese de diferentes atributos, de forma a agregá-los em um único valor, sendo uma representação matemática da estrutura de preferência do decisor. Segundo GOBETTI & BARROS (1994), essa função incorpora a maneira de agir do decisor em situações de incerteza. Em aplicações de múltiplos objetivos, é preciso determinar as funções de utilidade de cada atributo e combiná-las, fundindo-as em uma única função utilidade-multiatributo.

No âmbito dessa abordagem, incluem-se métodos largamente utilizados, como o Método de Pesos, Método das Restrições e o Método Multiobjetivo Linear. Esse tipo de metodologia permite o ordenamento em ordem de preferência de todas as alternativas.

Um método bastante utilizado, “Compromise Programming” (Programação de Compromisso), também pode ser classificado dentro das características dessa família, por buscar a otimização da função “distância da solução ideal”. O Método da Programação de Compromisso (ZELENY, 1973) é um método que busca identificar soluções não-dominantes, que estão mais próximas a uma solução ideal, através de um procedimento de medida de distância. A solução ideal é definida como sendo o vetor dos melhores valores alcançados em cada critério, na matriz de avaliação. Também é determinado um vetor com os piores valores, que é utilizado para indicar a distância relativa da alternativa à solução mais desfavorável.

### **Métodos seletivos**

Essa família, de utilização mais difundida na Europa, procura estabelecer comparações entre alternativas, duas a duas, por meio do estabelecimento de uma relação que acompanha as margens de preferência ditadas pelos agentes decisores, sendo chamada de relação de seleção.

Essa relação binária indica se há argumentos suficientes para decidir se um dos elementos do par é tão bom quanto o outro, ou se essa asserção pode ser refutada. Dependendo do método, essas comparações podem ainda considerar pesos, representando a importância relativa entre critérios.

Esse grupo metodológico pode incorporar o uso de conceitos como indiferença e incomparabilidade, no que se refere à preferência entre ações, o que permite, em determinados casos, uma avaliação mais apropriada do problema, mas que pode não permitir um ordenamento completo das alternativas em relação à preferência, em algumas situações. Esses métodos são propostos para um grupo finito de alternativas, podendo sua filosofia, no entanto, ser aplicada para casos de infinitas alternativas. Muitos são os métodos desse grupo, sendo os mais conhecidos os métodos da família Electre e Promethee.

Os métodos Electre (ROY, 1985) aplicam-se, principalmente, à análise de alternativas discretas avaliadas qualitativamente. O método Electre I tem como idéia principal separar, do conjunto total de alternativas, aquelas que são preferidas na maioria dos critérios de avaliação e que não causam um nível inaceitável de descontentamento nos outros critérios. Para isso, são introduzidos os conceitos de concordância e discordância. A concordância entre duas alternativas  $i$  e  $j$  representa a disposição do decisor em escolher a alternativa  $i$  em lugar da  $j$ . O índice de concordância (C) representa uma razão ponderada dos critérios para os quais a alternativa  $i$  é preferida à alternativa  $j$ . O conceito de discordância (D) é complementar e representa o quanto a escolha de  $i$  é prejudicial em relação a  $j$ . Para ambos os índices, é definida uma escala numérica comum a todos os critérios. O resultado do Electre I é um gráfico determinando uma ordenação parcial das alternativas, sendo, as alternativas a escolher, obtidas mediante a determinação de um subconjunto de alternativas denominado *kernel* (K).

Já o Electre II pode apresentar uma ordenação mais completa, apresentando, como aprimoramento do método anterior, duas relações de subclassificação, de dominância forte e fraca, havendo, dessa forma, dois patamares de concordância e dois de discordância. O Electre III veio a acrescentar alguns aperfeiçoamentos em relação às versões anteriores, como, por exemplo, a utilização de funções  $q$ ,  $p$  e  $v$ , indicando relações de indiferença, preferência e veto, definidas com precisão por ROY (1985).

Do mesmo modo que o Electre, o método Promethee (VINCKE, 1982) estabelece uma estrutura de preferência entre alternativas discretas. Para cada critério, existe uma função de preferência entre alternativas, que deve ser maximizada. Essa função indica a intensidade da preferência de uma alternativa à outra, com o valor variando entre 0 (indiferença) e 1 (preferência total). Frequentemente, são utilizados seis tipos de funções de preferência, sugeridos pelo método, com dois parâmetros, no máximo.

### **Métodos interativos**

Essa é a família mais recente das três relacionadas e se baseia na alternância de etapas computacionais com etapas de debate, onde são obtidas novas informações sobre as preferências dos agentes decisores, podendo esses métodos ser aplicados para um universo maior de casos, dada sua flexibilidade. Nesses métodos, as preferências são discutidas e reavaliadas ao longo de todo o processo decisório, sendo chamado de articulação progressiva de preferências. Parte-se do princípio segundo o qual o decisor não tem estabelecido *a priori* o seu sistema de preferência. Esse sistema se revela aos poucos, pelo maior entendimento do problema e pelo curso do processo decisório.

Embora todos os métodos de análise multicritério incluam alguma etapa de diálogo com os decisores, buscando definir o grupo de ações e os critérios avaliados, nos métodos interativos os decisores dão uma contribuição direta na elaboração da solução, intervindo durante os

procedimentos, e não somente na definição do problema. Os métodos mais conhecidos que se enquadram nessas características, segundo BARBOSA (1997), são: Método do Valor Substituto de Troca e Método dos Passos.

#### 10.4 PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA DE ANÁLISE TECNOLÓGICA

Com base em uma avaliação das experiências já desenvolvidas e na proposta contida no PROSAB, foi desenvolvida uma metodologia geral de análise composta por quatro fases:

- Fase I - Instruções gerais e informação de dados.
- Fase II - Pré-seleção de alternativas viáveis.
- Fase III - Avaliação tecnológica.
- Fase IV - Análise tecnológica global (Multicritério).

Como já salientado, as metodologias de seleção de processos de tratamento utilizam conceitos de tecnologia apropriada e visam a auxiliar na escolha de uma alternativa para pós-tratamento de reatores anaeróbios, no âmbito de um universo de alternativas possíveis.

Por exemplo, poder-se-ia considerar, no universo das alternativas pesquisadas pelo Tema 2 do PROSAB, a que mais se ajusta a um caso específico, ou seja, a um cenário de uma determinada região ou local, em um determinado período.

A metodologia desenvolvida parte do pressuposto que o local da futura estação de tratamento já foi escolhido e que um sistema de coleta de esgotos separador absoluto já existe ou será implantado. Além disso, assume-se que o clima predominante da região é tropical ou subtropical e que as alternativas tratam esgotos municipais com características semelhantes.

Parte-se do princípio, também, de que se dispõe de um banco de dados de “alternativas tecnológicas” para pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, banco esse que foi formado a partir dos dados coletados nos diversos subprojetos de pesquisa da Rede 2 do PROSAB.

Dois tipos de abordagens metodológicas poderiam ser adotadas para se desenvolver o aplicativo.

A primeira abordagem metodológica, denominada “versão participativa da metodologia”, explora a relação analista-decisor, ou seja, o decisor (*que pode ser um diretor de serviço de saneamento, um secretário de obras ou mesmo um prefeito*) é convidado pelo analista (*que pode ser o projetista ou o engenheiro capacitado para desenvolver o aplicativo*) a expor suas preferências por meio da definição dos objetivos, da escolha dos critérios e da atribuição de níveis de importância dos critérios.

A metodologia proposta neste trabalho, para a avaliação das alternativas de pós-tratamento de águas residuárias, estudadas pelo PROSAB, é uma versão de tipo “participativa”. Para auxiliar a análise dos dados fornecidos pelos agentes decisores, foi produzido o sistema computacional, que será detalhado neste capítulo.

A segunda abordagem metodológica, denominada “versão assistida da metodologia” envolve uma adaptação do modelo PROSEL-I proposto por SOUZA (1992) e requer uma menor interação entre analista e decisor, uma vez que se recorre a funções matemáticas, para definir as relações de preferência entre alternativas. Essas relações de preferência independem do decisor, sendo que, definidos os domínios de validade, podem ser essas relações aplicadas para o

conjunto das alternativas a serem avaliadas. A participação do próprio analista nessa avaliação é reduzida, pois os julgamentos, muitas vezes subjetivos, que este é obrigado a exercer sobre o comportamento dos sistemas, se apresentam em número mais reduzido.

Tanto a primeira como a segunda versão da metodologia seguem etapas e fluxogramas semelhantes, podendo, inclusive, utilizarem-se de parâmetros e dados comuns.

A seguir, apresenta-se a descrição das fases da metodologia proposta para a solução do problema.

### **Fase I - Instruções gerais e informação de dados**

Nessa fase, são selecionadas as opções que determinam as instruções gerais de procedimento. Podem ser selecionados os arquivos de dados existentes. É também possível introduzir os pesos para cada critério de decisão que está sendo considerado (o que significa que também é possível eliminar alguns critérios da análise, se desejado).

Os dados necessários para execução do sistema são os seguintes:

- dados de especificação do caso a ser estudado;
- dados das variáveis de projeto e planejamento;
- dados das condições locais e do terreno onde será instalada a estação de tratamento de águas residuárias;
- dados da capacidade local em suprimento de recursos necessários;
- dados de qualidade da água residuária bruta;
- dados da qualidade mínima desejada para o efluente tratado;
- pesos para os diferentes critérios que serão utilizados nos algoritmos de análise de decisão.

### **Fase II – Pré-seleção de alternativas viáveis**

Nessa fase, as alternativas analisadas pelo PROSAB, presentes no banco de dados do sistema, e consideradas como tecnologias reconhecidamente aprovadas, são identificadas como o universo de alternativas de pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios a ser analisado. Todas as alternativas consideradas possuem um arquivo de dados próprio que está integrado ao aplicativo desenvolvido.

A partir de consulta a esses dados, verifica-se quais das alternativas consideradas inicialmente são viáveis para o caso em questão, isto é, quais atendem às restrições técnicas impostas a elas, em função das condições locais.

Essa pré-seleção de alternativas é realizada por meio de um procedimento de exclusão das alternativas que não atendem a um conjunto, previamente especificado pelo usuário, de restrições técnicas, formando-se, assim, o universo de alternativas viáveis para o caso em estudo.

A Fase II compreende as seguintes ações:

- 1) Definição das eficiências máximas possíveis de cada alternativa (que são as eficiências intrínsecas da "j-ésima" alternativa em tratar a "i-ésima" característica de qualidade dos esgotos).
- 2) Definição da qualidade da água residuária bruta, conforme os dados introduzidos no modelo (são fornecidas as concentrações "Ci(i)", onde "i" significa as várias características de qualidade dos esgotos, consideradas pelas instituições participantes da Rede 2 do PROSAB).

- 3) Definição dos padrões de qualidade para o efluente, isto é, as concentrações máximas permissíveis "Ce(i)", que devem obedecer as metas de planejamento da comunidade, os usos do efluente tratado, ou as normas e legislação para lançamento no corpo receptor (ou no terreno).
- 4) Cálculo das eficiências mínimas aceitáveis para o caso em estudo, E(i), para a "i-ésima" característica de qualidade dos esgotos estudados.
- 5) Exclusão das alternativas inviáveis, em função do critério de eficiência.
- 6) Leitura dos dados informados das características mínimas possíveis de qualidade do efluente tratado por cada alternativa, isto é, as concentrações mínimas que cada processo de tratamento é capaz de fornecer.
- 7) Exclusão das alternativas que não atendem ao critério das concentrações mínimas possíveis para o efluente, sendo descartadas as alternativas quando a concentração exigida para o caso em estudo for menor que a mínima possível fornecida pela alternativa.
- 8) Leitura das necessidades de espaço físico das alternativas.
- 9) Cálculo das necessidades de área de terreno das alternativas.
- 10) Exclusão das alternativas inviáveis, em função do critério de ocupação de espaço, isto é, são eliminadas as alternativas que exigem área maior do que a disponível designada pelo caso em estudo.
- 11) Leitura das declividades de terreno mínimas requeridas pelas alternativas (o sistema contém essa informação em sua base de dados).
- 12) Exclusão de alternativas inviáveis, pelo critério de declividade.
- 13) Leitura das taxas de percolação mínimas no solo, aceitáveis pelas alternativas (contidas na base de dados do sistema).
- 14) Exclusão das alternativas inviáveis, pelo critério de mínima taxa de percolação requerida.
- 15) Leitura das profundidades mínimas de lençol freático, aceitáveis pelas alternativas (contidas na base de dados).
- 16) Exclusão das alternativas inviáveis, pelo critério da profundidade mínima aceitável de lençol freático.
- 17) Leitura dos valores de profundidades mínimas da camada impermeável do solo, aceitáveis pelas alternativas (contidas na base de dados).
- 18) Exclusão das alternativas inviáveis, pelo critério de profundidade mínima da camada impermeável do solo.
- 19) Leitura das espessuras mínimas de solo, aceitáveis pelas alternativas (contidas na base de dados).
- 20) Exclusão das alternativas inviáveis, pelo critério de espessura mínima de solo.
- 21) Leitura das condições de ocorrência de rochas, que são requeridas pelas alternativas (as alternativas são classificadas na base de dados do sistema em aquelas que "requerem terrenos sem ocorrência de rochas" e aquelas a que não se impõe essa condição).
- 22) Exclusão das alternativas inviáveis, pelo critério de ocorrência de rochas no terreno.
- 23) Resultados finais do processo de pré-seleção técnica (somente as alternativas que atendem a todos os critérios ao mesmo tempo, isto é, não foram excluídas em nenhuma etapa, são permitidas a continuar na análise pelas fases posteriores. Se não houver nenhuma alternativa viável, o sistema finaliza a sua análise nesse ponto).

### **Fase III - Avaliação tecnológica**

Se houver mais de uma alternativa viável, avalia-se a eficiência com que cada alternativa exequível cumpre alguns critérios pré-fixados de tecnologia apropriada, que podem ser escolhidos pelo usuário.

Nessa fase da análise, são estimados os graus de influência dos seguintes fatores sócio-econômico-ambientais na decisão:

- Demanda por área de implantação/construção.
- Custo de implantação/construção.
- Custo de operação e manutenção.
- Simplicidade/facilidade de implantação/construção.
- Simplicidade/facilidade de operação e manutenção.
- Resistência a choques de cargas.
- Flexibilidade e possibilidade de expansão.
- Produção de impacto ambiental.
- Quantidade produzida de resíduos sólidos.
- Disposição adequada/reaproveitamento de resíduos sólidos.
- Exigência em capacitação de recursos humanos.
- Utilização preferencial de recursos materiais locais.
- Nível de rejeição do público ao tratamento.
- Confiabilidade no fornecimento de energia.

Esses fatores são ou podem ser vistos como efeitos ou resultados da instalação da estação de tratamento de águas residuárias em um determinado local.

Forma-se, assim, a matriz de conseqüências (*pay-off matrix*), que pode ter livre utilização: ou pode ser utilizada para escolher diretamente as alternativas considerando ou não os vários critérios constantes da matriz; ou pode ser introduzida em qualquer algoritmo aplicável para realizar a análise de decisão multicritério.

A matriz de conseqüências foi gerada por meio de dados recolhidos por questionários de aquisição de dados enviados às instituições participantes do PROSAB. Cada instituição avaliou a alternativa por ela pesquisada e outras duas alternativas com desempenho conhecido: sistema de lodos ativados e lagoa de estabilização facultativa. Esses dados foram, posteriormente, submetidos a um painel de especialistas no tema, e escoimados até o ponto de consenso possível entre os especialistas participantes. Assim, as performances das alternativas em cada um dos critérios foram estimadas a partir de escalas ordinais de comparação entre alternativas, o que produz resultados de análise suficientemente precisos.

#### **Fase IV - Análise tecnológica global (Multicritério)**

Na fase IV, utiliza-se a análise multiobjetivo e multicritério. Para tanto, foi proposto o emprego de alguns dos algoritmos disponíveis para aplicação de métodos multicritério na forma computacional, como aqueles correspondentes aos métodos da "Ponderação Aditiva" (GOICOECHEA et al., 1982), "Compromise Programming" (ZELENY, 1973) e a série de métodos ELECTRE (ROY, 1985), para a geração de uma hierarquização das alternativas viáveis, a partir da matriz de conseqüência gerada na fase anterior. A utilização de mais de um método de análise multicritério é recomendada por vários autores, mas isso é matéria que transcende o escopo do presente texto.

Ao final, o usuário, instruído pelos resultados obtidos com a aplicação dos métodos multicritério, pode chegar a uma decisão, sendo a alternativa selecionada virtualmente a mais aceitável socialmente, culturalmente, ambientalmente e economicamente, do ponto-de-vista das pessoas atuando na "decisão" (SOUZA & FORSTER, 1996).

### **10.5 ELABORAÇÃO DE APLICATIVO PARA A METODOLOGIA PROPOSTA**

Para auxiliar e tornar rápida e automática a aplicação da metodologia proposta, foi elaborado um aplicativo para processamento computacional dos dados obtidos, em relação às alternativas de

tratamento estudadas (banco de dados). As sub-rotinas foram criadas em linguagem de programação *Delphi*.

O aplicativo foi elaborado de modo que o usuário seguisse a ordem dos acontecimentos proposta na metodologia acima descrita. A Figura 10.1 mostra a tela de entrada do aplicativo, que faz um alerta aos usuários do sistema, que esse só deve ser utilizado com a supervisão de um profissional especialista na área.

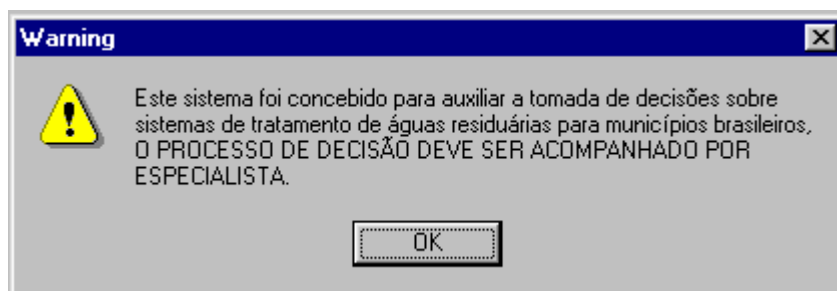


Figura 10.1 - Tela de alerta aos usuários

A Figura 10.2 mostra a tela principal do sistema, cuja barra de ferramentas indica a ordem dos acontecimentos para sua utilização.

Como o sistema já possui as bases de dados dos subprojetos do PROSAB, o usuário não é obrigado a gerar um banco de dados próprio de sistemas de tratamento, para que possa utilizar o aplicativo. Assim, para utilizá-lo, o usuário deve, primeiramente, escolher a base de dados referente aos sistemas de tratamento de águas residuárias com que deseja trabalhar.

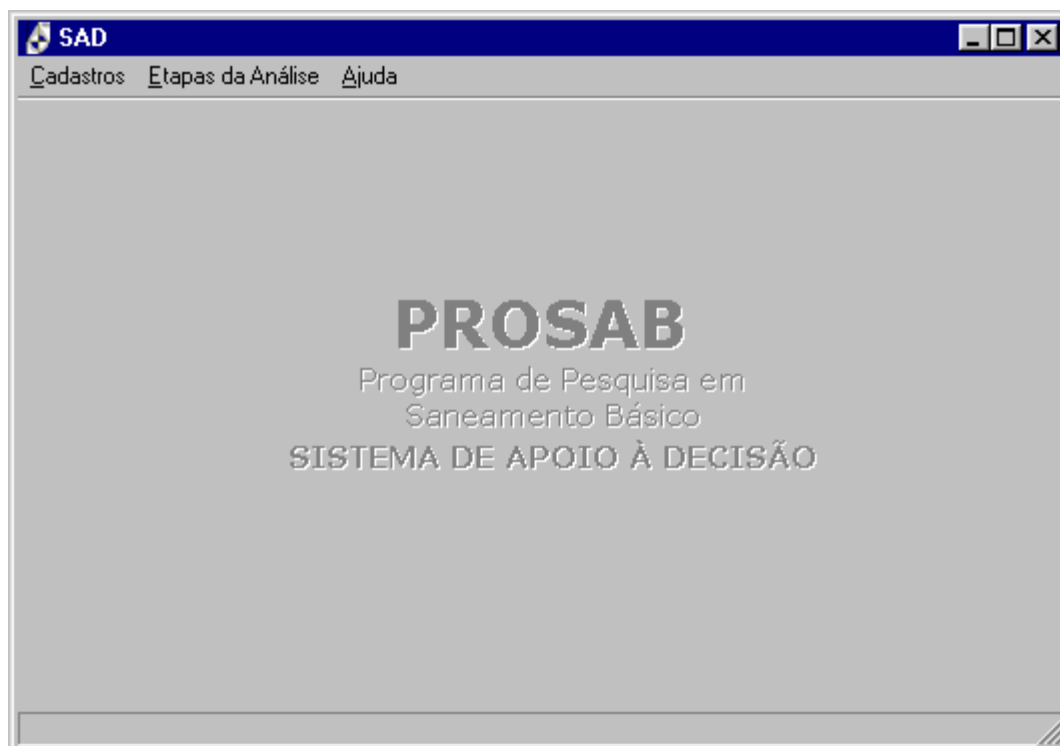


Figura 10.2 - Tela principal do aplicativo produzido

Depois de escolhido esse banco de dados, o usuário deve introduzir os dados do caso em questão, utilizados na pré-seleção de alternativas, pois nessa etapa não há casos pré-cadastrados. Os dados necessários para essa pré-seleção são divididos em três grupos: concentração máxima permitida de efluente, grau de tratamento mínimo exigido e restrições técnicas. As Figuras 10.3 e 10.4 mostram telas de entrada de alguns desses dados.

**Cadastro de Caso**

Arquivo Registro ?

Incluir Editar Apagar Gravar Cancelar Pesquisar Sair

Código da Caso: Descrição:

Restrições Técnicas Concentração de Efluentes Grau de Tratamento

Declividade do Terreno: Profund. Camada Perm. Solo: ☐ Existe Abastecimento de Energia?

População de Projeto: Área Máxima Ocupada: ☒ Existe Afloramento de Rochas?

Permeabilidade do Solo: Custo Máximo de Implantação:

Nível do Lençol Freático: Custo Máximo de OM:

Espessura do Solo:

Figura 10.3 - Tela de entrada de dados do caso em questão - Restrições técnicas

**Cadastro de Caso**

Arquivo Registro ?

Incluir Editar Apagar Gravar Cancelar Pesquisar Sair

Código da Caso: Descrição:

Restrições Técnicas Concentração de Efluentes Grau de Tratamento

SS Total: DQO Filtrado: NMP Colif.totais:

DBO Total: Cot Total: NMP Colif.Fecais:

DBO Filtrado: NTK: Tubidez:

DQO Total: Fósforo Total: Sólidos Totais:

Figura 10.4 - Tela de entrada de dados do caso em questão – Grau de tratamento mínimo

Nem todos os campos necessitam ser preenchidos para se continuar a análise. Assim, em relação às características de qualidade da água, recomenda-se que se dê ênfase à DBO total, DQO total, Sólidos Suspensos Totais, Nitrogênio Amoniacoal e Nitrato, Fósforo, e um tipo de Coliformes (totais ou fecais).

Seguindo a ordem dos eventos, proposta pelo aplicativo, o usuário, após introduzir os dados do caso, deve processar a pré-seleção das alternativas existentes no banco de dados. Esse processamento gera o conjunto de alternativas viáveis para o caso em questão.

Como resultado da etapa de pré-seleção, é gerado um formulário que mostra quais das alternativas existentes no banco de dados escolhido são viáveis para o caso. Nesse mesmo formulário, há uma matriz “alternativas *versus* critérios de eliminação analisados”. Essa matriz mostra quais são as alternativas viáveis para cada um desses critérios.

Com essa matriz é possível visualizar quais os critérios que são responsáveis pelo veto das alternativas que não foram consideradas viáveis. A Figura 10.5 apresenta esse formulário.

Resultado da Pré-Seleção				
Alternativa	Aprovado	GT_SolidosTot	GT_SSTotal	GT
UASB seguido de Vala de Filtração	Sim	NI	NI	NI
UASB seguido de Biofiltro Aerado Sub	Não	NI	NI	NI
UASB seguido de Sistema de Lodos A	Sim	NI	NI	NI
UASB seguido de Lagoa Aerada Aeról	Sim	NI	NI	NI
UASB seguido de Wetlands	Sim	NI	NI	NI
UASB seguido de Flotação por Ar Diss	Sim	NI	NI	NI
UASB seguido de Filtro Anaeróbio	Sim	NI	NI	NI
UASB seguido de Escoamento Superf	Sim	NI	NI	NI
UASB seguido de Filtro Biológico de A	Sim	NI	NI	NI

Legenda:  
 APR - Aprovado    Não Select - Não Selecionado  
 REP - Reprovado    NI - Não Informado

Ok

Figura 10.5 - Resultado da etapa de pré-seleção de alternativas para um caso fictício

No caso de se desejar processar a pré-seleção sem a utilização de todos os critérios eliminatórios, pode-se selecionar que critérios serão utilizados nesse processamento. A Figura 10.6 mostra a tela em que é realizada essa seleção.

O próximo passo proposto pelo aplicativo é a avaliação das alternativas consideradas viáveis. Nessa etapa, há a geração da matriz de consequências (*pay-off matrix*), que é uma matriz alternativas *versus* critérios de avaliação.

Assim como na etapa de pré-seleção, pode-se realizar a seleção dos critérios que se deseja utilizar na avaliação das alternativas. A Figura 10.6 mostra o módulo do aplicativo responsável pela seleção desses critérios, além da lista completa de critérios de análise que podem ser utilizados.

**Seleção de Critérios da Pré-Seleção**

Caso Selecionado: **Cruzeiro**

Restrições Técnicas:	Conc. de Efluentes:	Grau de Tratamento:
<input checked="" type="checkbox"/> Declividade do Terreno	<input checked="" type="checkbox"/> Sólidos Totais	<input checked="" type="checkbox"/> Sólidos Totais
<input checked="" type="checkbox"/> Permeabilidade do Solo	<input checked="" type="checkbox"/> SS Total	<input checked="" type="checkbox"/> SS Total
<input checked="" type="checkbox"/> Nível Máximo do Lençol Freático	<input checked="" type="checkbox"/> DBO Total	<input checked="" type="checkbox"/> DBO Total
<input checked="" type="checkbox"/> Espessura Mínima do Solo	<input checked="" type="checkbox"/> DBO Filtrado	<input checked="" type="checkbox"/> DBO Filtrado
<input checked="" type="checkbox"/> Profund. Mín. Camada Perm. Solo	<input checked="" type="checkbox"/> DQO Total	<input checked="" type="checkbox"/> DQO Total
<input checked="" type="checkbox"/> Área Máxima Ocupada	<input checked="" type="checkbox"/> DQO Filtrado	<input checked="" type="checkbox"/> DQO Filtrado
<input checked="" type="checkbox"/> Custo Máximo de Implantação	<input checked="" type="checkbox"/> Cot Total	<input checked="" type="checkbox"/> Cot Total
<input checked="" type="checkbox"/> Custo Máximo de OM	<input checked="" type="checkbox"/> NTK	<input checked="" type="checkbox"/> NTK
<input checked="" type="checkbox"/> Existe Abastecimento de Energia?	<input checked="" type="checkbox"/> Fósforo Total	<input checked="" type="checkbox"/> Fósforo Total
<input checked="" type="checkbox"/> Existe Afloramento de Rochas?	<input checked="" type="checkbox"/> NMP Colif. totais	<input checked="" type="checkbox"/> NMP Colif. totais
	<input checked="" type="checkbox"/> NMP Colif. Fecais	<input checked="" type="checkbox"/> NMP Colif. Fecais
	<input checked="" type="checkbox"/> Tubidez	<input checked="" type="checkbox"/> Tubidez

Buttons: Marcar Todos, Desmarcar Todos, D Todos, Ok, Sair

Figura 10.6 - Seleção de critérios (parâmetros) para a pré-seleção de alternativas

É importante notar que os critérios de avaliação são utilizados, tanto na etapa de avaliação, isoladamente, critério a critério, quanto na de análise tecnológica global (multicritério). Assim, se um critério for excluído da fase de avaliação, também o será da fase de análise tecnológica.

A última etapa proposta pelo aplicativo é a análise tecnológica global, também chamada análise multicritério. Nessa etapa, o usuário escolhe, entre os métodos disponíveis no aplicativo, aquele que será utilizado nessa avaliação. Os métodos atualmente disponíveis são o da Ponderação Aditiva, o da Programação de Compromisso (*Compromisse Programming*) e o ELECTRE III.

Nessa etapa, é necessário que o usuário introduza os pesos dos critérios de avaliação para o caso real em estudo. Já existem cadastrados quatro contextos tecnológicos com conjuntos de pesos diferentes. O usuário pode tentar classificar o seu caso específico em um desses quatro contextos ou utilizá-los como base para um novo caso com pesos diferentes, que sejam considerados mais adequados.

A Figura 10.7 mostra o módulo do aplicativo em que é realizada a entrada dos pesos e a seleção de critérios de avaliação.

**Seleção de Critérios**

Critérios de Avaliação:

Critérios de Avaliação	Pesos:
<input checked="" type="checkbox"/> Requisitos de Área para Construção	
<input checked="" type="checkbox"/> Custo de Implantação e Construção	
<input checked="" type="checkbox"/> Custo de Operação e Manutenção	
<input checked="" type="checkbox"/> Dificuldade de Construção	
<input checked="" type="checkbox"/> Dificuldade de Operação e Manutenção	
<input checked="" type="checkbox"/> Consumo de Energia	
<input checked="" type="checkbox"/> Resistência a Choques de Carga	
<input checked="" type="checkbox"/> Nível de Instrução do Pessoal para O&M	
<input checked="" type="checkbox"/> Rejeição do Público em Geral	
<input checked="" type="checkbox"/> Dificuldade em Realizar Ampliações	

Figura 10.7 - Critérios de avaliação: pesos e seleção

O resultado da análise tecnológica global é mostrado em formulários que indicam a posição hierárquica das alternativas e a viabilidade de cada uma delas.

A viabilidade da alternativa está presente nesse formulário, pois a análise final pode ser realizada com todas as alternativas disponíveis no banco de dados de sistemas de tratamento, e não somente com as que foram consideradas viáveis para o caso. Isso permite que o usuário possa adotar uma alternativa mais bem colocada no resultado da análise multicritério, mesmo que ela seja considerada inviável para o caso em um ou mais critérios de pré-seleção, considerados pouco relevantes pelo usuário.

Para mostrar um exemplo de saída do SAD, apresenta-se a Figura 10.8, que mostra o resultado de um processamento da etapa de análise tecnológica global, pelo método da Programação de Compromisso, escolhido ao acaso, somente para efeito de exemplificação.

Resultado Compromise Programming	
Alternativa	GrauProximidade
► UASB seguido de Filtro Anaeróbio	1.222,77616
UASB seguido de Lagoa de Polimento	1.216,13062
UASB seguido de Vala de Filtração	1.081,65430
UASB seguido de Escoamento Superficial	676,44245
UASB seguido de Filtro Biológico de Alta Taxa	663,22587
UASB seguido de Flotação por Ar Dissolvido	612,79398
UASB seguido de Wetlands	498,98539
UASB seguido de Filtro Aerado Submerso ou Biodisco	440,69950

Figura 10.8 - Resultado da análise final pelo método *Compromise Programming*, considerando como Contexto 1

## 10.6 FORMAÇÃO DA BASE DE DADOS

Para viabilizar a aplicação prática do aplicativo proposto, são necessários os dados que evidenciam o desempenho de todas as alternativas consideradas, segundo os vários critérios escolhidos para realizar a avaliação tecnológica.

Para a construção desse banco de dados, foram utilizados, como fontes de dados primários, os diversos relatórios parciais produzidos pelos diferentes subprojetos participantes da Rede 2 do PROSAB, além de uma série de questionários elaborados especialmente para essa finalidade, que foram distribuídos para a Rede. Após isso, foi realizado o tratamento dos dados brutos, e o resultado foi submetido a um painel de especialistas, que realizou a sua escoima e produziu a base de dados final. Deve-se salientar que a qualidade dos dados pode ser constantemente melhorada, com conseqüente aprimoramento dos resultados obtidos por meio da utilização do SAD.

Os questionários foram distribuídos para os diversos subprojetos e as informações do preenchimento desses questionários foram coletadas via Internet, facilitando o trabalho e evitando custos adicionais de obtenção dos dados das instituições integrantes da Rede 2 do PROSAB. Foram disponibilizados três tipos de questionários, que foram denominados de Questionários 1, 2 e 3.

O Questionário 1 foi utilizado para a aquisição de dados específicos de cada um dos sistemas de tratamento de águas residuárias estudados pelas instituições, para a formação de um banco de dados específico. Entre as informações adquiridas pelo Questionário 1, pode-se destacar a concentração da água residuária bruta, as eficiências de remoção, a concentração do efluente de alguns parâmetros de qualidade da água e a avaliação da alternativa pesquisada pela instituição, em relação a alguns critérios de avaliação.

A Figura 10.9 mostra a estrutura do banco de dados utilizado para armazenar as informações adquiridas pelo Questionário 1.

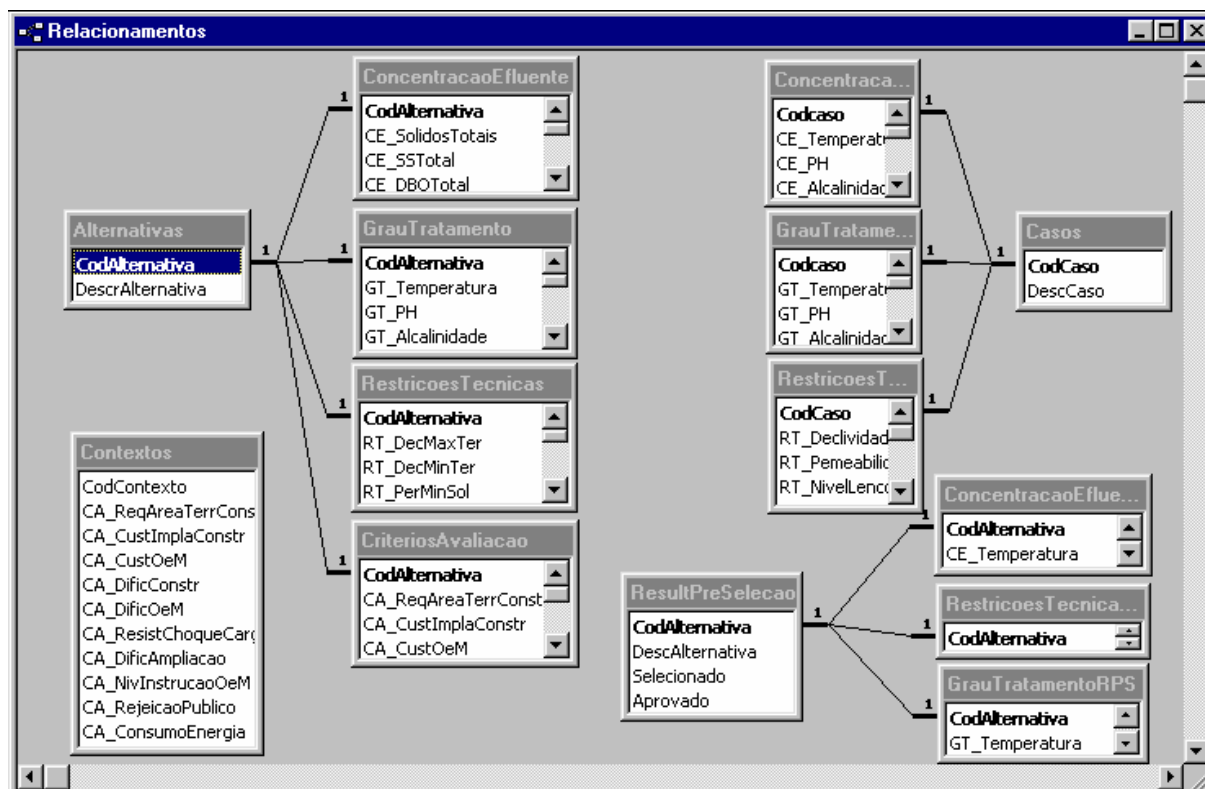


Figura 10.9 - Estrutura do banco de dados de alternativas de tratamento – Questionário 1

O Questionário 2 foi utilizado para a aquisição dos pesos, para cada um dos critérios de avaliação citados acima. Nesse questionário, cada instituição gerava um conjunto de pesos referentes a quatro contextos tecnológicos diferentes, mostrados a seguir:

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

O Questionário 2 gerou o banco de dados em que se dispõe, também, de um conjunto de pesos para cada um desses casos.

No Questionário 3, também distribuído para a Rede 2, mas incluindo entre os respondentes outros especialistas no tema, continha o resumo de todos os dados obtidos e tratados, e teve o objetivo de verificação de todos os dados obtidos e sua análise por todos os envolvidos na pesquisa.

## 10.7 EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DO APLICATIVO

### 10.7.1 Considerações preliminares

Para facilitar o entendimento do aplicativo, foi realizada a aplicação do Sistema de Apoio à Decisão (SAD) a um caso real. A cidade escolhida para esse estudo de caso foi a cidade de Santa Maria, no Distrito Federal, que é de médio porte, planejada para o assentamento de populações de baixa renda.

A cidade de Santa Maria foi escolhida para estudo pela disponibilidade de dados e pelo conhecimento das condições que existiam na época em que foi tomada a decisão para a

elaboração do projeto da sua ETE – Estação de Tratamento de Esgotos (CARNEIRO & BARBOSA, 1999; CASTRO & SANTOS, 1997).

Os dados necessários para a fase de pré-seleção de alternativas viáveis foram levantados a partir da bibliografia existente e aqueles necessários à análise tecnológica foram levantados por meio da inserção da cidade de Santa Maria em um dos quatro casos existentes no banco de dados no sistema, definidos como representativos da maioria das cidades brasileiras. As informações são condizentes à época do projeto da então futura ETE da cidade.

### **10.7.2 Caracterização do local**

As condições socio-econômicas da cidade de Santa Maria são precárias: a população possui uma baixa renda, baixo nível de escolaridade e não dispõe de infra-estrutura básica suficiente em termos de serviços urbanos.

O comércio local é basicamente representado por estabelecimentos que comercializam gêneros de primeira necessidade, algumas lojas de material de construção, bares e poucos serviços de apoio. Muitos lotes, originalmente cedidos pelo governo, estão, agora, sendo vendidos, gerando um pequeno mercado imobiliário.

A população de Santa Maria, estimada em mais de 130.000 habitantes, dispõe de apenas um posto de saúde para atendê-la. A cidade possuía, em 1999, de 7 instituições de ensino, sendo 2 CAICs – Centro de Apoio Integral à Criança – e 5 escolas de primeiro grau.

Apenas as principais vias, que dão acesso às linhas de ônibus, estão pavimentadas, e os sistemas de redes de esgotos e de drenagem de águas pluviais ainda se encontram em fase de estruturação.

Segundo CARNEIRO & BARBOSA (1999), a estação de tratamento de águas residuárias existente no local foi projetada para uma população de 212.592 habitantes.

A cidade possui topografia suave, com declividade média variando entre 0,7 e 3,3%. Nas áreas próximas ao ribeirão Alagado e ao ribeirão Santa Maria, onde foi construída a ETE, a declividade varia entre 5 e 10 %.

A temperatura média local varia em torno de 22°C e a mínima, no inverno, atinge menos de 18°C. Na região, verifica-se a presença de latossolos vermelho escuro e vermelho amarelo, caracterizados como típicos do cerrado. O estudo deste tipo de solo na região fornece valores de condutividade hidráulica igual a  $10^{-3}$  cm/min (CARNEIRO & BARBOSA, 1999).

O ribeirão Alagado e o ribeirão Santa Maria, ambos pertencentes à Bacia do rio Corumbá (sub-bacia do Paranaíba e bacia do Paraná), são utilizados pela CAESB e pela SANEAGO como mananciais de água para abastecimento público. A CAESB realiza a captação de água nas cabeceiras do ribeirão Alagado, possível corpo receptor para o efluente da ETE, onde ele ainda não é poluído. Porém, os lançamentos de esgotos da cidade-satélite do Gama e o carreamento de resíduos de toda natureza provocam uma acentuada alteração das características do ribeirão a jusante.

### **10.7.3 Características da água residuária bruta**

Como não eram conhecidas as características da água residuária local, utilizou-se a proposição de CASTRO & SANTOS (1997), que definiram as seguintes concentrações máximas dos parâmetros de qualidade da água residuária bruta para Santa Maria:

- Sólidos Totais: 810 mg/L.
- Sólidos Suspensos: 540 mg/L.
- DBO<sub>5</sub>: 540 mg/L.
- DQO: 810 mg/L.
- Nitrogênio Total: 90 mg/L.
- Nitrato: 0 mg/L.
- Fósforo Total: 11 mg/L.

Segundo CASTRO & SANTOS (1997), o número de coliformes fecais (NMP) estimado para a água residuária bruta é  $4,6 \times 10^7$  / 100 mL.

#### **10.7.4 Qualidade do efluente e grau de tratamento requeridos**

Segundo o Art. 1º da Resolução CONAMA Nº 20/86, as águas de Classe 2 são destinadas ao abastecimento doméstico após tratamento convencional, à proteção das comunidades aquáticas, à recreação de contato primário, à irrigação de hortaliças e plantas frutíferas, e à criação natural e/ou intensiva (aqüicultura) de espécies destinadas à alimentação humana. Quanto à água residuária em si, considerou-se que não havia o objetivo de reúso de água, no caso em estudo.

Os limites, para as principais características de qualidade de água, que devem ser obedecidos pelas águas de Classe 2 são:

- Turbidez: 100 UNT.
- OD: > 5 mg/L.
- DBO<sub>5</sub>: 5 mg/L.
- Fosfato Total: 0,025 mg/L.
- Nitrato: 10 mg/L.
- Coliformes fecais: 1.000/100 mL (condições satisfatórias à balneabilidade).
- Coliformes totais: 5.000/100 mL (condições satisfatórias à balneabilidade).

As características de qualidade de água analisadas nesta aplicação são DBO<sub>5</sub>, coliformes fecais, fósforo total e nitrogênio, devido à sua importância local. Segundo CASTRO & SANTOS (1997), admitindo-se, a partir de estudos e levantamentos efetuados, uma vazão máxima de esgoto de 615,30 L/s e a vazão mínima do ribeirão de 362,65 L/s, tem-se a seguinte concentração máxima de carga poluidora permissível no efluente da estação de tratamento:

- DBO<sub>5</sub>: 5 mg/L.
- Coliformes fecais: 1.000 CF/100 mL.
- Fósforo total: 0,025 mg/L.
- Nitrato + Nitrito: 17,30 mg/L.

As características do esgoto de Santa Maria não excedem os limites estabelecidos pelo Artigo 21 da Resolução CONAMA Nº 20/86, sendo que seu lançamento no corpo d'água não é restringido pela concentração dos poluentes citados nesse artigo.

O grau de tratamento necessário para as características dos esgotos estudados pode ser encontrado na Tabela 10.2, que resume os resultados da análise realizada.

Tabela 10.2 - Grau de tratamento mínimo exigido

Parâmetro	Unidade	Concentração no afluente	Concentração no efluente	Grau de tratamento (%)
DBO <sub>5</sub> (20°C)	(mg/L)	300	5	98,30
Coliformes fecais	CF/100 mL	4,6 x 10 <sup>7</sup>	1.000	99,998
Fósforo total	mg/L	6	0,025	99,58
Nitrato+Nitrito	mg/L	50	17,3	65,40

Fonte: CASTRO & SANTOS (1997)

### 10.7.5 Resultado da fase de pré-seleção (alternativas viáveis)

A Figura 10.10 mostra o formulário que indica o resultado da etapa de pré-seleção de alternativas viáveis. Como se nota nessa figura, nenhuma das alternativas de tratamento estudadas pela Rede 2 do PROSAB foi considerada viável para o caso. Isso se deve ao fato de algumas delas não disporem, ainda, de todas as informações necessárias. No entanto, para a maioria delas, a restrição se deu por incapacidade de atender as limitações impostas pela legislação vigente.

Resultado da Pré-Seleção				
Alternativa	Aprovado	GT_SolidosTotais	GT_SSTotal	
UASB seguido de Vala de Filtra	Não	NI	NI	
UASB seguido de Biofiltro Aera	Não	NI	NI	
UASB seguido de Sistema de L	Não	NI	NI	
UASB seguido de Lagoa Aerad	Não	NI	NI	
UASB seguido de Wetlands	Não	NI	NI	
UASB seguido de Flotação por	Não	NI	NI	
UASB seguido de Filtro Anaeról	Não	NI	NI	
UASB seguido de Escoamento	Não	NI	NI	
UASB seguido de Filtro Biológic	Não	NI	NI	

Legenda:  
 APR - Aprovado    Não Select - Não Selecionado  
 REP - Reprovado    NI - Não Informado

☒ Ok

Figura 10.10 - Resultado da pré-seleção para o caso de Santa Maria

A Figura 10.11 mostra o resultado da pré-seleção de alternativas por característica sendo analisada, em termos de concentrações de efluente.

Resultado da Pré-Seleção					
Alternativa	Aprovado	CE_SSTotal	CE_DBOTotal	CE_NTK	
▶ UASB seguido de Vala de Filtra	Não	APR	REP	APR	
UASB seguido de Biofiltro Aera	Não	APR	REP	REP	
UASB seguido de Sistema de L	Não	APR	REP	REP	
UASB seguido de Lagoa Aerad	Não	APR	REP	REP	
UASB seguido de Wetlands	Não	APR	REP	APR	
UASB seguido de Flotação por	Não	APR	REP	REP	
UASB seguido de Filtro Anaeró	Não	APR	REP	REP	
UASB seguido de Escoamento	Não	APR	REP	APR	
UASB seguido de Filtro Biológic	Não	APR	REP	REP	

Legenda:  
 APR - Aprovado    Não Select - Não Selecionado  
 REP - Reprovado    NI - Não Informado

Ok

Figura 10.11 - Resultado do processamento do SAD proposto ao estudo de caso, em relação ao critério “concentração do efluente”

A matriz alternativas *versus* características de qualidade dos esgotos, em termos de eficiência de tratamento, gerada pelo processamento do SAD desenvolvido para as condições do estudo de caso analisado, pode ser visualizada na Figura 10.12.

Resultado da Pré-Seleção					
Alternativa	Aprovado	GT_SSTotal	GT_DBOTotal	GT_NTK	
▶ UASB seguido de Vala de Filtra	Não	APR	REP	NI	
UASB seguido de Biofiltro Aera	Não	APR	REP	NI	
UASB seguido de Sistema de L	Não	APR	REP	NI	
UASB seguido de Lagoa Aerad	Não	APR	REP	NI	
UASB seguido de Wetlands	Não	APR	REP	NI	
UASB seguido de Flotação por	Não	APR	REP	NI	
UASB seguido de Filtro Anaeró	Não	APR	REP	NI	
UASB seguido de Escoamento	Não	APR	REP	NI	
UASB seguido de Filtro Biológic	Não	APR	REP	NI	

Legenda:  
 APR - Aprovado    Não Select - Não Selecionado  
 REP - Reprovado    NI - Não Informado

Ok

Figura 10.12 - Resultado do processamento do SAD proposto ao estudo de caso, em relação ao critério “grau de tratamento”

As alternativas foram também analisadas quanto à viabilidade em termos de restrições técnicas. Essa análise pode ser vista na Figura 10.13. Apesar de algumas das alternativas terem sido habilitadas em alguns dos critérios da pré-seleção, nenhuma delas foi considerada viável para o caso, pois, para que isso acontecesse, era necessário que a alternativa houvesse sido aprovada em todos os critérios de pré-seleção.

Resultado da Pré-Seleção				
Alternativa	Aprovado	RT_Decliv	RT_AbastEner	RT_AflorRoch
▶ UASB seguido de Vala de Filtra	Não	APR	APR	APR
UASB seguido de Biofiltro Aera	Não	APR	APR	APR
UASB seguido de Sistema de L	Não	APR	APR	APR
UASB seguido de Lagoa Aerad	Não	APR	APR	APR
UASB seguido de Wetlands	Não	APR	APR	APR
UASB seguido de Flotação por	Não	APR	APR	APR
UASB seguido de Filtro Anaeró	Não	APR	APR	APR
UASB seguido de Escoamento	Não	APR	APR	APR
UASB seguido de Filtro Biológic	Não	APR	APR	APR

Legenda:  
 APR - Aprovado    Não Select - Não Selecionado  
 REP - Reprovado    NI - Não Informado

Ok

Figura 10.13 - Resultado do processamento do SAD proposto ao estudo de caso, em relação aos critérios de restrição técnica

#### 10.7.6 Resultado da análise tecnológica global (multicritério e multiobjetivo)

Com a finalidade de realizar a análise tecnológica global, a cidade de Santa Maria foi inserida no Contexto 3 (ver item 10.6), que caracteriza um contexto tecnológico composto de sistema de médio porte em local de alto risco ambiental-epidemiológico. Foi realizada a análise tecnológica pelos métodos multicritério da Ponderação Aditiva, da Programação de Compromisso (*Compromisse Programming*) e ELECTRE III.

Foi considerado que todas as alternativas atenderiam aos requisitos do estudo de caso, mas foram desabilitadas (o SAD permite ao usuário fazer isso) algumas delas que foram consideradas inapropriadas para o porte da ETE pretendida (ou ao tamanho da população servida). As alternativas que foram desabilitadas da análise global multiobjetivo foram: Filtro anaeróbio, Escoamento subsuperficial e Vala de filtração.

O resultado dessa etapa, para o processamento com cada um dos métodos multiobjetivo selecionados, pode ser visto na Tabela 10.3.

Tabela 10.3 - Resultados finais da avaliação de desempenho das alternativas

Classificação das alternativas	Métodos de análise multicritério		
	Ponderação Aditiva	<i>Compromising Programming</i>	ELECTRE III
1 <sup>a</sup>	Lagoa polimento	Lagoa polimento	Lagoa polimento
2 <sup>a</sup>	Flotação por ar dissolvido	Filtro biológico	Filtro biológico/ Flotação por ar dissolvido
3 <sup>a</sup>	Escoamento superficial	Flotação por ar dissolvido	Terras úmidas (Wetlands)/ Escoamento superficial
4 <sup>a</sup>	Filtro biológico	Escoamento superficial	Filtro aerado submerso
5 <sup>a</sup>	Terras úmidas (Wetlands)	Terras úmidas (Wetlands)	Lagoa Aerada/ Biofiltro aerado submerso
6 <sup>a</sup>	Filtro aerado submerso	Filtro aerado submerso	Lodos ativados
7 <sup>a</sup>	Biofiltro aerado submerso	Lagoa aerada	-
8 <sup>a</sup>	Lagoa aerada	Biofiltro aerado submerso	-
9 <sup>a</sup>	Lodos ativados	Lodos ativados	-

Para o estudo de caso, verifica-se que as alternativas *Lagoa de polimento*, *Filtro biológico*, *Flotação por ar dissolvido* e *Escoamento superficial* mostram-se mais adequadas, considerando-se os três métodos utilizados. Pode-se continuar o processo de seleção refinando alguns dados de entrada, e trabalhando apenas com as alternativas que melhor se classificaram, até que se chegue a uma ordenação aceitável.

Esse resultado mostra a potencialidade de utilização do aplicativo. Com a continuação do levantamento de dados e o aperfeiçoamento do aplicativo, espera-se que esse tipo de avaliação tecnológica possa ser mais amplamente adotada.

## 10.8 BIBLIOGRAFIA

- BARBOSA, P. S. O emprego da análise multiobjetivo no gerenciamento dos recursos hídricos brasileiros. *A Água em Revista*. CPRM, Brasil, Ano V (8). 1997.
- CARNEIRO, G. A., BARBOSA, R. F. M. *Desenvolvimento de uma metodologia para a seleção de processos de tratamento de águas residuárias municipais – estudo de caso no Distrito Federal*. Monografia de Estágio Supervisionado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Brasília, DF, Brasil, 111p. 1999.
- CARNEIRO, G. A., BARBOSA, R. F. M., SOUZA, M. A. A. Uma metodologia para seleção de processos de tratamento de águas residuárias municipais e sua aplicação a um estudo de caso no Distrito Federal. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, Brasil, **5**, (1/2), 68-75. 2000.
- CASTRO, A. L. M., SANTOS, K. A. R. *Dimensionamento da ETE de Santa Maria*. Monografia de Estágio Supervisionado. Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Brasília. Brasília, DF, Brasil, 130p. 1997.
- GOBETTI, L. E. C., BARROS, M. T. L. *Análise multiobjetivo aplicada ao planejamento de sistemas de recursos hídricos*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil. 1993.
- GOICOECHEA, A., HANSEN, D. R., DUCKSTEIN, L. *Multiobjective decision analysis with engineering and business applications*. John Wiley & Sons, Chichester, Inglaterra, Reino Unido. 1982.

- ROY, B. *Méthodologie multicritère d'aide à la decision*. Economica, Paris, França. 1985.
- 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. Um modelo para seleção de processos de tratamento de águas residuárias municipais. In: *XXVI Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, AIDIS, Lima, Peru, 1-5 novembro, 98 (meio eletrônico). 1998.
- SOUZA, M.A.A., FORSTER, C. F. Metodologias para seleção de processos de tratamento de águas residuárias. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, ABES, Ano I, **2**, Abril / Junho 96, 19-31. 1996.
- TECLE, A., FOGEL, M., DUCKSTEIN, L. Multicriterion selection of wastewater management alternatives. *Journal of Water Resources Planning and Management Division. Proceedings of ASCE*, **114** (4), 383-398. 1988.
- VINCKE, P. *Multicriteria decision-aid*. John Wiley & Sons, Chichester, Inglaterra, Reino Unido. 1982.
- ZELENY, M. *Multiple criteria decision making*. University of South Carolina Press, Columbia, Estados Unidos. 1973.