

# SOBRE O DESIGN DE UM SISTEMA DE SUPORTE À DECISÃO PARA ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Waldir Roque<sup>1</sup>; Paulo Salles<sup>2</sup>; Peter Struss<sup>3</sup> & Ulrich Heller<sup>4</sup>

**Resumo** - Neste artigo apresentamos uma aplicação da tecnologia de sistemas baseados em modelos, dentro do escopo de um sistema de suporte à decisão, aplicado para estações de tratamento de água. Este sistema visa detectar desvios relativos a operação normal da estação, identificando as suas possíveis causas e propondo intervenções adequadas para remediá-las. A fundamentação está na construção de uma biblioteca de fragmentos de modelos que representem processos, distúrbios e intervenções. Com base nesses fragmentos e observações disponíveis, modelos do comportamento de distúrbios da estação são gerados automaticamente, como uma solução da tarefa de diagnóstico. Extensões de tais modelos, de tal modo que os resultados sejam consistentes com os objetivos de correção, representam possíveis propostas de terapia. A exploração interativa dos algoritmos de resolução de problemas de uma estação, requer a determinação de mapas entre visões sobre a operação da estação e a representação e procedimentos de resolução de problemas com base em modelos. Isto não é uma tarefa fácil, pois não podemos assumir que o operador esteja familiarizado com as bibliotecas do modelo e, mesmo que este esteja, o processo automático de construção não é transparente para eles. Apresentamos aqui a especificação e design do sistema de suporte à decisão e a interação deste com o usuário.

**Abstract** - The paper presents the application of model-based systems technology within a decision support system for drinking water treatment plants. This system aims at detecting deviations from normal plant operation, identifying their possible causes, and proposing adequate remedial interventions. Its basis is a library of model fragments that represent intended processes, disturbances, and possible interventions. Based on these fragments and the available observations,

---

<sup>1</sup> Instituto de Matemática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 91509-900, Porto Alegre – RS, Brasil. Tel. (051) 3316.6202, Fax. (051) 3316.7301. Email: roque@mat.ufrgs.br

<sup>2</sup> Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, psalles@unb.br

<sup>3</sup> Department of Computer Science, Technical University of Munich, Munich, Germany, [struss@in.tum.de](mailto:struss@in.tum.de)

possible models of the disturbed plant behavior are generated automatically as a solution to the diagnostic task. An extension of such a model by models of interventions such that the result is consistent with remedial goals represents a possible therapy proposal. Exploiting the respective basic problem solving algorithms in an interactive decision support system for plant operators requires finding a mapping between their views on the plant operation and the representations and procedures of the model-based problem solver. This is not straightforward, because we cannot assume that the operator is familiar with the model library and because even if this were the case, the automated process of model construction is not transparent to him. We present a specification of the decision support system, the interaction between the user and the system.

**Palavras-chave** - Sistema de Suporte à Decisão, Diagnóstico Baseado em Modelos, Raciocínio Qualitativo, Inteligência Artificial, Tratamento de Água.

## INTRODUÇÃO

Sistemas de conhecimento com base em modelos fornecem meios para tornar disponíveis o conhecimento de especialistas para leigos ou para especialistas com pouco conhecimento sobre o domínio específico. Esta qualidade é de interesse particular no domínio de ecologia e de meio ambiente, pois cada indivíduo, instituição ou empresa afeta o ambiente (freqüentemente de uma forma destrutiva), mas não esperamos que estes possuam um conhecimento próprio do impacto dos problemas e dos métodos para preveni-los ou corrigi-los. Sistemas de suporte a decisão para o meio ambiente devem capturar o conhecimento de especialistas nas áreas de ecologia e/ou meio ambiente e facilitar o acesso de usuários à informação sobre problemas específicos, gerando respostas e soluções baseadas nestas informações, no domínio de conhecimento e na apresentação dessas de forma compreensiva.

Escolhemos sistemas com base em modelos para atacar essa tarefa ambiciosa. Algumas suposições fundamentais de nosso trabalho são:

- O domínio de conhecimento pode ser representado por um conjunto genérico, independente e, portanto, reutilizável de fragmentos de modelos (processos) que descrevem fenômenos relevantes e que são agrupados em uma biblioteca (teoria do domínio).
- O usuário enfrenta dois tipos distintos de tarefas: acesso à situação (compreender sobre *o que se passa?*) e proposta de terapias (*o que pode ser feito?*).

---

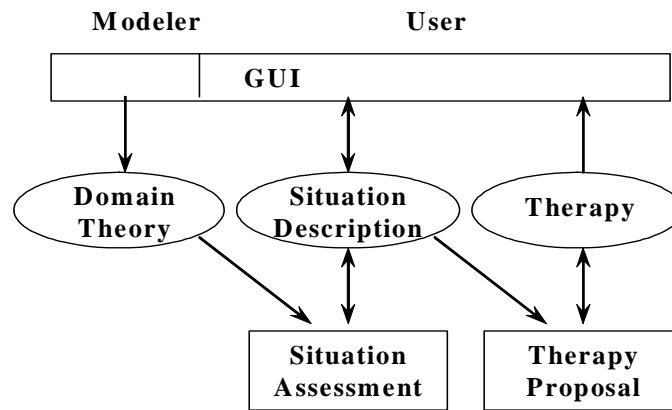
<sup>4</sup> ESG GmbH, Einsteinstr 174, Munich, Germany, uheller@esg.de

- Uma resposta apropriada para o acesso à situação é dada por um modelo que pode ser composto a partir da biblioteca e explicar parcialmente a informação sobre a situação que esta disponível para o usuário, e similarmente,
- Uma terapia adequada pode ser encontrada por uma extensão do modelo da situação por possíveis ações que satisfaçam um conjunto de objetivos de comportamento.

A Figura 1 ilustra a arquitetura que segue a partir destas suposições. A base de nossa solução é uma integração inovadora de teorias lógicas e implementações de modelos orientados por processos ([Forbus 84]) e diagnóstico com base em modelos ([de Kleer-Mackworth-Reiter 92], [Dressler-Struss 96]). Neste artigo não iremos retomar as considerações sobre os conceitos teóricos e técnicos formais já expostos com certo detalhe em ([Heller-Struss 98], [Struss-Heller 01] e [Heller 01]), mas apenas resumir os conceitos e focalizar a discussão de como um sistema de suporte à decisão pode ser baseado nesses.

O contexto da aplicação do nosso trabalho é uma estação de tratamento de água. Embora este não seja um sistema ecológico natural, o mesmo parece um bom começo para tais aplicações. De um lado, compreende processos físicos, químicos e biológicos contendo apenas um conhecimento parcial e qualitativo das informações disponíveis, como ocorre em muitos sistemas ecológicos. Por outro lado, possui uma estrutura fixa e um conjunto limitado de fenômenos relevantes que torna-o um bom alvo para uma primeira tentativa. Além do mais, é possível validar e avaliar o sistema de suporte à decisão com operadores em estações reais, havendo uma suave transição para fenômenos ecológicos e ambientais reais pela inclusão de problemas que afetem a fonte natural de reserva do corpo de água (por exemplo, na presença de explosões de crescimento de algas, como proposto em [Struss-Heller 01]).

Na próxima seção descrevemos os principais aspectos dos processos de tratamento de água, acentuando os potenciais problemas e como remediá-los. Na seção 3, o formalismo de modelagem será resumido e ilustrado com exemplos da teoria do domínio relativo ao tratamento de água. Na seção 4 apresentamos resumidamente o formalismo do diagnóstico com base em modelos. Baseados nisso, apresentaremos nas seções 5 e 6 os componentes do acesso a situações e das propostas de terapias. A seção 7 é dedicada a comentários e conclusões.



**Figura 1:** Arquitetura do Sistema de Suporte à Decisão

## O PROCESSO DE TRATAMENTO

A água a ser tratada, em nosso domínio de aplicação, é coletada a partir de fontes naturais como de um rio (Rio Guaíba em Porto Alegre) ou de um reservatório (como a Lomba do Sabão, em Porto Alegre). Após o bombeamento da água para a estação de tratamento, a mesma passa por uma seqüência de processos, os quais serão explicados em algum detalhe a seguir.

*Tanque de entrada* → *Canal de entrada* → *Chincana* → *Tanque de decantação* →  
*Canal de água decantada* → *Filtros* → *Canal de água filtrada* → *Reservatório*

### **Tanque de entrada:**

- *Função:* reduzir a quantidade de algas e moluscos. A coloração (verde ou marrom) indica a presença de algas. Para remediar, é adicionado um agente oxidante (sulfato de cobre, carbono ativado ou ozônio).
- *Possíveis problemas:* A coloração permanece verde ou marrom, devido à presença de algas
- *Terapia:* Aumentar a quantidade do agente oxidante ou modificar o agente oxidante

### **Canal de entrada:**

- *Função:* Pré-cloração e pré-alcalinização. Se a alcalinidade for  $\leq 19$  e se o  $\text{pH} \leq 6,5$ , as ações são aplicadas de modo que a alcalinidade alcance  $\geq 20$  e o  $6,5 \leq \text{pH} \leq 7$ . Se necessário, primeiramente cloro é adicionado ao sistema para reagir com o material orgânico e remove-los.
- *Possíveis problemas:* Se houver muito material orgânico (sólido ou dissolvido), muito cloro terá de ser adicionado, resultando em um super decréscimo do pH. Quando este está abaixo de 6, algumas substâncias indesejadas (tricloraminas) podem aparecer.

- *Terapia:* É necessário aumentar o valor do pH. Isto pode ser obtido utilizando  $\text{CaCO}_3$  a fim de aumentar o pH para o intervalo desejado (entre 6 – 6,5), o que é necessário para que o Sulfato de Alumínio reaja (veja o próximo passo). Se tricloramina é formada, esta deverá ser removida por meio do sulfato de alumínio (o que pode outra vez fazer decrescer o pH).
- *Possíveis problemas:* A reação pode não ser efetiva e ocorrer uma alta concentração de  $\text{NH}_3$ . Como consequência, mais cloraminas irão surgir.
- *Terapia:* Modifique o agente oxidante (ao invés de cloro, troque para  $\text{ClO}_2$  ou  $\text{O}_3$ ) ou deixe a remoção para o próximo passo.
- *Possíveis problemas:* Se não houver oxigênio na água, o processo de decomposição (aeróbica) não poderá ocorrer. Naturalmente, bactérias anaeróbicas (e fungos) podem continuar o processo. No entanto, esta decomposição anaeróbica é muito ácida. Isto irá reduzir o pH ainda mais e, considerando que há cloro, a concentração de cloraminas irá crescer.
- *Terapia:* Modifique o agente oxidante (ao invés de cloro, use  $\text{ClO}_2$  ou  $\text{O}_3$ ) ou deixe a remoção para o próximo passo.
- *Possíveis problemas:* Depois de adicionar cloro, há ainda matéria orgânica na água porque o cloro reage com sais (outros compostos oxidantes, provenientes da agricultura, indústria, esgoto, material trazido pelas chuvas).
- *Terapia:* Modifique o agente oxidante (ao invés de cloro, use  $\text{ClO}_2$  ou  $\text{O}_3$ ) ou deixe a remoção para o próximo passo
- *Possíveis problemas:* Após a adição de  $\text{CaCO}_3$  (pré-alcalinização), o pH pode não aumentar em virtude do  $\text{CaCO}_3$  estar reagindo com outras substâncias ou a presença de outra reação produzindo mais  $\text{H}^+$ , e a concentração de  $\text{CaCO}_3$  não é alta o suficiente para removê-los.
- *Terapia:* Aumente a dose de  $\text{CaCO}_3$ . Outra terapia possível é utilizar  $\text{NaOH}$  ao invés de  $\text{CaCO}_3$  (o que pode trazer consigo componentes metálicos que irão contaminar a água).

### **Chincana:**

- *Função:* Aqui a água passa por três processos: reação com o sulfato de alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), mexer a água e coagulação. Os objetivos são a remoção de substâncias dissolvidas ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$  etc) e substâncias sólidas não dissolvidas (algas, material orgânico, solo, sais etc).  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  dissocia-se na água produzindo cargas positivas ( $\text{Al}^{+++}$ ) e cargas negativas ( $\text{SO}_4^{--}$ ), que atraem outras cargas opostas de substâncias dissolvidas e não dissolvidas para formar flocos. A água é mexida a fim de criar flocos maiores, pela aglutinação de dos flocos menores), o que é obtido através de quedas e curvas com

obstáculos no tanque. Então, a probabilidade de contato de moléculas com diferentes cargas aumenta, resultando em um acréscimo no tamanho dos flocos.

- *Possíveis problemas:* As substâncias não são reduzidas
- *Terapia:* Aumente a dose de sulfato de alumínio.
- *Possíveis problemas:* Mesmo aumentando a dose de sulfato de alumínio as substâncias não são reduzidas em virtude do pH não estar adequado (este não estava correto no passo anterior).
- *Terapia:* Aumente a dose de sulfato de alumínio para reduzir o pH (se o pH estiver acima do nível necessário), ou aumente a dose de  $\text{CaCO}_3$  no passo anterior para aumentar o pH.
- *Possíveis problemas:* Pode acontecer que a chincana fique bloqueada por material contido na água ou por animais vivos (moluscos).
- *Terapia:* Remova o material
- *Possíveis problemas:* Flocos não são criados por que o pH não é adequado
- *Terapia:* Aumente a dose de sulfato de alumínio para reduzir o pH (se o pH estiver acima do nível desejado), ou aumente a dose de  $\text{CaCO}_3$  no passo anterior para aumentar o pH.

#### ***Tanque de decantação:***

- *Função:* Separação entre fases sólidas e líquidas, isto é, flocos e água. A água flui a baixa velocidade através de tanques. Durante este período, os flocos submergem para o fundo do tanque formando uma camada. Ao final deste passo, a coloração e a turbidez da água são medidas.
- *Possíveis problemas:* Enorme camada de flocos no final (o que causará problemas para o próximo passo) em virtude da alta acumulação de flocos e outros materiais no fundo do tanque.
- *Terapia:* Remoção do lodo do fundo do tanque
- *Possíveis problemas:* Uma camada de gordura/óleo aparece na superfície da água em virtude da não detecção de poluentes na água.
- *Terapia:* Remoção da gordura/óleo da superfície.
- *Possíveis problemas:* A coloração da água está fora dos padrões de operação da estação, mas indicando a presença de sais e outras substâncias dissolvidas na água.
- *Terapia:* Aumente a quantidade de sulfato de alumínio no passo anterior.
- *Possíveis problemas:* Após o aumento da dose de sulfato de alumínio, a coloração está ainda acima do nível.

- *Terapia:* Se possível, adote um tratamento terciário (com a utilização de carbono ativado ou ozônio). Se a estação de tratamento não tiver tratamento terciário, então pare a distribuição de água e espere.

#### ***Canal de água decantada:***

- *Função:* Cloro é adicionado à água novamente (intercloração) a fim de garantir a oxidação de qualquer matéria orgânica que não tenha sido removida e para deixar cloro livre na água. Este cloro livre irá matar as bactérias que ainda podem estar presentes na água.
- *Possíveis problemas:* O cloro pode reduzir demasiadamente o pH, resultando em uma possível reação com matéria orgânica gerando tricloraminas.
- *Terapia:* Alcalinização no canal pela adição de  $\text{CaCO}_3$ . Isto cria o risco do  $\text{CaCO}_3$  permanecer na água, gerando problemas na próxima etapa de filtragem.

#### ***Filtros:***

- *Função:* Durante esta etapa, pequenos flocos que não foram removidos e, talvez, algas e bactérias (micro organismos) são retidos nas camadas de areia. O objetivo é remover o material e, então, reduzir a coloração e a turbidez. Quando a água sai dos filtros, esta deve estar dentro das normas legais brasileiras.
- *Possíveis problemas:* Os filtros não estão sendo efetivos devido ao acúmulo de muitos flocos e organismos.
- *Terapia:* Direcione a água para filtros diferentes e limpe os filtros sujos ou troque a areia.

#### ***Canal de água filtrada:***

- *Função:* Os ajustes finais na qualidade da água são realizados. Medidas de alcalinidade, pH, coloração, turbidez e concentração de cloro livre são efetuadas na saída dos filtros.
- *Possíveis problemas:* pH muito baixo.
- *Terapia:* Alcalinização até alcançar um pH entre 6.0 – 6,5.
- *Possíveis problemas:* A concentração de cloro livre é muito baixa.
- *Terapia:* Adicionar cloro até a concentração ficar entre 1,3 e 3,0 ppm.
- *Possíveis problemas:* Coloração e/ou turbidez não estão dentro dos padrões legais.
- *Terapia:* Tratamento terciário com a finalidade de remover substâncias dissolvidas e modificar a coloração, e as substâncias não dissolvidas para modificar a turbidez.

#### ***Reservatório:***

- *Função*: A água tratada é enviada para um reservatório e em seguida é enviada para a rede de distribuição.

## MODELAGEM

No que segue, apresentamos resumidamente o formalismo de modelagem que prover os fundamentos do sistema de suporte à decisão e ilustramos o mesmo com alguns exemplos relativos a estação de tratamento de água. De acordo com o método de modelagem composicional, isto é dividido em duas partes:

- A teoria do domínio, que representa o conhecimento geral em termos de axiomas matemáticos, e a biblioteca dos tipos de constituintes de comportamento.
- Uma descrição da situação capturando a informação sobre um sistema específico em um estado específico identificado em termos de objetos observáveis, suas interrelações e valores das variáveis dos objetos (por exemplo, medidas). Veja Tabela 2.

Seguimos o princípio de raciocínio tipo estrutura-para-comportamento, modelagem composicional [Falkenhainer – Forbus 91] e fazemos uma generalização de ambos os paradigmas: modelagem baseada em componentes e modelagem baseada em processos. De acordo com essa visão, o modelo do sistema consiste de duas partes: a teoria do domínio e a descrição da situação.

### Teoria do domínio

A Teoria do Domínio captura o que conhecemos sobre o domínio, i.e., todos os sistemas de uma certa classe (ex. ecossistemas hidrológicos ou estações de tratamento de água). Distinguimos *elementos estruturais* (objetos e relações) de *constituintes de comportamento* (os quais podem ser processos e outros fragmentos de modelos). A ontologia consiste de:

- *Tipos de objetos*, que ocorrem em descrições estruturais, por exemplo tipos de componentes de um dispositivo (resistor, fio quebrado), entidades espacialmente distintas (camadas em um corpo de água, tubulações, tanques), etc. Tipos de objetos podem ser estruturados hierarquicamente.
- *Relações*, para caracterizar configurações de objetos. Exemplos são relações espaciais (contido-em, abaixo), conectividade de componentes, etc. Algumas propriedades importantes de relações, como unicidade, podem ser especificadas.
- *Quantidades*, são os elementos básicos dos descritores de comportamento. Múltiplos tipos de quantidades (ex. com diferente domínios) podem ser definidos e objetos de um certo tipo



pode ser fornecido com um número de quantidades associadas a objetivos específicos (ex. a resistência de um resistor, a concentração de ferro dissolvido em um tanque de água etc.).

<i>Teoria do Domínio</i>
<i>Ontologia</i>
<i>Tipos de objetos (hierarquicos)</i>
<i>Relação de objetos</i>
<i>Tipos de quantidades</i>
<i>Tipos de Constituintes de Comportamento</i>
<i>Condições estruturais (objetos e relações presentes)</i>
<i>Condições quantificadoras (vínculos sobre quantidades)</i>
<i>Efeitos dos quantificadores (vínculos e influências)</i>
<i>Axiomas Básicos</i>
<i>Descrição da Situação</i>
<i>Objetos</i>
<i>Túplas de relações</i>
<i>Especificação de valores quantitativos</i>

**Tabela 2.** Estrutura dos Modelos de Sistemas

A Figura 2 mostra parte da hierarquia de objetos da teoria do domínio de tratamento de água. Alguns objetos (tais como tanques de água) servem como *localizadores espaciais*, i.e, definem univocamente o local de outros objetos (ex., substâncias). A Figura 3 exhibe algumas relações e suas propriedades.

A teoria do domínio deve, também, prover um vocabulário de descritores de comportamento e as interfaces que derivam os constituintes comportamentais dos descritores estruturais. Introduzem-se,

- *Tipos de constituintes de comportamento*: Estes são fenômenos físicos que contribuem para o comportamento do sistema como um todo. Eles podem representar componentes básicos de leis (Lei de Ohm, Ou-Lógico) ou processos como na Teoria de Processos Qualitativos (QPT [Forbus, 84]). Exemplos são a alcalinização, transporte da água ou crescimento de algas. Estes ocorrem deterministicamente sob certas condições e suas ocorrências geram efeitos particulares. Aplicando a distinção entre aspectos estruturais e quantitativos à ambos condições e efeitos, obtemos:
  - *StructuralConditions*: assertivas sobre a existência de relações e objetos (ex. sedimentos de ferro)
  - *QuantityConditions*: assertivas sobre os valores das quantidades (ex. um baixo pH no reservatório)
  - *StructuralEffects*: criação ou mesmo possível eliminação de objetos e relações (ex. a geração de ferro dissolvido a partir do sedimento)

QuantityEffects: podem ser expressos como restrições às variáveis (ex. a concentração de ferro dissolvido cresce com a concentração de sedimentos de ferro e diminui o pH). Aqui nós também permitimos efeitos especificados parcialmente na forma de influências conforme na QPT.

A forma abstrata dos tipos de constituintes de comportamento pode ser escrita como:

$$\text{StructuralConditions} \wedge \text{QuantityConditions} \Rightarrow \text{Structuraleffects} \wedge \text{QuantityEffects}$$

Mais precisamente, para cada constelação de objetos satisfazendo as condições estruturais e quantitativas, uma instância do constituinte de comportamento ocorre, e impõe os respectivos efeitos sobre a constelação. Figura 4 mostra um processo em uma notação gráfica e lógica.

Além disso, incluímos uma seção para as leis fundamentais que determinam os mecanismos de formação de modelos, como combinam-se influências e de predição temporal (continuidade, integração, etc). Estes “axiomas básicos” não podem ser especificados arbitrariamente pelo modelador, mas sim representam as leis independentes do domínio como as dos constituintes de comportamento mencionada anteriormente. Nesse ponto, quase não temos compromisso com respeito aos quantificadores de domínio (simbólicos, qualitativos, reais, etc), o formalismo para especificação dos efeitos quantitativos (vínculos, equações diferenciais, etc) e a expressividade das condições e efeitos estruturais (ex. não existência de certos objetos como condições ou destruição de objetos como efeitos estruturais). Em geral, assumimos que condições e efeitos são locais e composicionais.

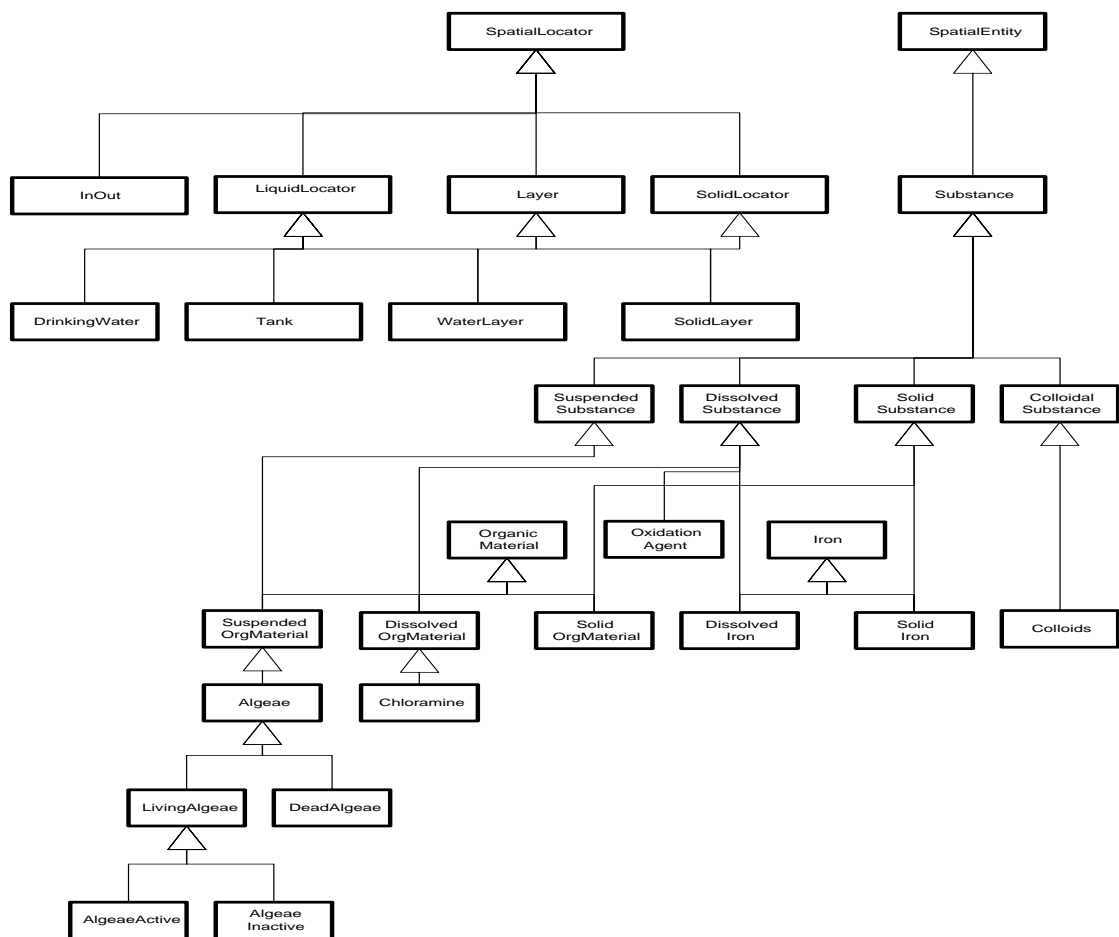


Figura 2. Parte da hierarquia de objetos no tratamento de água.

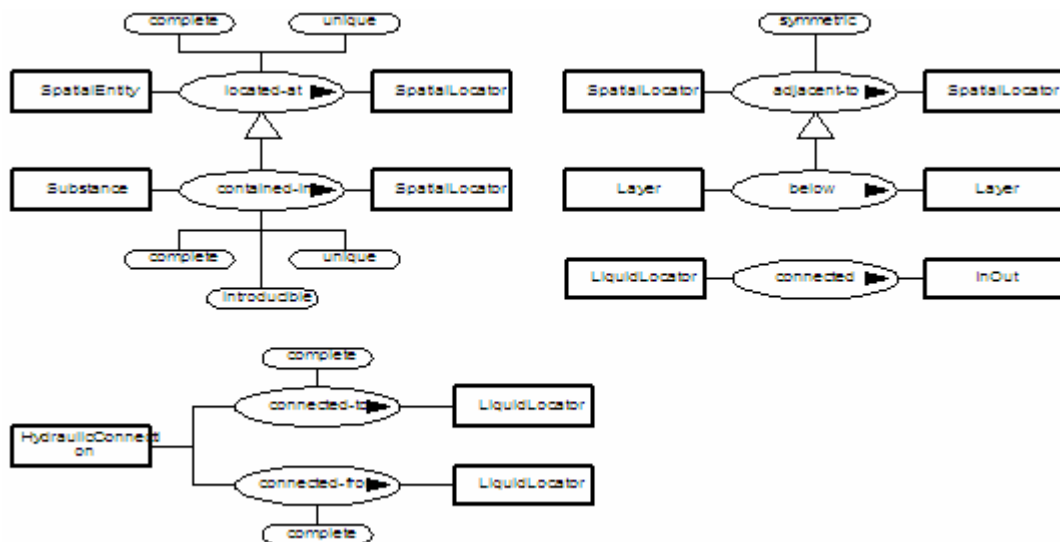


Figura 3. Relações entre objetos

### Descrição da situação

Um sistema particular em consideração é caracterizado por sua *estrutura de objetos*, i.e. instâncias dos tipos de objetos e túplas individuais das relações dos objetos (por exemplo, as

componentes e as estruturas de conexão de um dispositivo). No que segue, iremos nos referir a objetos e túplas de relações como elementos estruturais. Uma situação particular do sistema é caracterizada por *especificações de valores quantitativos*. Dependendo da tarefa e do contexto elas podem representar medidas reais (ex.. um acréscimo na quantidade de ferro na água potável), especificação de metas (uma certa quantidade de ferro) ou meramente hipóteses, etc.

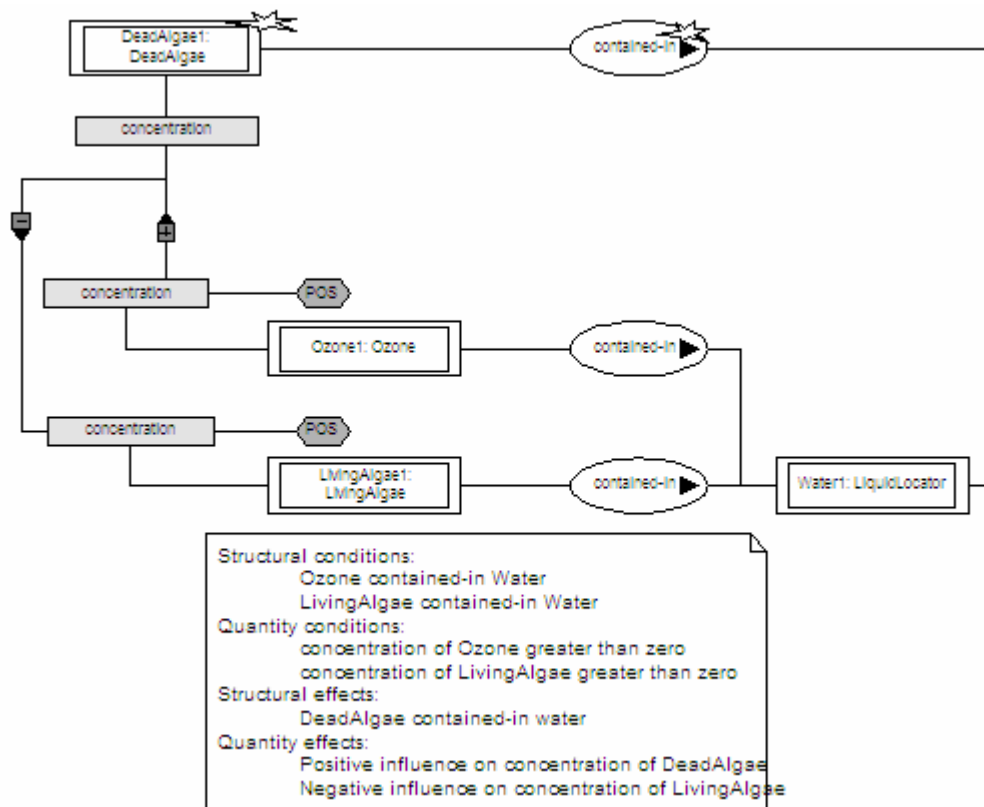
### **Representando ações**

Para a tarefa de propor terapias, nós precisamos representar ações que afetem o comportamento do sistema. Estes efeitos são aqueles introduzidos anteriormente: a criação de objetos e/ou relações entre objetos, e impor influências e vínculos sobre as quantidades. Ações podem ter certas precondições físicas para as suas aplicabilidades, que podem ser especificadas em termos de condições estruturais ou condições quantitativas. No entanto, diferentemente de processos ordinários, elas não tornam-se automaticamente ativas quando essas precondições físicas são satisfeitas. Elas possuem uma precondição adicional para tornarem-se efetivas: alguma intervenção humana. Tais intervenções podem ser uma seqüência inteira de atividades humanas (ex. encher um tanque com alguma substância, conectá-lo a um cano e abrir uma válvula), que deve ser levada em consideração quando planejando o trabalho ou estimando o seu custo. Porém, do ponto de vista do raciocínio sobre terapias adequadas, é suficiente considerá-las como entidades atômicas (isoladas). Assim, uma maneira fácil de integrar as ações no formalismo de modelagem é representar as intervenções humanas como um tipo especial de objeto, chamado de *ações gatilho*, cuja existência é uma condição estrutural das respectivas ações.

Como as ações gatilho dependem apenas da decisão e das respectivas atividades humanas, elas não podem nunca aparecer como efeitos estruturais de processos ou de outras ações. Além do mais, devemos nos assegurar que diferentes instâncias de ações devem ter diferentes objetos como ações gatilho, mesmo se estas são instâncias do mesmo tipo de ação. Por outro lado, várias instâncias de um tipo de ação pode ser ativado pelo mesmo objeto. Uma forma de se conseguir isto no contexto do nosso formalismo de modelagem sem a adição de novos conceitos é garantir que ações gatilho tenham uma localização que seja unívoca à todas as instâncias de um tipo de ação. Por exemplo, se um tanque tem várias conexões com outros tanques, a ativação do gatilho *open\_connection* deve ser especificada para cada abertura ao invés de apenas para o tanque, já que neste caso a abertura de uma conexão deveria também ativar a abertura de todas as outras.

### **Modelo de desvios**

Em muitas ocasiões, não é relevante para o acesso à situação ou à proposta de terapia considerar-se o valor absoluto das quantidades. Pelo contrário, pode ser suficiente raciocinar-se em termos de desvios (quantitativos) a partir apenas de uma valor nominal. Por exemplo, estes podem ser usados para expressar que o suprimento de cloro acima do normal tende a diminuir o pH para fora do seu intervalo.



**Figura 4.** Processo de eliminação de algas por ozonização.

A descrição de desvios pode refletir fatos que podem não ser necessários ou impossíveis de especificar o comportamento normal de forma exata ou numérica. Para cada variável, o desvio pode ser representado da forma:

$$\Delta X := X_{\text{atual}} - X_{\text{ref}}$$

Os modelos de desvios podem ser gerados a partir dos modelos absolutos com a propagação de comportamentos normais ou de referência (que podem ser deixados sem especificação). Na fase de acesso à situação, podemos iniciar com o desvio do estado final, que é indicado por medidas, e tentarmos encontrar desvios de outras quantidades que causem o desvio da inicial.

## MÉTODO DE DIAGNÓSTICO BASEADO EM CONSISTÊNCIA

O desenvolvimento e melhoria da técnica de diagnóstico baseada em consistência é um campo de pesquisa bastante ativo, o qual se beneficiou dos fundamentos lógicos encontrados em ([Reiter 87]) e outros ([Hamscher et al. 92]). A nossa breve introdução aqui segue o trabalho de ([Dressler-Struss 96]).

Partindo-se da descrição de um sistema - **SD** (funcionando corretamente), o sistema de diagnóstico pode fazer previsões (em termos de valores das variáveis, dada uma certa situação). Se alguma destas previsões contradiz observações reais - **OBS**, o sistema é dito como contendo alguma falha. Adicionalmente, são gravadas todas as suposições sobre os componentes que estão funcionando corretamente quando a previsão é realizada. Para cada modelo de componente,  $C_i$ , dentro de um conjunto de componentes, **COMPS**, contribuindo para a predição, uma hipótese da forma  $ok(C_i)$  é introduzida. Um sistema válido de manutenção baseado em hipóteses (ATMS, ([de Kleer 86])) pode ser empregado para calcular o conjunto mínimo de hipóteses necessárias para assegurar um certo valor de uma variável. Se uma contradição ocorrer, esta estará também sustentada por um ou mais conjuntos mínimos de tais hipóteses. Chamaremos estes conjuntos de *conflitos*. Formalmente temos,

$$SD \cup OBS \cup \{ok(C_i) : C_i \in COMPS\} \vdash \perp$$

Claramente, nem todos os componentes,  $C_i$ , incluídos no conflito podem estar funcionando corretamente. Portanto, um conjunto de candidatos a diagnóstico é gerado a partir do conjunto de conflitos obtidos pela identificação de conjuntos de componentes cobrindo todos estes conflitos. Os "conjuntos bingo" são candidatos para representar o sistema real de falhas. Note que o caso mais simples é aquele em que um único componente ocorre em todos os conflitos, porém o algoritmo funciona igualmente bem para o caso de falhas múltiplas.

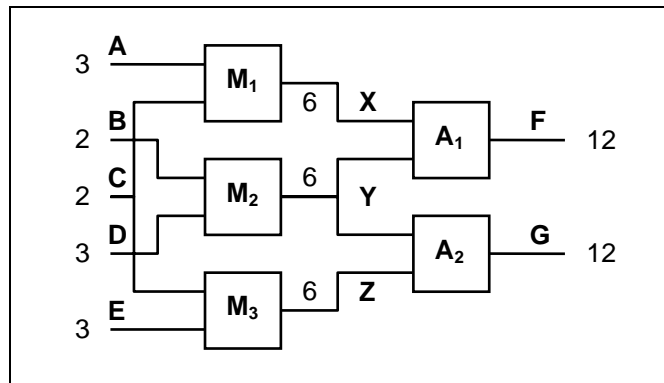
Podemos ver que quando todos os componentes estão funcionando corretamente, temos um caso especial do nosso modelo inicial do dispositivo,

$$SD \cup \{ok(C_i) : C_i \in COMPS\}$$

O modelo revisado contém novas hipóteses sobre o "modo" em que um componente individual se encontra. Isto pode ser uma hipótese mais fraca ( $\neg ok(C_i)$ , não permitindo qualquer predição) ou uma hipótese de algum modo potencial de falha ( $mode_i(C_i)$ ), para o qual existe um "modelo de falha", que deve ser consistente com as observações:

$$SD \cup OBS \cup \{mode_i(C_i) : C_i \in COMPS\} \not\vdash \perp$$

Utilizando um exemplo simples de um circuito contendo multiplicadores ( $M_i$ ) e endereços ( $A_j$ ) (ver Figura 5), este mecanismo de raciocínio pode ser demonstrado:



**Figure 5:** Exemplo de um circuito.

Assumindo a entrada  $A=3$ ,  $B=2$ ,  $C=2$ ,  $D=3$  e  $E=3$ , propagação pode ser usada para prever as saídas  $F=12$  e  $G=12$ . O ATMS calcula que, por exemplo,  $F=12$  depende de

$$\{ok(A_1), ok(M_1), ok(M_2)\}.$$

Se agora medirmos  $F=10$  e  $G=12$  e entrarmos estes valores como fatos, então

$$\{ok(A_1), ok(M_1), ok(M_2)\}$$

é um conflito, da mesma forma que

$$\{ok(A_1), ok(A_2), ok(M_1), ok(M_3)\}.$$

Este conjunto de hipóteses está envolvido no cálculo quando  $G=10$  com  $Z=6$  e  $Y = F - X = 10 - 6 = 4$ . Logo, os candidatos minimais são (cada um explica ambos os conflitos):

$$\{ok(A_1)\}, \{ok(M_1)\}, \{ok(A_2), ok(M_2)\}, \{ok(M_2), ok(M_3)\}.$$

Como pode ser facilmente visto, a partir do conjunto COMPS e da forma do método, isto está particularmente alinhado para o diagnóstico de componentes. Essa técnica tem sido empregada com muito sucesso em diversos projetos cooperativos com a indústria pelo grupo MQM da Universidade Técnica de Munique, liderado pelo Prof. P. Struss.

Embora o exemplo acima tenha sido para diagnóstico com base em componentes, a técnica foi generalizada com a finalidade de abranger modelos mais ricos, particularmente, no domínio de sistemas ecológicos e meio ambiente, nos quais o diagnóstico baseado em consistência de processos vem se mostrando bastante promissor ([Heller-Struss, 98], [Heller-Struss 02]).

## COMPONENTES DE ACESSO A SITUAÇÕES

Como mencionado anteriormente, a primeira tarefa a ser resolvida é determinar as hipóteses sobre a situação atual com base nas informações disponíveis sobre o sistema, em outras palavras,

observações. Se as observações são assertivas verdadeiras sobre todos os objetos relevantes envolvidos no sistema, o acesso à situação apenas terá que determinar os processos ativos decorrentes dessas observações. Em geral, as observações são incompletas e podem conter informações imprecisas. Por exemplo, se a concentração de ferro recebida na água não é medida, então a assertiva sobre o ferro ou está faltando ou é apenas uma suposição (ex. um valor default da concentração). Neste caso, o acesso à situação deverá completar a descrição provida pelo usuário (ex. assumindo hipoteticamente a existência de ferro) e/ou revisar informações incompletas (ex. a concentração default). Portanto, permitimos que as hipóteses definidas pelo usuário qualifiquem as assertivas quantitativas. Hipóteses também podem ser utilizadas para a existência de elementos estruturais.

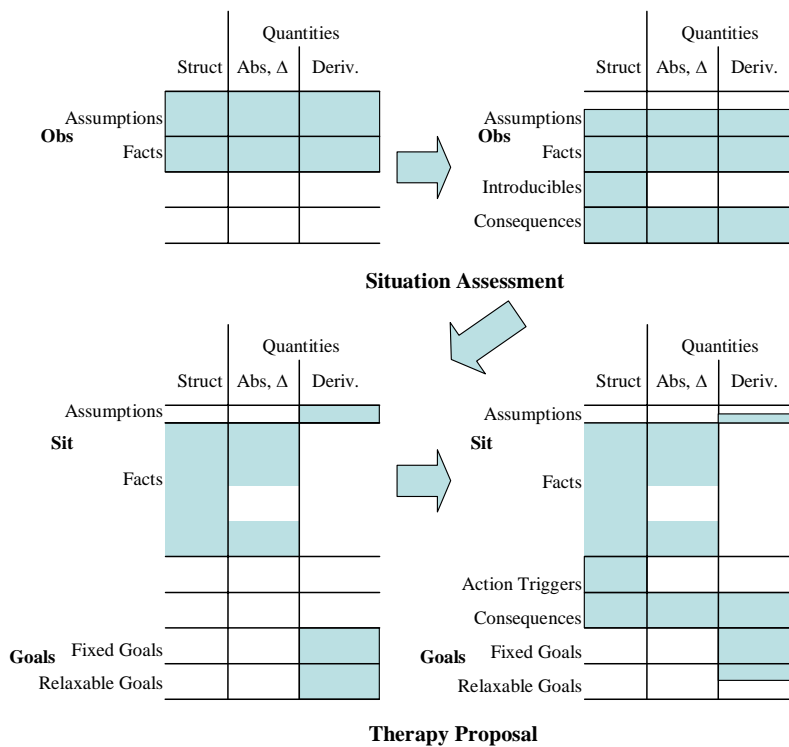
A composição da descrição da situação não pode ser arbitrária. Alguns objetos podem simplesmente ser “introduzidos” sem qualquer explicação adicional, como a presença de ferro na água, enquanto outros só serão aceitos se eles seguirem o restante do modelo, como no caso do ferro na água tratada. Neste sentido, certos tipos de objetos podem ser chamados de *introduzíveis* para permitir a adição de objetos de tipos semelhantes ao modelo do sistema. Isto leva à mais importante forma para o problema de controle de resolução de tarefas, já que um conjunto mais restrito de introduzíveis requer o “aprofundamento” da busca por causas. Introduzíveis especificam que não se pode esperar uma explicação e, portanto, representam modelos de fronteiras. Por exemplo, podemos aceitar que o ferro esteja presente na água recebida sem qualquer justificativa, em contraste o ferro presente em um dos tanques de tratamento e a sua concentração tem que ser uma consequência da ação de outros processos.

Podemos agora definir o conjunto de soluções aceitáveis para o acesso à situação como a *estrutura mínima consistente aceitável para a qual um conjunto máximo de hipóteses definidas pelo usuário é válido*. Uma estrutura é definida como *aceitável* se esta contém pelo menos os elementos estruturais especificados pelo usuário como fatos (sem hipóteses) e todos os demais elementos estruturais são introduzíveis ou uma consequência necessária de um constituinte de comportamento (por via de efeitos estruturais). Obviamente, a estrutura uma estrutura na qual estão faltando os efeitos estruturais necessários não é consistente com as regras de ocorrência dos constituintes de comportamento, logo soluções sempre incluem todos estes efeitos.

Minimalidade deve ser entendido com respeito a inclusão de conjuntos. Note que não usamos a cardinalidade absoluta dos elementos estruturais presentes em uma solução como um critério para escolha de uma solução à outra, apenas excluímos objetos “desnecessários” ou “supérfluos” de serem incluídos na solução.

Com base nas quatro categorias: fato, hipóteses, introduzíveis e consequências, na Figura 6 ilustramos a entrada e saída deste passo, de forma abstrata, no sistema de suporte à decisão.





**Figura 6.** Entrada e saída dos dois passos e suas conexões.

Assertivas quantitativas podem referir-se ao valor absoluto de variáveis, suas derivadas e desvios. A entrada do usuário consiste de fatos, hipóteses referentes à estrutura e quantidades. Em particular, isso inclui desvios (observado ou assumido) de variáveis com respeito ao seu valor nominal (que caracterizam o comportamento esperado do sistema), que em nossa área de aplicação, por exemplo, pode ser a assertiva de que a concentração de ferro ou turbidez estão muito elevadas em um certo estágio do processo de tratamento da água. Este componente de acesso à situação começa a partir da construção de um modelo consistente pela adição de introduzíveis e pela revisão das hipóteses do usuário, observando o critério de minimalidade descrito anteriormente

Freqüentemente, o resultado não é único e ocorrem várias soluções minimais. Nesse caso, medidas adicionais podem auxiliar na eliminação de algumas destas, bem como de técnicas para medidas ou propostas de testes como é comum no caso de diagnóstico com base em componentes. Caso contrário (ou adicionalmente), os resultados devem ser apresentados ao usuário e inspecionados por ele ou ela. Isso levanta a questão da geração de *explicação*, especialmente porque o resultado do acesso à situação contém elementos que o usuário não mencionou, mas que foram introduzidos ou inferidos pelo sistema. Em outro trabalho trataremos mais detalhadamente deste tópico.

## PROPOSTA DE COMPONENTES DE TERAPIAS

Após termos identificado a situação atual, a questão que se levanta é se a situação está de acordo com a performance dos objetivos ou ações devem ser tomadas para torná-la satisfatória. Assim, a entrada de propostas de terapia é um resultado do acesso à situação e da descrição dos objetivos a serem alcançados por ações remediadoras (se alguma). Na sua forma mais abrangente, uma terapia é uma seqüência de ações que leva a um estado do sistema que é consistente com os objetivos específicos e os requisitos de planejamento. Neste trabalho, consideramos apenas os problemas mais específicos:

- Assumimos que os objetivos podem ser descritos por um conjunto de assertivas quantificadoras (em oposição a vínculos complexos sobre várias variáveis do sistema), por exemplo, limitando a concentração de ferro com uma certa tolerância.
- Uma terapia é definida como um conjunto de ações plausíveis que movem as variáveis, que desviam dos seus valores alvo, na direção apropriada (sem perturbá-las) quando aplicada à situação corrente. Por exemplo, se a concentração de ferro está muito elevada, então um objetivo intermediário de terapia é reduzi-la e deixar outras variáveis inalteradas.

Seguindo tais hipóteses, podemos ser mais específicos sobre as propostas de entrada de terapias:

- *Os objetivos intermediários*: estes podem simplesmente ser expressos pelas derivadas das variáveis de interesse considerando o sinal oposto ao do desvio da respectiva variável.
- *A situação corrente*: esta deve incluir tudo como um fato que resultou da etapa de acesso à situação, com uma exceção: as derivadas das variáveis que não são de interesse devem ser tornadas em hipóteses. A razão para isso está no fato de que assumimos que as ações e seus efeitos são introduzidos instantaneamente. Portanto, devemos permitir que derivadas mudem seus valores (discontinuamente) se influenciadas pelas ações.

Isso está indicado na Figura 6. Desde que seja impossível satisfazer todos os objetivos intermediários, podemos ainda prover um mecanismo de descartar alguns deles. Podemos chegar a isto considerando objetivos específicos como fatos e aqueles descartáveis como hipóteses. Desta forma, uma terapia é identificada como um conjunto de ações gatilho que, juntamente com a situação corrente, conduz a um modelo em que a *estrutura mínima consistente aceitável para a qual um conjunto máximo de hipóteses objetivos intermediários é válido*. Isto é completamente análogo a etapa de acesso à situação (e utiliza os mesmos algoritmos de diagnóstico), mas diferente

no sentido de que os introduzíveis são ações gatilho. A Figura 6 ilustra a etapa da proposição de terapias de forma esquemática. Minimizando o conjunto de ações, em geral, não é suficiente, e podemos querer selecionar aquele que minimiza o custo.

## **DISCUSSÃO E CONCLUSÃO**

A discussão sobre o sistema de suporte à decisão apresentado neste trabalho utiliza modelagem orientada por processos e diagnóstico baseado em consistência para realizar o acesso à situação e propor terapias. Este está fundamentado em um número de hipóteses. As mais importantes restrições são devido a perspectivas estáticas: em ambas as etapas, uma solução é procurada unicamente pela análise de uma tomada do sistema. A primeira etapa determina apenas o estado corrente ao invés de prover informações sobre o desenvolvimento de uma perturbação ao longo do tempo. Embora isto pareça apropriado para uma entrada de proposição de terapia, a qual, de fato, deve ser aplicada ao estado corrente, terapia com um único passo pode ser irreal para muitas outras aplicações que podem requerer uma seqüência de intervenções.

De acordo com o estágio atual de desenvolvimento deste projeto cooperativo, editores gráficos estão disponíveis para a teoria do domínio, para o descritor de situações e para o solucionador de problemas baseado em consistência; uma teoria de domínio está disponível e uma primeira versão do sistema de suporte à decisão está sendo implementada. Esta será uma versão fortemente interativa, a qual apresentará inconsistências ao usuário e deixará que este oriente a procura por um modelo consistente. Com base nesse conjunto, uma versão com geração automática de soluções consistentes será desenvolvido.

Alguns aspectos importantes que deverão ser ainda considerados são: a conexão com um sistema padrão de monitoramento, a introdução de refinamentos numéricos, explanação e generalização e/ou extensão para outras aplicações, como o caso do tratamento de esgotos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a Mercedes Bendatti e Elenara Lersch, da Divisão de Pesquisas do Departamento Municipal de Águas e Esgotos de Porto Alegre (DMAE), pela cooperação em partes deste projeto.

## REFERÊNCIAS

- [de Kleer 86] de Kleer, J. (1986), An Assumption-Based TMS, *Artificial Intelligence* 28(127-162).
- [de Kleer-Mackworth-Reiter 92] de Kleer, J.; Mackworth, A.; Reiter, R. (1992). Characterizing Diagnoses and Systems. *Artificial Intelligence*, 56.
- [Dressler-Struss 96] Dressler, O. and Struss, P. (1996), The Consistency-based Approach to Automated Diagnosis of Technical Devices. In: Brewka, G. (ed.), *Principles of Knowledge Representation*, CSLI Publications, Stanford, pp. 267-311.
- [Falkenhainer – Forbus 91] Falkenhainer, B. and Forbus, K. (1991) Compositional Modeling: Finding the Right Model for the Job. *Artificial Intelligence*, 51(1-3): 95-143.
- [Forbus 84] Forbus, K. (1984), Qualitative Process Theory. *Artificial Intelligence*, 24(85-168).
- [Hamscher et al. 92] Hamscher, W., Console, L., de Kleer, J. (eds.) (1992): *Readings in Model based Diagnosis*, Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo.
- [Heller 01] Heller, U. (2001) *Process-oriented Consistency-based Diagnosis: Theory, Implementation and Applications*. PhD thesis. Technical University of Munich.
- [Heller-Struss 98] Heller, U. and Struss, P. (1998), Diagnosis and Therapy Recognition for Ecosystems - Usage of Model-Based Diagnosis Techniques. In: *12<sup>th</sup> International Symposium on Computer Science for Environmental Protection*, Bremen, Germany.
- [Heller-Struss 02] Heller, U. and Struss, P. (2002), Consistency-Based Problem Solving for Environmental Decision Support. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Eng.*, 17(89-92).
- [Reiter 87] Reiter, R. (1987): A Theory of Diagnosis from First Principles, *Artificial Intelligence* 32(57-95).
- [Struss-Heller 01] Struss P., Heller U. (2001), GDE+ - The Generalized Diagnosis Engine. In: *12th International Workshop on Principles of Diagnosis*, Sansicario, Italy.