

## DESIGN DE UM SISTEMA DE SUPORTE À DECISÃO BASEADO EM MODELOS PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA

**Waldir Roque<sup>1</sup>**

roque@mat.ufrgs.br

**Peter Struss<sup>2</sup>**

struss@in.tum.de

**Paulo Salles**

psalles@unb.br

**Ulrich Heller**

uheller@esg.de

<sup>1</sup>Instituto de Matemática,

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

<sup>2</sup>Department of Computer Science,

Technical University of Munich, Munich, Germany

<sup>3</sup>Instituto de Ciências Biológicas,

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil

<sup>4</sup>ESG GmbH

Einsteinstr 174, Munich, Germany

### 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 à operação normal da estação, identificando as possíveis causas e propondo intervenções adequadas para remediá-las. Sua fundamentação está na construção de uma biblioteca de fragmentos de modelos que representem processos, distúrbios e possíveis intervenções. Com base nesses fragmentos e nas observações disponíveis, possíveis modelos do comportamento de distúrbios da estação são gerados automaticamente como uma solução da tarefa de diagnóstico. Uma extensão de tais modelos de intervenção, de tal modo que os resultados sejam consistentes com os objetivos de correção, representam uma possível proposta de terapia. Apresentamos aqui a especificação do sistema de suporte à decisão e a interação entre o usuário e o sistema.

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

### 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, possible models of the disturbed plant behavior are generated automatically as a solution to the

---

<sup>1</sup> Autor para correspondências.

<sup>2</sup> OCC'M Software, GmbH, Deisenhofen, Germany.

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. We present the specification of the decision support system, the interaction between the user and the system.

**Keywords:** Decision Support System, Model-Based Diagnosis, Qualitative Reasoning, Artificial Intelligence, Water Treatment Plants.

## 1 Introdução

Os sistemas de conhecimento com base em modelos fornecem meios para tornar disponível o conhecimento de especialistas para leigos ou para especialistas com pouca informação sobre o domínio específico. Estes sistemas são de particular interesse em áreas como ecologia e meio ambiente, pois indivíduos, instituições e empresas afetam o meio ambiente, mas não esperamos que possuam um conhecimento próprio do impacto dos problemas que causam e dos métodos para preveni-los, remediá-los ou corrigi-los.

Para atacar esta tarefa ambiciosa, escolhemos sistemas com base em modelos. Algumas suposições fundamentais de nosso trabalho são:

- O domínio do 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 o que se passa?*) e proposta de terapias (*o que pode ser feito?*).
- Uma resposta apropriada para o acesso à situação é dada por um modelo que pode ser composto a partir da biblioteca do domínio e explicar parcialmente a informação sobre a situação que está 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 destes conceitos. A base de nossa solução é uma integração inovadora de teorias lógicas, implementações de modelos orientados por processos (FORBUS, 1984) e diagnóstico com base em modelos (de KLEER-

MACKWORTH-REITER, 1992; DRESSLER-STRUSS, 1996). Não iremos rediscutir os conceitos teóricos e técnicos já expostos com detalhes em Heller (2001), Heller-Struss (2002) e Struss-Heller (2001), mas apenas resumí-los e focalizar a discussão de como um sistema de suporte à decisão pode ser baseado neles.

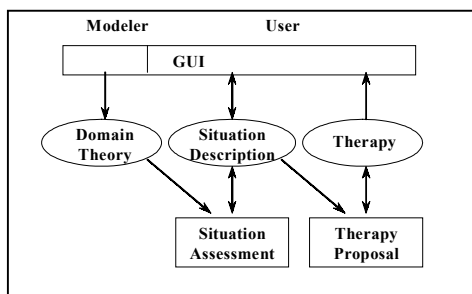


Figura 1: Arquitetura do Sistema de Suporte à Decisão.

Nosso foco é uma estação de tratamento de água. Embora não seja exatamente um sistema ecológico, esta compreende processos físicos, químicos e biológicos sobre os quais temos conhecimento parcial e qualitativo das informações, como ocorre em muitos sistemas ecológicos. Por outro lado, esta possui uma estrutura fixa e um conjunto limitado de fenômenos relevantes que a torna um bom alvo para uma primeira tentativa. Além do mais, podemos validar e avaliar o sistema de suporte à decisão em estações reais, havendo uma suave transição para fenômenos ecológicos e ambientais pela inclusão de problemas que afetam o corpo d'água (por exemplo, na presença de explosões de crescimento de algas, como proposto em Struss-Heller (2001).

Na próxima seção descrevemos alguns processos do tratamento de água, acentuando os potenciais problemas e como remediá-los. Na seção 3, o formalismo de modelagem é resumido e ilustrado com exemplos da teoria do domínio relativo ao tratamento de água. Na seção 4 apresentamos resumidamente o formalismo do diagnóstico baseado em consistência. Em seguida, apresentamos nas seções 5 e 6 os componentes do acesso às situações e das propostas de terapias. A seção 7 é dedicada a comentários e conclusões.

## 2 O Processo de Tratamento

A água a ser tratada é coletada de fontes naturais como o Rio Guaíba ou como a Lomba do Sabão, ambas em Porto Alegre. Após o bombeamento da água para a estação de tratamento, a

mesma passa por uma seqüência de processos. Em virtude do pouco espaço disponível, ilustraremos no quadro da Tabela 1 apenas alguns dos processos envolvidos.

<p><i>Tanque de entrada → Canal de entrada → Chicana → Tanque de decantação → Canal de água decantada → Filtros → Canal de água filtrada</i></p>
<p><b>Tanque de entrada:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Função:</b> 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).</li><li>• <b>Possíveis problemas:</b> A coloração permanece verde ou marrom, devido a presença de algas</li><li>• <b>Terapia:</b> Aumentar a quantidade do agente oxidante ou modificar o agente oxidante</li></ul>
<p><b>Canal de entrada:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Função:</b> Pré-cloração e pré-alkalinização. Se a alcalinidade for <math>\leq 19</math> e se o <math>\text{pH} \leq 6,5</math>, então as ações são aplicadas de modo que a alcalinidade alcance <math>\geq 20</math> e <math>6,5 \leq \text{pH} \leq 7</math>. Se necessário, primeiramente cloro é adicionado ao sistema para reagir com o material orgânico e remove-los.</li><li>• <b>Possíveis problemas:</b> Se houver muito material orgânico (sólido ou dissolvido), então muito cloro terá de ser adicionado, resultando em um super decréscimo do pH. Quando este está abaixo de 6, algumas substâncias indesejadas (tricloraminas) podem surgir.</li><li>• <b>Terapia:</b> É necessário aumentar o valor do pH. Pode ser obtido utilizando <math>\text{CaCO}_3</math> a fim de elevar o pH para o intervalo desejado (6 – 6,5), o que é necessário para que o Sulfato de Alumínio reaja. Se tricloramina é formada, esta deverá ser removida por meio do sulfato de alumínio (o que pode outra vez fazer decrescer o pH).</li></ul>

Tabela 1: Ilustração de processos no tratamento de água.

### 3 Modelagem

De acordo com o método de modelagem composicional o formalismo é dividido em:

- 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 inter-relações e valores das variáveis dos objetos (por exemplo, medidas).

Seguimos o princípio de raciocínio do tipo estrutura-para-comportamento, a modelagem composicional e fazemos uma generalização de ambos os paradigmas: modelagem baseada em componentes e modelagem baseada em processos.

#### 3.1 Teoria do Domínio

A Teoria do Domínio captura o que conhecemos sobre o domínio, i.e., todos os sistemas de uma certa classe (e.g. ecossistemas hidrológicos ou estações de tratamento de água).

Distinguimos *elementos estruturais* (objetos e relações) de *constituintes de comportamento* (processos e outros fragmentos de modelos). A ontologia consiste de:

- *Tipos de objetos*, que ocorrem em descrições estruturais, como tipos de componentes de um dispositivo (resistor, fio quebrado), entidades espacialmente distintas (camadas de um corpo de água, tanques). Tipos de objetos podem ser estruturados hierarquicamente.
- *Relações*, para caracterizar configurações de objetos. Exemplos são relações espaciais (contido-em, abaixo-de), 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 (e.g. com diferente domínios) podem ser definidos e objetos de um certo tipo podem ser fornecidos com um número de quantidades associadas a objetivos específicos (e.g. a concentração de ferro dissolvido em um tanque de água etc.).

Alguns objetos (tanques) servem como *localizadores espaciais*, i.e, definem univocamente o local de outros objetos (substâncias). A Figura 2 exhibe algumas relações e suas propriedades.

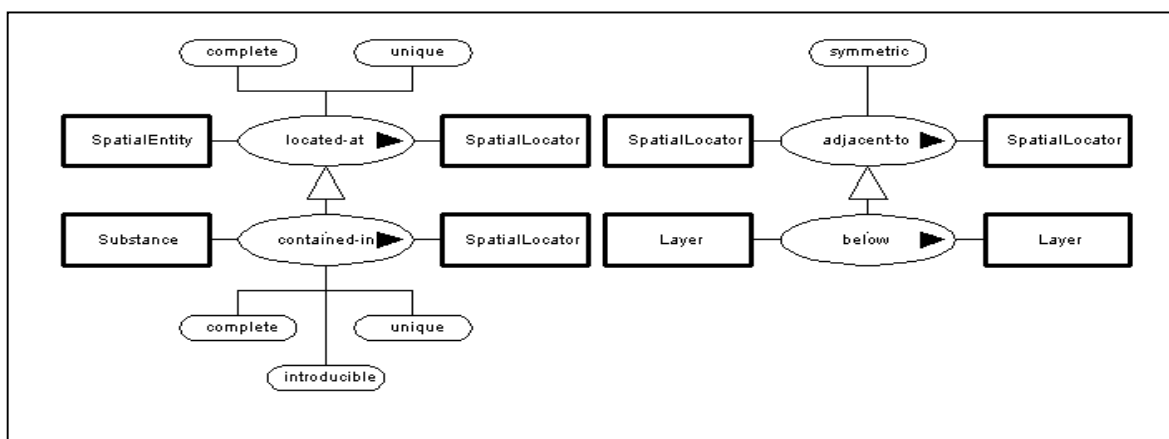


Figura 2: Relações entre objetos

A teoria do domínio deve prover um vocabulário de descritores de comportamento e as interfaces que derivam os constituintes comportamentais dos descritores estruturais. Incluem-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, 1984). Aplicando a distinção entre aspectos estruturais e quantitativos à ambos condições e efeitos, obtemos:
  - **StructuralConditions:** assertivas sobre a existência de relações e objetos (e.g. sedimentos contendo ferro)
  - **QuantityConditions:** assertivas sobre os valores das quantidades (e.g. um baixo pH no reservatório)
  - **StructuralEffects:** criação ou mesmo possível eliminação de objetos e relações (e.g. a geração de ferro dissolvido na água a partir do sedimento)
  - **QuantityEffects:** podem ser expressos como restrições às variáveis (e.g. a concentração de ferro dissolvido cresce com a concentração de ferro nos sedimentos e diminui o pH).

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. A Figura 3 mostra um processo em uma notação gráfica e lógica.

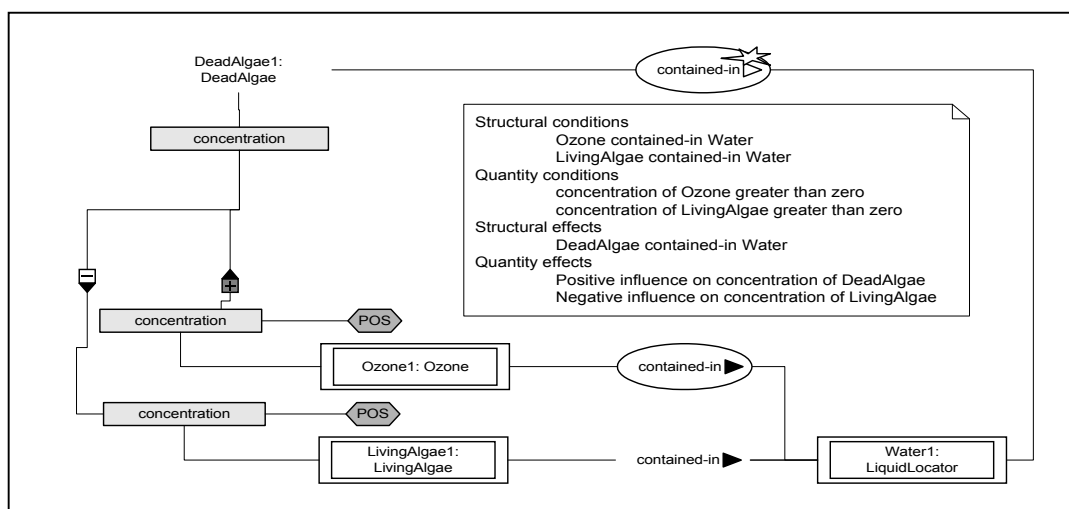


Figura 3: Processo referente a eliminação de algas pela ozonização.

### 3.2 Descrição da situação

Um sistema é caracterizado por sua *estrutura de objetos*, i.e. instâncias dos tipos de objetos e túplas individuais das relações dos objetos (e.g. as componentes e as estruturas de conexão de um dispositivo). Iremos nos referir a objetos e túplas de relações como elementos estruturais. Uma situação particular é caracterizada por *especificações de valores quantitativos*. Dependendo da tarefa e do contexto, elas podem representar medidas reais (e.g. um acréscimo na quantidade de ferro), especificação de metas (uma certa quantidade de ferro) ou meramente hipóteses, etc.

### 3.3 Representando ações

Para propor terapias, precisamos representar ações que afetem o comportamento do sistema, ou seja, a criação de objetos e/ou relações entre objetos, e impor influências e vínculos sobre as quantidades. Ações podem ter certas precondições físicas, que podem ser especificadas em termos de condições estruturais ou condições quantitativas. Possuem uma precondição adicional para tornarem-se efetivas: alguma intervenção humana. Ações podem ser uma seqüência de atividades (encher um tanque com alguma substância, conectá-lo a um cano e abrir uma válvula), que devem ser levadas 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 nunca podem aparecer como efeitos estruturais de processos ou de outras ações. Por outro lado, várias instâncias de um tipo de ação podem ser ativadas pelo mesmo objeto. Uma forma de se conseguir esse resultado sem a adição de novos conceitos é garantir que ações gatilho tenham uma localização unívoca a todas as instâncias de um tipo de ação. Por exemplo, a ativação do gatilho *open\_connection* deve ser especificada para cada abertura ao invés de apenas para o tanque.

### 3.4 Modelos 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 um valor nominal. Por exemplo, estes podem ser usados para expressar que o suprimento de cloro acima do normal tende a diminuir o pH pondo-o fora do seu intervalo. A descrição de desvios pode refletir fatos que podem não ser necessários ou cujo comportamento normal seja impossível de especificar 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 tentar encontrar desvios de outras quantidades que causem o desvio do estado inicial.

## 4 Método de diagnóstico baseado em consistência

A nossa breve introdução aqui segue os trabalho de fundamentos encontrados em (REITER, 1987; HAMSCHER *et al.*, 1992; DRESSLER-STRUSS, 1996). 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 dessas previsões contradiz observações reais - OBS, admite-se que o sistema contém 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 uma conjunto de componentes, COMPS, que contribuem para a predição, uma hipótese da forma  $ok(C_i)$  é introduzida. Um sistema válido de manutenção baseado em hipóteses (ATMS) (KLEER, 1986) 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 esses 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 ao 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 também 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:

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

O leitor pode ver em (HELLER-STRUSS, 1998) um exemplo simples deste raciocínio aplicado a um circuito elétrico contendo multiplicadores ( $M_i$ ) e endereços ( $A_j$ ). Embora o exemplo citado tenha sido usado 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 muito promissor (HELLER-STRUSS, 1998; HELLER-STRUSS, 2002).

## 5 Componentes de acesso a situações

A primeira tarefa a ser resolvida é determinar as hipóteses sobre a situação atual com base nas informações disponíveis sobre o sistema. Se as observações são assertivas verdadeiras sobre todos os objetos relevantes do 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. Nesse caso, o acesso à situação deverá completar a

descrição provida pelo usuário e/ou revisar informações incompletas. Portanto, permitimos que as hipóteses definidas pelo usuário qualifiquem as assertivas quantitativas.

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. Assim, certos tipos de objetos são chamados de *introduzíveis* para permitir a adição de objetos de tipos semelhantes ao modelo do sistema. Podemos 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 válida*. Uma estrutura é definida como aceitável se esta contém pelo menos os elementos estruturais especificados pelo usuário como fatos e todos os demais elementos estruturais são introduzíveis ou são conseqüências necessárias de constituintes de comportamento. Minimalidade deve ser entendida com respeito a inclusão de conjuntos. Note que não usamos a cardinalidade absoluta dos elementos estruturais presentes em uma solução como critério para preferir uma solução em relação a outra, apenas excluimos da solução objetos "desnecessários" ou "supérfluos".

Com base nas quatro categorias: fatos, hipóteses, introduzíveis e conseqüências, na Figura 4 ilustramos os passos acesso à situação e proposta de terapias no sistema de suporte à decisão.

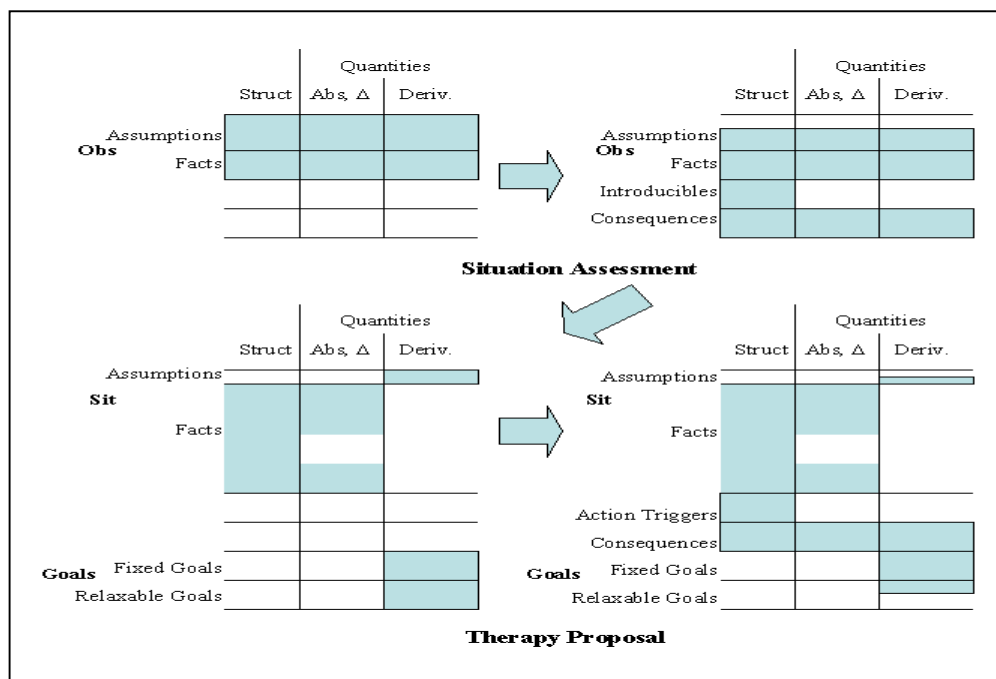


Figura 4: Entrada e saída dos dois passos e suas conexões.

Assertivas quantitativas podem referir-se ao valor absoluto de variáveis, suas derivadas e desvios. A entrada do usuário consiste de fatos, hipóteses referentes a estrutura e quantidades. Isso inclui desvios (observado ou assumido) de variáveis com respeito ao seu valor nominal. Em geral podem ocorrer várias soluções minimais. Os resultados devem ser apresentados ao usuário e inspecionados por ele ou ela, o que levanta a questão da *geração de explicações*, a ser tratada futuramente.

## 6 Propostas de componentes de terapias

Após identificada a situação atual, a questão é definir se essa situação está de acordo com os objetivos estabelecidos ou se ações devem ser tomadas para torná-la satisfatória. Assim, a entrada de propostas de terapia é resultado do acesso à situação e da descrição dos objetivos a serem alcançados por ações remediadoras. Considerando apenas os problemas mais específicos:

- Assumimos que os objetivos podem ser descritos por um conjunto de assertivas quantificadoras, e. g. limitando a concentração de ferro com uma certa tolerância.
- Uma terapia é definida como um conjunto de ações plausíveis que movem as variáveis desviadas do alvo na direção apropriada, e.g. se a concentração de ferro está muito elevada, o objetivo intermediário é reduzi-la e deixar as outras variáveis inalteradas.

Podemos ainda ser mais específicos sobre as propostas de entrada de terapias com:

- *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 transformadas em hipóteses. A razão para isso está no fato de assumirmos que as ações e seus efeitos são introduzidos instantaneamente.

Desde que seja impossível satisfazer todos os objetivos intermediários, podemos ainda prover um mecanismo para descartar alguns deles. Dessa forma, uma terapia é identificada por

um conjunto de ações gatilho que, juntamente com a situação corrente, conduzem a um modelo em que a *estrutura mínima consistente aceitável para a qual um conjunto máximo de hipóteses objetivos intermediários é válida*. A Figura 4 ilustra o esquema da etapa da proposição de terapias.

## 7 Comentários e conclusão

A discussão sobre o sistema de suporte à decisão apresentado aqui utiliza modelagem orientada por processos e diagnóstico baseado em consistência para realizar o acesso à situação e propor terapias. As restrições mais importantes devem-se ao fato de que, em ambas as etapas, uma solução é procurada unicamente pela análise de uma tomada do sistema. A primeira etapa determina o estado corrente ao invés de prover informações sobre o desenvolvimento de uma perturbação ao longo do tempo. Embora isso pareça apropriado para uma entrada de proposição de terapia, a qual, de fato, deve ser aplicada ao estado corrente, terapias com um único passo podem ser irreais para muitas outras aplicações que requerem uma seqüência de intervenções.

De acordo com o estágio atual de desenvolvimento deste projeto cooperativo, alguns resultados foram obtidos. Infelizmente, por falta de espaço, apenas mencionaremos alguns desses sem contudo detalharmos. Os 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 serão ainda considerados, tais como a conexão com um sistema padrão de monitoramento, a introdução de refinamentos numéricos, a geração de explicações e generalização e/ou extensão para outras aplicações, como o caso do tratamento de esgotos.

## 8 Referências

DRESSLER, O. e STRUSS, P. **The Consistency-based Approach to Automated Diagnosis of Technical Devices**. In: Brewka, G. (ed.). Principles of Knowledge Representation. CSLI Publications, Stanford, 1996, p. 267-311.

FORBUS, K. **Qualitative Process Theory**. Artificial Intelligence, 24:85-168, 1984.

HAMSCHER, W.; CONSOLE, L. e de KLEER, J. (eds.). **Readings in Model based Diagnosis**. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, 1992.

HELLER, U. **Process-oriented Consistency-based Diagnosis: Theory, Implementation and Applications**. Doctoral thesis, Department of Computer Science, Technical University of Munich, 2001.

HELLER, U. e STRUSS, P. **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, 1998.

HELLER, U. e STRUSS, P. **Consistency-Based Problem Solving for Environmental Decision Support**. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Eng.*, 17:89-92, 2002.

KLEER, J. **An Assumption-Based TMS**. *Artificial Intelligence*, 28:127-162, 1986.

KLEER, J.; MACKWORTH, A. e REITER, R. **Characterizing Diagnoses and Systems**. *Artificial Intelligence*, 56, 1992.

REITER, R. **A Theory of Diagnosis from First Principles**. *Artificial Intelligence*, 32:57-95, 1987.

STRUSS, P. e HELLER, U. **GDE+ - The Generalized Diagnosis Engine**. In: 12th International Workshop on Principles of Diagnosis, Sansicario, Italy, 2001.