

Teoria das Coberturas Nebulosas : uma abordagem abdutiva difusa para solução de problemas de diagnóstico

Silvia Maria F. S. Massruhá ^{1,2}, Sandra Aparecida Sandri ¹, Jacques Wainer ³

¹Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada,
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE,
Caixa Postal 515, CEP 12201-970, São José dos Campos - SP, Brasil,
{silvia, sandri}@lac.inpe.br

² Embrapa Informática Agropecuária - EMBRAPA,
Caixa Postal 6041, CEP 13083-886, Campinas - SP, Brasil,
silvia@cnptia.embrapa.br

³ Instituto de Computação - UNICAMP,
Caixa Postal 6176, CEP 13083-970, Campinas - SP, Brasil,
wainer@ic.unicamp.br

Resumo

Este artigo visa apresentar o escopo do modelo proposto para suportar uma nova teoria de diagnóstico denominada, Teoria das Coberturas Nebulosas - TCN. No trabalho de pesquisa em andamento está sendo investigado a possibilidade de se ter um conjunto de desordens para explicar as manifestações presentes em um caso particular de diagnóstico. O modelo proposto incorpora conceitos de lógica nebulosa, inferência abdutiva, teoria de possibilidades e teoria de decisão visando construir uma teoria de diagnóstico mais completa. Adicionalmente, são apresentados os resultados parciais obtidos e os trabalhos de pesquisa a serem explorados no contexto de modelos de diagnóstico.

Palavras-Chave: diagnóstico, abdução, conjuntos nebulosos ou fuzzy, teoria de possibilidades, teoria de decisão.

Abstract

This paper presents a model proposed to support a new theory of diagnosis, Fuzzy Covering Theory - FCT. In this research work is being investigated the possibility of having a set of disorders explaining the manifestations presented in a particular case of diagnosis. This model incorporates concepts of fuzzy logic, abductive inference, possibility theory and decision theory aiming to build a more complete theory of diagnosis. Finally, the partial results obtained as well as the future works to be explored in the context of models for diagnostic problem-solving are also presented in this paper.

1. Introdução

O problema de diagnóstico consiste em encontrar as explicações para a presença de um conjunto de manifestações (falhas) utilizando o conhecimento sobre o mundo. O raciocínio de diagnóstico pode ser visto como processo cognitivo que abrange: conhecimento genérico sobre falhas e explicações para estas falhas (um modelo de diagnóstico), o conhecimento sobre um domínio e heurísticas específicas do domínio.

Os problemas de diagnóstico podem ser encontrados em diversas áreas, como o diagnóstico dos sintomas de um paciente ou de uma planta, a determinação de falha de um programa de um computador, a causa de ruídos em um sistema hidráulico, a localização de falhas num dispositivo eletrônico em um satélite, dentre outros.

Os sistemas de diagnóstico também são usados em indústrias e tem sido uma área ativa de pesquisa em Inteligência Artificial – IA. Esta área tem gerado muitas metodologias, teorias e aplicações nas duas últimas décadas. Sistemas de diagnósticos variam desde sistemas baseados em regras, raciocínio baseado em caso, teorias baseadas em conjuntos e teorias baseadas em lógicas [4,6,8,9]. Entretanto, somente em meados dos anos 80 que os aspectos conceituais e formais do processo de diagnóstico começaram a ser investigados por vários autores [8,9].

Uma das primeiras teorias formais de diagnóstico foi proposta por Reggia em termos de teoria de conjuntos, denominado *set-covering theory* ou *parsimonious covering theory*, traduzido para **teoria das coberturas**

parcimoniosas - TCP [8]. Resumidamente, no modelo TCP, o conhecimento do domínio é representado por um conjunto finito de desordens (D), um conjunto finito de manifestações (M) e por uma relação causal binária $C \subseteq D \times M$ onde está baseado o cálculo para diagnóstico dos fatos observados (M^+). Vários algoritmos tem sido propostos nesta linha de cobertura de conjuntos embora este problema tenha sido geralmente classificado como NP-difícil [6,8].

Os aspectos formais de diagnóstico empregando conhecimento causal tem utilizado a lógica como ferramenta básica [8,9]. Na teoria lógica de **diagnóstico abduativo**, o raciocínio de diagnóstico é formalizado dos efeitos para as causas, com conhecimento causal representado com implicações lógicas do tipo: **causas -> efeitos**, onde as causas são geralmente anormalidades ou falhas mas também podem incluir situações normais. Na maioria das vezes o raciocínio abduativo não gera conclusões sólidas, pois somente encontra (e eventualmente classifica) as causas plausíveis para efeitos observados. No entanto, o raciocínio abduativo pode ser muitas vezes empregado como paliativo para casos onde o raciocínio dedutivo não é possível.

A TCP é um modelo formal de inferência de diagnóstico para os modelos abduativos baseados em associações [8]. Embora a TCP seja uma ferramenta simples e poderosa para raciocínio de diagnóstico, o modelo original tem algumas limitações [8]. Vários autores tem investigado tanto a teoria quanto a implementação da teoria da diagnose e proposto outros modelos. Lucas [6] permite representar vários tipos de interações que não são possíveis no TCP original. Dubois & Prade [2] propõem uma extensão possibilista ao TCP para modelar as incertezas. Wainer & Rezende [10] propõem uma extensão temporal ao TCP de modo que informações categóricas e temporais possam ser incorporadas para base de conhecimento. A informação temporal permite representar a evolução esperada das manifestações causadas por determinada desordem. A informação categórica permite distinguir entre manifestações que são somente possíveis daquelas que são necessárias durante a evolução de uma desordem. O trabalho de Wainer & Sandri em [11] mostra que melhor do que representar informação temporal como intervalos bem definidos (*crisp*) é representá-los como intervalos nebulosos, aqui denominado TCP-nebuloso.

Neste artigo está descrito o escopo de um novo modelo abduativo nebuloso para a solução de problemas de diagnóstico que está baseado na validação do modelo TCP-nebuloso no domínio de diagnóstico de doenças de milho apresentado em [7].

2. Abordagem adotada

No trabalho de Wainer & Sandri [11] é proposta a incorporação de conjuntos nebulosos em alguns conceitos de TCP-temporal. Wainer & Sandri em [11] propõem índices de consistência temporal, categórica (α_{ct}) e de intensidade (γ_{ct}) para consistir informação entre um modelo de desordens e um caso particular (M^+). A melhor explicação para o diagnóstico assumida em [11] é uma doença que tem consistência temporal, categórica e de intensidade com todos os sintomas e explica todos os sintomas presentes no caso. Assim d_1 é um diagnóstico para o caso se $\alpha_{ct}(d_1) > 0$ e $\gamma_{ct}(d_1) > 0$ para todo $m_i \in M^+$.

Entretanto, este trabalho está simplificado em relação ao modelo TCP-temporal original [10], pois está somente interessado em verificar como uma desordem única cobre um conjunto de manifestações ao invés de construir uma teoria de diagnóstico completa.

Na validação da extensão nebulosa ao TCP temporal/categórico apresentada em [7], pode-se observar que algumas funcionalidades adicionais se tornam necessárias para se obter uma solução para problemas de diagnóstico.

3. Modelo proposto

No trabalho de pesquisa em andamento está sendo investigado a possibilidade de se ter um conjunto de desordens para explicar as manifestações de uma caso particular, não só uma desordem como proposto em [11] visando construir uma teoria de diagnóstico, denominada, Teoria das Coberturas Nebulosas -TCN(Figura 1).

Isto se torna mais interessante em domínios em que um conjunto de desordens tem manifestações em comum como é o caso de doenças de plantas, medicina entre outros. Suponha no diagnóstico de falhas de satélite um caso M^+ onde há perda de velocidade mínima, esta manifestação pode ser causada por falhas em 2 equipamentos: propulsores e filtros do satélite. Um exemplo em medicina seria um caso M^+ onde um paciente está com dor no peito e tosse crônica, cujo o diagnóstico poderia ser duas doenças: ataque cardíaco e bronquite.

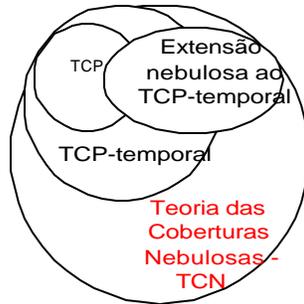


Figura 1: Escopo da Teoria das Coberturas Nebulosas

A partir da validação descrita em [7], concluiu-se que o modelo TCN deve contemplar algumas características principais para suportar a teoria proposta acima e obter uma solução de diagnóstico parcimoniosa. Dentre elas tem-se:

- uma generalização do modelo TCP-nebuloso proposto por Wainer & Sandri [11] de modo a combinar os vários índices de consistência visando usá-los na classificação de hipóteses em uma situação prática de diagnóstico;
- uma ou mais funções de utilidade associadas a outros conceitos de teoria da decisão de modo a auxiliar na seleção e classificação de hipóteses;
- modelagem para suportar informação incompleta:
 - onde a associação entre desordens e manifestações são incompletas;
 - onde se tem um conjunto de manifestações onde ausência (M^-) ou presença (M^+) são desconhecidas para um determinado caso;
- funções para suportar a identificação de condições favoráveis à evolução de uma desordem visando previsões futuras e tomada de decisões para controle.

4. Teoria das Coberturas Nebulosas (TCN)

Generalização do TCP nebuloso: um ponto que está sendo explorado no escopo de TCN é como os vários índices de consistência propostos em [11] podem ser usados em uma situação prática de diagnóstico. Por exemplo, se os índices de consistência para uma desordem não são todos iguais a 1, existe mais de uma maneira de usá-los: combiná-los em um único índice, definir qual índice é mais importante (este grau de importância pode depender de heurísticas do domínio). Além disso, estes índices podem ser usados para classificar hipóteses utilizando alguma heurística. Heurísticas do domínio de diagnóstico dinâmico

estão sendo investigadas de modo a contribuir para a classificação de hipóteses.

Suponha que para um determinado caso M^+ o índice de consistência categórico-temporal para d_1 é menor que o de d_2 ($\alpha_{ct}(d_1) = 0.25 < \alpha_{ct}(d_2) = 0.30$). Assim, d_2 pode ser a melhor explicação para M^+ . No exemplo de doenças de milho [7], as manifestações causadas pela *ferrugem comum* (d_1) são muito similares às manifestações causadas pela *ferrugem polysora* (d_2) e *ferrugem branca* (d_3) que são outras doenças causadas por fungos em plantas. Neste caso, os índices de consistência temporal-categórico podem auxiliar na seleção e redução de hipóteses.

Funções de utilidade na seleção de hipóteses: na maioria dos domínios, as restrições temporais no modelo usualmente representam o conhecimento acumulado destes intervalos para um grande número de casos. Através da extensão nebulosa, além das explicações para um determinado caso serem melhor definidas em relação a um modelo também se pode classificar melhor as explicações mais plausíveis. No domínio agrícola, isto pode ser vital, inclusive podendo vir a comprometer toda uma produção ou um replanejamento agrícola.

Por exemplo, utilizando estas predições pode-se investigar primeiramente as manifestações que devem prioritariamente ser investigadas mesmo que não se tenha informações completas sobre elas. Esta funcionalidade está sendo incorporada através de uma função de utilidade em cima das manifestações de modo a selecionar manifestações prioritárias e reduzir hipóteses. Seja a função de utilidade f definida como

$$f = (c_i)^{p_i} \quad (1)$$

onde c_i é o custo associado para cada manifestação m_i , com valores entre $[0,1]$. A variável p_i corresponde ao número de desordens que aquela manifestação m_i pode eliminar. Por exemplo, sejam duas manifestações m_1 e m_2 que ocorrem em uma fase inicial (crescimento vegetativo) do desenvolvimento de uma cultura de milho. Suponha que na doença d_1 “a

manifestação m_1 *raramente* ocorre” e “a manifestação m_2 *predominantemente* ocorre”. Sendo o custo c_1 inversamente proporcional à predominância da manifestação para uma determinada doença d_i , supomos um custo $c_1=0.5$ e $c_2=0.3$ associados a m_1 e m_2 em d_1 , respectivamente. Portanto, o custo de m_2 é menor durante uma seleção de hipóteses. Entretanto, se m_2 for selecionado, apenas uma desordem é eliminada do conjunto de hipóteses (i.e $p_2=1$) e m_1 elimina 3 desordens do conjunto de hipóteses (i.e $p_1=3$). Aplicando a fórmula (1), temos que o custo de seleção da manifestação m_1 é menor que de m_2 (i.e, $f_1 < f_2$),

$$f_1 = (c_1)^{p_1} = (0.5)^3 = 0.125$$

$$f_2 = (c_2)^{p_2} = (0.3)^1 = 0.3$$

Assim, a seleção da manifestação m_1 deveria ser prioritária em relação a m_2 durante um processo de raciocínio de diagnóstico embora seu custo inicial seja maior.

Na área de planejamento e controle pretende-se ainda incorporar outros conceitos da área de teoria de decisão. Vários autores tem proposto incorporar teoria de decisão dentro do paradigma de planejamento utilizando modelos clássicos de teoria de decisão, tais como, processos de decisão de Markov (*MDP - Markov Decision Process*). Outra linha de pesquisa que se pretende investigar são versões qualitativas para teoria de decisão que vem sendo proposta recentemente por outros autores em contrapartida a ferramentas quantitativas [3,5].

Modelagem para casos com informação incompleta: um outro trabalho de pesquisa que está sendo estudado é a informação categórica nebulosa, como por exemplo “na doença d_1 a manifestação m_1 *raramente* ocorre”. Normalmente, tem-se uma escala qualitativa para descrever os efeitos que uma desordem d pode causar (necessariamente (N), tipicamente ou predominantemente (T), possivelmente (P), raramente (R) ou ausente (A)). Em [11] somente os graus N e P são representados na base de conhecimento. Para suportar os outros graus de informação categórica nebulosa é necessário substituir N e P por distribuições de possibilidades.

Distribuições de probabilidades não podem ser usadas neste caso, pois, estas medidas não são baseadas em dados estatísticos. Teoria de possibilidades parece mais adequada para representar este tipo de informação categórica nebulosa. Cayrac et al [1] apresenta uma aplicação de teoria de possibilidades no diagnóstico de falhas de satélite. Em [1] é proposto uma associação gradual para um dado modelo de

falhas, onde os efeitos são classificados em 6 + 1 categorias: 3 níveis de efeitos de mais certeza (“completamente certo”, “quase certo”, “intervalo certo”) e 3 níveis de efeitos mais impossíveis (“completamente impossível”, “quase impossível”, “intervalo impossível”) e um de total ignorância quanto a relação causal entre falhas e efeitos. Cayrac et al [1] mostra que incorporando esse pequeno número de níveis de incerteza ao modelo de falhas já se obteve uma melhora no processo de diagnóstico.

Por outro lado, também existe a observação incompleta do caso. Também está sendo incorporado no trabalho em andamento como modelar a incerteza de um determinada manifestação ter ocorrido ou não (similar a proposta de [2]) que é diferente de modelar a intensidade da manifestação. Formalmente, existe um conjunto não-vazio $M^0 = M - (M^+ \cup M^-)$ de manifestações onde a ausência (M^-) ou presença (M^+) são desconhecidas. Portanto, os fatos observados M^+ e M^- também são modelados como conjuntos nebulosos. Entretanto, o requisito $M^+ \cap M^- = \emptyset$ é mantido e estendido para observações incompletas.

Mecanismos de teoria da decisão para previsões futuras e controle: um outro problema são as medidas de controle que devem ser adotadas imediatamente após o diagnóstico. Na medicina refere-se ao tratamento do paciente propriamente dito. No domínio agrícola são adotadas medidas como: eliminação das plantas hospedeiras infectadas, utilização de cultivares resistentes, aplicação de fungicidas ou rotação de culturas entre outras. As condições ambientais de temperatura (alta, média, baixa) e umidade relativa do ar (alta, baixa) interferem diretamente na tomada de decisões para controle de doenças. Portanto, mecanismos de teoria de decisão qualitativa também parecem adequados neste caso [3,5].

Em [11], além de ser apresentado o modelo para incorporar informação temporal nebulosa, informação categórica e informação de intensidade em uma abordagem de diagnóstico também foi mostrado como fazer previsões sobre manifestações futuras. Além de previsões futuras, a parte referente a tomada de decisões também não foi apresentada neste trabalho embora se pretenda incorporar na teoria de diagnóstico final conforme apresentado na Figura 2.

5. Arquitetura TCN

A arquitetura proposta para suportar o modelo apresentado acima é composta por 6 módulos principais conforme apresentado na Figura 2.

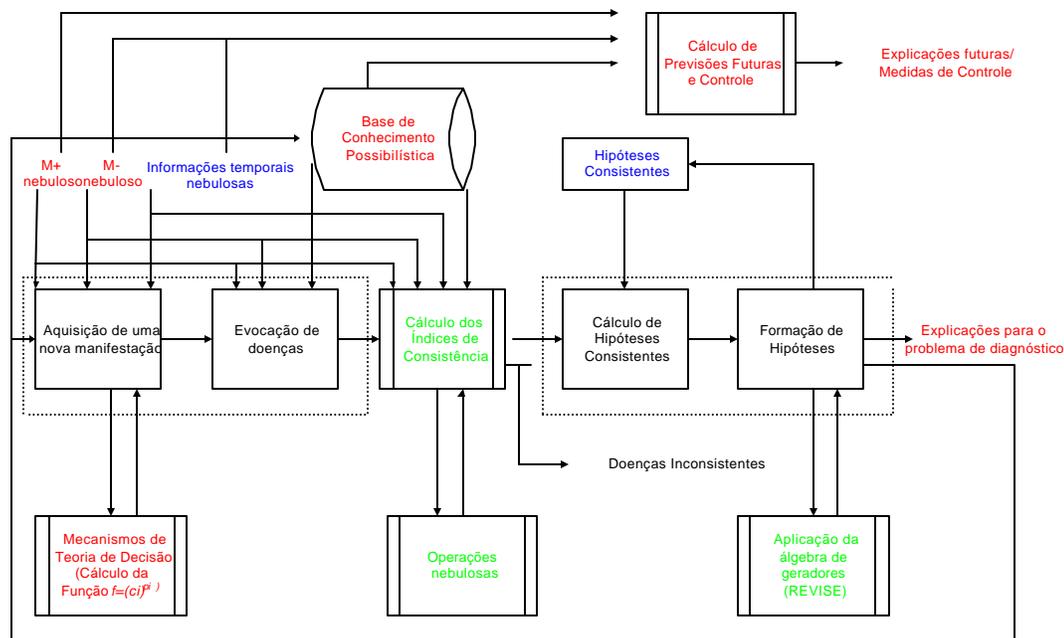


Figura 2: Esboço do Modelo TCN

O ciclo inicia com o módulo Obtenção de uma Nova Manifestação a partir de uma nova manifestação presente e com suas possíveis informações temporais, isto é, o possível intervalo em que está manifestação tenha ocorrido ou com uma manifestação ausente. O módulo Evocação de Desordens evoca as causas potenciais, isto é, desordens das manifestações presentes e ausentes. Estes dois módulos contemplam a fase de Planejamento que engloba a seleção de desordens a partir da base de conhecimento. É importante lembrar que estes módulos devem suportar tanto a associação gradual entre desordens e manifestações na base de conhecimento como a incerteza dos fatos observados em um caso específico.

Em seguida, no módulo de Cálculo dos Índices de Consistência, são calculados os índices de consistência temporal, categórica e intensidade para as desordens evocadas no módulo anterior. As informações nebulosas da base de conhecimento, das manifestações presentes (M^+) com seus intervalos temporais nebulosos e das manifestações ausentes (M^-) são utilizadas para calcular estes índices. O conjunto de desordens inconsistentes é atualizado por este módulo.

Os dois outros módulos abrangem a etapa de Seleção de Hipóteses. O módulo Cálculo de Hipóteses Consistentes elimina todas as hipóteses correntes que contém pelo menos uma das desordens inconsistentes calculadas no módulo anterior. As hipóteses evocadas que não se tornaram inconsistentes são incorporadas as

hipóteses resultantes do módulo Formação de Hipóteses. As hipóteses geradas por este módulo são consistentes com a informação nebulosa do caso particular apresentado.

O processo se repete enquanto existir manifestações presentes ou ausentes. Para selecionar a próxima manifestação no módulo Obtenção de uma Nova Manifestação é executada a função de utilidade $f = (c_i)^{p_i}$ (1) apresentada acima. Ao final de todas as manifestações, o algoritmo fornecerá todas as explicações consistentes com o caso.

Finalmente, o módulo Cálculo de Previsões Futuras é utilizado para fazer previsões sobre manifestações futuras a partir das informações presentes (M^+) e suas informações temporais. Quanto ao módulo de controle é utilizado para extrair informação da base de conhecimento sobre as condições favoráveis para evolução de uma desordem (temperatura, umidade) de modo auxiliar na tomada de decisão das medidas de controle.

Quanto a implementação deste modelo, algoritmos estão sendo especificados para suportar as funções de cada módulo apresentado. Estes algoritmos estão sendo implementados em PROLOG devido a sua fácil sintaxe e aderência ao problema.

6. Resultados parciais e trabalhos futuros

Neste trabalho inicial está sendo utilizado uma base de conhecimento que contém 42 doenças da

cultura do milho com suas respectivas manifestações e estádios de desenvolvimento. Inicialmente, um subconjunto desta base de conhecimento foi validada no escopo do TCP e TCP-temporal através de uma ferramenta em Prolog desenvolvida no escopo de [10]. Posteriormente, esta mesma base de conhecimento foi aplicada no escopo do modelo apresentado em [11] a fim de validar a abordagem de diagnóstico proposta e visando especificar as funcionalidades da TCN. Entretanto, foi necessário a implementação em Prolog dos módulos de Cálculo de Índices de Consistência e Formação de Hipóteses que incorporam os conceitos do modelo TCP-nebuloso de modo a viabilizar a validação.

Quanto à validação da abordagem de diagnóstico, os resultados obtidos foram positivos para o modelo TCP-nebuloso em relação aos outros modelos (TCP e TCP-temporal). Para uma mesma base de conhecimento de teste $\langle D, M, C \rangle$ que contempla nove desordens (D), seis manifestações (M) e a relação causal entre elas (C), no escopo do TCP original foram geradas 5 explicações plausíveis para um caso particular (M^+) e debaixo da ferramenta que implementa o TCP-temporal nenhuma explicação foi encontrada para o mesmo caso M^+ . Já no contexto do TCP-nebuloso foram geradas apenas 2 explicações plausíveis dentre as 5 apresentadas inicialmente no TCP original. Portanto, a utilização de intervalos nebulosos para modelar informação temporal mostrou mais eficiente do que o modelo TCP-temporal que utiliza intervalos bem definidos além de auxiliar na seleção e redução do conjunto de hipóteses. Entretanto, algumas extensões se fazem necessárias para se obter uma teoria de diagnóstico completa conforme apresentado no presente trabalho.

Atualmente, estas funcionalidades que devem ser suportadas pela TCN (apresentadas na seção 4) estão sendo especificadas e detalhadas de modo a formalizar o modelo TCN. Em paralelo, os algoritmos que compõem os módulos da arquitetura TCN estão sendo especificados e implementados em AMZI Prolog. Entretanto, o módulo de Previsões Futuras e Controle ainda não foi especificado, primeiramente, mecanismos de teoria da decisão qualitativa estão sendo revisados [3,5].

Validações periódicas estão sendo realizadas junto aos fitopatologistas da Embrapa. Espera-se que com este trabalho possa se obter um modelo de diagnóstico que seja mais apropriado para as áreas de veterinária e fitopatologia e que resultem no desenvolvimento de sistemas de diagnóstico mais eficientes.

É válido ressaltar que embora este trabalho inicial esteja voltado para um domínio específico, espera-se que os desenvolvimentos teóricos obtidos também possam ser aplicados em outros problemas de diagnóstico dinâmico, tais como, o diagnóstico de falhas em satélites artificiais.

7. Referências bibliográficas

- [1] Cayrac, D.; Dubois, D.; Haziza, M. & Prade, H. Possibility theory in "fault mode effects analyses" – a satellite fault diagnosis application, *Proceedings 3rd IEEE international Conf. On Fuzzy Systems*, Orlando, Flórida, p. 1176-1181, 1994.
- [2] Dubois D. & Prade, H. Fuzzy relation equations and causal reasoning. *Fuzzy Sets and Systems* (75), p. 119-134, 1995.
- [3] Dubois D. & Prade H. Possibility theory as a basis for qualitative decision theory. *In 14th Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI '95)*, pages 1924-1930, Montreal, 1995.
- [4] Durkin J. *Expert Systems: Design and Development*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, Inc. 1994. 800p.
- [5] Fargier H.; Lang J. & Sabbadin R. Towards qualitative approaches to multi-stage decision making. *Dans: International Journal of Approximate Reasoning*, V. 19, p. 441--471, 1998.
- [6] Lucas, P. Modelling Interactions for diagnosis. *In Proceedings of CESA '96 IMACS Multiconference: Symposium and Modelling, Analysis and Simulation*, vol.1, p. 541-546, 1996.
- [7] Massruhá, S.M.F.S; Sandri, S.A. & Wainer, J. Um modelo alternativo abdutivo nebuloso para solução de problemas de diagnóstico. *Primeiro Workshop de Teses e Dissertações em Inteligência Artificial – I WTDIA'02 Proceedings - XVI Brazilian Symposium on Artificial Intelligence - SBIA'02*. Recife, Brazil, November, 2002. (Aceito para publicação e apresentação oral).
- [8] Peng, Y. & Reggia J.A. *Abductive Inference Models for Diagnostic Problem-Solving*, Springer-verlag, 1990.
- [9] Reiter R. A theory of diagnosis from first principles. *Artificial Intelligence*, 32(1), p.57-95, April, 1987.
- [10] Wainer, J. & Rezende, A.M. A temporal extension to the Parsimonius Covering Theory. *Artificial Intelligence in Medicine*. Elsevier Science B. V, v.10, p. 235-255, 1997.
- [11] Wainer, J. & Sandri, S. A *Fuzzy Temporal/Categorical Information in diagnosis. Special Issue on Intelligent Temporal Information Systems in Medicine, JIIS*, 1998.