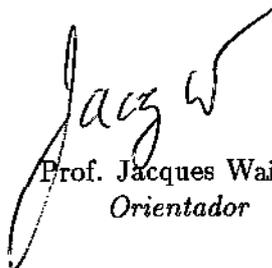


# Uma Extensão Temporal à Teoria das Coberturas Parcimoniosas

Este exemplar corresponde à redação final da tese devidamente corrigida e defendida pelo Sr. Alexandre de Melo Rezende e aprovada pela Comissão Julgadora.

Campinas, 7 de setembro de 1996.

  
Prof. Jacques Wainer  
*Orientador*

Dissertação apresentada ao Instituto de Matemática Estatística e Ciência da Computação, UNICAMP, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.



93309191

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DO IMECC DA UNICAMP**

Rezende, Alexandre de Melo

R339e Uma extensão temporal à teoria das coberturas parcimoniosas /  
Alexandre de Melo Rezende -- Campinas, [S.P. :s.n.], 1996.

Orientador : Jacques Wainer

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas,  
Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação.

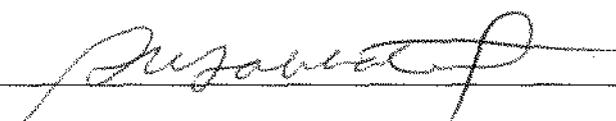
1. Inteligência artificial. 2. Sistemas especialistas  
(Computação). 3. Diagnóstico - Técnicas. I. Wainer, Jacques. II.  
Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Matemática,  
Estatística e Ciência da Computação. III. Título.

**Uma Extensão Temporal à  
Teoria das Coberturas  
Parcimoniosas**

**Alexandre de Melo Rezende**

Tese de Mestrado defendida e aprovada em 08 de Julho de 1996

pela Banca Examinadora composta pelos Profs. Drs.



---

Prof (a). Dr (a). RENATO MARCOS ENDRIZZI SABBATINI



---

Prof (a). Dr (a). ARIADNE MARIA BRITO RIZZONI DE CARVALHO



---

Prof (a). Dr (a). JACQUES WAINER

# Uma Extensão Temporal à Teoria das Coberturas Parcimoniosas<sup>1</sup>

Alexandre de Melo Rezende<sup>2</sup>

Instituto de Matemática Estatística e Ciência da Computação  
IMECC – UNICAMP

Banca Examinadora:

- Jacques Wainer (Orientador)<sup>3</sup>
- Renato Marcos Endrizzi Sabbatini<sup>4</sup>
- Ariadne Maria Brito Rizzoni Carvalho<sup>3</sup>
- Heloisa Vieira Rocha (Suplente)<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup>Dissertação apresentada ao Instituto de Matemática Estatística e Ciência da Computação da UNICAMP, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

<sup>2</sup>O autor é Bacharel em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Uberlândia.

<sup>3</sup>Professor do Instituto Matemática Estatística e Ciência da Computação - IMECC - UNICAMP.

<sup>4</sup>Pesquisador do Núcleo de Informática Biomédica da UNICAMP - NIB.

*À minha irmã Maria Célia por seu amor e dedicação aos pobres.*

# Agradecimentos

À Deus por transmitir a agradável sensação de sua presença nas experiências da vida.

Aos meus pais Célio e Terezinha pela formação moral e humana que deram aos seus filhos, e pelas constantes preocupações com o nosso bem-estar e felicidade.

Aos meus irmãos Rosália, Romero, Célia, Beto, Ivete e Gorete pelo apoio e incentivo.

À extraordinária namorada Silvana pelo carinho, compreensão e motivação.

Ao meu orientador por me sugerir este excelente assunto, pela confiança, liberdade e compreensão dispensados durante a execução deste trabalho.

Ao professor César Laerte Natal da Faculdade de Ciências Médicas da Universidade Federal de Uberlândia, e ao Dr. Fernando Gonçales do Instituto de Moléstias Infeciosas do Hospital das Clínicas da UNICAMP, por terem colaborado para a realização da implementação descrita nesta dissertação.

A todos os amigos em especial ao Osvaldo, Arturo, Erasmo, Paulo Barthelmes, Ana Monteiro, Stella, Edmar, Aredis, Emerson, Maurício, Raul, Mariano, Horácio, Salenko, Hélivio, Marcos Alexandre, Bruno, Roland, Jörg, Yang, Ivan, Luiz Benini, Adary, Eduardo, Cairo, Nelson, Douglas.

Aos professores João Nunes de Souza e Sérgio de Mello Schneider do Departamento de Informática da Universidade Federal de Uberlândia, pela presteza, motivação e apoio.

Aos professores e funcionários do departamento em especial à Roseli e Luiz (em memória).

Ao contribuinte brasileiro que na figura do CNPq financiou este trabalho.

*“Não basta ensinar ao homem uma especialidade, porque ele se tornará assim uma máquina utilizável, mas não uma personalidade. É necessário que adquira um sentimento, um senso prático daquilo que vale a pena ser empreendido, daquilo que é belo, do que é moralmente correto. A não ser assim ele se assemelhará, com seus conhecimentos profissionais, mais a um cão ensinado do que uma criatura harmoniosa e desenvolvida. Deve aprender a compreender as motivações dos homens, suas quimeras e angústias para determinar com exatidão seu lugar em relação aos seus próximos e à comunidade.”*

Albert Einstein

# Resumo

Nesta dissertação propõe-se uma extensão temporal à *Teoria das Coberturas Parcimoniosas*. Esta teoria provê um fundamento teórico ao processo de raciocínio diagnóstico, como um raciocínio abduutivo baseado nos modelos que associam causas à suas conseqüências (ou doenças com seus sinais e sintomas). A extensão temporal proposta para a Teoria das Coberturas Parcimoniosas possibilita associar a cada doença a evolução temporal dos seus sinais e sintomas.

A eliminação de hipóteses temporalmente inconsistentes minimiza uma das maiores limitações da Teoria das Coberturas Parcimoniosas: a teoria pode incluir um grande número de hipóteses alternativas. Além do mais, a inclusão de aspectos temporais a uma extensão da teoria que incluía informações probabilísticas também elimina o problema de rejeições incorretas de hipóteses quando um sintoma necessário não estiver presente.

A extensão temporal proposta é aplicada a um problema de diagnóstico médico em que o tempo é importante na diagnose. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, como a construção rápida da base de conhecimento, a eliminação significativa do número de hipóteses e a redução do tempo gasto na obtenção da solução do problema.

Finalmente, são apresentadas as contribuições, limitações e extensões futuras desta dissertação.

# Abstract

In this work we propose a temporal extension to the *Parsimonious Covering Theory*. This theory provides a theoretical foundation for the diagnostic reasoning process as an abductive reasoning based on models that associate causes with their consequences (or diseases and their symptoms). Our temporal extension of the Parsimonious Covering Theory allows one to associate to a disease a temporal evolution of symptoms.

The elimination of temporally inconsistent hypothesis minimizes one of the greatest limitation of the Parsimonious Covering Theory: the theory may include a large number of alternative hypothesis. Furthermore, the inclusion of temporal aspects to an extension of this theory that includes probabilistic information also eliminates the problem of incorrectly rejecting hypothesis if a necessary symptom has not yet occurred.

Finally, the limitations of the representation formalism and the problems with the temporal reasoning in a diagnostic system are also described.

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Solução de Problemas de Diagnóstico . . . . .	3
1.2	Divisão do Restante da Dissertação . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Modelos Computacionais Para a Solução do Problema de Diagnóstico</b>	<b>9</b>
2.1	Sistemas para Solução de Problemas Baseados em Conhecimento . . . . .	9
2.1.1	Modelos Estatísticos de Classificação: Classificação Bayesiana . . . . .	9
2.1.2	Sistemas de Produção Baseado em Regras . . . . .	10
2.2	Modelos Abdutivos Baseados em Associações . . . . .	11
2.2.1	Conceitos Básicos . . . . .	11
2.2.2	Teoria das Coberturas Parcimoniosas: Um Resumo Informal	12
<b>3</b>	<b>Fundamentos da Teoria das Coberturas Parcimoniosas</b>	<b>16</b>
3.1	Formulação do Problema . . . . .	17
3.1.1	Problemas de Diagnóstico . . . . .	17
3.1.2	Soluções para Problemas de Diagnóstico . . . . .	21
3.2	Propriedades de Problemas de Diagnóstico . . . . .	23
3.3	Uma Álgebra para Conjuntos Geradores . . . . .	28
3.4	Solução do Problema . . . . .	40
3.4.1	Algoritmo . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Teoria das Coberturas Parcimoniosas e Tempo</b>	<b>44</b>
4.1	O Tempo no Diagnóstico Médico . . . . .	45
4.1.1	O tempo na Descrição do Conhecimento . . . . .	46
4.1.2	O Tempo na Descrição do Quadro Clínico . . . . .	47
4.1.3	O Tempo no Raciocínio Diagnóstico . . . . .	47

4.2	Formulação do Problema de Diagnóstico Dinâmico . . . . .	48
4.3	Soluções para o Problema de Diagnóstico Dinâmico . . . . .	52
4.3.1	Algoritmos . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Problemas de Diagnóstico Abertos</b>	<b>61</b>
5.1	Formulação do Problema de Diagnóstico Dinâmico Aberto e suas Soluções . . . . .	62
5.1.1	Algoritmos . . . . .	64
<b>6</b>	<b>Implementação de um Problema Médico de Diagnóstico Temporal</b>	<b>71</b>
6.1	Representação da Base de Conhecimento . . . . .	73
6.1.1	Problemas Encontrados e suas Soluções . . . . .	73
6.1.2	Implementação . . . . .	74
6.2	Representação do Caso . . . . .	77
6.2.1	Quadro Clínico . . . . .	77
6.2.2	Representação do Quadro Clínico (Caso) . . . . .	77
6.3	Solução do Problema de Diagnóstico . . . . .	78
6.4	Comparação entre as Versões Temporais e Atemporais . . . . .	81
<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>83</b>
7.1	Contribuições . . . . .	83
7.2	Limitações . . . . .	84
7.3	Extensões Futuras . . . . .	85
<b>A</b>	<b>Base de Conhecimento</b>	<b>87</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>96</b>

# Lista de Tabelas

2.1	Três modelos para construção de sistemas automatizados de diagnóstico. . . . .	12
3.1	A execução da solução do problema pelo algoritmo <i>BIPARTIDO</i>	42
6.1	Agentes causadores de intoxicações alimentares. . . . .	72

# Lista de Figuras

2.1	Associações causa-efeito de possíveis problemas de um automóvel.	13
3.1	Rede associativa de um problema de diagnóstico geral, em que os nós representam elementos diagnósticos e arcos relações causais. . .	17
3.2	Rede causal de uma base de conhecimento $KB = \langle D, M, C \rangle$ de um problema de diagnóstico. . . . .	18
3.3	Os conjuntos $efeitos(d_i)$ e $causas(m_j)$ definidos pela TCP. . . . .	20
3.4	Representação de uma cobertura irredundante $\{d_1, d_4\}$ de $M^+$ , em que $M^+$ não está contido em $efeitos(d_1)$ ou $efeitos(d_4)$ . . . . .	22
3.5	Uma taxonomia de coberturas, em que $S_{cm} \subseteq S_{ci} \subseteq S_{cr} \subseteq S_c \subseteq 2^D = S_c \cup S_n$ . . . . .	26
3.6	Um problema de diagnóstico $P_1$ . . . . .	30
4.1	Ordem cronológica de ocorrência das manifestações da Histoplasmose. . . . .	46
4.2	Grafos temporais das doenças $d_8$ e $d_9$ com suas respectivas funções distâncias temporais e durações. . . . .	50
4.3	Um caso em que a restrição de distância mínima não é satisfeita. . .	53
4.4	Um caso em que a restrição de distância máxima não é satisfeita. . .	54
5.1	Esboço do algoritmo <i>BIPARTIDO – TEMPORAL – ABERTO</i> . . . . .	70
6.1	Grafo temporal do Cogumelo Tóxico ( <i>Amanita phalloides</i> , <i>A. virosa</i> e <i>A. verna</i> ) . . . . .	76

# Capítulo 1

## Introdução

O problema de diagnóstico consiste em encontrar as explicações para a presença de um conjunto de *manifestações* (sintomas) utilizando o conhecimento sobre o mundo. Os problemas de diagnóstico podem ser encontrados em diversas áreas, como o diagnóstico dos sinais e sintomas de um paciente, a determinação da falha de um programa de computador, a causa de ruídos num sistema hidráulico, a localização de falhas num dispositivo eletrônico, e os motivos pelos quais uma criança encontra dificuldades em aprender aritmética [Reg82].

Devido às limitações da memória humana e à complexidade de diversos problemas de diagnóstico, os sistemas baseados em conhecimento para a solução do problema de diagnóstico possuem grande potencial para aplicações práticas. Os problemas de diagnóstico são usados em indústrias e são uma área ativa de pesquisa em IA.

Os sistemas baseados em regras e os modelos estatísticos de classificação foram os métodos mais utilizados na implementação de sistemas de diagnóstico. Recentemente, os modelos de raciocínio abduutivo baseados em associações têm sido aplicados na solução de problemas de diagnóstico, apresentando vantagens potenciais sobre os demais métodos. Informalmente, *abdução* ou *inferência abduitiva* significa “inferência das melhores explicações, ou as mais plausíveis, para um conjunto dado de fatos” [Pop73]. A abdução, juntamente com a dedução e indução, correspondem às três formas fundamentais de raciocínio [Pen90].

Neste contexto, a *Teoria das Coberturas Parcimoniosas*<sup>1</sup> (originalmente *Parimonious Covering Theory*) [Pen90] é apontada por seus autores como fundamento teórico para estes modelos na formalização da natureza abduitiva do raciocínio diagnóstico. Esta teoria sintetiza os esforços de dez anos de trabalho

---

<sup>1</sup>Denotada por TCP no restante desta dissertação.

do autor e outros pesquisadores na área de diagnóstico, podendo ser estendida para incorporar vários tipos de informação, como o conhecimento probabilístico, fundamental na representação das incertezas.

Embora o tempo seja um dos principais aspectos no diagnóstico, os sistemas para solução do problema de diagnóstico de primeira geração consideram que o domínio de sua aplicação é estático. Esta consideração é bastante limitante pois requer que todas as manifestações sejam observadas num determinado instante, ou que todas as entidades envolvidas no raciocínio exibam a propriedade de persistência para frente, isto é, se um fato é verdadeiro no instante  $t$ , permanece também em  $t'$ , com  $t' > t$  [Con91]. Esta consideração é totalmente irrealística. Por exemplo, no caso médico, na maioria das vezes um sintoma é observado no paciente durante um intervalo específico de tempo. A propriedade de persistência é negada toda vez que o paciente relata seus sintomas especificando a duração (como: “Eu tive febre por cinco dias na primeira semana de janeiro”).

Algumas das primeiras tentativas de se incorporar conhecimento e raciocínio temporais ao processo de diagnóstico são apresentadas em [Con89, Ham87, Lon83]. Os trabalhos recentes estão relacionados aos modelos causais devido ao reconhecimento da comunidade de Inteligência Artificial da forte relação entre causa e tempo [Rie77, All84, McD82, Sho90, Sho89]. Entre estes estão os trabalhos de Luca Console e Pietro Torasso em [Con91, Con93].

Apesar das vantagens sobre os sistemas baseados em regras e os modelos estatísticos de classificação, a TCP, citada acima, é também limitada quando aplicada à domínios dinâmicos, em que a ordem cronológica de ocorrência e duração das manifestações devem ser consideradas. Os próprios autores, nas conclusões apresentadas em [Pen90], destacam a necessidade de se incorporar fatores temporais à teoria.

A manutenção de hipóteses temporalmente inconsistentes durante e ao final do processo de solução do problema de diagnóstico, e a rejeição categórica incorreta de doenças são problemas que podem ocorrer na TCP quando não se considera o tempo. Este último problema ocorre quando se incorpora conhecimento probabilístico à TCP. Para este modelo estendido, quando uma doença necessariamente causa uma manifestação, e esta manifestação está ausente, então a doença é considerada categoricamente inconsistente. No entanto, problemas podem surgir quando não se avalia se houve tempo suficiente para esta manifestação ocorrer. Para contornar estes problemas relacionados ao tempo propõe-se nesta dissertação uma extensão temporal à TCP.

O tempo utilizado no diagnóstico médico foi escolhido como fonte de estudo para estender a TCP, devido ao reconhecimento da comunidade de Inteligência Artificial em Medicina [Ker90, Con91, Ham87, Lon83] da necessidade de se incor-

porar aspectos temporais na solução do problema. Outros trabalhos apresentados em [Con93, Dou93], relacionados à representação e raciocínio temporais, também inspiraram a elaboração da extensão temporal proposta nesta dissertação. O primeiro trata de técnicas para a verificação de restrições temporais em modelos causais, e o segundo, de um sistema utilizado em robótica no reconhecimento de situações em ambientes dinâmicos.

Para avaliar a extensão temporal proposta construiu-se um sistema simples para o diagnóstico de doenças de origem alimentar. Este problema de diagnóstico é fortemente temporal, incluindo 28 doenças e aproximadamente 60 manifestações diferentes. Os principais resultados obtidos foram a rápida construção da base de conhecimento e a redução do tempo na solução do problema.

Embora o modelo temporal estudado esteja relacionado a um domínio específico, isto é, medicina, deseja-se que a extensão proposta possa ser aplicada a outros problemas de diagnóstico dinâmicos.

Antes de finalizar este capítulo é descrita a forma com que os diagnosticadores humanos resolvem os problemas de diagnóstico, e os motivos pelos quais a solução de um problema de diagnóstico é um tipo de inferência abduativa. Em seguida, resume-se os capítulos restantes desta dissertação.

## 1.1 Solução de Problemas de Diagnóstico

É amplamente aceito que o mecanismo humano de inferência diagnóstica pertence à categoria de abdução [Pop73, Pop82, Reg83, Reg85, Cha85, Els78]. Nesta categoria o problema de diagnóstico é a classe mais típica e entendida. Considere o diagnóstico médico como exemplo. Os livros-texto médicos apresentam associações entre doenças e manifestações da forma “a doença  $d_i$  pode causar os sintomas (manifestações)  $m_1, m_2, \dots, m_k$ ”. Usualmente, algumas estimativas grosseiras são atribuídas a estas associações. Se um conjunto de sintomas ou manifestações está presente, o médico tenta identificar um conjunto de uma ou mais doenças (formação de hipóteses) que seja capaz de causar todas as manifestações presentes no paciente (ou pelo menos as mais significativas). As informações de estimativas de probabilidade e informações contextuais (por exemplo, idade do paciente e inter-relações entre doenças) são usadas para distinguir entre as possíveis hipóteses, no sentido de selecionar as mais plausíveis. Se as hipóteses resultantes não são convincentes, ou existe necessidade de discriminação entre as

hipóteses existentes, perguntas devem ser feitas, ou dados de laboratórios devem ser obtidos para se descobrir informações adicionais que possibilitem a revisão das hipóteses.

Pesquisadores de diversas áreas produziram estudos empíricos do raciocínio de diagnóstico humano, ou seja, como diagnosticadores humanos realizam inferência abduativa para atingir suas conclusões [Els78, Kas78, Rub75]. Baseado nestes estudos pôde-se concluir que o raciocínio diagnóstico humano sempre envolve a “formação de hipóteses” (formação das explicações candidatas), “atualização das hipóteses” (atualização das hipóteses existentes ou formação de novas hipóteses baseado na nova informação disponível) e “teste das hipóteses” (discriminação das hipóteses existentes). O ciclo de *formação de hipóteses e testes* continua até que a plausibilidade de uma ou mais hipóteses passe por um certo critério pré-estabelecido, e que sejam aceitáveis como explicações razoáveis (diagnose) para as manifestações presentes. O processo de formação de hipóteses e teste envolvido no raciocínio consiste, então, de ciclos com três fases:

- (1) *evocação de doenças*, no qual um conjunto de elementos individuais de hipóteses (doenças) é evocado através das associações com a nova manifestação fornecida;
- (2) *formação de hipóteses*, no qual os elementos de hipóteses gerados no passo anterior são combinados com as hipóteses previamente formadas, gerando um novo conjunto de hipóteses, de tal forma que cada nova hipótese possa explicar as manifestações anteriores e a nova manifestação;
- (3) *geração de perguntas ou teste das hipóteses*, no qual uma nova “pergunta” é gerada, e cuja resposta é utilizada para testar ou distinguir entre as hipóteses existentes.

O passo de evocação de doenças consiste na recuperação das doenças na memória de longa duração (“long-term memory”) à medida que o diagnosticador detecta uma nova manifestação, através da informação disponível sobre o problema. A evocação das causas potenciais de uma manifestação ocorre no estágio inicial do processo diagnóstico. Estas causas potenciais são obtidas através das associações causais, de conhecimento do diagnosticador, entre as doenças e suas manifestações. Idealmente, a base de conhecimento do diagnosticador ou memória de longa duração inclui o conjunto de todas as doenças que causam uma manifestação, e o conjunto de todas as possíveis manifestações de uma doença. Usualmente, uma *única* manifestação (ao invés de uma combinação de manifestações)

é responsável pela evocação de novas doenças para incorporação nas hipóteses envolvidas [Kas78].

A segunda fase do ciclo de formação de hipótese e teste, validação de hipóteses ou formação de hipóteses, envolve a incorporação das possíveis causas da nova manifestação nas hipóteses em questão. A formação de hipóteses pode requerer a atribuição da nova manifestação a uma doença considerada presente (isto é, presente em alguma hipótese existente), ou a adição de doenças evocadas pela nova manifestação para formar as novas hipóteses. Em outras palavras, o conjunto das hipóteses plausíveis está continuamente alterando durante este processo. Neste sentido, a abdução é considerada uma lógica não-monotônica [Reg84]. Num determinado instante, as hipóteses envolvidas podem se tornar relativamente complexas, não apenas pelo fato da incerteza sobre quais das diversas doenças explicam uma certa manifestação, mas também pela presunção da presença de múltiplas doenças simultaneamente (*hipóteses com múltiplas doenças*). É importante ressaltar que durante este processo dinâmico, diagnosticadores humanos tendem a focalizar suas atenções em apenas algumas hipóteses mais promissoras, enquanto as restantes são deixadas de lado, mas não esquecidas completamente. Mais adiante, se alguma manifestação não esperada tornar-se disponível, estas hipóteses podem ser reconsideradas. Em outras palavras, os diagnosticadores humanos adotam alguma forma de estratégia de busca “best-first” para limitar o espaço de busca.

Evidências empíricas sugerem que a formação de hipóteses pode ser examinada de forma mais clara através da resolução de dois objetivos conflitantes:

- *Objetivo de cobertura*: o objetivo de explicar todas as manifestações que estão presentes.
- *Objetivo de parcimônia*: o objetivo de minimizar a complexidade da explicação.

O segundo objetivo pode ser visto como uma tentativa de focalizar o processo de raciocínio e, desta forma, restringir o espaço de busca, como um reflexo das limitações da memória humana, ou como uma heurística de senso comum que é correta na maioria das vezes.

É importante avaliar a natureza seqüencial do raciocínio diagnóstico. À medida que o diagnosticador gradualmente adquire informação sobre o problema sua(s) hipótese(s) muda(m) refletindo a nova informação. Por exemplo, se um paciente se queixa de um repentino princípio de dor no peito, as hipóteses iniciais de um médico podem ser algo como:

HIPÓTESE H1: “Ataque cardíaco”, ou “embolia pulmonar”, “ou ...”

Embora se considere múltiplas doenças, as doenças acima são alternativas. À medida que detalhes futuros forem disponíveis, algumas destas doenças, inicialmente consideradas, podem ser eliminadas. Se for descoberto que o paciente também possui tosse crônica, então as hipóteses podem ser alteradas para:

HIPÓTESE H2: “Ataque cardíaco”, ou “embolia pulmonar”, “ou ...”

<sup>e</sup>  
“bronquite”, ou “asma”, “ou ...”

refletindo o fato de que o médico acredita que pelo menos duas doenças devem estar presentes para explicar os sintomas do paciente. Note que neste ponto há incertezas (indicadas por *ou*) e presunções de que múltiplas doenças estão presentes simultaneamente (indicadas por *e*). A presença de múltiplas doenças simultaneamente (duas neste caso, mais em outros) é uma das características da solução de problemas de diagnósticos gerais, considerada difícil de modelar nos sistemas dedutivos.

Outro aspecto da validação de hipóteses é a classificação das doenças competitivas. O termo *doenças competitivas* refere-se às hipóteses alternativas que explicam as mesmas manifestações (ou manifestações semelhantes), como ataque cardíaco e embolia pulmonar nas hipóteses H1 ou H2. A origem deste termo deve-se ao fato de que estas doenças podem ser vistas como “competitivas” entre si, na explicação das manifestações observadas (por outro lado, as doenças ataque cardíaco e bronquite podem ser vistas como “cooperantes” na formação das explicações). Ao final da seção de solução do problema, os diagnosticadores humanos são capazes de classificar as doenças competitivas apenas de forma bastante grosseira (por exemplo, a doença *d* está definitivamente presente, *d* é bastante provável de estar presente, *d* pode estar presente, e *d* é possível mas não provável). A maioria destas classificações pode ser explicada por duas regras: (a) ponderação baseada na contagem do número de sintomas positivos, ou (b) ponderação baseada no número de sintomas positivos menos o número de sintomas esperados que estão ausentes [Els78].

A terceira fase do ciclo de formação de hipóteses e teste, geração de perguntas, representa a fase de “teste”. A palavra “pergunta” é utilizada em sentido geral para indicar qualquer tipo de atividade de obtenção de informação. Os estudiosos da solução do problema de diagnóstico pelo homem freqüentemente dividem tais questões em duas categorias: *dirigidas à protocolo* e *dirigidas à hipóteses*. Perguntas dirigidas à protocolo são aquelas rotineiras que o diagnosticador geralmente pergunta. Por outro lado, perguntas dirigidas à hipóteses buscam informações

necessárias na modificação das hipóteses existentes. Os estudiosos que observam diagnosticadores às vezes atribuem cada pergunta dirigida à hipótese a uma estratégia de solução de um problema específico: tentativa de confirmar uma hipótese, tentativa de eliminar uma hipótese, ou tentativa de discriminar entre duas ou mais hipóteses [Kas78, Els78].

Diversos aspectos do processo de raciocínio diagnóstico são entendidos de forma incompleta no presente momento. Por exemplo, não é clara a forma com que o diagnosticador raciocina efetivamente sobre múltiplas doenças simultâneas. Em tais situações, cada manifestação deve ser atribuída a uma doença apropriada, e as doenças competitivas devem ser classificadas no contexto de outras doenças presentes. Também, é incerta a forma exata na qual o diagnosticador decide terminar o processo de diagnóstico porque uma “solução” foi alcançada.

O processo de solução do problema de diagnóstico pela TCP é semelhante ao ciclo de formação de hipótese e teste descrito acima, conforme apresentado no capítulo 3. Mantendo esta importante característica, a extensão temporal e categórica propostas nos capítulos 4 e 5, respectivamente, possibilitam a verificação e eliminação de hipóteses inconsistentes a cada ciclo da solução do problema. Em outras palavras, o processo é o mesmo, no entanto, considerando apenas as hipóteses consistentes.

## 1.2 Divisão do Restante da Dissertação

O resto desta dissertação está dividido da seguinte forma. No capítulo 2 apresenta-se um breve resumo dos sistemas automatizados para a solução do problema de diagnóstico. Informalmente, introduz-se algumas das terminologias da TCP. No capítulo 3 descreve-se os principais conceitos da teoria, como a formulação de problemas de diagnóstico e representação do conhecimento, operações para formação e atualização de hipóteses e um algoritmo para a solução do problema.

No capítulo 4 a TCP é estendida para incorporar o conhecimento temporal. Inicialmente são apresentados os aspectos temporais no diagnóstico médico que influenciaram na extensão temporal proposta. A formulação de problemas de diagnóstico dinâmico e o algoritmo para a solução do problema são também descritos neste capítulo.

A noção de problema de diagnóstico aberto é descrita no capítulo 5. Através desta noção e do formalismo de representação temporal proposto no capítulo 4, apresenta-se uma solução para o problema das rejeições categóricas, que ocorre quando se incorpora conhecimento probabilístico à TCP.

No capítulo 6 apresenta-se uma experiência da aplicação da extensão temporal proposta a um problema médico de diagnóstico temporal. Os resultados obtidos com a extensão temporal proposta são comparados com os obtidos na TCP descrita no capítulo 3.

Finalmente, no capítulo 7 descreve-se as contribuições, limitações e futuras extensões desta dissertação.

## Capítulo 2

# Modelos Computacionais Para a Solução do Problema de Diagnóstico

Neste capítulo é apresentado um breve resumo dos sistemas automatizados para solução de problemas de diagnóstico descrito em [Pen90]. O capítulo está organizado em duas partes. Na seção 2.1 descreve-se sucintamente dois importantes métodos utilizados pelos sistemas de diagnósticos: os modelos estatísticos de classificação e os sistemas baseados em regras. Na seção seguinte descreve-se outra classe de sistemas denominada *sistemas abduativos baseados em associações*, que modela a idéia de raciocínio abduativo em modelos computacionais. Um simples exemplo de tais sistemas é apresentado para introduzir a terminologia da TCP.

## 2.1 Sistemas para Solução de Problemas Baseados em Conhecimento

### 2.1.1 Modelos Estatísticos de Classificação: Classificação Bayesiana

A classificação Bayesiana é o modelo estatístico mais utilizado na solução de problemas de diagnóstico desde o advento dos computadores digitais [Led59], às vezes atingindo excelentes resultados. O conhecimento dos sistemas diagnósticos que utilizam a classificação Bayesiana é representado por probabilidades anteriores de doenças e probabilidades condicionais entre doenças e manifestações. Por exemplo, na medicina há situações em que cada uma das  $n$  doenças podem indi-

vidualmente ser a causa dos sintomas de um paciente. Se  $d_i$  é a *i*ésima patologia, então  $P(d_i)$  representa a probabilidade anterior de  $d_i$ , isto é, quão comum  $d_i$  ocorre em geral. Seja  $M_J$  o conjunto de todas as manifestações presentes de um paciente em particular, e seja  $P(M_J/d_i)$  a probabilidade condicional de  $M_J$  na presença de  $d_i$ , isto é, quão freqüente as manifestações  $M_J$  ocorrem na presença de  $d_i$ . Suponha que se saiba  $P(d_i)$  para todas as doenças e  $P(M_J/d_i)$  para todas as possíveis combinações de manifestações para cada  $d_i$ . Então, considerando que as doenças são mutuamente exclusivas e exaustivas, o teorema de Bayes pode ser diretamente aplicado para obter  $P(d_i/M_J)$ , isto é, a probabilidade posterior de cada  $d_i$  para um dado paciente, através da fórmula

$$P(d_i/M_J) = \frac{P(M_J/d_i)P(d_i)}{P(M_J)} = \frac{P(M_J/d_i)P(d_i)}{\sum_{k=1}^n P(M_J/d_k)P(d_k)}$$

A probabilidade posterior  $P(d_i/M_J)$  fornece a probabilidade de cada doença  $d_i$  ocorrer na presença das manifestações  $M_J$ . A doença com maior probabilidade posterior calculada pode ser escolhida como diagnose.

Esta técnica atingiu alta performance em domínios específicos, como diagnose da causa da dor abdominal aguda [deD75], doença cardíaca congênita [War64] e hemorragia cerebral [Zag83].

### 2.1.2 Sistemas de Produção Baseado em Regras

Os sistemas de diagnóstico baseados em regras produziram importantes resultados na última década. O MYCIN [Sho76], para doenças infecciosas, é o mais conhecido. Neste modelo o conhecimento é representado por um conjunto de regras ou produções. Associado a cada regra pode haver estimativas de certeza que são combinadas para produzir uma estimativa final das conclusões destes sistemas.

O mecanismo de inferência dos sistemas baseados em regras consiste de um interpretador de regras que aplica regras à base de conhecimento, baseado nas características do problema, no sentido de alcançar conclusões sobre o caso.

Além do MYCIN, as principais aplicações deste método são CASNET/ GLAUCOMA [Wei78] para glaucoma, o protótipo MDX [Cha79] para diagnose médica geral e DENTRAL para análise de estruturas moleculares na química orgânica.

## 2.2 Modelos Abdutivos Baseados em Associações

As redes associativas, ou semânticas, têm sido estudadas extensamente como método de representação de conhecimento em IA [Qui68, Fin79]. Uma rede associativa consiste usualmente de *nós*, representando entidades como objetos, conceitos e eventos, e *arcos* representando inter-relações e associações entre nós. O significativo poder das redes associativas as torna particularmente adequadas para representação das associações causais em diversas aplicações de diagnóstico.

### 2.2.1 Conceitos Básicos

O uso das associações simbólicas causa-efeito entre entidades individuais, e um processo repetitivo de formação de hipótese e teste como mecanismo básico de inferência são as características dos modelos abdutivos baseado em associações para a solução do problema de diagnóstico. Alguns sistemas de diagnóstico auxiliados por computador podem ser classificados nesta categoria, como INTERNIST-1 [Pop75, Mil82] para medicina interna, NEUROLOGIST [Cat79] para neurologia, PIP [Pau76] para edema, IDT [Shu82] para diagnose de problemas de hardware de computador, KMS.HT [Reg81] para sistemas independentes de domínio, e outros.

Dado o conjunto de uma ou mais características iniciais do problema, o mecanismo de inferência gera um conjunto de hipóteses plausíveis potenciais ou “causas” que possam explicar as características do problema dado. Estas hipóteses são testadas então de duas maneiras. A primeira pelo uso de diversos procedimentos que medem suas habilidades em explicar as características presentes, enquanto a segunda pela geração de novas questões cujas respostas auxiliarão na discriminação das hipóteses mais prováveis. Este ciclo de formação de hipótese e teste é então repetido com a informação adicional adquirida. As hipóteses anteriores podem ser atualizadas formando agora novas hipóteses. Uma vez que este mecanismo de inferência é um modelo direto do processo de raciocínio diagnóstico humano, descrito no capítulo 1, o processamento feito por estes sistemas é relativamente de fácil entendimento para os usuários.

Os modelos abdutivos baseados em associações, usando conhecimento associativo causa-efeito são bastante promissores. No entanto, esta técnica está ainda em estágio inicial de desenvolvimento com relação aos modelos estatísticos de classificação e aos sistemas baseados em regras. Diversos dos modelos abdutivos desenvolvidos são dependentes de domínio, como INTERNIST-1 [Pop75], PIP [Pau76], e IDT [Shu82]. A representação do conhecimento nestes sistemas está relacionada a uma aplicação específica, e o mecanismo de inferência conta

Modelo	Representação	Mecanismo de Inferência	Base Teórica
modelo estatístico de classificação	probabilidades anteriores e condicionais	cálculo das probabilidades posteriores	teoria da probabilidade
dedução baseado em regras	regras condicionais (produções)	deduções (com melhoramentos)	lógica de primeira ordem
abdução baseado em associações	frames e redes semânticas	formação de hipótese e teste	?

Tabela 2.1: Três modelos para construção de sistemas automatizados de diagnóstico.

intensamente com heurísticas extraídas das características destes domínios específicos. Estes modelos de domínio específicos obtiveram sucesso em suas respectivas aplicações, auxiliaram no esclarecimento das idéias básicas da natureza abduativa da inferência diagnóstica, e inspiraram o abandono dos modelos tradicionais de classificação estatística e baseados em regras. Por outro lado, a natureza de domínio específico destes modelos limitou suas generalizações e suas aplicações a outros problemas.

Os modelos mais recentes desta categoria incluem aplicações independentes de domínio, como o KMS.HT [Reg81], MGR [Coo87] e PIERCE [Pun86]. Claramente, separando os aspectos independentes de domínio da representação do conhecimento e o processo de inferência da informação específica da aplicação, estes sistemas usufruem de uma grande generalidade, mas permanecem estacionários na formulação teórica do raciocínio abduativo: o código, por si só, é o modelo para estes sistemas.

Resumidamente, enquanto os modelos estatísticos de classificação e os sistemas baseados em regras possuem teorias bem definidas, isto é, teoria da probabilidade e lógica dedutiva, respectivamente, os modelos abduativos baseados em associações, no momento, necessitam de uma base teórica para suportá-los.

### 2.2.2 Teoria das Coberturas Parcimoniosas: Um Resumo Informal

A TCP é um modelo formal de inferência diagnóstica para os modelos abduativos baseados em associações. Em outras palavras, a teoria representa uma tentativa, pelo menos em parte, de remover o ponto de interrogação na tabela 2.1. A teoria foi criada por Reggia et al. [Reg83, Reg85], e substancialmente estendida por Peng e Reggia, assim como outros autores [Pen85, Pen86, Pen87a, Pen87b, Pen87c], nos últimos anos. Antes de iniciar o tratamento formal da teoria, inicialmente ilustra-se as idéias básicas de como o conhecimento é organizado e

utilizado, e a forma com que a inferência é conduzida através de um simples exemplo.

A rede causal da figura 2.1 ilustra, as associações causa-efeito de alguns problemas que podem ocorrer num automóvel. As associações são dirigidas e conectam dois tipos diferentes de entidades, denominadas *doenças* e *manifestações*, denotadas pelos conjuntos  $D$  e  $M$ , respectivamente. Manifestações individuais são denotadas por  $m_j$ , enquanto doenças individuais por  $d_i$ . A rede resultante representa o conhecimento específico do domínio. O sentido das relações é das doenças (i.e. causas) para as manifestações (i.e. efeitos). Assim, cada doença é associada com todas as manifestações que pode causar. Através da rede causal pode-se *evocar* todas as possíveis causas de uma manifestação. Por exemplo, “motor não funciona” evoca duas possíveis doenças: “bateria descarregada” ou “linha de combustível bloqueada”. O conjunto de doenças evocadas pode ser considerado uma composição de um diagnóstico diferencial (conjunto de explanatórias alternativas) para a manifestação que as evocou.

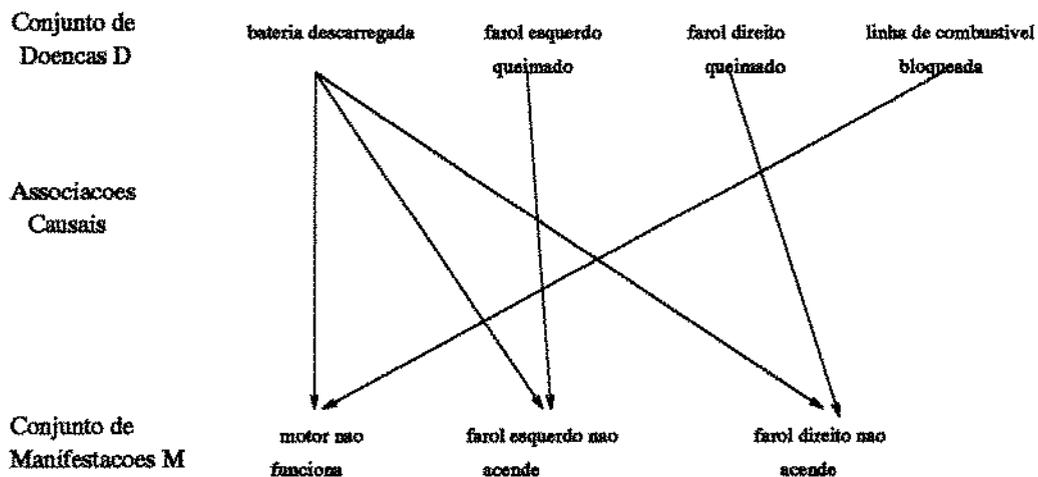


Figura 2.1: Associações causa-efeito de possíveis problemas de um automóvel.

Quando a primeira manifestação “motor não funciona” é detectada, durante o processo de solução do problema de diagnóstico, as duas doenças evocadas constituem as duas hipóteses iniciais:

“bateria descarregada” ou “linha de combustível bloqueada”.

Cada uma destas hipóteses consiste de uma única doença, e cada doença é capaz de fazer com que o motor não funcione, sendo as únicas doenças possíveis,

conforme a base de conhecimento da figura 2.1. Para que se possa distinguir entre as duas hipóteses, perguntas sobre a presença de outras manifestações devem ser respondidas como:

“Os faróis funcionam?”

Se ambos os faróis não funcionam, então tem-se duas novas manifestações (relacionadas aos faróis direito e esquerdo). Por sua vez, cada uma destas manifestações evoca seu próprio conjunto de doenças, isto é, suas respectivas causas. O mecanismo de inferência da TCP incorpora sucessivamente estes conjuntos de doenças evocadas às hipóteses existentes. Neste exemplo específico, a TCP apresenta duas hipóteses alternativas ou explicações para as três manifestações:

“bateria descarregada”  
ou  
“linha de combustível bloqueada” e  
“farol esquerdo queimado” e  
“farol direito queimado.”

A plausibilidade destas duas hipóteses pode ser justificada da seguinte forma. Primeiramente cada hipótese *cobre* todas as três manifestações, no sentido de que cada manifestação pode ser explicada por uma doença da hipótese. Em segundo lugar cada hipótese é parcimoniosa, ainda que num sentido diferente. A primeira hipótese contém apenas uma doença, sendo a menor cobertura das três manifestações, e assim denominada *cobertura mínima*. A segunda hipótese contém três doenças, não assemelhando aspecto parcimonioso ou simples, especialmente quando comparada à hipótese de uma única doença. No entanto, esta segunda hipótese é ainda parcimoniosa uma vez que se uma doença for retirada da hipótese ela não mais será uma cobertura para todas as manifestações. Tais hipóteses são denominadas *coberturas irredundantes* pois não contêm nenhuma doença redundante ou extra.

O processo de inferência utilizado nesta teoria pode ser considerado como um modelo do ciclo formação de hipótese e teste do raciocínio humano [Els78, Kas78, Rub75] discutido no capítulo 1. A fase de “formação de hipóteses” do ciclo é realizada pela evocação de doenças através das associações causais da figura 2.1, e a atualização das hipóteses para obter as coberturas parcimoniosas de todas as manifestações conhecidas. A “fase de teste” é realizada pelo processo de geração de perguntas e respostas, na busca de mais manifestações para discriminação de hipóteses. Este ciclo continua, tomando-se uma nova manifestação por vez, até que todas as questões relevantes sejam produzidas e todas as manifestações

processadas. Em diversas situações do mundo real uma única doença não é capaz de explicar a presença de todas as manifestações presentes. Portanto, as hipóteses finais não são restritas a uma única doença, como é o caso da segunda hipótese do exemplo acima envolvendo três doenças.

Ao invés de representar a solução (todas as coberturas mínimas) como uma lista explícita de todas as possíveis hipóteses, a TCP organiza as doenças envolvidas nas hipóteses numa estrutura compacta denominada *gerador*. Um gerador é um conjunto de diversos grupos de doenças diferentes que implicitamente representa um conjunto de hipóteses de uma solução, podendo ser utilizado para gera-las. Se  $A$ ,  $B$  e  $C$  são conjuntos disjuntos de doenças distintas, um gerador  $\{A, B, C\}$  representa o conjunto de todas as hipóteses, de tal forma que uma hipótese é formada tomando-se um elemento de  $A$ , outro de  $B$  e outro de  $C$ . Assim, o gerador implicitamente representa todas as hipóteses da forma  $\{d_A, d_B, d_C\}$  em que  $d_A \in A$ ,  $d_B \in B$  e  $d_C \in C$ . Por exemplo, um gerador

$$\{\{d_1, d_2, d_3\} \{d_4, d_5, d_6, d_7\}\}$$

representa compactamente as doze hipóteses

$$\{\{d_1, d_4\} \{d_1, d_5\} \{d_1, d_6\} \{d_1, d_7\} \{d_2, d_4\} \{d_2, d_5\} \\ \{d_2, d_6\} \{d_2, d_7\} \{d_3, d_4\} \{d_3, d_5\} \{d_3, d_6\} \{d_3, d_7\}\}.$$

Em geral, se o  $i$ ésimo conjunto de um gerador contém  $n_i$  doenças, então este gerador representa  $\prod_i n_i$  hipóteses, geralmente uma grande economia com relação a representação explícita (ou separada). Além do mais, como será apresentado no próximo capítulo, as doenças de um único conjunto de um gerador (por exemplo  $\{d_1, d_2, d_3\}$  no exemplo acima) tipicamente cobrem o mesmo conjunto (ou similar) de manifestações, facilitando a solução do problema. A forma de representação das hipóteses por um gerador, equivale à forma de organização das possibilidades (doenças competitivas) pelos diagnosticadores na solução do problema.

## Capítulo 3

# Fundamentos da Teoria das Coberturas Parcimoniosas

Neste capítulo apresenta-se a formalização da solução do problema de diagnóstico abdutivo descrita em [Pen90]. Conforme apresentado no capítulo 2, tal formalização envolve as entidades de diagnóstico como doenças e manifestações, associações causais relacionando estas entidades, a noção de explicação diagnóstica, e o mais importante que é o processo de raciocínio da formação de hipótese e teste. O principal objetivo é derivar um modelo formal que represente parte significativa do conhecimento causal e o método de inferência descritos nos capítulos anteriores.

Na TCP o conhecimento de diagnóstico é representado como uma rede associativa de relações causais (veja figura 3.1). As doenças (conjunto  $D$ ), estão relacionadas casualmente aos estados patológicos intermediários (conjunto  $S$ ), que por sua vez estão relacionados às manifestações mensuráveis (conjunto  $M$ ). Por exemplo, na medicina, “ataque cardíaco” é uma doença, “choque” um estado patológico, e “confuso” uma manifestação. O ataque cardíaco pode causar choque que por sua vez pode deixar alguém confuso. O estado de estar confuso é considerado uma anormalidade diretamente observável, tornando-o uma manifestação, enquanto choque e ataque cardíaco não são diretamente observáveis (suas presenças devem ser inferidas).

Nesta dissertação considera-se a *versão simplificada* da TCP. Na versão simplificada o problema de diagnóstico é restrito apenas às entidades doenças e manifestações, e as relações causais entre estes dois tipos de entidades. Os estados patológicos (ou síndromes) são desconsiderados.

O conhecimento associativo usado em problemas de diagnósticos gerais, em

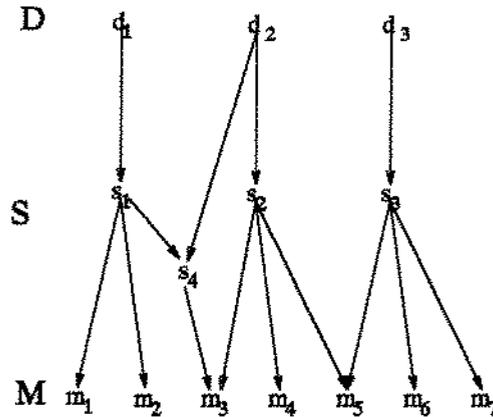


Figura 3.1: Rede associativa de um problema de diagnóstico geral, em que os nós representam elementos diagnósticos e arcos relações causais.

que estão envolvidos estados intermediários e cadeias de arcos causais é usualmente muito extenso e complexo.

O resto deste capítulo está dividido da seguinte forma. Na seção 3.1 inicia-se a formalização de problemas de diagnóstico e suas soluções. A análise das propriedades desta formulação é descrita na seção 3.2. Uma parte considerável deste capítulo é dedicada ao desenvolvimento de uma álgebra para geradores apresentada na seção 3.3. Esta álgebra provê operações básicas para o algoritmo de solução do problema. Finalmente, na seção 3.4 é apresentado o algoritmo para a solução do problema e sua correção é demonstrada.

## 3.1 Formulação do Problema

### 3.1.1 Problemas de Diagnóstico

Na versão simplificada da TCP, utiliza-se dois conjuntos finitos e discretos que definem o escopo de problemas de diagnóstico (veja figura 3.2). O conjunto  $D$  representa o conjunto de todas as possíveis doenças  $d_i$  que podem ocorrer, e o conjunto  $M$  todas as possíveis manifestações  $m_j$  que podem ocorrer quando uma ou mais doenças estiverem presentes. Assume-se que  $D$  e  $M$  não possuem elementos em comum, e que a presença de qualquer  $d_i$  não é diretamente mensurável.

Para modelar a noção intuitiva de causa utiliza-se uma relação  $C$ , de  $D$  para  $M$ , associando individualmente doenças e manifestações. Uma associação  $\langle d_i, m_j \rangle$  em  $C$  significa que  $d_i$  pode diretamente causar  $m_j$ . Note que não

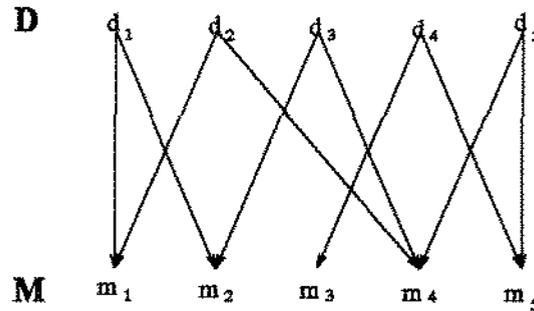


Figura 3.2: Rede causal de uma base de conhecimento  $KB = \langle D, M, C \rangle$  de um problema de diagnóstico.

é válido afirmar que  $d_i$  necessariamente causa  $m_j$ . Em outras palavras, a probabilidade associada a uma associação causal é suposta não ser zero (nenhuma associação causal neste caso) nem um (casualidade necessária), mas algum valor intermediário. Este fato reflete a situação do mundo real em diversos casos. Por exemplo, nem todos os pacientes com gripe possuem os mesmos sintomas. Alguns podem ter febre, faringite, tosse, erisipela em curso, e assim por diante, enquanto outros podem ter apenas alguns destes sintomas. Os conjuntos  $D$ ,  $M$  e  $C$  juntos constituem a base de conhecimento  $KB$  de um problema de diagnóstico.

Para completar a formulação do problema necessita-se de um caso particular. Utiliza-se  $M^+$  como um subconjunto de  $M$  para denotar o conjunto de todas as manifestações presentes, isto é, manifestações conhecidas de um determinado caso. O conjunto  $M^+$  não precisa necessariamente ser especificado por completo no início da solução de um problema de diagnóstico, isto é,  $M^+$  pode ser gradualmente obtido de respostas às perguntas durante o processo seqüencial de formação de hipóteses e teste.

A partir das idéias acima, define-se formalmente um problema de diagnóstico.

**Definição 3.1** Um problema de diagnóstico  $P$  é um par  $\langle KB, Ca \rangle$  em que:

- $KB = \langle D, M, C \rangle$  é a base de conhecimento, composta por
  - $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$  é um conjunto finito, não vazio, de elementos denominados doenças;
  - $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$  é um conjunto finito, não vazio, de elementos denominados manifestações;

–  $C \subseteq D \times M$  é uma relação denominada *causação*;

- $Ca = \langle M^+ \rangle$  é o **caso**, e  $M^+ \subseteq M$  é o conjunto de manifestações presentes no caso.

Pela definição, os conjuntos  $D$ ,  $M$  e  $C$  juntos especificam o ambiente do problema em que o processo de diagnóstico é conduzido. Por exemplo, para o problema simples de diagnóstico da figura 3.2,  $D$  é o conjunto formado por cinco doenças  $d_1, d_2, \dots, d_5$ , enquanto  $M$  por cinco manifestações  $m_1, m_2, \dots, m_5$ . O produto cartesiano  $D \times M$ , na definição 3.1, representa um conjunto de pares  $\langle d_i, m_j \rangle$  para cada doença distinta  $d_i$  em  $D$ , e cada manifestação distinta  $m_j$  em  $M$ . Para o problema da figura 3.2, há no total  $5 \times 5 = 25$  pares em  $D \times M$ . A relação  $C$  é tipicamente um pequeno subconjunto de  $D \times M$ , conforme ilustrado na figura 3.2. Por exemplo,  $d_1$  e  $m_1$  estão casualmente associados, o que não ocorre com  $d_1$  e  $m_3$ . Assim,  $\langle d_1, m_1 \rangle$  pertence à  $C$ , o que não é o caso de  $\langle d_1, m_3 \rangle$ . Na figura 3.2, há dez pares do tipo doença-manifestação na relação  $C$ .

O conjunto  $M^+$  representa as manifestações que estão presentes para um problema específico (ao contrário do conhecimento genérico em  $D$ ,  $M$  e  $C$ ,  $M^+$  é o conhecimento de um caso específico ou instância). Este conjunto corresponde à entrada de um sistema baseado em conhecimento. Em situações como as da figura 3.2, em que não se está preocupado com um problema específico de diagnóstico, mas interessado apenas na rede causal associativa, utiliza-se  $KB = \langle D, M, C \rangle$  para a rede em questão. Na definição do problema acima, vale a pena destacar que não há nenhuma restrição na relação causal  $C$ , e na entrada do problema  $M^+$ : qualquer doença pode estar associada potencialmente a qualquer manifestação, e qualquer manifestação pode pertencer à  $M^+$ .

Para um problema de diagnóstico  $P$ , é conveniente e útil definir os seguintes conjuntos ou funções baseadas na relação  $C$ :

**Definição 3.2** Para todo  $d_i \in D$  e  $m_j \in M$  num problema de diagnóstico  $P$ ,  
 $efeitos(d_i) = \{m_j \mid \langle d_i, m_j \rangle \in C\}$ , o conjunto dos elementos diretamente causados por  $d_i$ ; e  
 $causas(m_j) = \{d_i \mid \langle d_i, m_j \rangle \in C\}$ , o conjunto dos elementos que podem diretamente causar  $m_j$ .

Os conjuntos  $efeitos(d_i)$  e  $causas(m_j)$  são ilustrados na figura 3.3. Conforme apresentado no capítulo 2, estes conceitos são intuitivamente familiares aos diagnosticadores humanos. Por exemplo, nos livros-texto médicos a descrição das doenças freqüentemente inclui, entre outras coisas, o conjunto  $efeitos(d_i)$ , isto é,

as manifestações causadas pela doença  $d_i$ . Clínicos freqüentemente referem-se ao “diagnóstico diferencial” de uma manifestação  $m_j$ , que corresponde ao conjunto  $causas(m_j)$ . Os conjuntos definidos acima podem facilmente ser generalizados de doenças e manifestações individualmente para conjuntos de doenças e manifestações conforme apresentado a seguir.

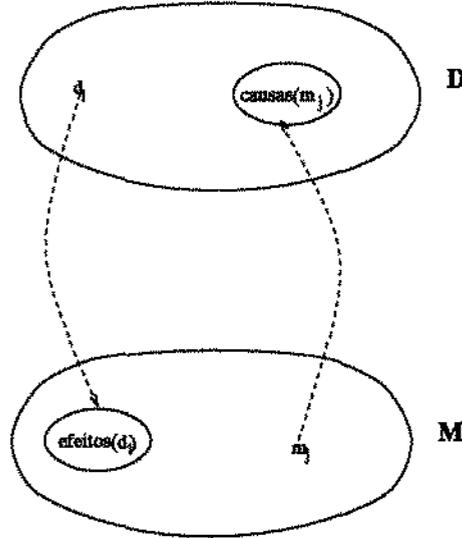


Figura 3.3: Os conjuntos  $efeitos(d_i)$  e  $causas(m_j)$  definidos pela TCP.

**Definição 3.3** Para todo  $D_L \subseteq D$  e  $M_J \subseteq M$  num problema de diagnóstico  $P$ ,  
 $efeitos(D_L) = \bigcup_{d_i \in D_L} efeitos(d_i)$ , e  
 $causas(M_J) = \bigcup_{m_j \in M_J} causas(m_j)$ .

Assim, por exemplo, os efeitos de um conjunto de doenças são apenas a união dos efeitos individuais de cada doença do conjunto.

**Exemplo:** Para o problema de diagnóstico da figura 3.2,

$$efeitos(d_1) = \{m_1, m_2\},$$

$$causas(m_2) = \{d_1, d_3\},$$

$$efeitos(\{d_1, d_4\}) = \{m_1, m_2, m_3, m_5\}, \text{ e}$$

$$causas(\{m_4, m_5\}) = \{d_2, d_3, d_4, d_5\}. \quad \square$$

### 3.1.2 Soluções para Problemas de Diagnóstico

Uma vez caracterizados os problemas de diagnóstico, caracteriza-se agora suas soluções. Para isto, define-se a noção de “cobertura”; baseado na relação causal  $C$ , decide-se o critério de parcimônia, e formalmente define-se o conceito de uma explicação (hipóteses “explicativas”).

**Definição 3.4** O conjunto  $D_L \subseteq D$  é dito ser uma **cobertura** de  $M_J \subseteq M$  se  $M_J \subseteq \text{efeitos}(D_L)$ .

Baseado na noção de “cobertura”, que formaliza o termo impreciso “causalmente explica”, define-se um dos mais importantes conceitos da TCP: a explicação diagnóstica.

**Definição 3.5** Um conjunto  $E \subseteq D$  é dito ser uma **explicação** para  $M^+$  para um problema de diagnóstico, se e somente se,  $E$  cobre  $M^+$  e satisfaz um certo critério de parcimônia.

Note que a definição de uma “explicação” consiste em três condições: o requisito cobertura (toda manifestação em  $M^+$  deve estar causalmente associada a algum dos membros de  $E$ ), o requisito de parcimônia (a cobertura deve ser parcimoniosa), e o requisito de que uma explicação deve consistir apenas de doenças. A condição de cobertura modela o que intuitivamente espera-se de uma “explicação”, isto é, a explicação deve ser capaz de “explicar causalmente” todas as manifestações ditas estarem presentes. Uma explicação deve também ser um subconjunto de  $D$ .

Baseado na definição 3.5, uma questão central desta teoria é: o que torna uma cobertura de  $M^+$  mais provável que outra? Como apresentado no capítulo 2, existem diversos critérios para noção imprecisa de parcimônia. Cardinalidade mínima e irredundante são apenas dois destes critérios.

#### Definição 3.6

- (1) Uma cobertura  $D_L$  de  $M_J$  é dita ser **mínima** se sua cardinalidade for a menor de todas as coberturas de  $M_J$ .
- (2) Uma cobertura  $D_L$  de  $M_J$  é dita ser **irredundante** se nenhum de seus subconjuntos próprios for também uma cobertura de  $M_J$ ; caso contrário a cobertura é dita ser **redundante**.
- (3) Uma cobertura  $D_L$  de  $M_J$  é dita ser **relevante** se for um subconjunto de  $\text{causas}(M_J)$ ; caso contrário, a cobertura é dita ser **irrelevante**.

No capítulo 2 foram apresentados exemplos de coberturas mínimas e irredundantes. A figura 3.4 ilustra graficamente uma cobertura irredundante de duas doenças para um dado  $M^+$ .

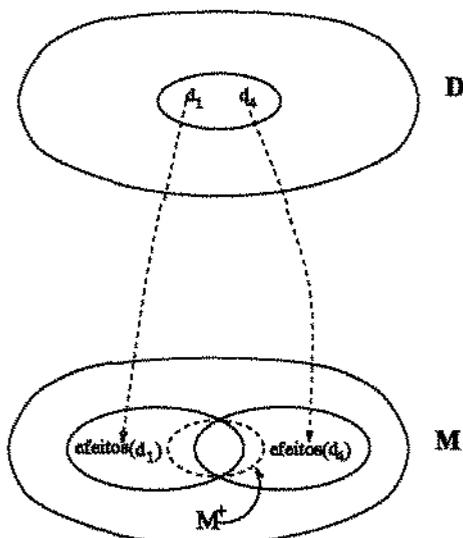


Figura 3.4: Representação de uma cobertura irredundante  $\{d_1, d_4\}$  de  $M^+$ , em que  $M^+$  não está contido em  $efeitos(d_1)$  ou  $efeitos(d_4)$ .

O terceiro critério de parcimônia acima, *relevância*, é mais “fraco” do que irredundância. Coberturas deste tipo são denominadas relevantes, porque cada doença de uma destas coberturas está causalmente associada a alguma manifestação presente (isto é, a doença pertence ao conjunto  $causas(M^+)$ ). Este fato reflete situações do mundo real, em que a diagnose usualmente consiste apenas daquelas doenças que são evocadas por um conjunto dado de manifestações presentes. Uma doença em que nenhuma de suas manifestações está presente é usualmente considerada um componente impossível para a diagnose, embora seja possível imaginar, presumivelmente, raras situações em que uma cobertura irrelevante possa ser de interesse<sup>1</sup>.

Há outros critérios de parcimônia possíveis. Entretanto, por razões conceituais, a irredundância é a escolha preferível. O principal motivo é que através do conjunto de todas as coberturas irredundantes é possível gerar todas as co-

<sup>1</sup>Por exemplo, se  $d_i$  possui uma probabilidade posterior de 0,99, então mesmo que nenhuma de suas manifestações esteja presente, uma cobertura relevante incluindo  $d_i$  pode ser uma possibilidade viável.

berturas. Assim, a não ser que se afirme o contrário, quando se falar em uma cobertura ou explicação parcimoniosa, sempre estará se referindo a uma cobertura irredundante.

Em diversos problemas de diagnóstico, tais como os que ocorrem na medicina, o diagnosticador está geralmente interessado em conhecer todas as explicações plausíveis para um caso. Estas explicações, como alternativas, podem interferir no andamento das ações a serem tomadas pelo diagnosticador. Este fato conduz à seguinte definição de solução do problema:

**Definição 3.7** *A solução de um problema de diagnóstico  $P = \langle KB, Ca \rangle$ , denotado por  $Sol(P)$ , é o conjunto de todas as explicações para  $M^+$ .*

**Exemplo:** Na figura 3.2,  $\{d_1, d_4\}$  e  $\{d_2, d_3, d_4\}$  são as únicas explicações plausíveis (isto é, coberturas irredundantes) para  $M^+ = \{m_1, m_2, m_3\}$  e, por isto, constituem a solução para o problema. Todas as duas coberturas são coberturas irredundantes de  $M^+$ , enquanto a primeira é, também, uma cobertura mínima.  $\square$

Ao contrário dos sistemas de produção baseados em regras e dos modelos estatísticos de classificação, a TCP provê formas sistemáticas para a construção de todas (ou algumas) explicações para diversos problemas de diagnóstico. Neste método de solução de problemas conjuntos de doenças são formados e checados para confirmação, baseado nos princípios de cobertura e parcimônia. A natureza construtiva da solução do problema é uma das características distintas desta teoria, assim como de outros modelos abduativos. Antes de estabelecer os aspectos para a solução do problema da teoria, alguma de suas propriedades são primeiramente analisadas.

## 3.2 Propriedades de Problemas de Diagnóstico

As proposições seguintes descrevem certas propriedades básicas dos problemas de diagnóstico definidos na TCP. Estas proposições são utilizadas repetidamente de forma explícita e implícita nos subseqüentes desenvolvimentos da teoria neste capítulo. Primeiro, são especificadas algumas das mais elementares propriedades, obtidas diretamente das definições anteriores.

**Lema 3.1** *Seja  $KB = \langle D, M, C \rangle$  uma rede causal para um problema de diagnóstico  $P$ , tal que  $d_i \in D$ ,  $m_j \in M$ ,  $D_L, D_N \subseteq D$ , e  $M_J \subseteq M$ . Então*

- (a)  $\text{efeitos}(d_i) \neq \emptyset$ ,  $\text{causas}(m_j) \neq \emptyset$ ;
- (b)  $d_i \in \text{causas}(\text{efeitos}(d_i))$ ,  $m_j \in \text{efeitos}(\text{causas}(m_j))$ ;
- (c)  $D_L \subseteq \text{causas}(\text{efeitos}(D_L))$ ,  $M_J \subseteq \text{efeitos}(\text{causas}(M_J))$ ;
- (d)  $M = \text{efeitos}(D)$ ,  $D = \text{causas}(M)$ ;
- (e)  $d_i \in \text{causas}(m_j)$ , se e somente se,  $m_j \in \text{efeitos}(d_i)$ ;
- (f)  $\text{efeitos}(D_L) - \text{efeitos}(D_N) \subseteq \text{efeitos}(D_L - D_N)$ .

**Lema 3.2** Se  $KB = \langle D, M, C \rangle$  é a rede causal para um problema de diagnóstico  $P$  com  $D_L \subseteq D$  e  $M_J \subseteq M$ , então  $D_L \cap \text{causas}(M_J) = \emptyset$ , se e somente se,  $M_J \cap \text{efeitos}(D_L) = \emptyset$ .

Agora pode-se prosseguir na caracterização do conceito de explicação, para um problema de diagnóstico, pelos lemas seguintes. Pela definição de cobertura irredundante fica claro que:

**Lema 3.3** Se  $D_N$  é uma cobertura de  $M_J$  num problema de diagnóstico, então existe um  $D_L \subseteq D_N$  que é uma cobertura irredundante de  $M_J$ .

Os lemas 3.1(d) e 3.3 conduzem, imediatamente, ao seguinte resultado, que é garantido para todos os três requisitos da definição 3.5.

**Teorema 3.4 (Teorema da Existência de uma Explicação)** Existe pelo menos uma explicação para  $M^+$  para um problema de diagnóstico  $P = \langle \langle D, M, C \rangle, \langle M^+ \rangle \rangle$ .

Para qualquer cobertura  $D_L$  de  $M^+$ , se todo  $m_j \in M^+$  coberto por algum  $d_i \in D_L$ , for também coberto por alguma outra doença(s) em  $D_L$ , então  $d_i$  é “redundante” no sentido de que  $D_L - \{d_i\}$  é ainda uma cobertura para  $M^+$ . Este fato pode ser explicado mais precisamente como se segue.

**Lema 3.5** Uma cobertura  $D_L$  de  $M_J$  é irredundante, se e somente se, para todo  $d_i \in D_L$ , existe algum  $m_j \in M_J$ , que é coberto exclusivamente por  $d_i$ , isto é,  $m_j \in \text{efeitos}(d_i)$ , mas  $m_j \notin \text{efeitos}(D_L - \{d_i\})$ .

Este lema é bastante útil quando se estabelece a irredundância de uma cobertura, e conduz aos seguintes lemas:

**Lema 3.6** Se  $D_L$  é uma cobertura irredundante de  $M_J$ , então  $|D_L| \leq |M_J|$ . Mais precisamente, se  $E$  é uma explicação para  $M^+$  num problema de diagnóstico, então  $|E| \leq |M^+|$ .

**Lema 3.7**  $E = \emptyset$  é a única explicação para  $M^+ = \emptyset$ .

Estes resultados conduzem à uma importante observação que está relacionada aos diversos sistemas para a solução de problemas de diagnóstico.

**Teorema 3.8 (Teorema das Doenças Competitivas)** *Seja  $E$  uma explicação para  $M^+$ , tal que  $M^+ \cap \text{efeitos}(d_1) \subseteq M^+ \cap \text{efeitos}(d_2)$ , e  $d_1, d_2 \in D$ . Então,*

- (a)  $d_1$  e  $d_2$  não estão em  $E$  simultaneamente; e
- (b) se  $d_1 \in E$ , então há outra explicação  $E'$  para  $M^+$  que contém  $d_2$ , e não contém  $d_1$ , de menor ou igual cardinalidade.

Este teorema formaliza a noção de “doenças competitivas” em problemas de diagnóstico. Estas doenças podem ser vistas como alternativas (pois “competem” entre si pela explicação de certas manifestações). Se todas as manifestações em  $M^+$  cobertas por uma doença, são também cobertas por outra doença, então estas duas doenças são alternativas entre si. Assim, apenas uma é necessária numa explicação. Além do mais, estas duas doenças competem com cada uma para ser considerada a mais plausível (neste sentido elas formam uma diagnose diferencial, podendo ser discriminadas no processo de diagnóstico subsequente).

Agora, considera-se o relacionamento entre os diferentes critérios de parcimônia descritos anteriormente, ilustrado na figura 3.5.

**Lema 3.9** *Seja  $2^D$  o conjunto das partes de  $D$ , e seja  $S_{cm}, S_{ci}, S_{cr}$  e  $S_c$  os conjuntos de todas as coberturas mínimas, irredundantes, relevantes, e todas as coberturas de  $M^+$  para um dado problema de diagnóstico  $P$ , respectivamente. Então  $\emptyset \subseteq S_{cm} \subseteq S_{ci} \subseteq S_{cr} \subseteq S_c \subseteq 2^D$ .*

O próximo lema mostra que o conjunto de todas as coberturas irredundantes de  $M^+$ , para um problema de diagnóstico como um todo, possui um tipo de propriedade ótima.

**Lema 3.10 (Propriedade de Inclusão)** *Para um problema de diagnóstico  $P$ , seja  $S_{ci}$  o conjunto de todas as coberturas irredundantes de  $M^+$ . Então  $S_{ci}$  é o menor conjunto de coberturas, tal que para qualquer  $D_N \subseteq D$  cobrindo  $M^+$ , há um  $D_L$  neste conjunto de coberturas com  $D_L \subseteq D_N$ .*

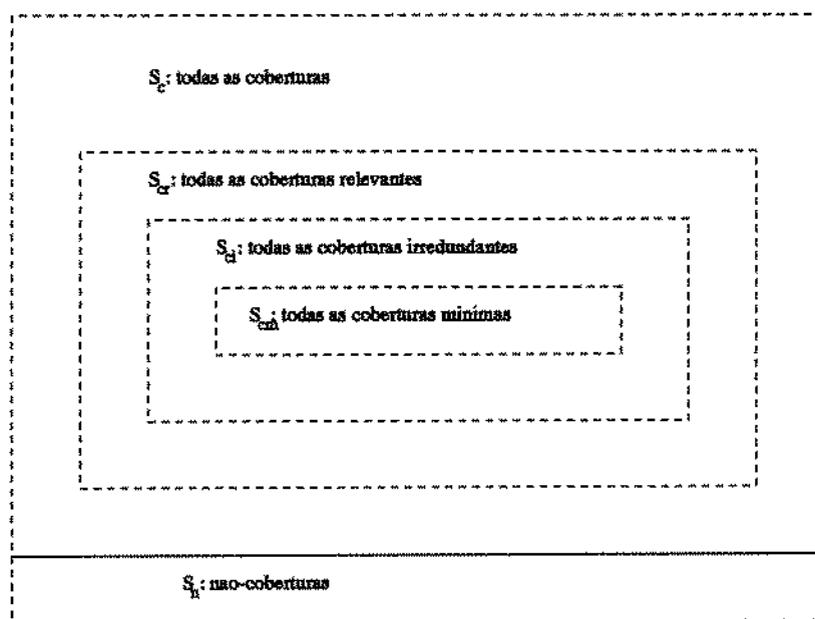


Figura 3.5: Uma taxonomia de coberturas, em que  $S_{cm} \subseteq S_{ci} \subseteq S_{cr} \subseteq S_c \subseteq 2^D = S_c \cup S_n$ .

Por este lema,  $S_{ci}$ , o conjunto de todas as explicações para  $M^+$ , é o menor conjunto de coberturas que implica (ou implicitamente representa) em todas as coberturas de  $M^+$ . Assim, qualquer cobertura pertence a este conjunto, ou pode sistematicamente ser gerada adicionando doenças extras a um dos membros de  $S_{ci}$  (isto é, todas as coberturas de  $M^+$  estão em  $S_{ci}$ , ou contêm algum conjunto de  $S_{ci}$ ).

**Exemplo:** O lema 3.9 pode ser facilmente verificado no exemplo do problema da figura 3.2. Há apenas uma cobertura mínima,  $\{d_1, d_4\}$ , de  $M^+ = \{m_1, m_2, m_3\}$ . Esta cobertura e  $\{d_2, d_3, d_4\}$  são as únicas coberturas irredundantes de  $M^+$ . Além destas duas, há outras três coberturas relevantes,  $\{d_1, d_4, d_2\}$ ,  $\{d_1, d_4, d_3\}$  e  $\{d_1, d_2, d_3, d_4\}$ , geradas adicionando-se doenças relevantes extras às coberturas irredundantes. Uma vez que  $d_5$  é causalmente irrelevante para  $M^+$ , adicionando-se  $d_5$  a cada uma das coberturas relevantes, resulta numa cobertura irrelevante. Assim, há no total 10 coberturas, 5 das quais são irrelevantes. Todos os demais subconjuntos de  $D$  não são coberturas (exemplos de não coberturas são  $\emptyset$ ,  $\{d_1\}$ ,  $\{d_2, d_4\}$ , etc.).  $\square$

Em alguns domínios de aplicação, a restrição de uma única doença tem sido utilizada como critério de parcimônia, isto é, uma explicação é uma única doença que cobre  $M^+$ . O problema com este critério é que na maioria dos problemas de diagnósticos mais gerais, não existem coberturas com uma única doença. Por outro lado, a intuição sugere que a relevância é bastante vaga como critério de parcimônia em diversas aplicações do mundo real. Mesmo no problema simples do exemplo da figura 3.2, em que há apenas duas coberturas irredundantes, existem cinco coberturas relevantes.

Cardinalidade mínima modela características e suposições de diversos sistemas de diagnóstico abduativos anteriores. Entretanto, existem casos evidentes em que coberturas mínimas não são necessariamente as melhores. Por exemplo, suponha que a combinação de duas doenças  $d_2$  e  $d_3$ , ou uma rara doença  $d_1$  sozinha, podem cobrir todas as manifestações presentes. Se a cardinalidade mínima for escolhida como critério de parcimônia,  $d_1$  será selecionada como hipótese viável (explicação), enquanto  $\{d_2, d_3\}$  será descartada. Um diagnosticador humano, no entanto, poderá dar preferência à  $\{d_2, d_3\}$ , ou pelo menos considerá-la como possível alternativa. Por esta razão, baseando-se unicamente na intuição, a irredundância é escolhida assim como outros critérios de parcimônia [Pen85, Pen87c, Rei87, deK87].

### 3.3 Uma Álgebra para Conjuntos Geradores

Nesta seção inicia-se o desenvolvimento de técnicas para a solução do tipo de problema simples de diagnóstico definido na seção 3.1. Um processo abdutivo para solução de problemas deve ser *construtivo*. Baseado no conhecimento associativo armazenado na relação  $C$ , este processo deve construir as explicações plausíveis para um dado  $M^+$ , ao invés de testar cada membro do conjunto das partes,  $2^D$ . O principal motivo é que  $|2^D|$  geralmente é muito extenso, enquanto o número de explicações para um problema em particular é relativamente pequeno. Além do mais, a maioria dos membros de  $2^D$  são irrelevantes para um dado problema. Também, para imitar o processo cíclico de formação de hipóteses e teste, o processo de solução do problema deve ser *seqüencial*, isto é, as manifestações presentes de um problema ( $M^+$ ) são fornecidas e processadas uma por vez. A natureza construtiva e seqüencial é uma das características distintas deste modelo, e do raciocínio abdutivo em geral.

No capítulo 2 foi introduzida informalmente uma estrutura denominada gerador para representar tentativas de solução e soluções finais (conjuntos de todas as explicações). No que se segue, formaliza-se esta forma conveniente e compacta de representação, define-se um conjunto de operadores para geradores, mostrando como estes operadores podem ser utilizados no processo de solução do problema. Os geradores são utilizados no algoritmo para solução do problema. Uma vez definida a álgebra para manipulação de geradores, a especificação dos algoritmos torna-se extremamente fácil. Inicialmente, define-se formalmente geradores e conjuntos geradores.

**Definição 3.8** *Sejam  $g_1, g_2, \dots, g_n$  subconjuntos não vazios de  $D$ , disjuntos dois-a-dois. Então  $G_I = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$  é um gerador. A classe gerada por  $G_I$ , denotada como  $[G_I]$ , é definida como  $[G_I] = \{\{d_1, d_2, \dots, d_n\} | d_i \in g_i; 1 \leq i \leq n\}$ .*

Um gerador pode ser interpretado a partir de duas perspectivas. Pela definição um gerador  $G_I$  é simplesmente um conjunto de  $n \geq 0$  conjuntos de doenças distintas. Entretanto, por outra perspectiva,  $[G_I]$  é análogo ao conjunto Produto Cartesiano, com a exceção de que  $[G_I]$  consiste em conjuntos não ordenados, ao invés de tuplas ordenadas. Em particular,  $[G_I]$  contém precisamente todos os possíveis conjuntos de  $n$  elementos que podem ser formados tomando um elemento de cada  $g_i \in G_I$ . Para relembrar do propósito especial do gerador  $G_I$ , subseqüentemente escreve-se para geradores  $G_I = (g_1 \ g_2 \ \dots \ g_n)$ , ao invés de  $G_I = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ . Note, pela definição, que se  $G_I = \emptyset$ , então  $[G_I] = \{\emptyset\}$ .

É conveniente falar sobre conjunto de geradores, quando não é possível representar todas as explicações de um dado problema em um único gerador.

**Definição 3.9**  $G = \{G_1, G_2, \dots, G_N\}$  é um conjunto gerador se cada  $G_I \in G$  for um gerador e  $[G_I] \cap [G_J] = \emptyset$ , para  $I \neq J$ . A classe gerada por  $G$  é

$$[G] = \bigcup_{I=1}^N [G_I].$$

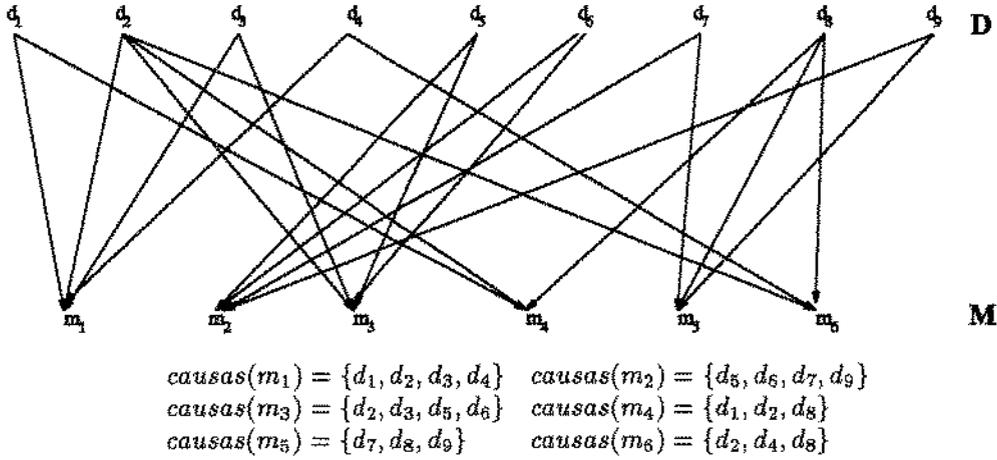
Note por esta definição, que se o conjunto gerador  $G = \emptyset$ , então  $[G] = \emptyset$ ; se  $G = \{\emptyset\}$ , então  $[G] = \{\emptyset\}$ . Um conjunto gerador não é simplesmente um conjunto de conjuntos, ou seja, é um conjunto de geradores em que a classe gerada por cada membro nunca é duplicada.

Para facilitar a compreensão das operações de conjunto gerador, um problema de diagnóstico abstrato,  $P_1$ , é dado na figura 3.6. Este problema é utilizado como exemplo no restante deste capítulo.

**Exemplo:** No problema de diagnóstico da figura 3.6, se  $M^+ = \{m_1, m_4, m_5\}$ , então o conjunto de todas as oito coberturas irredundantes pode ser representado por  $[G]$ , sendo que  $G = \{G_1, G_2\}$  é um conjunto gerador com  $G_1 = (\{d_3, d_4\} \{d_8\})$ , e  $G_2 = (\{d_1, d_2\} \{d_7, d_8, d_9\})$ . Note que  $G_2$  representa compactamente seis explicações (incidentalmente, neste caso,  $[G]$  é também o conjunto de todas as coberturas mínimas de  $M^+$ ; esta coincidência não é verdadeira de uma forma geral). Se nenhuma outra manifestação estiver presente, então  $G$  representa a solução para este problema.  $\square$

A estrutura de geradores oferece mais do que apenas uma representação eficaz. Agrupando-se doenças através das operações a serem definidas, o gerador fornece uma forma natural de computar e representar doenças competitivas (diagnose diferencial) durante a solução do problema. Se um gerador  $G_I$  representa um conjunto de explicações para um dado  $M^+$ , então cada  $g_i \in G_I$  é um conjunto de doenças competitivas. O teorema das doenças competitivas (teorema 3.8) é baseado na cobertura das partes de  $M^+$  por doenças individuais, de forma isolada. Por outro lado, os geradores agrupam doenças competitivas, nas coberturas irredundantes de  $M^+$ , no contexto da presença de outras doenças. Por exemplo, considerando o exemplo anterior, para cobrir de forma irredundante  $\{m_1, m_4, m_5\}$ ,  $d_3$  e  $d_4$  são competitivas no contexto de  $d_8$  no gerador  $G_1$ , e  $d_1$  e  $d_2$  são competitivas no contexto de qualquer uma das doenças  $d_7, d_8$  e  $d_9$  em  $G_2$ .

No passo seguinte define-se as operações de divisão e resto para conjuntos geradores, criando uma álgebra para conjuntos geradores. Estas operações são definidas de tal forma que podem ser utilizadas nos algoritmos na atualização correta das hipóteses existentes (representadas por um conjunto gerador), utilizando



$G = \{G_1, G_2\}$  é um conjunto gerador representando o conjunto de todas as coberturas irredundantes de  $M^+ = \{m_1, m_4, m_5\}$ , em que  $G_1 = (\{d_3, d_4\} \{d_8\})$  e  $G_2 = (\{d_1, d_2\} \{d_7, d_8, d_9\})$

$$H_1 = causas(m_3) = \{d_2, d_3, d_5, d_6\}$$

$Q^J = div(G, H_1) = Q^{J_1} \cup Q^{J_2}$  representa todas as coberturas irredundantes de  $\{m_1, m_4, m_5\}$  que também cobrem  $m_3$ , em que

$$Q^{J_1} = div(G_1, H_1) = \{(\{d_3\} \{d_8\})\}, e$$

$$Q^{J_2} = div(G_2, H_1) = \{(\{d_2\} \{d_7, d_8, d_9\})\}$$

$Q^K = res(G, H_1) = Q^{K_1} \cup Q^{K_2}$  representa todas as coberturas irredundantes de  $\{m_1, m_4, m_5\}$  que não cobrem  $m_3$ , em que

$$Q^{K_1} = res(G_1, H_1) = \{(\{d_4\} \{d_8\})\}, e$$

$$Q^{K_2} = res(G_2, H_1) = \{(\{d_1\} \{d_7, d_8, d_9\})\}$$

$Q^L = augres(G, H_1) = Q^{L_1} \cup Q^{L_2}$ , em que

$$Q^{L_1} = augres(G_1, H_1) = \{(\{d_4\} \{d_8\} \{d_2, d_5, d_6\})\}, e$$

$$Q^{L_2} = augres(G_2, H_1) = \{(\{d_1\} \{d_7, d_8, d_9\} \{d_3, d_5, d_6\})\}$$

$$Q^R = res(Q^L, Q^J) =$$

$$\{(\{d_4\} \{d_8\} \{d_5, d_6\}) (\{d_1\} \{d_7, d_8, d_9\} \{d_5, d_6\}) (\{d_1\} \{d_7, d_9\} \{d_3\})\}$$

representa todas as coberturas irredundantes de  $\{m_1, m_4, m_5, m_3\}$ , que são coberturas redundantes de  $\{m_1, m_4, m_5\}$

$G^{rev} = Q^J \cup Q^R$  é o conjunto gerador representando todas as 14 coberturas irredundantes de  $\{m_1, m_4, m_5, m_3\}$

Figura 3.6: Um problema de diagnóstico  $P_1$ .

o conjunto de doenças evocadas pela nova manifestação descoberta. Em outras palavras, estas operações são utilizadas para mecanizar o processo de “formação de hipóteses” durante a solução do problema.

A primeira operação a ser introduzida é a operação de *divisão*. Utilizando as doenças evocadas pela nova manifestação descoberta, a operação de divisão seleciona aquelas hipóteses existentes que cobrem as manifestações anteriores e a nova manifestação.

**Definição 3.10** *Sejam  $G_I = (g_1 g_2 \dots g_n)$  um gerador, e  $H_1 \subseteq D$ , tal que  $H_1 \neq \emptyset$ . Então  $Q = \{Q_k | Q_k \text{ é um gerador}\}$  é a **divisão** de  $G_I$  por  $H_1$ , se para todo  $k$ ,  $1 \leq k \leq n$ ,  $Q_k = (q_{k1} q_{k2} \dots q_{kn})$ , tal que*

$$q_{kj} = \begin{cases} g_j - H_1 & \text{se } j < k, \\ g_j \cap H_1 & \text{se } j = k, \\ g_j & \text{se } j > k. \end{cases}$$

Informalmente, todos os geradores resultantes de uma divisão podem ser obtidos da seguinte forma. Para qualquer ordem dos  $g'_j$ s em  $G_I$ , o primeiro gerador resultante da divisão de  $G_I$  por  $H_1$  é igual a  $G_I$ , exceto que  $g_1$  é substituído por  $g_1 \cap H_1$ . No segundo gerador,  $g_1$  é substituído por  $g_1 - H_1$ ,  $g_2$  por  $g_2 \cap H_1$ , enquanto os outros  $g'_j$ s não são alterados, e assim por diante. No  $k^{\text{ésimo}}$  gerador, todos os  $g'_j$ s anteriores a  $g_k$  são substituídos por  $g_j - H_1$ ,  $g_k$  é substituído por  $g_k \cap H_1$ , e todos os  $g'_j$ s posteriores a  $g_k$  não são alterados. Fica claro, pela definição anterior, que todo gerador  $Q_k$  resultante da divisão de  $G_I$  por  $H_1$ , possui um conjunto  $q_{kk}$  que é um subconjunto de  $H_1$ . Assim, pela definição 3.8, para todo  $E \in [Q_k]$ ,  $E \cap H_1 \neq \emptyset$ . As operações de diferença  $g_j - H_1$ , para todo  $j < k$ , garantem que  $[Q_k]$  e  $[Q_{k'}]$  são disjuntos, e assim asseguram que a divisão  $Q$  é um conjunto gerador. Para certificar-se disto, considere, informalmente, o primeiro e segundo gerador  $Q_1$  e  $Q_2$ . Pela definição anterior,  $Q_1 = (q_{11} g_2 g_3 \dots)$  e  $Q_2 = (q_{21} q_{22} g_3 \dots)$ . Uma vez que  $q_{11} = g_1 \cap H_1$  e  $q_{21} = g_1 - H_1$ , então  $q_{11}$  e  $q_{21}$  são disjuntos. Assim, intuitivamente, quaisquer membros de  $[Q_1]$  e  $[Q_2]$  diferem em seus primeiros elementos. A implicação e uso destas propriedades da operação de divisão são formalmente especificadas e demonstradas no lema 3.11.

Note que se durante a operação de divisão algum conjunto vazio resultar das operações de interseção ou diferença, então, pela definição 3.8, esta parcela produzida não é um gerador, e pela definição 3.10, não deve ser incluída no resultado da divisão. Por exemplo, se  $g_j \cap H_1 = \emptyset$  para algum  $j$ , então  $(\dots \emptyset \dots)$  é produzido, devendo ser desconsiderado. Assim, se  $|G_I| = n$ , tem-se no máximo  $n$  geradores na divisão de  $G_I$  por  $H_1$ , mas, usualmente, o número de geradores é menor que  $n$ .

**Exemplo:** Para o problema  $P_1$  da figura 3.6, considere a divisão do gerador  $G_1 = (\{d_3, d_4\} \{d_8\})$  de  $G$  por  $H_1 = causas(m_3) = \{d_2, d_3, d_5, d_6\}$ . Seguindo a definição 3.10,  $Q_1 = (\{d_3\} \{d_8\})$  é um gerador, mas  $Q_2$  não é uma vez que  $\{d_8\} \cap H_1 = \emptyset$ . Desta forma, o conjunto gerador  $Q^{J_1} = \{Q_1\}$  é a divisão de  $G_1$  por  $H_1$ . Similarmente, o conjunto gerador  $Q^{J_2} = \{(\{d_2\} \{d_7, d_8, d_9\})\}$  é a divisão de  $G_2 = (\{d_1, d_2\} \{d_7, d_8, d_9\})$  por  $H_1$ .  $\square$

Fica claro, uma vez que  $G_I$  é um conjunto não ordenado de conjuntos, que se a ordem dos membros de  $G_I$  é alterada, então um conjunto gerador diferente pode resultar da operação de divisão. Felizmente, pode ser demonstrado que para quaisquer duas divisões  $Q^J$  e  $Q^K$ , que resultem de diferentes ordens dos  $g'_j$ s em  $G_I$ ,  $[Q^J] = [Q^K]$ , isto é, todas as possíveis divisões de  $G_I$  por  $H_1$ , para todas as possíveis ordens dos elementos de  $G_I$ , geram a mesma classe [Reg85]. Por esta razão, utiliza-se  $div(G_I, H_1)$  para se referir à divisão de  $G_I$  por  $H_1$ , que resulta numa ordem particular, mas arbitrária, na qual  $g_1, g_2, \dots, g_n$  em  $G_I$  são dados durante a operação. Em seguida, a operação de divisão é generalizada para divisão de um conjunto gerador por um conjunto de doenças.

**Definição 3.11** *Sejam  $G$  um conjunto gerador e  $H_1 \subseteq D$ , tal que  $H_1 \neq \emptyset$ . A divisão de  $G$  por  $H_1$  é*

$$div(G, H_1) = \bigcup_{G_I \in G} div(G_I, H_1).$$

Pelas definições anteriores, a divisão de um gerador ou conjunto gerador produz um novo conjunto gerador. Agora, apresenta-se importantes resultados que este novo conjunto gerador representa.

**Lema 3.11** *Sejam  $G_I$  um gerador,  $G$  um conjunto gerador, e  $H_1 \subseteq D$ , tal que  $H_1 \neq \emptyset$ . Então*

- (a)  $div(G_I, H_1)$  é um conjunto gerador, em que  $[div(G_I, H_1)] = \{E \in [G_I] | E \cap H_1 \neq \emptyset\}$ ; e
- (b)  $div(G, H_1)$  é um conjunto gerador, em que  $[div(G, H_1)] = \{E \in [G] | E \cap H_1 \neq \emptyset\}$ .

Este lema fornece a idéia intuitiva da divisão de um gerador ou conjunto gerador. A classe gerada pela divisão de  $G_I$  por  $H_1$ ,  $[div(G_I, H_1)]$ , é um subconjunto de  $[G_I]$ . Os membros (conjunto de doenças) desta classe são aqueles de  $[G_I]$  que contêm pelo menos um elemento de  $H_1$ . Este é também o caso de

$div(G, H_1)$ . Pelo fato dos resultados das divisões serem conjuntos de geradores, garante-se que nenhuma duplicação existe na classe gerada por estes conjuntos de geradores. Esta propriedade torna a divisão bastante útil na solução seqüencial do problema de diagnóstico. Por exemplo, dado um problema, o conjunto de todas as explicações para as manifestações conhecidas no momento,  $M_J$ , pode ser representado por  $[G]$ , sendo que  $G$  é um conjunto gerador. Quando ocorre a confirmação de uma nova manifestação  $m_j$ , também presente, ou seja,  $m_j \notin M_J$ , então  $div(G, causas(m_j))$  representa aquelas explicações para  $M_J$  que também cobrem a nova manifestação  $m_j$ , pois cada uma delas contém pelo menos uma doença de  $causas(m_j)$ . Assim,  $div(G_I, causas(m_j))$  representa um conjunto atualizado de explicações para  $M^+ \cup \{m_j\}$ . Este fato é demonstrado no exemplo seguinte.

**Exemplo:** Para o problema  $P_1$  na figura 3.6, suponha que  $M^+ = \{m_1, m_4, m_5\}$  conduz à uma tentativa de solução representada por  $G = \{G_1, G_2\}$ , num determinado instante. Suponha, também, que a manifestação  $m_3$  seja observada, isto é, está presente no caso. Pode ser verificado facilmente que alguns dos membros de  $[G]$ , diga-se  $\{d_3, d_8\}$ , também cobrem  $m_3$ , mas alguns outros, diga-se  $\{d_4, d_8\}$  não a cobrem. Pelo lema 3.11, a operação de divisão  $Q^J = div(G, causas(m_3)) = Q^{J_1} \cup Q^{J_2}$ , pode ser utilizada para encontrar os membros do primeiro caso, isto é, todos os membros de  $[G]$  que também cobrem  $m_3$ . Como ilustrado na figura 3.6,  $Q^J$  representa parte da solução para o conjunto estendido  $\{m_1, m_4, m_5, m_3\}$ .  $\square$

Para representar os membros de  $[G]$  que não cobrem a nova manifestação observada,  $m_j$ , é introduzido uma operação denominada *resto* de uma divisão. Na definição 3.10 tem-se que os geradores resultantes da divisão de  $G_I = (g_1 \ g_2 \ \dots \ g_n)$  por  $H_1$  são

$$\begin{aligned} & (g_1 \cap H_1 \ g_2 \ \dots \ g_{n-1} \ g) \\ & (g_1 - H_1 \ g_2 \cap H_1 \ \dots \ g_{n-1} \ g_n) \\ & \vdots \\ & (g_1 - H_1 \ g_2 - H_1 \ \dots \ g_{n-1} \cap H_1 \ g_n) \\ & (g_1 - H_1 \ g_2 - H_1 \ \dots \ g_{n-1} - H_1 \ g_n \cap H_1). \end{aligned}$$

Na execução de mais um passo, obtêm-se os membros restantes de  $[G_I]$ , após a operação de divisão, isto é, aqueles que não possuem elementos em comum com  $H_1$ . Assim, o resto de uma operação de divisão de  $G_I$  por  $H_1$  é representado pelo gerador

$$(g_1 - H_1 \ g_2 - H_1 \ \dots \ g_{n-1} - H_1 \ g_n - H_1).$$

Esta operação conduz à definição da operação resto abaixo. Mais adiante, é apresentado que a operação resto é complementar à operação de divisão em termos das explicações que esta operação representa.

**Definição 3.12** *Sejam  $G_I = (g_1 \ g_2 \ \dots \ g_n)$  um gerador,  $G$  um conjunto gerador, e  $H_1 \subseteq D$ , em que  $H_1 \neq \emptyset$ . Então o resto de uma divisão de  $G_I$  por  $H_1$  é*

$$\begin{aligned} \text{res}(G_I, H_1) = \\ \left\{ \begin{array}{ll} \{(g_1 - H_1 \ \dots \ g_n - H_1)\} & \text{se } g_i - H_1 \neq \emptyset, \text{ para todo } i, 1 \leq i \leq n, \\ \emptyset & \text{caso contrário;} \end{array} \right. \quad (\text{a}) \end{aligned}$$

e o resto da divisão de  $G$  por  $H_1$  é

$$\text{res}(G, H_1) = \bigcup_{G_I \in G} \text{res}(G_I, H_1). \quad (\text{b})$$

A idéia básica da operação  $\text{res}$  é remover em  $G_I$  todos os elementos de  $H_1$ . Assim, o conjunto gerador resultante não gera nenhum conjunto (explicação) que compartilhe algum elemento com  $H_1$ . Isto é formalizado pelo próximo lema.

**Lema 3.12** *Para  $G_I, G$  e  $H_1$  definidos conforme definição 3.12,*

- (a)  $\text{res}(G_I, H_1)$  é um conjunto gerador, em que  
 $[\text{res}(G_I, H_1)] = \{E \in [G_I] \mid E \cap H_1 = \emptyset\}$ , e
- (b)  $\text{res}(G, H_1)$  é um conjunto gerador, em que  
 $[\text{res}(G, H_1)] = \{E \in [G] \mid E \cap H_1 = \emptyset\}$ .

Pelos lemas 3.11 e 3.12, tem-se que  $[\text{div}(G_I, H_1)]$  e  $[\text{res}(G_I, H_1)]$  particionam  $[G_I]$ , enquanto  $[\text{div}(G, H_1)]$  e  $[\text{res}(G, H_1)]$  particionam  $[G]$ .

**Exemplo:** Para o problema  $P_1$  da figura 3.6, tem-se pela definição 3.12.  $Q^K = \text{res}(G, H_1) = Q^{K_1} \cup Q^{K_2}$ , em que  $Q^{K_1} = \text{res}(G_1, H_1) = \{\{\{d_4\} \{d_8\}\}\}$ , e  $Q^{K_2} = \text{res}(G_2, H_1) = \{\{\{d_1\} \{d_7, d_8, d_9\}\}\}$ . Pode-se notar que  $[Q^K] = [\text{res}(G, H_1)]$  representa todos os membros de  $[G]$  que não contêm nenhuma causa de  $m_3$ , e que esta classe e  $[Q^J] = [\text{div}(G, H_1)]$  particionam a classe  $[G]$ .  $\square$

Até agora todas as operações de divisão e resto foram definidas para um único conjunto de elementos  $H_1 \subseteq D$  como divisor. Agora estas operações são generalizadas para permitirem que geradores e conjuntos geradores sejam divisores.

**Definição 3.13** *Sejam  $G$  e  $Q$  conjuntos geradores,  $G_I \in G$  e  $Q_J \in Q$  geradores, e  $q_j \in Q_J$ . Então a divisão de  $G_I$  por  $Q_J$  é*

$$\text{div}(G_I, Q_J) = \begin{cases} \{G_I\} & \text{se } Q_J = \emptyset, \\ \text{div}(\text{div}(G_I, q_j), Q_J - (q_j)) & \text{caso contrário;} \end{cases} \quad (\text{a})$$

a divisão de  $G$  por  $Q_J$  é

$$\text{div}(G, Q_J) = \bigcup_{G_I \in G} \text{div}(G_I, Q_J) \quad (\text{b})$$

Lembre-se que o gerador  $Q_J$  é uma coleção de conjuntos de doenças  $q_j$ . Basicamente, o que  $\text{div}(G_I, Q_J)$  faz, conforme definido recursivamente acima, é dividir sucessivamente  $G_I$  por cada conjunto de doenças  $q_j$  em  $Q_J$ . Este fato é ilustrado pelo exemplo seguinte.

**Exemplo:** Se  $G_I = (\{d_3, d_4\} \{d_5\} \{d_7, d_9\} \{d_2, d_8\})$  e  $Q_J = (\{d_2\} \{d_7, d_8\})$ , então

$$\text{div}(G_I, Q_J)$$

$$\begin{aligned} &= \text{div}(\text{div}(G_I, \{d_2\}), (\{d_7, d_8\})) && (\text{def. 3.13a}) \\ &= \text{div}(\{(\{d_3, d_4\} \{d_5\} \{d_7, d_9\} \{d_2\})\}, (\{d_7, d_8\})) && (\text{def. 3.10}) \\ &= \text{div}(\{(\{d_3, d_4\} \{d_5\} \{d_7, d_9\} \{d_2\})\}, (\{d_7, d_8\})) && (\text{def. 3.13b}) \\ &= \text{div}(\text{div}(\{(\{d_3, d_4\} \{d_5\} \{d_7, d_9\} \{d_2\})\}, \{d_7, d_8\}), \emptyset) && (\text{def. 3.13a}) \\ &= \{(\{d_3, d_4\} \{d_5\} \{d_7\} \{d_2\})\} && (\text{defs. 3.10 \& 3.13a}) \end{aligned}$$

□

Lembre-se que no lema 3.11, para cada  $H_1 \subseteq D$ ,  $[\text{div}(G_I, H_1)]$  contém apenas aqueles elementos de  $G_I$  que possuem pelo menos um elemento de  $H_1$ . Assim, dividindo sucessivamente  $G_I$  por *todo*  $q_j \in Q_J$ , o resultado corresponde aos membros de  $[G_I]$  que contêm pelo menos um elemento de *cada*  $q_j$  em  $Q_J$ . Pela definição de geradores, isto equivale a dizer que  $\text{div}(G_I, Q_J)$  representa aqueles membros de  $[G_I]$  que contêm um membro de  $[Q_J]$  como um subconjunto. Este fato é observado no exemplo anterior, em que  $[\text{div}(G_I, Q_J)] = \{\{d_3, d_5, d_7, d_2\}, \{d_4, d_5, d_7, d_2\}\}$ , contém algum membro de  $[Q_J]$  (isto é  $\{d_2, d_7\}$ ), sendo os únicos membros de  $[G_I]$  que possuem esta propriedade. Uma observação análoga também é garantida para  $\text{div}(G, Q_J)$ , isto é, para um divisão de um conjunto gerador por um gerador. Esta propriedade é formalmente especificada no lema seguinte.

**Lema 3.13** *Sejam  $G$ ,  $G_I$ ,  $Q_J$  e  $q_j$  definidos conforme definição 3.13. Então,*

- (a)  $\text{div}(G_I, Q_J)$  é um conjunto gerador, em que  
 $[\text{div}(G_I, Q_J)] = \{E \in [G_I] \mid \text{existe } E' \in [Q_J], \text{ em que } E' \subseteq E\};$
- (b)  $\text{div}(G, Q_J)$  é um conjunto gerador, em que  
 $[\text{div}(G, Q_J)] = \{E \in [G] \mid \text{existe } E' \in [Q_J], \text{ em que } E' \subseteq E\}.$

As operações de resto podem ser generalizadas, de maneira análoga, para representar aqueles membros de  $[G_I]$  ou  $[G]$  restantes das divisões. As propriedades da operação resto (Lema 3.12) são, também, preservadas de uma forma mais geral.

**Definição 3.14** *Sejam  $G$  e  $Q$  conjuntos geradores,  $G_I \in G$  e  $Q_J \in Q$  geradores,  $q_j \in Q_J$ . Então a divisão residual de  $G_I$  por  $Q_J$  é*

$$\text{res}(G_I, Q_J) = \begin{cases} \emptyset & \text{se } Q_J = \emptyset, \\ \text{res}(G_I, q_j) \cup \text{res}(\text{div}(G_I, q_j), Q_J - (q_j)) & \text{caso contrário;} \end{cases} \quad (\text{a})$$

a divisão residual de  $G$  por  $Q_J$  é

$$\text{res}(G, Q_J) = \bigcup_{G_I \in G} \text{res}(G_I, Q_J); \quad (\text{b})$$

e a divisão residual de  $G$  por  $Q$  é

$$\text{res}(G, Q) = \begin{cases} G & \text{se } Q = \emptyset, \\ \text{res}(\text{res}(G, Q_J), Q - \{Q_J\}) & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (\text{c})$$

A idéia da definição recursiva 3.14a é que para se obter todos  $E \in [G_I]$  que não contêm algum  $E' \in [Q_J]$ , deve-se primeiramente particioná-los em duas classes junto a um  $q_j \in Q_J$  arbitrário:  $\text{res}(G_I, q_j)$  e  $\text{div}(G_I, q_j)$ . Todos aqueles  $E \in [G_I]$ , cuja interseção com  $q_j$  é vazia, estão na primeira classe. Para aqueles que compartilham algum elemento em comum com  $q_j$  (isto é, aqueles da segunda classe), deve-se fazer uma diferenciação dos  $E' \in [G_I]$  baseado em algum outro  $q_k$ , e assim podendo ser recursivamente obtido das operações de resto através dos  $q_k \in Q_J$  restantes.

**Exemplo:** Se  $G_I$  e  $Q_J$  são dados como no exemplo anterior, então

$$\begin{aligned}
& res(G_I, Q_J) \\
&= res(G_I, \{d_2\}) \cup res(div(G_I, \{d_2\}), (\{d_7, d_8\})) && (\text{def. 3.14a}) \\
&= \{(\{d_3, d_4\} \{d_5\} \{d_7, d_9\} \{d_8\})\} && (\text{def. 3.12a}) \\
&\quad \cup res(\{(\{d_3, d_4\} \{d_5\} \{d_7, d_9\} \{d_2\})\}, (\{d_7, d_8\})) && (\text{def. 3.10}) \\
&= \{(\{d_3, d_4\} \{d_5\} \{d_7, d_9\} \{d_8\})\} \\
&\quad \cup res(\{(\{d_3, d_4\} \{d_5\} \{d_7, d_9\} \{d_2\})\}, (\{d_7, d_8\})) && (\text{def. 3.14b}) \\
&= \{(\{d_3, d_4\} \{d_5\} \{d_7, d_9\} \{d_8\})\} \\
&\quad \cup res(\{(\{d_3, d_4\} \{d_5\} \{d_7, d_9\} \{d_2\})\}, \{d_7, d_8\}) && (\text{def. 3.14a}) \\
&\quad \cup res(div(\{(\{d_3, d_4\} \{d_5\}, \{d_7\} \{d_9\} \{d_2\}), \{d_7, d_8\}), \emptyset) \\
&= \{(\{d_3, d_4\} \{d_5\} \{d_7, d_9\} \{d_8\})\} \\
&\quad (\{d_3, d_4\} \{d_5\} \{d_9\} \{d_2\}) && (\text{defs.3.12a\&3.14a})
\end{aligned}$$

□

Complementando o lema 3.13 tem-se os seguintes resultados com relação as propriedades das operações resto.

**Lema 3.14** *Sejam  $G, Q, G_I,$  e  $Q_J$  definidos conforme definição 3.14. Então:*

- (a)  $res(G_I, Q_J)$  é um conjunto gerador, em que  
 $[res(G_I, Q_J)] = \{E \in [G_I] \mid \text{não existe } E' \in [Q_J], \text{ em que } E' \subseteq E\};$
- (b)  $res(G, Q_J)$  é um conjunto gerador, em que  
 $[res(G, Q_J)] = \{E \in [G] \mid \text{não existe } E' \in [Q_J], \text{ em que } E' \subseteq E\};$
- (c)  $res(G, Q)$  é um conjunto gerador, em que  
 $[res(G, Q)] = \{E \in [G] \mid \text{não existe } E' \in [Q], \text{ em que } E' \subseteq E\}.$

Pelos lemas 3.13 e 3.14 segue, imediatamente, que  $[G_I]$  é particionado por  $[div(G_I, Q_J)]$  e  $[res(G_I, Q_J)]$ . Similarmente,  $[G]$  é particionado por  $[div(G, Q_J)]$  e  $[res(G, Q_J)]$ . Estes fatos podem ser verificados facilmente pelos dois exemplos anteriores. Os oito membros de  $[G_I]$  nestes exemplos são agora particionados em duas classes: duas destas oito classes que contêm algum membro de  $[Q_J]$  estão em  $[div(G_I, Q_J)]$ , e as seis outras classes restantes estão em  $[res(G_I, Q_J)]$ .

Para tornar a álgebra completa e simétrica, uma divisão de um conjunto gerador  $G$ , por um conjunto gerador  $Q$  pode ser facilmente definida como

$$div(G, Q) = \begin{cases} \emptyset & \text{se } Q = \emptyset; \\ div(G, Q_J) \cup div(res(G, Q_J), Q - \{Q_J\}) & \text{caso contrário,} \end{cases}$$

e pode ser demonstrado que  $\text{div}(G, Q)$  é um conjunto gerador e  $[\text{div}(G, Q)] = \{E \in [G] \mid \text{existe } E' \in [Q], \text{ em que } E' \subseteq E\}$ . Esta divisão por um gerador não é utilizada no algoritmo para solução do problema.

A operação final introduzida para a solução do problema de diagnóstico com geradores é denominada *resto estendido*, denotado por *augres*. Esta operação construtiva é uma extensão da operação *resto*. Lembre-se de que se  $[G]$  é o conjunto de todas as explicações para  $M^+$  num problema de diagnóstico, e  $m_j \notin M^+$  é uma nova manifestação, então todo  $E \in [G]$  pertence à  $[\text{div}(G, \text{causas}(m_j))]$  e, desta forma, cobre  $M^+$  e  $m_j$ , ou pertence à  $[\text{res}(G, \text{causas}(m_j))]$ , cobrindo apenas  $M^+$ . A idéia básica da operação *augres* é estender a operação *resto* adicionando-se as doenças apropriadas de  $\text{causas}(m_j)$ , de tal forma que todos os conjuntos de doenças gerados pela operação *resto estendido* cubram  $m_j$ , além de  $M^+$ . Para evitar duplicações, escolhe-se as doenças em  $\text{causas}(m_j)$  que não aparecem no gerador original  $G_I$  para estender  $\text{res}(G_I, \text{causas}(m_j))$ . Desta forma, através da combinação das operações *div* e *augres*, todas as explicações para  $M^+ \cup \{m_j\}$  podem ser construídas a partir de todas as explicações para  $M^+$  e das doenças em  $\text{causas}(m_j)$ .

**Definição 3.15** *Sejam  $G_I = (g_1 g_2 \dots g_n)$  um gerador,  $G$  um conjunto gerador, e  $H_1 \subseteq D$ , tal que  $H_1 \neq \emptyset$ . Então o resto estendido de uma divisão  $G_I$  por  $H_1$ , é*

$$\text{augres}(G_I, H_1) = \begin{cases} \{(g_1 - H_1 \dots g_n - H_1 A)\} & \text{se } g_i - H_1 \neq \emptyset, 1 \leq i \leq n, A \neq \emptyset, \\ \emptyset & \text{caso contrário;} \end{cases} \quad (\text{a})$$

em que

$$A = H_1 - \bigcup_{i=1}^n g_i.$$

O resto estendido de  $G$  por  $H_1$  é

$$\text{augres}(G, H_1) = \bigcup_{G_I \in G} \text{augres}(G_I, H_1). \quad (\text{b})$$

**Lema 3.15** *Sejam  $G_I$ ,  $G$ , e  $H_1$  definidos conforme definição 3.15. Então  $\text{augres}(G_I, H_1)$  e  $\text{augres}(G, H_1)$  são conjuntos geradores.*

**Exemplo:** Para o problema  $P_1$  na figura 3.6,

$$Q^{L_1} = \text{augres}(G_1, H_1) = \{(\{d_4\} \{d_8\} \{d_2, d_5, d_6\})\}, \text{ e } Q^{L_2} = \text{augres}(G_2, H_1) =$$

$\{(\{d_1\} \{d_7, d_8, d_9\} \{d_3, d_5, d_6\})\}$ . O resultado de ambas as operações são conjuntos geradores, e as classes geradas por estes resultados são disjuntas. Assim,  $Q^L = Q^{L_1} \cup Q^{L_2} = \text{augres}(G, H_1)$  é um conjunto gerador.  $\square$

Em resumo, esta seção introduz a noção do uso de um conjunto gerador para representar a solução de um problema de diagnóstico, e as operações de divisão, resto, e resto estendido para manipular estes conjuntos geradores durante a solução do problema. Suponha que num determinado instante da solução do problema, um conjunto de manifestações  $M_1$  está presente, e o conjunto gerador  $G^1$  represente as tentativas de soluções (isto é, todas as explicações para  $M_1$ ). Se uma manifestação adicional  $m_j$ , que não pertence a  $M_1$  é descoberta, então as manifestações em  $M_2 = M_1 \cup \{m_j\}$  são ditas estarem presentes. Assim, a divisão

$$\text{div}(G^1, \text{causas}(m_j))$$

resulta no conjunto gerador representando todas as explicações em  $[G^1]$  que também cobrem  $m_j$ , e desta forma  $M_2$ . Além do mais,

$$\text{res}(G^1, \text{causas}(m_j))$$

é um conjunto gerador representando todas as explicações em  $[G^1]$  que não cobrem  $m_j$ . Entretanto, adicionando-se os elementos apropriados de  $\text{causas}(m_j)$  a cada conjunto  $\text{res}(G^1, \text{causas}(m_j))$  para formar o resto estendido,

$$\text{augres}(G^1, \text{causas}(m_j)),$$

pode-se converter cada uma das explicações para  $M_1$  em  $[G^1]$  que não cobre  $M_2$ , numa cobertura de  $M_2$ . O conjunto de explicações representado por  $\text{div}(G^1, \text{causas}(m_j))$ , e as coberturas representadas por  $\text{augres}(G^1, \text{causas}(m_j))$  representam as soluções revisadas ou hipóteses para  $M_2$ . (Algumas coberturas redundantes podem resultar de  $\text{augres}(G^1, \text{causas}(m_j))$ ). Este problema é tratado na próxima seção). Assim, a importância das operações apresentadas nesta seção, é que estas operações definem de maneira concisa a forma de se revisar incrementalmente o conjunto gerador existente, quando uma nova manifestação é descoberta, durante a solução sequencial do problema.

Deve-se notar que a operação de divisão é uma generalização da interseção de conjuntos. A extensão desta interseção é fundamental em diversas áreas de IA relacionadas ao conhecimento. A exploração deste conceito parece útil, e prevê aplicações mais difundidas para problemas não diagnósticos.

### 3.4 Solução do Problema

Baseado nas operações de gerador desenvolvidas na seção anterior, apresenta-se um algoritmo para a solução do problema de diagnóstico demonstrando sua correção.

#### 3.4.1 Algoritmo

A rede causal do problema de diagnóstico definido neste capítulo pode ser vista como um grafo bipartido na linguagem da teoria dos grafos. Portanto, o algoritmo apresentado é denominado *BIPARTIDO*. Este algoritmo trabalha de forma seqüencial e construtiva. O algoritmo processa uma manifestação  $m_j$  por vez, através do conjunto das manifestações presentes  $M^+$ , ou por um processo iterativo de geração de perguntas e respostas, e incorpora *causas*( $m_j$ ) às hipóteses existentes. Este ciclo continua até que todas as manifestações sejam processadas.

O algoritmo *BIPARTIDO* representa suas tentativas de solução (explicações) e solução final na forma de conjunto gerador, e se baseia nas operações de divisão, resto, e resto estendido para geradores, desenvolvidas na seção anterior. Sucintamente, uma função denominada “*revise*” é definida para construir as novas hipóteses através das hipóteses existentes e das doenças evocadas pela nova manifestação:

$$\begin{aligned} \text{revise}(G, H_1) &= F \cup \text{res}(Q, F), \text{ em que} \\ F &= \text{div}(G, H_1), \text{ e } Q = \text{augres}(G, H_1). \end{aligned}$$

A operação  $\text{res}(Q, F)$ , como é apresentado mais adiante, é utilizada para remover todas as coberturas duplicadas e redundantes de  $[Q]$ . A função *revise* é o núcleo do algoritmo *BIPARTIDO*, descrito abaixo.

1. **function** *BIPARTIDO*( $D, M, C$ )
2. **variables**  
 $m_{nova}$ : **manifestation**;  
 $hipóteses$ : **generator-set**;
3. **begin**
4.  $hipóteses = \{\emptyset\}$ ; (\*inicialmente nenhuma manifestação está presente\*)
5. **while** *Maismanifs* **do** (\*enquanto existir outra manifestação\*)
6.  $m_{nova} = \text{Prozman}$ ; (\*obtem a nova manifestação\*)
7.  $hipóteses = \text{revise}(hipóteses, \text{causas}(m_{nova}))$ ;  
 (\*atualiza  $hipóteses$  através de  $\text{causas}(m_{nova})$ \*)
8. **endwhile**
9. **return**  $hipóteses$  (\*conjunto gerador para  $Sol(P)$ \*)
10. **end.**

O algoritmo *BIPARTIDO* toma  $D$ ,  $M$  e  $C$  como a base de conhecimento, e mantém um conjunto gerador denominado *hipóteses*, em que [*hipóteses*] é o conjunto de todas as coberturas irredundantes de todas as manifestações presentes num dado instante. Cada vez que uma nova manifestação  $m_{nova}$  é descoberta, todas as causas de  $m_{nova}$  são “evocadas” e incorporadas à *hipóteses* corrente, utilizando a função *revise*. As novas *hipóteses* construídas representam então o conjunto de todas as coberturas irredundantes de todas as manifestações, incluindo  $m_{nova}$ . Este processo continua até que todas as manifestações presentes sejam processadas. Então, o conjunto gerador *hipóteses* é retornado como solução para o problema  $P = \langle \langle D, M, C \rangle, \langle M^+ \rangle \rangle$ . A ordem em que as manifestações são fornecidas ao algoritmo não afeta as explicações na solução final (embora a forma do conjunto gerador final possa ser diferente para diferentes ordens de manifestações).

Para deixar claro o processo utilizado no algoritmo *BIPARTIDO* um breve exemplo é apresentado. Lembre-se do problema de diagnóstico abstrato  $P_1$  da figura 3.6. Suponha que as manifestações  $m_1$ ,  $m_4$ ,  $m_5$  e  $m_3$  sejam descobertas e processadas nesta ordem (estas manifestações formam o conjunto  $M^+$ ). Um esboço da solução do problema pelo algoritmo *BIPARTIDO* é apresentado na tabela 3.1. A primeira coluna da tabela lista a nova manifestação descoberta  $m_{nova}$ , a segunda corresponde à  $causas(m_{nova})$ , e a terceira coluna representa o conjunto de todas as coberturas irredundantes das manifestações presentes num dado instante. Cada um destes conjuntos geradores são obtidos pela revisão do conjunto gerador anterior utilizando  $causas(m_{nova})$  da  $m_{nova}$  corrente. Na linha 5 do algoritmo *BIPARTIDO*, *Maismanifests* é uma função booleana externa que retorna “true” se houver mais manifestações a serem processadas, ou “false” caso contrário. *Proxman* é uma função não determinística externa que retorna a nova manifestação. A única consideração a ser feita é que quando *Maismanifests* retornar “false”, todas as manifestações presentes já terão sido descobertas e retornadas por *Proxman*. Note que estas duas funções externas são específicas da aplicação (isto é, suas implementações dependem do domínio de aplicação), e assim não são formalizadas na teoria.

Para estabelecer a correção do algoritmo *BIPARTIDO*, propriedades de conjuntos geradores são estabelecidas inicialmente no contexto do processo de atualização de hipóteses. Pelo lema 3.11 tem-se imediatamente que

**Lema 3.16** *Sejam  $G$  um conjunto gerador em que  $[G] = \{\text{todas as coberturas irredundantes de } M^+\}$ , e  $m_j \in M - M^+$ . Seja  $F = \{E \subseteq D \mid E \text{ é uma cobertura irreduntante de } M^+ \text{ e } M^+ \cup \{m_j\}\}$ . Então  $F = [div(G, causas(m_j))]$ .*

Coberturas irredundantes de  $M^+ \cup \{m_j\}$  diferentemente daquelas em

$m_{nova}$	$causas(m_{nova})$	$hipóteses$
$m_1$	$\{d_1, d_2, d_3, d_4\}$	$\{\{d_1, d_2, d_3, d_4\}\}$
$m_4$	$\{d_1, d_2, d_8\}$	$\{\{d_1, d_2\}, \{d_3, d_4\}, \{d_8\}\}$
$m_5$	$\{d_7, d_8, d_9\}$	$\{\{d_1, d_2\}, \{d_7, d_8, d_9\}, \{d_3, d_4\}, \{d_8\}\}$
$m_3$	$\{d_2, d_3, d_5, d_6\}$	$\{\{d_3\}, \{d_8\}, \{d_2\}, \{d_7, d_8, d_9\}, \{d_4\}, \{d_8\}, \{d_5, d_6\}, \{d_1\}, \{d_7, d_8, d_9\}, \{d_5, d_6\}, \{d_1\}, \{d_7, d_9\}, \{d_3\}\}$

Tabela 3.1: A execução da solução do problema pelo algoritmo *BIPARTIDO*

$[div(G, causas(m_j))]$  devem então cobrir  $M^+$  redundantemente. Em seguida indica-se que estas últimas coberturas podem ser obtidas por  $augres(G, causas(m_j))$ .

**Lema 3.17** *Sejam  $G$  e  $m_j$  definidos como no lema 3.16. Então todo  $E \subseteq D$ , que é uma cobertura irredundante de  $M^+ \cup \{m_j\}$ , mas uma cobertura redundante de  $M^+$ , deve pertencer a  $[augres(G, causas(m_j))]$ .*

Combinando os lemas 3.16 e 3.17, se o conjunto de todas as coberturas irredundantes de  $M^+$  é representado pelo conjunto gerador  $G$ , e  $m_j \in M - M^+$ , então para toda explicação  $E$  de  $M^+ \cup \{m_j\}$ ,  $E \in [div(G, causas(m_j))] \cup [augres(G, causas(m_j))]$ . Entretanto, nem todo membro de  $[augres(G, causas(m_j))]$  é necessariamente uma cobertura irredundante de  $M^+ \cup \{m_j\}$ ; alguns podem ser coberturas redundantes. Este problema conduz ao próximo lema que mostra que todas as duplicações e coberturas redundantes de  $M^+ \cup \{m_j\}$  em  $[augres(G, causas(m_j))]$  podem ser removidas pela operação resto.

**Lema 3.18** *Sejam  $G$  e  $m_j$  definidos como no lema 3.16,  $F = div(G, causas(m_j))$ , e  $Q = augres(G, causas(m_j))$ . Seja  $S = \{E \subseteq D \mid E \text{ é uma cobertura irredundante de } M^+ \cup \{m_j\}, \text{ mas uma cobertura redundante de } M^+\}$ . Então,  $S = [res(Q, F)]$ .*

**Exemplo:** Para o problema  $P_1$  da figura 3.6,  $[G]$  é o conjunto de todas as coberturas irredundantes de  $M^+ = \{m_1, m_4, m_5\}$ . Uma divisão de  $G$  por  $causas(m_3)$ ,

## Capítulo 4

# Teoria das Coberturas Parcimoniosas e Tempo

Uma das limitações da TCP apresentada no capítulo anterior é que a solução  $Sol(P)$  para um problema de diagnóstico  $P = \langle \langle D, M, C \rangle, \langle M^+ \rangle \rangle$  pode incluir um grande número de hipóteses alternativas. Este fato ocorre porque  $Sol(P)$  é definido como o conjunto de todas as coberturas irredundantes de  $M^+$ . Para selecionar entre estas explicações potenciais, algum critério diferente de parcimônia é necessário, e informações adicionais devem ser integradas para suportar esta distinção [Pen90].

Além da limitação acima, conforme apresentado no capítulo 1, a TCP é restrita quando aplicada à domínios dinâmicos, em que a ordem cronológica de ocorrências das manifestações deve ser considerada.

Neste capítulo a TCP é estendida para incorporar o conhecimento temporal. Através deste conhecimento é possível selecionar as hipóteses em  $Sol(P)$  que são temporalmente consistentes com as informações temporais observadas, ou seja, fornecidas para solução do problema. Desta forma, obtém-se um método de solucionar simultaneamente as duas limitações apresentadas acima. Em outras palavras, o número de hipóteses é reduzido uma vez que se considera apenas aquelas que são temporalmente consistentes.

O raciocínio temporal proposto utiliza dos operadores de geradores, definidos no capítulo anterior, para remover as hipóteses temporalmente inconsistentes, de acordo com o critério de consistência a ser definido neste capítulo. Além do mais, a verificação da consistência das hipóteses é efetuada durante a solução do problema, toda vez que alguma informação temporal associada a uma nova manifestação estiver disponível, evitando que se perca tempo com hipóteses in-

consistentes.

O tempo utilizado no diagnóstico médico foi escolhido como fonte de estudo para estender a TCP, devido ao reconhecimento da comunidade de Inteligência Artificial em Medicina [Ker90, Con91, Ham87, Lon83] da necessidade de se incorporar aspectos temporais na solução do problema. Para se conhecer este tempo fez-se uma investigação na informação temporal utilizada na descrição de patologias. Também, baseou-se no modelo causal/temporal descrito em [Con91] utilizado no diagnóstico de doenças do fígado e lepra.

Outros trabalhos apresentados em [Con93, Dou93], relacionados à representação e raciocínio temporais, também inspiraram a elaboração da extensão temporal proposta nesta dissertação. O primeiro trata de técnicas para a verificação de restrições temporais em modelos causais, enquanto o segundo de um sistema utilizado em robótica no reconhecimento de situações em ambientes dinâmicos.

Embora o modelo temporal estudado esteja relacionado a um domínio específico, isto é, medicina, deseja-se que a extensão proposta possa ser aplicada a outros problemas de diagnóstico dinâmicos.

O resto deste capítulo está dividido da seguinte forma. Na seção 4.1 são descritos os aspectos temporais no diagnóstico médico. Na seção 4.2 o problema de diagnóstico descrito no capítulo anterior é estendido para incorporar o conhecimento temporal. Finalmente, na seção 4.3 são apresentados o raciocínio temporal proposto e as soluções para o problema de diagnóstico dinâmico. Ainda, nesta seção, é descrito o algoritmo para a solução do problema de diagnóstico dinâmico.

## **4.1 O Tempo no Diagnóstico Médico**

Para se conhecer o modelo temporal utilizado em problemas de diagnóstico médico fez-se uma investigação da forma de descrição das informações temporais das manifestações de uma patologia, através do “Manual Merck de Medicina” [Ber87]. Outros aspectos também foram analisados com o intuito de conhecer de forma mais abrangente um problema de diagnóstico do mundo real.

Esta investigação e o artigo “On the co-operation between abductive and temporal reasoning in medical diagnosis” [Con91] serviram de inspiração na elaboração do formalismo de representação do conhecimento e raciocínio temporais descritos nas seções 4.2 e 4.3, respectivamente. O artigo apresenta um formalismo para a representação do conhecimento causal/temporal entre estados patofisiológicos (isto é, alteração dos processos fisiológicos normais) de uma doença. Este modelo é baseado no uso de redes causais. O objetivo deste tipo de rede é re-

presentar todas as evoluções patofisiológicas que um paciente pode exibir quando acometido de uma ou mais doenças.

Nesta seção são explicitados resumidamente os principais aspectos destes trabalhos, considerados na incorporação do conhecimento temporal à TCP <sup>1</sup>.

#### 4.1.1 O tempo na Descrição do Conhecimento

Nesta seção são sintetizados os principais aspectos na descrição do conhecimento temporal de patologias obtidos do “Manual Merck de Medicina” [Ber87]. No apêndice A estes aspectos são apresentados com mais detalhes e exemplos.

Na investigação feita no “Manual Merck de Medicina” [Ber87] as manifestações de uma patologia foram classificadas em *temporais* e *atemporais*. As manifestações temporais são aquelas que possuem duração ou se relacionam temporalmente com outra(s) manifestação(ões), enquanto as demais são atemporais. Pela análise das patologias estudadas observou-se que na maioria das vezes a informação temporal utilizada na descrição da *duração* de uma manifestação e da *distância temporal* entre duas manifestações é variável ou indeterminada, refletindo uma das principais características deste domínio que é a incerteza. Por exemplo, considere a figura 4.1 que ilustra as três formas da doença Histoplasmose [Ber87pg.155] com suas respectivas manifestações. A distância temporal entre as manifestações de cada forma da Histoplasmose é indeterminada. Sabe-se apenas que as manifestações da forma cavitária crônica sucedem as manifestações da forma progressiva disseminada que, por sua vez, sucedem as manifestações da forma primária. Na maioria das vezes, a indeterminação da distância temporal está relacionada às flexões do verbo “seguir” e “proceder” associando duas manifestações (ou conjunto de manifestações).

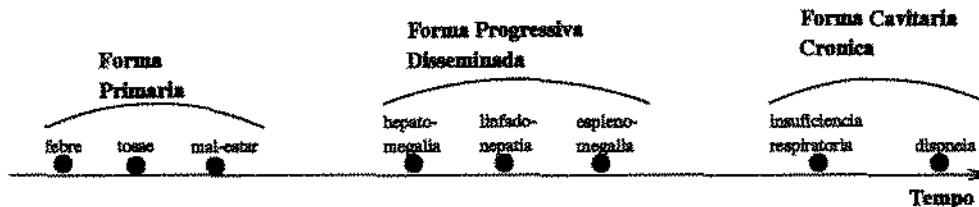


Figura 4.1: Ordem cronológica de ocorrência das manifestações da Histoplasmose.

Outro aspecto importante observado é que a ordem cronológica é descrita, na

<sup>1</sup>Vale a pena ressaltar que muitos destes aspectos foram confirmados posteriormente, através de entrevistas à clínicos do Instituto de Moléstias Infecciosas do HC-UNICAMP, durante a implementação descrita no capítulo 6.

maioria das vezes, para conjuntos de manifestações, ao invés de manifestações individualmente. As manifestações de um mesmo conjunto ocorrem ao mesmo tempo (ou numa diferença de tempo insignificante para o diagnóstico). Estes conjuntos de manifestações representam formas, classes de manifestações e estágios de uma patologia. Novamente, a Histoplasmose ilustrada na figura 4.1 é um exemplo deste caso, ou seja, seus conjuntos de manifestações representam formas da doença.

A distância temporal pode ser descrita de duas formas. Na primeira, a distância é descrita com relação ao início da ocorrência das manifestações. Por exemplo, no caso da Histoplasmose ilustrada na figura acima, sabe-se que o início da hepatomegalia é após o início do mal-estar. A segunda forma relaciona o final de uma manifestação ao início de outra manifestação. Por exemplo, na intoxicação por cogumelo tóxico (*Gyromitra*) [Man90] a insuficiência hepática ocorre entre um a dois dias após o fim das cólicas abdominais e diarreia. Nas patologias estudadas, observa-se que a primeira forma de descrição da distância temporal é predominante.

#### 4.1.2 O Tempo na Descrição do Quadro Clínico

Para que o médico possa utilizar o tempo na solução do problema de diagnóstico é necessário o *início* e *duração* das manifestações do paciente. No entanto, muitas vezes este conhecimento é incerto, pois o paciente não tem certeza da ordem cronológica de ocorrência e duração de suas manifestações. Por exemplo, o paciente pode não saber do instante exato da febre. Provavelmente, o paciente a descreverá por um intervalo de tempo como “a febre iniciou 5 a 7 dias atrás”. É possível obter a informação temporal precisa, isto é, o parâmetro  $x$  possui o valor  $y$  no instante  $z$ , somente quando o paciente é monitorado num ambiente especializado como num hospital [Ker91].

Resumidamente, para representar o tempo relacionado às manifestações do quadro clínico do paciente é necessário considerar que esta informação na maioria das vezes é incerta ou não está disponível.

#### 4.1.3 O Tempo no Raciocínio Diagnóstico

O raciocínio diagnóstico médico é efetuado através do conhecimento temporal das manifestações de uma patologia, e das manifestações do caso, isto é, do quadro clínico. Este raciocínio é basicamente de dois tipos. O principal consiste em verificar se a ordem cronológica de ocorrência e duração das manifestações de uma patologia, tida como hipótese, é consistente com a ordem cronológica e

duração das manifestações do quadro clínico. Em outras palavras, este raciocínio possibilita eliminar hipóteses cujas restrições temporais não foram satisfeitas.

Uma patologia que segue sem tratamento evolui no decorrer do tempo. Determinar o estágio atual (ou presente) de uma patologia consiste em outro importante tipo de raciocínio temporal. Por exemplo, através deste raciocínio, pode-se prever eventos futuros que possam colocar em risco a vida do paciente, e tomar as devidas precauções no sentido de evitar tais complicações, ou esperar pela ocorrência de uma manifestação para a confirmação de uma hipótese.

Na próxima seção é proposto formalmente um modelo de representação temporal mais geral, a ser incorporado na TCP, que incorpora algumas das características descritas acima.

## 4.2 Formulação do Problema de Diagnóstico Dinâmico

Nesta seção a TCP é estendida para incorporar o conhecimento temporal. Através deste conhecimento é possível selecionar as hipóteses que são temporalmente consistentes com a informação temporal de um caso.

Antes de iniciar a formulação da extensão temporal são introduzidos alguns conceitos e notações relacionadas à representação do tempo e às estruturas de representação do conhecimento.

As primitivas elementares ou objetos primitivos utilizados na representação do tempo são *pontos de tempo* ("time points"). Os *intervalos* são definidos como conjuntos convexos não-vazios de pontos de tempo (pontos na linha de tempo), representados por  $I = [I^-, I^+]$  em que  $I^-$  e  $I^+$  são pontos extremos do intervalo  $I$  (obviamente,  $I^- \leq I^+$ ;  $I^- > I^+$  indica que o intervalo  $I$  é um *intervalo vazio*). As notações relacionadas às operações de intervalos são as seguintes:

- $I + J = [I^- + J^-, I^+ + J^+]$ ;
- $I \cap J = [\max(I^-, J^-), \min(I^+, J^+)]$ ;
- $I \leq p \Rightarrow I^+ \leq p$ , em que  $p$  é um ponto de tempo.

Nesta seção é também introduzida a estrutura de grafos. A notação  $G = (V, A)$  denota o grafo direcionado  $G$ , em que  $V$  é um conjunto finito denominado

conjunto de vértices de  $G$ , e  $A$  uma relação binária em  $V$  denominada *conjunto de arcos* (ou *arestas*) de  $G$ . Cada elemento de  $V$  é denominado *vértice*, e cada elemento de  $A$  é denominado *arco* (ou *aresta*).

Embora não seja explicitamente utilizado nesta dissertação (com exceção do capítulo 6), é importante introduzir a noção de *unidade de tempo*. As unidades de tempo são, por exemplo, horas, dias, semanas, meses e anos. Por exemplo, na medicina, a distância temporal e durações das manifestações de uma patologia são descritas utilizando estas unidades. A unidade de tempo que representa a maior e menor unidade de tempo é denominada *unidade de maior granularidade temporal* e *unidade de menor granularidade temporal*.

Iniciando a formalização do problema de diagnóstico dinâmico, tem-se que os conjuntos  $D$  e  $M$  continuam definindo o escopo de problemas de diagnóstico, uma vez que se considera a versão simplificada da TCP.

A noção intuitiva de causa passa a ser representada por um conjunto finito e discreto de grafos,  $G$ <sup>2</sup>. Toda doença  $d_i$  em  $D$  é representada por um grafo  $G_i = (V_i, A_i)$  em  $G$  denominado *grafo temporal* de  $d_i$ . Os elementos de  $V_i$  (isto é, os vértices do grafo) são todas as manifestações que podem ser causadas por  $d_i$ . Os arcos em  $A_i$  são *dirigidos* e indicam relações temporais (relações qualitativas) entre manifestações individuais de  $V_i$ , tal que, o início da manifestação representada pelo destino do arco sucede o início da manifestação representada pela origem, quando a doença  $d_i$  estiver presente. Os arcos são rotulados pela distância temporal (relação quantitativa) entre as manifestações relacionadas pelos arcos, conforme apresentado formalmente mais adiante.

A figura 4.2 ilustra a informação temporal das doenças  $d_8$  e  $d_9$  do problema de diagnóstico da figura 3.6, para facilitar a compreensão da formulação temporal desta seção.

O grafo temporal, além de dirigido, é *transitivo*, *acíclico* e não necessariamente conexo. A impossibilidade de se definir ciclos é a maior restrição do formalismo de representação. Em outras palavras, não é possível representar eventos recorrentes. Como exemplo de eventos recorrentes tem-se as manifestações “sensação de frio”, “febre”, “prostração” e “cefaléia” da Malária *Malariae* [Ber89pg231] que ocorrem a cada intervalo de 72 horas. No entanto, esta restrição é importante para reduzir a complexidade do processo de raciocínio [Con91].

O fato do grafo temporal poder ser desconexo representa vantagens no potencial de representação. Por exemplo, na seção 4.1.1 é descrito que no caso de patologias as relações temporais são descritas apenas para algumas manifestações.

---

<sup>2</sup>Implicitamente, pode-se ainda considerar a existência da rede causal associativa.

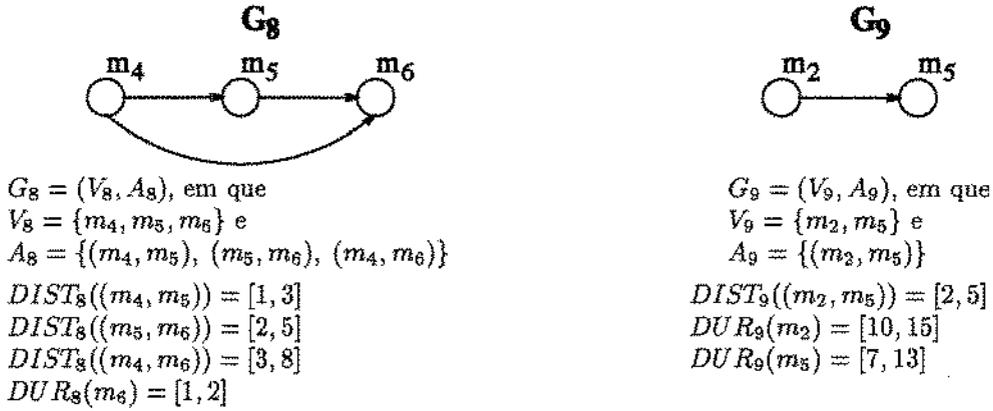


Figura 4.2: Grafos temporais das doenças  $d_8$  e  $d_9$  com suas respectivas funções distâncias temporais e durações.

A possibilidade do grafo temporal ser desconexo facilita, então, a representação do conhecimento temporal em domínios em que a informação é incompleta e incerta.

A *distância temporal* entre as manifestações e a *duração* de uma manifestação são representadas por funções em grafos, denominadas *função distância temporal* e *função duração*, denotadas por  $DIST$  e  $DUR$ , respectivamente. A função distância temporal  $DIST$  atribui um intervalo  $R = [R^-, R^+]$  a cada arco de um grafo temporal  $G_t$  em  $G$ .  $DIST(G_t, (m_i, m_j)) = R$  para  $(m_i, m_j) \in A_t$ , abreviado por  $DIST_t((m_i, m_j)) = R$ , indica que a diferença de tempo admissível entre o início de  $m_j$  e o início de  $m_i$  no grafo temporal de  $d_t$  pertence ao intervalo  $R$ . Por exemplo, pela figura 4.2,  $DIST_8((m_4, m_5)) = [1, 3]$  indica que a distância temporal admissível entre o início das manifestações  $m_4$  e  $m_5$  na doença  $d_8$  é qualquer valor entre 1 e 3 unidades de tempo.

Note que a distância temporal é mensurada entre o início da manifestação representada pelo nó origem, e o início da representada pelo nó destino. No caso da medicina, esta consideração representa uma certa limitação, pois em alguns casos, a única informação temporal disponível refere-se à distância temporal entre o fim de uma manifestação e o início de outra.

A função  $DUR$  atribui a cada vértice  $m_j$  de um grafo temporal  $G_t$  em  $G$  um intervalo  $J$  que especifica que a duração de  $m_j$  deve pertencer a  $J$ . Por exemplo, pela figura 4.2,  $DUR_1(m_5) = [7, 13]$  indica que a duração admissível da manifestação  $m_5$  na doença  $d_9$  é qualquer valor entre 7 e 13 unidades de tempo.

A transitividade do grafo temporal deve ser consistentemente transportada através da função  $DIST$ : se  $DIST_t((m_i, m_j)) = R_1$  e  $DIST_t((m_j, m_k)) = R_2$ ,

então  $DIST_l((m_i, m_k)) = R_1 + R_2$ . A transitividade é bastante importante no raciocínio temporal proposto. Por exemplo, pela transitividade pode-se facilmente obter todas as manifestações sucessoras e antecessoras de uma determinada manifestação.

A seguir define-se formalmente o grafo temporal de uma doença.

**Definição 4.1** *O grafo temporal de uma doença  $d_l \in D$ ,  $G_l = (V_l, A_l)$ , é grafo dirigido, acíclico e transitivo definido da seguinte forma:*

- $V_l \subseteq M \equiv$  conjunto de elementos diretamente causados por  $d_l$ , e
- $A_l = \{(m_i, m_j) \mid \text{o início de } m_i \text{ ocorre antes do início } m_j \text{ quando a doença } d_l \text{ estiver presente}\}$ .

**Definição 4.2** *A base de conhecimento de um problema de diagnóstico dinâmico é uma tupla  $KB = \langle D, M, G, DIST, DUR \rangle$  em que*

- $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$  é um conjunto finito, não-vazio, de elementos denominados doenças;
- $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$  é um conjunto finito, não-vazio, de elementos denominados manifestações;
- $G = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$  é um conjunto finito, não-vazio, de elementos da forma  $G_l = (V_l, A_l)$ ,  $l = 1, \dots, n$ , denominados grafos temporais;
- $DIST_l : (m_i, m_j) \longrightarrow [R^-, R^+]$ , tal que  $(m_i, m_j)$  é um arco de  $G_l \in G$ ,  $R^- \leq R^+$  e  $R^- > 0$  denominado função distância temporal;
- $DUR_l : m_i \longrightarrow [J^-, J^+]$ , tal que  $m_i$  é um vértice de  $G_l \in G$ ,  $J^- \leq J^+$  e  $J^- > 0$ , denominada função duração.

em que as funções  $DIST$  e  $DUR$  possuem as propriedades descritas acima.

Para representar as informações de um caso, necessita-se do conjunto de manifestações  $M^+$  como antes, e informações temporais destas manifestações. A função  $BEG^+$  associa um intervalo para algumas das manifestações em  $M^+$ .  $BEG^+(m_j) = I$ ;  $m_j \in M^+$ , indica que  $m_j$  iniciou a qualquer instante dentro do intervalo  $I$ . Da mesma forma, a função  $DUR^+$  associa a algumas manifestações em  $M^+$  um intervalo tal que a duração é qualquer valor do intervalo.

É importante notar que este modelo possibilita a representação do conhecimento incompleto com relação as manifestações observadas (conforme descrito

na seção 4.1.2). Tanto o início quanto a duração de uma manifestação presente podem ser indicados por um intervalo. Além do mais, *não* é necessário associar início ou duração a toda manifestação observada. Desta forma, evita-se que alguma informação temporal incorreta do caso comprometa a solução do problema de diagnóstico.

**Definição 4.3** *Um problema de diagnóstico dinâmico  $P$  é um par  $\langle KB, Ca \rangle$ , em que  $KB$  é definido conforme definição 4.2, e  $Ca = \langle M^+, BEG^+, DUR^+ \rangle$  é o caso, definido como:*

- $M^+ \subseteq M$  é um subconjunto distinto de  $M$  que é dito estar presente;
- $BEG^+ : m_j \longrightarrow [I^-, I^+]$  para  $m_j \in M^+$ , denominado informação de início do caso;
- $DUR^+ : m_j \longrightarrow [I^-, I^+]$  para  $m_j \in M^+$ , denominado informação de duração do caso.

Os conjuntos definidos abaixo são equivalentes aos conjuntos da definição 3.2. No entanto, são agora descritos em função dos grafos temporais.

**Definição 4.4** *Para todo  $d_l \in D$  e  $m_j \in M$  num problema de diagnóstico  $P$*

- $efeitos(d_l) = V_l$ , o conjunto de elementos diretamente causados por  $d_l$ ; e
- $causas(m_j) = \{d_l | m_j \in V_l, \text{ para todo grafo temporal } G_l = (V_l, A_l) \in G\}$ , o conjunto de elementos que podem diretamente causar  $m_j$ ;

A generalização dos conjuntos definidos acima é equivalente à generalização da definição 3.3.

### 4.3 Soluções para o Problema de Diagnóstico Dinâmico

Nesta seção descreve-se a solução para os problemas de diagnóstico definidos na seção 4.2, apresentando o critério de consistência temporal para as explicações de uma solução. Inicialmente, define-se a noção de inconsistência temporal de um arco de um grafo temporal.

**Definição 4.5** *Para um problema de diagnóstico dinâmico  $P$  sejam  $G_l = (V_l, A_l) \in G$ ,  $(m_i, m_j) \in A_l$ ,  $DIST_l((m_i, m_j)) = R$ ,  $m_i, m_j \in M^+$ ,  $BEG^+(m_i) = I_{m_i}$  e  $BEG^+(m_j) = I_{m_j}$ . O arco  $(m_i, m_j)$  é temporalmente inconsistente com o caso, se e somente se,*

$$(I_{m_i} + R) \cap I_{m_j} = \emptyset.$$

O intervalo resultante da operação  $(I_{m_i} + R)$  corresponde a um conjunto de pontos válidos para o início da manifestação  $m_j$ . Assim, se a interseção entre este intervalo e  $I_{m_j}$  (intervalo “real” válido para o início de  $m_j$ ) é vazia, então o arco  $(m_i, m_j)$  é temporalmente inconsistente com o caso.

Pela definição acima, implicitamente, se o arco  $(m_i, m_j)$  é temporalmente inconsistente, significa que as distâncias temporais mínima e/ou máxima, representadas por  $R^-$  e  $R^+$ , respectivamente, não foram satisfeitas. Em outras palavras, pelos menos uma das desigualdades abaixo é verdadeira:

- Inconsistência da distância mínima (veja ilustração na figura 4.3)

$$I_{m_j}^+ - I_{m_i}^- < R^-.$$

- Inconsistência da distância máxima (veja figura ilustração na 4.4)

$$I_{m_j}^- - I_{m_i}^+ > R^+.$$

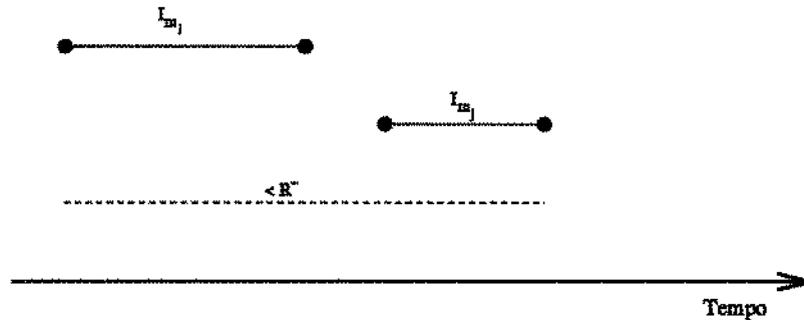


Figura 4.3: Um caso em que a restrição de distância mínima não é satisfeita.

A primeira inconsistência indica que se a distância máxima entre o início de  $m_i$  e o início de  $m_j$  é inferior à distância mínima admissível, então a restrição de distância mínima não é satisfeita. Por sua vez, a segunda inconsistência indica que se a distância mínima entre o início de  $m_i$  e o início de  $m_j$  é superior à distância máxima admissível, então a restrição de distância máxima não é satisfeita.

Esta forma de definição de inconsistência temporal é utilizada em [Con91, Con93] na verificação da inconsistência temporal entre estados relacionados causalmente, numa rede causal/temporal.

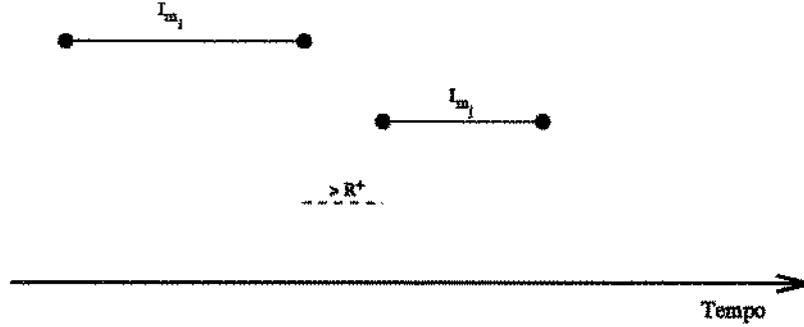


Figura 4.4: Um caso em que a restrição de distância máxima não é satisfeita.

A seguir é demonstrada a equivalência destas duas formas de inconsistência.

**Demonstração:** Deseja-se demonstrar que a forma de restrição da definição 4.5 é equivalente à descrita acima, ou seja, demonstrar que:

$$(I_{m_i} + R) \cap I_{m_j} = \emptyset \Rightarrow \begin{aligned} I_{m_j}^+ - I_{m_i}^- &< R^- \text{ ou} \\ I_{m_j}^- - I_{m_i}^+ &> R^+ \end{aligned}$$

Tem-se que

$$\begin{aligned} (I_{m_i} + R) \cap I_{m_j} &= ([I_{m_i}^-, I_{m_i}^+] + [R^-, R^+]) \cap [I_{m_j}^-, I_{m_j}^+] \\ &= [\max(I_{m_i}^- + R^-, I_{m_j}^-), \min(I_{m_i}^+ + R^+, I_{m_j}^+)] \end{aligned}$$

Como o intervalo resultante acima é vazio, tem-se as quatro inequações: (i)  $(I_{m_i}^- + R^-) > (I_{m_j}^+ + R^+)$ , (ii)  $(I_{m_i}^- + R^-) > I_{m_j}^+$ , (iii)  $I_{m_j}^- > (I_{m_i}^+ + R^+)$  e (iv)  $I_{m_j}^- > I_{m_i}^+$ . As inequações (i) e (iv) são falsas pela definição de intervalos. Por outro lado, as inequações (ii) e (iii) equivalem à  $I_{m_j}^+ - I_{m_i}^- < R^-$  e  $I_{m_j}^- - I_{m_i}^+ > R^+$ , respectivamente.  $\square$

A definição abaixo apresenta o conceito mais importante desta formulação temporal: Inconsistência temporal de uma doença.

**Definição 4.6** Para um problema de diagnóstico dinâmico  $P$  sejam  $G_I = (V_I, A_I) \in G$  o grafo temporal de uma doença  $d_I \in D$ . A doença  $d_I$  é temporalmente inconsistente com o caso, se e somente se,

1. existe pelo menos um arco  $(m_i, m_j) \in A_I$  temporalmente inconsistente com o caso, ou

2. existe pelo menos um vértice  $m_j \in V_l$ , tal que,  $m_j \in M^+$  e  $DUR_l(m_j) \cap DUR^+(m_j) = \emptyset$ .

Note que o grafo temporal  $G_l = (V_l, A_l)$ , juntamente com as funções  $DIST_l$  e  $DUR_l$  representam todas as restrições temporais das manifestações da doença  $d_l$ . As restrições relacionadas a uma manifestação  $m_j \in V_l$  individualmente podem ser de dois tipos: *restrições de relação* e *restrição de duração*. As restrições de relação de  $m_j$  são obtidas pelos arcos com destino e origem em  $m_j$ , e seus respectivos rótulos. A restrição de duração existe quando  $DUR_l(m_j) \neq [0, +\infty)$  ( $[0, +\infty)$  indica que a duração não é disponível). Por exemplo, considere a manifestação  $m_6$  do grafo temporal  $G_8$ , ilustrado na figura 4.2. Existem duas restrições de relação de  $m_6$  representadas por  $DIST_8((m_5, m_6)) = [2, 5]$  e  $DIST_8((m_4, m_6)) = [3, 8]$ . Por sua vez, a restrição de duração de  $m_6$  é representada por  $DUR_8(m_6) = [1, 2]$ . Esta forma de descrever as restrições temporais relacionadas a uma manifestação individualmente é bastante importante na solução seqüencial do problema de diagnóstico.

Finalmente, baseado na definição acima, formaliza-se as noções de uma explicação temporalmente consistente e solução temporalmente consistente.

**Definição 4.7** Um conjunto  $E \subseteq D$  é dito ser uma **explicação temporalmente consistente com o caso** para um problema de diagnóstico dinâmico  $P$ , se e somente se,

1.  $E$  cobre  $M^+$ ; e
2.  $E$  satisfaz um certo critério de parcimônia; e
3. para todo  $d_l \in E$ ,  $d_l$  não é temporalmente inconsistente com o caso.

**Definição 4.8** A **solução temporalmente consistente** de um problema de diagnóstico dinâmico  $P = \langle \langle D, M, G, DIST, DUR \rangle, \langle M^+, BEG^+, DUR^+ \rangle \rangle$ , denotado por  $Sol(P)$ , é o conjunto de todas as explicações temporalmente consistentes do caso  $\langle M^+, BEG^+, DUR^+ \rangle$ .

### 4.3.1 Algoritmos

Nesta seção são descritos os algoritmos para a solução do problema de diagnóstico dinâmico. O algoritmo *BIPARTIDO*, descrito no capítulo anterior é modificado, para considerar somente as hipóteses temporalmente consistentes. No início de um novo ciclo, após a obtenção de uma manifestação, é checado a consistência temporal das doenças evocadas pela nova manifestação, com relação a informação

do caso até o momento. Em seguida, as hipóteses que contêm doenças temporalmente inconsistentes são eliminadas do conjunto corrente de hipóteses, e as novas doenças temporalmente consistentes são usadas na atualização do conjunto de hipóteses. Note que a verificação da consistência temporal é seqüencial, mantendo uma das características distintas da TCP e dos modelos abduativos em geral.

Para ilustrar as idéias básicas do algoritmo considere o problema de diagnóstico dinâmico composto pelo problema de diagnóstico da figura 3.6 e o conhecimento temporal das doenças  $d_8$  e  $d_9$  ilustrado na figura 4.2 (página 50). Tem-se que  $S_1 = \{\{d_1\}, \{d_2\}, \{d_3, d_8\}, \{d_4, d_8\}\}$  é o conjunto de todas as explicações (coberturas irredundantes) de  $M^+ = \{m_1, m_4\}$  temporalmente consistentes com  $BEG^+(m_4) = [10, 10]$  (os valores  $BEG^+(m_1)$ ,  $DUR^+(m_1)$ ,  $DUR^+(m_4)$  não estão definidos). Note que todas as coberturas irredundantes de  $M^+$  são consistentes, uma vez que a informação temporal das manifestações presentes, isto é, os valores que  $BEG^+$  e  $DUR^+$  associam às manifestações presentes não são suficientes para tornar alguma doença temporalmente inconsistente. Toda vez que uma nova manifestação é descoberta, tal que o início ou duração estão disponíveis, verifica-se a consistência temporal das hipóteses em  $S_1$  e as atualiza. Por exemplo, considere  $m_5$  a nova manifestação com  $BEG^+(m_5) = [16, 18]$  e  $DUR^+(m_5) = [2, 3]$ . Inicialmente, obtêm-se as doenças evocadas por  $m_5$  ( $causas(m_5) = \{d_7, d_8, d_9\}$ ) que são temporalmente consistentes com  $BEG^+(m_5)$  e  $DUR^+(m_5)$ . Pela figura 4.2 tem-se que as doenças  $d_8$  e  $d_9$  são temporalmente inconsistentes. A doença  $d_8$  é temporalmente inconsistente porque o arco  $(m_4, m_5)$  com rótulo  $[1, 3]$  é inconsistente com  $BEG^+(m_4)$  e  $BEG^+(m_5)$  de acordo com a definição 4.5 (fazendo as devidas substituições tem-se que  $([10, 10] + [1, 3]) \cap [16, 18] = \emptyset$ ). Por outro lado, a doença  $d_9$  é temporalmente inconsistente porque a duração de  $m_5$  em  $d_9$  é inconsistente com  $DUR^+(m_5)$  de acordo com a definição 4.6 (fazendo as devidas substituições, tem-se que  $[7, 13] \cap [2, 3] = \emptyset$ ).

No passo seguinte, remove-se todas as explicações em  $S_1$  que contêm estas doenças temporalmente inconsistentes. Assim,  $S_2 = \{\{d_1\}, \{d_2\}\}$  representa o conjunto de todas as explicações que não se tornaram inconsistentes. Vale a pena ressaltar que uma doença considerada temporalmente inconsistente não pode mais retornar às hipóteses, ou seja, é categoricamente rejeitada. Finalmente, as doenças não inconsistentes (no caso apenas  $d_7$ ) são usadas na atualização das explicações correntes. Assim,  $S_3 = \{\{d_1, d_7\}, \{d_2, d_7\}\}$  representa o conjunto de todas as explicações temporalmente consistentes com o caso (incluindo  $m_5$ ). Se nenhuma outra manifestação estiver presente então  $S_3$  representa a solução temporalmente consistente.

O primeiro algoritmo a ser descrito, *VRT*, é utilizado toda vez que o início

$BEG^+ = (m_j)$  de uma nova manifestação  $m_j$  é fornecido.  $VRT$  retorna todas as doenças evocadas por  $m_j$  que são temporalmente inconsistentes com  $BEG^+(m_j)$ . Em outras palavras,  $VRT$  verifica a satisfação das restrições de relação de  $m_j$  em cada uma das doenças fornecidas como argumento.

```

01.function  $VRT(D_L, G, DIST, BEG^+, m_j)$ 
02.  variables
03.     $D_I$ : set-of-disorses; (* doenças temporalmente inconsistentes *)
04.    vizinhos - origem, (* relações antecessoras de  $m_i$  *)
05.    vizinhos - destino, (* relações sucessoras de  $m_j$  *)
06.    vizinhos: set-of-arcs; (* todas as relações temporais de  $m_j$  *)
07.    inconsistente: boolean; (* flag *)
08.  begin
09.     $D_I = \emptyset$ ;
10.    while  $D_L \neq \emptyset$  do
11.       $d_i \in D_L$ ;
12.       $G_i = (V_i, A_i) \in G$ ;
13.      vizinhos - origem =  $\{(m_i, m_j) | (m_i, m_j) \in A_i, \text{ e } BEG^+(m_j) \text{ está definido}\}$ ;
14.      vizinhos - destino =  $\{(m_j, m_k) | (m_j, m_k) \in A_i, \text{ e } BEG^+(m_k) \text{ está definido}\}$ ;
15.      vizinhos = vizinhos - origem  $\cup$  vizinhos - destino;
16.      inconsistente = false;
17.      while vizinhos  $\neq \emptyset$  and not inconsistente do
18.         $(m', m'') \in vizinhos$ ;
19.        if  $(BEG^+(m') + DIST_1((m', m''))) \cap BEG^+(m'') = \emptyset$ 
20.          then
21.            inconsistente = true;
22.             $D_I = D_I \cup \{d_i\}$ ;
23.          endif
24.          vizinhos = vizinhos -  $\{(m', m'')\}$ ;
25.        endwhile
26.       $D_L = D_L - \{d_i\}$ ;
27.    endwhile
28.    return  $D_I$ ;
29.  end

```

O algoritmo acima recebe  $D_L$ ,  $G$ ,  $DIST$ ,  $BEG^+$  e  $m_j$  como argumentos, tal que  $D_L \subseteq causas(m_j)$  (A forma de seleção das doenças em  $D_L$  é descrita mais adiante). O conjunto  $D_I \subseteq D_L$  mantém todas as doenças temporalmente inconsistentes sendo retornado como resposta do algoritmo.

Para o grafo temporal de cada doença  $d_i$  em  $D_L$  é verificada a existência de um arco temporalmente inconsistente, conforme a definição 4.5 (linhas 10-27). Os arcos a serem considerados são aqueles com origem e destino na nova

manifestação  $m_j$ , tal que o início das manifestações representadas nos extremos destes arcos seja disponível (i.e.  $BEG^+$  está definido para estas manifestações) (linhas 13-15). A verificação de cada um destes arcos ocorre entre as linhas 17-25. Se algum arco for temporalmente inconsistente, então a doença em questão é acrescentada à  $D_I$  (linha 26).

A seguir é apresentado o algoritmo principal, *BIPARTIDO-TEMPORAL*, para a solução do problema de diagnóstico dinâmico. Este algoritmo é obtido do algoritmo *BIPARTIDO* apresentado no capítulo 3.

```

01. function BIPARTIDO-TEMPORAL(KB)
02. variables
03.    $m_j$ : manifestation; (*nova manifestação*)
04.   hipóteses: generator-set; (*repres. todas as explicações*)
05.    $D_C$ , (*doenças consistentes*)
06.    $D_I$ , (*doenças inconsistentes*)
07.    $H$ , (*doenças evocadas por  $m_j$ *)
08.    $H_I$ , (*doenças inconsistentes (início)  $H_I \subseteq H^*$ *)
09.    $H'_I$ : set-of-disorders; (*doenças inconsistentes (duração)  $H'_I \subseteq H^*$ *)
10.    $M^+$ : set-of-manifestations; (*manifestações presentes*)
11.    $BEG^+$ , (*inícios das manifestações presentes*)
12.    $DUR^+$ : function; (*duração das manifestações presentes*)
13. begin
14.   hipóteses =  $\{\emptyset\}$ ;
15.    $D_C = \emptyset$ ;
16.    $D_I = \emptyset$ ;
17.    $M^+ = \emptyset$ ;
18.   while Maismanifs do
19.      $H_I = \emptyset$ ;
20.      $H'_I = \emptyset$ ;
21.      $m_j = Prozman$ ; (*obtem nova manifestação*)
22.      $H = causas(m_j)$ ;
23.      $H = H - D_I$ ;
24.     if  $DUR^+(m_j)$  é definido (*duração foi fornecida*)
25.       then
26.          $H'_I = \{d_i | d_i \in H, e DUR_i(m_j) \cap DUR^+(m_j) = \emptyset\}$ ;
27.       endif
28.     if  $BEG^+(m_j)$  é definido (*início foi fornecido*)
29.       then
30.          $H_I = VRT((H - H'_I) \cap D_C, G, DIST, BEG^+, m_j)$ ;
31.       endif
32.     hipóteses = res(hipóteses,  $H_I \cup H'_I$ );
33.       (*seleciona as hipóteses correntes não inconsistentes*)
34.      $D_I = D_I \cup H_I \cup H'_I$ ;

```

```

34.       $D_C = (D_C \cup H) - (H_I \cup H'_I)$ ;
35.      if  $(H - D_I) = \emptyset$  or  $(hipóteses = \emptyset$  and  $M^+ \neq \emptyset)$ 
36.      then
37.          return nil (*não existe nenhuma explicação consistente*)
38.      else
39.           $hipóteses = revise(hipóteses, H - D_I)$ ;
40.      endif
41.       $M^+ = M^+ \cup \{m_j\}$ ;
42.  endwhile
43.  return hipóteses
44. end.

```

No início desta seção é apresentado a idéia básica do algoritmo. O conjunto gerador *hipóteses* mantém agora as coberturas irredundantes de  $M^+$  que são temporalmente consistentes com as informações temporais do caso, isto é, consistentes com  $BEG^+$  e  $DUR^+$ .

$H$  representa o conjunto de todas as doenças evocadas pela nova manifestação  $m_j$  (linha 22). Na linha 23,  $H$  é atualizado, isto é, são desconsideradas todas as doenças em  $H$  que se tornaram temporalmente inconsistentes nos ciclos anteriores.

$H_I$  e  $H'_I$  são subconjuntos disjuntos de  $H$  que representam as doenças temporalmente inconsistentes com  $BEG^+(m_j)$  e  $DUR^+(m_j)$ , isto é, devido ao início e duração da nova manifestação  $m_j$ .  $H'_I$  é obtido entre as linhas 24-27, enquanto  $H_I$  entre 28-31, através da função *VRT* descrita acima.

$D_I$  e  $D_C$  representam conjuntos de doenças evocadas temporalmente inconsistentes e consistentes, respectivamente. Estes conjuntos são atualizados a cada ciclo (linhas 33 e 34). Note que  $D_C$  representa aquelas doenças evocadas que não se tornaram temporalmente inconsistentes. Durante a solução do problema algumas das doenças em  $D_C$  podem migrar para  $D_I$ , mas o contrário não acontece.

Na linha 30, por razões de eficiência, as doenças passadas ao algoritmo *VRT* são selecionadas, ou seja, são aquelas em  $(H - H'_I) \cap D_C$ . A operação  $H - H'_I$  retira aquelas doenças que já foram consideradas inconsistentes na linha 26. A interseção das doenças restantes com  $D_C$  deve-se ao fato de que o grafo temporal de uma doença evocada pela primeira vez não possui arcos inconsistentes. Em outras palavras, os arcos da forma  $(m_i, m_j)$  e  $(m_j, m_k)$  (isto é, com destino e origem na nova manifestação  $m_j$ , respectivamente) não são temporalmente inconsistentes, uma vez que  $m_i$  e  $m_k$  não estão presentes até o momento.

Todas as hipóteses que contêm alguma doença temporalmente inconsistente (i.e. em  $H_I$  ou  $H'_I$ ) são removidas na linha 32, através da operação *res*. Em outras palavras, esta operação seleciona as hipóteses temporalmente consistentes.

Note pela linha 35 que pode não existir alguma explicação para um problema de diagnóstico dinâmico. Existem dois casos em que esta situação ocorre. O primeiro é quando todas doenças evocadas pela nova manifestação são temporalmente inconsistentes ( $(H - D_I) = \emptyset$ ). Neste caso, não existe nenhuma explicação para  $m_j$  que seja temporalmente consistente. O segundo caso ocorre quando o conjunto gerador *hipóteses* se torna vazio com a operação *res* da linha 37 (esta situação pode ser identificada quando  $hipóteses = \emptyset$  e  $M^+ \neq \emptyset$ ), ou seja, todas as explicações temporalmente consistentes num dado instante contêm pelo menos uma doença evocada pela nova manifestação que é temporalmente inconsistente (isto é, pertence a  $H_I$  ou  $H'_I$ ).

Finalmente, na linha 39 *hipóteses* é atualizado de maneira conveniente. O conjunto gerador *hipóteses* mantém, então, o conjunto atualizado de todas as explicações para as manifestações anteriores e para a nova manifestação, temporalmente consistentes com a informação temporal fornecida, até o presente momento.

## Capítulo 5

# Problemas de Diagnóstico Abertos

A TCP apresentada no capítulo 3 pode ser estendida para incorporar o conhecimento probabilístico [Pen90]. O conhecimento probabilístico especifica a intensidade das associações causais entre doenças e manifestações, e as probabilidades anteriores de doenças. Por exemplo, para o primeiro caso, pode-se associar a cada relação causal  $\langle d_i, m_j \rangle$  em  $C$  uma probabilidade que pode ser um valor numérico (0,5, 1, 0,001, etc.) que especifica a frequência com que  $m_j$  ocorre na presença de  $d_i$ . Estas probabilidades são utilizadas para estimar a plausibilidade de cada hipótese, e fazer rejeições categóricas de doenças durante a solução de um problema. Por exemplo, neste último caso, se  $m_j$  é uma manifestação que sempre ocorre na presença de  $d_i$  (isto é, a relação causal  $\langle d_i, m_j \rangle$  possui probabilidade 1), então durante a solução de um problema de diagnóstico se  $m_j$  estiver ausente, então  $d_i$  será descartada como possível elemento de uma hipótese.

Fazer rejeições categóricas desta natureza sem considerar o tempo pode incorrer em erros. Este problema deve-se ao fato de que em determinadas doenças algumas de suas manifestações ocorrem apenas em estágios avançados. Assim, durante a solução do problema de diagnóstico estas doenças podem ser consideradas erroneamente quando for negado prematuramente a presença destas manifestações. Por exemplo, considere novamente a figura 4.1. A hepatomegalia é uma manifestação (sinal) que *sempre* ocorre na forma progressiva disseminada. Assim, se um indivíduo for acometido de Histoplasmose e esta se manifestar na forma primária, na solução do problema de diagnóstico pela TCP (acrescida de algum conhecimento probabilístico), a Histoplasmose poderá ser descartada das possíveis hipóteses quando for negado a presença da hepatomegalia. Esta

situação demonstra que antes de se fazer a rejeição categórica de uma doença, baseando-se na ausência de uma manifestação, deve-se verificar primeiramente se houve tempo suficiente para que esta manifestação ocorra, ou seja, verificar se a manifestação não é uma manifestação “futura” da doença num problema de diagnóstico em particular. Esta limitação também ocorre nos modelos causais quando não se considera o tempo, ou nos modelos causais/temporais na decomposição seqüencial do raciocínio abduutivo e temporal [Con91]. O problema acima é denominado nesta dissertação *problema das rejeições categóricas*.

Neste capítulo é proposta uma solução para o problema das rejeições categóricas devido a algum conhecimento probabilístico incorporado à TCP. Para isto, utiliza-se do formalismo de representação temporal apresentadas no capítulo anterior, e da noção de problema de diagnóstico aberto definido na seção 5.1. Nesta seção são apresentados também a formulação de problemas de diagnóstico dinâmico aberto e suas soluções. O algoritmo para a solução do problema é apresentado em seguida.

## 5.1 Formulação do Problema de Diagnóstico Dinâmico Aberto e suas Soluções

O problema de diagnóstico apresentado nos capítulos anteriores é denominado *problema de diagnóstico fechado*. Para um problema de diagnóstico fechado o fato de uma manifestação não estar presente no caso não é importante. Apenas as manifestações presentes são relevantes para a solução do problema. No *problema de diagnóstico aberto* probabilidades são adicionadas à rede causal. Assim, conforme descrito acima, o fato de uma manifestação estar ausente poderá ser relevante. Em particular, o problema das rejeições categóricas surge quando uma manifestação que deveria ocorrer na presença de uma doença, não é observada no caso.

Nesta dissertação não se está interessado na informação probabilística usual (numérica) entre manifestações e doenças. Interessa apenas a informação de que uma doença *necessariamente* causa uma manifestação, ou se a causação é apenas *possível*. Assim, na base de conhecimento  $KB$  adiciona-se um novo componente, a função que atribui a cada vértice de todo grafo temporal um rótulo  $N$ , para necessário, ou um rótulo  $P$ , para possível. Esta função é denotada por  $POSS$ . Assim,  $POSS(G_t, m_j) = N$ , que novamente abrevia-se como  $POSS_t(m_j) = N$ , indica que a doença  $d_t$  necessariamente causa  $m_j$ .

O conjunto  $M^-$  denotando as *manifestações ausentes*, isto é, as manifestações que não estão presentes no caso, é adicionado a informação do caso  $Ca$ , junta-

mente com  $M^+$ ,  $BEG^+$  e  $DUR^+$ . Vale a pena ressaltar que se uma manifestação é considerada ausente, significa que todo tempo relevante para a solução do problema de diagnóstico a manifestação não ocorreu.

Para verificar se já houve tempo suficiente para a ocorrência de uma manifestação é necessário o *instante atual*, ou seja, o momento da solução do problema de diagnóstico. Por exemplo, este instante pode ser uma data ou composição data/hora, escolhido de acordo com a dinâmica do domínio. O ponto de tempo  $I_{atual}$  é utilizado nesta dissertação para denotar o instante atual.

O **problema de diagnóstico dinâmico aberto** é então o par  $P = \langle KB, Ca \rangle$  em que  $KB = \langle D, M, G, DIST, DUR, POSS \rangle$  e  $Ca = \langle M^+, BEG^+, DUR^+, M^-, I_{atual} \rangle$ .

A seguir é definido o conceito de inconsistência categórica de uma doença.

**Definição 5.1** *Sejam  $P = \langle KB, Ca \rangle$  um problema de diagnóstico dinâmico aberto e  $G_l = (V_l, A_l) \in G$ . A doença  $d_l$  é categoricamente inconsistente com o caso, se e somente se,*

1. *existe um arco  $(m_j, m_k)$  em  $A_l$ , tal que,  $POSS_l(m_j) = N$ ,  $m_j \in M^-$  e  $m_k \in M^+$ , ou*
2. *existe um arco  $(m_i, m_j)$  em  $A_l$ , tal que,  $POSS_l(m_j) = N$ ,  $m_j \in M^-$ ,  $m_i \in M^+$  e  $BEG^+(m_i) + DIST_l((m_i, m_j)) \leq I_{atual}$ .*

A definição acima é formada por duas condições. Em ambas as condições a doença  $d_l$  é considerada categoricamente inconsistente pela combinação de dois fatores: uma manifestação necessária está ausente ( $POSS_l(m_j) = N$  e  $m_j \in M^-$ ), e o fato de ter havido tempo suficiente para esta manifestação ocorrer. Na primeira condição o segundo fator é garantido uma vez que uma manifestação sucessora de  $m_j$  ocorreu ( $(m_j, m_k) \in A_l$  e  $m_k \in M^+$ ). Na segunda condição este fator é garantido pelo fato dos pontos de tempo válidos para a ocorrência da manifestação ausente  $m_j$  ( $BEG^+(m_i) + DIST_l((m_i, m_j))$ ) serem inferiores ao instante atual,  $I_{atual}$  (conforme descrito acima, se uma manifestação é considerada ausente significa que não ocorreu em nenhum instante de tempo relevante para a solução do problema de diagnóstico).

O problema das rejeições categóricas ocorre quando se considera apenas o primeiro fator acima como condição suficiente para classificar uma doença como categoricamente inconsistente com o caso.

Finalmente, define-se a explicação e solução de um problema de diagnóstico dinâmico aberto.

**Definição 5.2** Um conjunto  $E \subseteq D$  é dito ser uma **explicação consistente do caso**, para um problema de diagnóstico dinâmico aberto  $P = \langle KB, Ca \rangle$ , se e somente se,

1.  $E$  cobre  $M^+$ ; e
2.  $E$  satisfaz um certo critério de parcimônia; e
3. para toda  $d_i \in E$ ,  $d_i$  não é temporalmente inconsistente; e
4. para toda  $d_i \in E$ ,  $d_i$  não é categoricamente inconsistente.

**Definição 5.3** A **solução consistente** de um problema de diagnóstico dinâmico aberto  $P = \langle \langle D, M, G, DIST, DUR, POSS \rangle, \langle M^+, BEG^+, DUR^+, M^-, I_{atual} \rangle \rangle$ , denotado por  $Sol(P)$ , é o conjunto de todas as explicações consistentes do caso  $\langle M^+, BEG^+, DUR^+, M^-, I_{atual} \rangle$ .

Note que agora a palavra “consistente” é utilizada em sentido mais geral.

### 5.1.1 Algoritmos

Na seção 4.3.1 foi descrito um algoritmo *TEMPORAL – BIPARTITE* para a solução do problema de diagnóstico dinâmico. Este algoritmo verifica de maneira seqüencial a presença de doenças temporalmente inconsistentes, eliminando as hipóteses que as contêm. Nesta seção, o algoritmo *TEMPORAL – BIPARTITE* é modificado para também verificar, seqüencialmente, a presença de doenças categoricamente inconsistentes. O algoritmo resultante, *TEMPORAL-EXTENDED-BIPARTITE*, é descrito nesta seção.

Para facilitar a compreensão dos algoritmos é introduzido a noção de uma *doença candidata à inconsistência categórica*. Uma doença candidata à inconsistência categórica,  $d_i$ , é aquela que possui uma ou mais manifestações necessárias que não estão presentes no caso, isto é, existe  $m_j \in efeitos(d_i)$ , tal que  $POSS_I(m_j) = N$  e  $m_j \in M^-$ . Para verificar se estas doenças são categoricamente inconsistentes duas listas (ou conjuntos), denotadas por  $L_{cic1}$  e  $L_{cic2}$  são estruturadas da seguinte forma:

- $L_{cic1} = \{ \{ d_i, \{ m_1, \dots, m_k \}, \dots \} \}$  em que  $d_i$  é uma doença candidata à inconsistência categórica, e  $\{ m_1, \dots, m_k \}$  é um conjunto de manifestações sucessoras de manifestações necessárias de  $d_i$ , que não estão presentes no caso.

- $L_{cic2} = \{\{d_l, \{(m_i, m_j), \dots\}, \dots\}$  em que  $d_l$  é uma doença candidata à inconsistência categórica, e  $(m_i, m_j)$  são arcos do grafo temporal de  $d_l$  em que  $m_j$  é uma manifestação necessária que não está presente no caso.

As listas  $L_{cic1}$  e  $L_{cic2}$  têm como objetivo facilitar a aplicação seqüencial da primeira e segunda condições da definição 5.1, respectivamente. Se no instante em que foi negada a presença de uma manifestação as informações correntes do caso não são suficientes para classificar uma doença como categoricamente inconsistente, então esta doença, juntamente com as respectivas informações necessárias, são acrescentadas à  $L_{cic1}$  e  $L_{cic2}$ . Assim, nos ciclos subseqüentes, na presença de novas informações, é verificada consistência categórica das doenças destas listas.

Para exemplificar a situação acima, considere o grafo temporal da figura 4.2. Suponha que  $POSS_8(m_5) = N$ , e que durante a solução do problema de diagnóstico a presença de  $m_5$  seja negada (isto é,  $d_8$  é uma doença candidata à inconsistência categórica). Se neste instante  $m_6$  estiver presente, ou  $m_4$  estiver presente e  $BEG^+(m_4) + DIST_8((m_4, m_5)) \leq I_{atual}$ , então pela definição 5.1  $d_8$  é categoricamente inconsistente. Caso contrário, os pares  $\{d_8, \{m_6\}\}$  e  $\{d_8, \{(m_4, m_5)\}\}$  são acrescentados, de maneira conveniente, à  $L_{cic1}$  e  $L_{cic2}$ , respectivamente, para que a consistência categórica de  $d_8$  seja verificada nos ciclos subseqüentes.

A seguir é descrito o algoritmo *TEMPORAL-EXTENDED-BIPARTITE*

```

01. function TEMPORAL – EXTENDED – BIPARTITE(KB)
02.  variables
03.      $m_j$ : manifestation; (*nova manifestação*)
04.     hipóteses: generator-set; (*repres. todas as explicações*)
05.      $D_C$ , (*Doenças consistentes (temp. e categ.)*
06.      $D_I$ , (*Doenças inconsistentes (temp. e categ.)*
07.      $H$ , (*Doenças evocadas por  $m_j$ *)
08.      $H_I$ , (*Doenças temporalmente inconsistentes (início)  $H_I \subseteq H^*$ )
09.      $H'_I$ , (*Doenças temporalmente inconsistentes (duração)  $H'_I \subseteq H^*$ )
10.      $H_{CI}$ , (*Doenças categoricamente inconsistentes  $H_{CI} \subseteq H^*$ )
11.      $H_1$ : set-of-disorders;
12.      $L_{CIC1}$ , (*Lista de doenças cand. à inconsistência categórica (sucessoras)*)
13.      $L_{CIC2}$ , (*Lista de doenças cand. à inconsistência categórica (antecessoras)*)
14.      $L_1, L_2, L_3, L_4$ : sets;
15.      $M^+$ : set-of-manifestations; (*manifestações presentes*)
16.      $BEG^+$ , (*inícios das manifestações presentes*)
17.      $DUR^+$ : function; (*duração das manifestações presentes*)
18.      $I_{atual}$ : time point; (*instante atual*)
19.  begin

```

```

20.  hipóteses = {∅};
21.  DC = ∅;
22.  DI = ∅;
23.  LCIC1 = ∅;
24.  LCIC2 = ∅;
25.  M+ = ∅;
26.  Iatual = Instante - Atual;
27.  while Maismanifs do
28.    mj = Prozman.manifs;
29.    H = causas(mj);
30.    H = H - DI;
31.    if Prozman.status = "presente" (*mj ∈ M+*)
32.      then
33.        HI = ∅;
34.        H'I = ∅;
35.        HCI = {di | {di, ML} ∈ LCIC1, e mj ∈ ML}
           ∪ {di | {di, A} ∈ LCIC2, e existe um arco (mj, mk) ∈ A, tal que
           BEG+(mj) + DIST1((mj, mk)) ≤ Iatual};
36.        LCIC1 = {{di, ML} | {di, ML} ∈ LCIC1, e di ∉ HCI};
37.        LCIC2 = {{di, A} | {di, A} ∈ LCIC2, e di ∉ HCI};
38.        if DUR+(mj) é definido (*duração foi fornecida*)
39.          then
40.            H'I = {di | di ∈ H - HCI, e DURi(mj) ∩ DUR+(mj) = ∅};
41.          endif
42.        if BEG+(mj) é definido (*início foi fornecido*)
43.          then
44.            HI = VRT((H - (HCI ∪ H'I)) ∩ DC, G, DIST, BEG+, mj);
45.          endif
46.        hipóteses = res(hipóteses, HCI ∪ HI ∪ H'I);
47.        DI = DI ∪ HCI ∪ HI ∪ H'I;
48.        DC = (DC ∪ H) - (HCI ∪ HI ∪ H'I);
49.        if (H - DI) = ∅ or (hipóteses = ∅ and M+ ≠ ∅)
50.          then
51.            return nil (*não existe nenhuma explicação consistente*)
52.          else
53.            hipóteses = revise(hipóteses, H - DI);
54.          endif
55.        M+ = M+ ∪ {mj}
56.      else (*mj ∈ M-*)
57.        H1 = {di | di ∈ H, e POSSi(mj) = N};
58.        L1 = {{di, ML} | di ∈ H1, e ML = {mk | (mj, mk) ∈ Ai}};
59.        L2 = {{di, ML} | {di, ML} ∈ L1, ML ∩ M+ ≠ ∅};
60.        HCI = {di | {di, ML} ∈ L2};
61.        H1 = H1 - HCI;

```

```

62.       $L_3 = \{\{d_i, A\} \mid d_i \in H_1, e A = \{(m_i, m_j) \mid (m_i, m_i) \in A_i\}\};$ 
63.       $L_4 = \{\{d_i, A\} \mid \{d_i, A\} \in L_3, e \text{ existe um arco } (m_i, m_j) \in A, \text{ tal que}$ 
            $BEG^+(m_i) + DIST_i((m_i, m_j)) \leq I_{atual}\};$ 
64.       $H_{CI} = H_{CI} \cup \{d_i \mid \{d_i, A\} \in L_4\}$ 
65.       $hip\u00f3teses = res(hip\u00f3teses, H_{CI});$ 
66.       $D_I = D_I \cup H_{CI};$ 
67.       $D_C = D_C - D_I;$ 
68.       $L_{CIC1} = ATUALIZA(L_{CIC1}, L_1 - L_2);$ 
69.       $L_{CIC2} = ATUALIZA(L_{CIC2}, L_3 - L_4);$ 
70.      if  $hip\u00f3teses = \emptyset$  and  $M^+ \neq \emptyset$ 
71.          return nil
72.      endif
73.  endif
74. endwhile
75. return  $hip\u00f3teses$ 
76. end.

```

A principal diferen\u00e7a entre o algoritmo acima e o *TEMPORAL-BIPARTITE* refere-se aos procedimentos necess\u00e1rios para a verifica\u00e7\u00e3o da inconsist\u00eancia categor\u00edca atrav\u00e9s das manifesta\u00e7\u00f5es ausentes.

O algoritmo *TEMPORAL - EXTENDED - BIPARTITE* est\u00e1 basicamente dividido em duas partes. Nas linhas 32-54 ocorre o processamento das manifesta\u00e7\u00f5es presentes, enquanto nas linhas 56-71 o processamento das manifesta\u00e7\u00f5es ausentes. Para facilitar a compreens\u00e3o, a segunda parte do algoritmo \u00e9 comentada primeiro.

Nas linhas 22 e 23 as listas  $L_{cic1}$  e  $L_{cic2}$  s\u00e3o iniciadas, e na linha 25 \u00e9 atribuido \u00e0  $I_{atual}$  o momento da solu\u00e7\u00e3o do diagn\u00f3stico atrav\u00e9s da fun\u00e7\u00e3o externa *Instante - Atual*. Na linha 30 \u00e9 verificado se a manifesta\u00e7\u00e3o a ser processada,  $m_j$ , est\u00e1 presente ou ausente. Note que esta verifica\u00e7\u00e3o ocorre atrav\u00e9s da fun\u00e7\u00e3o externa *Prozman* que, agora, \u00e9 modificada para retornar o "status" das manifesta\u00e7\u00f5es.

Na linha 56,  $H_1$  representa as doen\u00e7as candidatas \u00e0 inconsist\u00eancia categor\u00edca com rela\u00e7\u00e3o \u00e0  $m_j$  (isto \u00e9, todas as doen\u00e7as em  $causas(m_j) - D_I$  em que  $m_j$  \u00e9 necess\u00e1ria).  $L_1$ , na linha seguinte, representa todos os elementos da forma  $\{d_i, M_L\}$  em que  $d_i$  \u00e9 uma doen\u00e7a de  $H_1$ , e  $M_L$  o conjunto de todas as manifesta\u00e7\u00f5es sucessoras de  $m_j$  em  $d_i$ . Note que estas manifesta\u00e7\u00f5es s\u00e3o obtidas com facilidade devido \u00e0 propriedade de transitividade do grafo temporal de  $d_i$ . Na linha 58,  $L_2$  representa todos os elementos da forma  $\{d_i, M_L\}$  em  $L_1$ , em que  $d_i$  \u00e9 categoricamente inconsistente (a condi\u00e7\u00e3o  $M_L \cap M^+ \neq \emptyset$  garante a satisfa\u00e7\u00e3o da primeira condi\u00e7\u00e3o da defini\u00e7\u00e3o 5.1, ou seja, que existe uma manifesta\u00e7\u00e3o sucessora de  $m_j$  que est\u00e1 presente).

Todas as doen\u00e7as em  $L_2$  s\u00e3o representadas por  $H_{CI}$  na linha 59. Em outras

palavras,  $H_{CI}$  representa todas as doenças consideradas categoricamente inconsistentes (devido a ausência de  $m_j$ ) pela primeira condição da definição 5.1. Na linha 60 estas doenças são retiradas de  $H_1$ .

Para aplicar a segunda condição da definição 5.1,  $L_3$ , na linha seguinte, representa todos os elementos da forma  $\{d_i, A\}$ , em que  $d_i$  é uma doença de  $H_1$  ( $d_i$  é candidata à inconsistência categórica), e  $A$  é o conjunto de todos os arcos do grafo temporal de  $d_i$  com destino na manifestação ausente  $m_j$  (novamente, a propriedade de transitividade é importante na obtenção das manifestações antecessoras de  $m_j$ ). Na linha 62,  $L_4$  representa todos os elementos  $\{d_i, A\}$  em  $L_3$  em que  $d_i$  é categoricamente inconsistente, (ou seja, verifica a existência de um arco  $(m_i, m_j)$  em  $A$ , tal que  $BEG^+(m_j) + DIST_i((m_i, m_j)) \leq I_{atual}$ ).

Na linha 63,  $H_{CI}$  é atualizado com as demais doenças categoricamente inconsistentes obtidas da segunda condição da definição 5.1. Na linha seguinte todas as hipóteses que possuem alguma doença em comum com  $H_{CI}$  são removidas das hipóteses correntes através da operação *res*. Os conjuntos  $D_I$  e  $D_C$  são atualizados nas linhas 65 e 66, respectivamente. Observe que agora  $D_I$  mantém também as doenças categoricamente inconsistentes.

As listas  $L_{cic1}$  e  $L_{cic2}$  são atualizadas (linhas 67 e 68) através da função *ATUALIZA*, descrita mais adiante. Note que são usados os elementos em  $L_1 - L_2$  e  $L_3 - L_4$  na atualização destas listas, respectivamente. Em outras palavras, são utilizados apenas aqueles elementos que não possuem doenças categoricamente inconsistentes. Lembre-se que conforme descrito no início desta seção, a consistência das doenças em  $L_1 - L_2$  e  $L_3 - L_4$  é verificada nos ciclos subsequentes. Assim, se for descoberto uma manifestação  $m_i \in M^+$ , tal que  $m_i \in M_L$ ,  $\{d_i, M_L\} \in L_1 - L_2$ , ou  $(m_i, m_j) \in A$ ,  $\{d_i, A\} \in L_3 - L_4$ , tal que  $BEG^+(m_i) + DIST_i((m_i, m_j)) \leq I_{atual}$ , então, neste instante, a doença  $d_i$  será considerada categoricamente inconsistente.

A principal alteração na parte do programa que processa as manifestações presentes encontra-se nas linhas 34-36. Na linha 34 são obtidas todas as doenças em  $L_{cic1}$  e  $L_{cic2}$  que se tornaram inconsistentes devido a presença da nova manifestação  $m_j$ , enquanto nas linhas 35 e 36  $L_{cic1}$  e  $L_{cic2}$  são atualizadas, respectivamente.

A seguir é descrito a função *ATUALIZA*, citada anteriormente, que atualiza  $L_{cic1}$  e  $L_{cic2}$  a partir de um outro conjunto  $L$ . Esta atualização deve ser efetuada de tal forma que exista apenas uma entrada para uma doença na lista resultante. Logo, se existe uma entrada  $\{d_i, M_i\}$  ( $\{d_i, A\}$ ) em  $L_{cic1}$  ( $L_{cic2}$ ) e uma entrada  $\{d_i, M_N\}$  ( $\{d_i, A'\}$ ) em  $L$ , então estas duas entradas corresponderão a uma única entrada  $\{d_i, M_L \cup M_N\}$  ( $\{d_i, A \cup A'\}$ ) na lista restante (a lista  $L_1$  do algoritmo representa esta situação). Os demais elementos são acrescentados à lista resultante

sem nenhuma alteração (representados pelas listas  $L_2$  e  $L_3$ ).

```

01.function ATUALIZA( $L_{CIC}, L$ )
02.  variables
03.     $L_1, L_2, L_3$ : sets;
04.  begin
05.     $L_1 = \{\{d_i, C_1 \cup C_2\} | \{d_i, C_1\} \in L_{CIC} \text{ e } \{d_i, C_2\} \in L\}$ ;
06.     $L_2 = \{\{d_i, C_1\} | \{d_i, C_1\} \in L_{CIC}, \text{ tal que } \nexists \{d_i, C_2\} \in L\}$ ;
07.     $L_3 = \{\{d_i, C_1\} | \{d_i, C_1\} \in L, \text{ tal que } \nexists \{d_i, C_2\} \in L_{CIC}\}$ ;
08.    return  $L_1 \cup L_2 \cup L_3$ ;
09.  end

```

O algoritmo *BIPARTIDO – TEMPORAL – ABERTO* é constituído basicamente de 5 módulos conforme ilustra a figura 5.1. O módulo Evocação de Doenças evoca as causas potenciais, isto é, doenças, das manifestações presentes e manifestações ausentes. Em seguida, o módulo Seleção de Doenças, é verificada a consistência temporal e categórica das doenças evocadas no módulo anterior. As informações da base de conhecimento ( $KB$ ), as manifestações presentes ( $M^+$ ) e as informações temporais destas manifestações ( $BEG^+$  e  $DUR^+$ ) são utilizadas nesta verificação. O conjunto de doenças inconsistentes é atualizado por este módulo.

O módulo Cálculo de Hipóteses Consistentes elimina todas as hipóteses correntes que contêm pelo menos uma destas doenças inconsistentes. As doenças evocadas no primeiro módulo, que não se tornaram inconsistentes no módulo Seleção de Doenças, são incorporadas às hipóteses resultantes do módulo Formação de Hipóteses. As hipóteses geradas por este módulo são consistentes com as manifestações presentes e suas respectivas informações temporais, e com as manifestações ausentes. É importante ressaltar que, ao contrário dos demais módulos, o módulo Formação de Hipóteses é executado apenas quando a manifestação que está sendo processada é uma manifestação presente.

Finalmente, o módulo Obtenção de Manifestações obtém uma nova manifestação presente com suas possíveis informações temporais (início e duração) ou uma manifestação ausente reiniciando o ciclo. Ao final do processo, o algoritmo fornecerá todas as explicações consistentes com o caso.

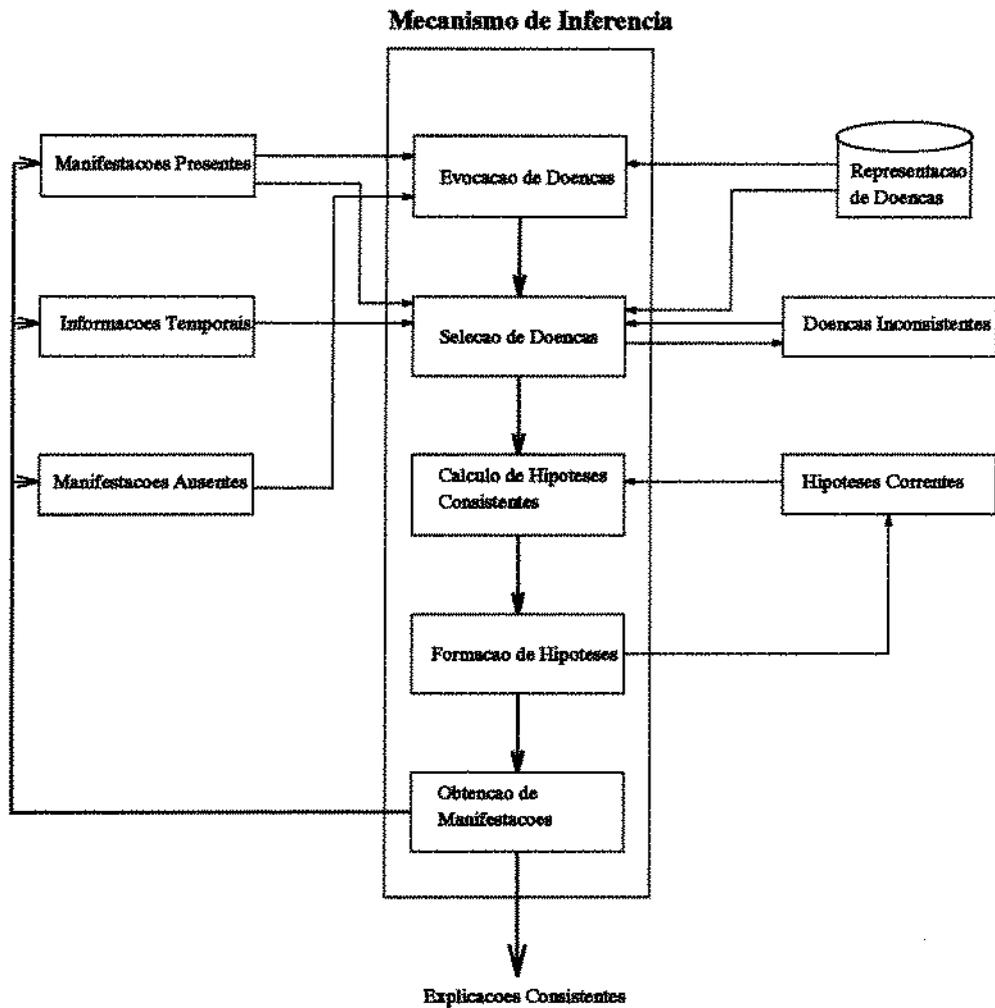


Figura 5.1: Esboço do algoritmo *BIPARTIDO - TEMPORAL - ABERTO*.

## Capítulo 6

# Implementação de um Problema Médico de Diagnóstico Temporal

Neste capítulo descreve-se uma experiência da aplicação da extensão temporal proposta nesta dissertação a um problema real de diagnóstico médico temporal. O problema de diagnóstico está relacionado às doenças de origem alimentares, devido à ingestão de alimentos contaminados por microorganismos patogênicos, toxinas microbiais ou produtos químicos.

O conhecimento utilizado nesta implementação foi obtido do manual “Principles and Practice of Infectious Diseases” [Man90], e contou com a colaboração de clínicos do Instituto de Moléstias Infecciosas do Hospital das Clínicas da UNICAMP. No apêndice A descreve-se as tabelas contendo a informação completa usada na geração da base de conhecimento.

O problema de diagnóstico de doenças de origem alimentar é fortemente temporal e consiste em descobrir o agente etiológico causador dos sintomas do paciente. No total são 28 agentes (listados na tabela 6.1) que podem causar aproximadamente 60 manifestações diferentes. As manifestações causadas por cada agente, assim como as informações temporais e probabilidades simbólicas, são descritas no apêndice A.

O programa desenvolvido para a solução do problema corresponde à implementação do algoritmo *BIPARTIDO – TEMPORAL – ABERTO* descrito no capítulo anterior. A linguagem utilizada na implementação foi o ARITY-PROLOG versão 5.1 para PC. Também foi implementado o algoritmo *BIPARTIDO* para se comparar os resultados obtidos.

Ref.	Agentes
1	<i>Staphylococcus aureus</i>
2	<i>Bacillus cereus</i> (incubação curta)
3	<i>Bacillus cereus</i> (incubação longa)
4	<i>Clostridium perfringens</i>
5	<i>Salmonella</i>
6	<i>Shigella</i>
7	<i>Campylobacter jejuni</i>
8	<i>Vibrio parahaemolyticus</i>
9	<i>Escherichia coli</i>
10	<i>Vibrio cholerae</i> non 01
11	<i>Vibrio cholerae</i> 01
12	<i>Clostridium botulinum</i>
13	<i>Yersinia enterocolitica</i>
14	Metais Pesados (cobre, zinco, estanho e cádmio)
15	Paralisia por Envenenamento de Marisco (PSP Aguda)
16	Paralisia por Envenenamento de Marisco (PSP Crônica)
17	Síndrome do Restaurante Chinês
18	"Neurotoxic Shellfish Poisoning" - NSP
19	Peixe Contaminado com Histamina ("scomboid")
20	Ciguatera (leve)
21	Ciguatera (severa)
22	Cogumelo Tóxico ("ibotenic acid" e "muscinol")
23	Cogumelo Tóxico (muscarina)
24	Cogumelo Tóxico ("psilocybin" e "psilocin")
25	Cogumelo Tóxico ( <i>Corprirus atramentarius</i> )
26	Cogumelo Tóxico (Espécie Desconhecida)
27	Cogumelo Tóxico ( <i>Amanita phalloides</i> , <i>A. virosa</i> e <i>A. verna</i> )
28	Cogumelo Tóxico ( <i>Gyromitra</i> )

Tabela 6.1: Agentes causadores de intoxicações alimentares.

Este capítulo está dividido da seguinte forma. Na seção 6.1 são descritos os problemas encontrados na representação da base de conhecimento e suas soluções. Os predicados utilizados na representação da base de conhecimento são também descritos. Na seção 6.2 é elaborado um quadro clínico fictício de um paciente para avaliar a soluções fornecidas pelo programa. Os resultados parciais e final do processo de solução do caso são descritos e comentados na seção 6.3. Finalmente, na seção 6.4 compara-se os resultados obtidos nas versões temporal e atemporal do programa.

## 6.1 Representação da Base de Conhecimento

A montagem da base de conhecimento foi relativamente simples, uma vez que na TCP e na extensão temporal proposta o mecanismo de inferência é bastante distinto da base de conhecimento.

A informação obtida considera casos mais gerais. Por exemplo não se considera que o paciente esteja fazendo uso de medicamentos ou que seja acometido de uma outra doença que possam inibir a presença de alguma manifestação ou interferir no comportamento temporal das manifestações. Além do mais, não foram consideradas outras informações (que não sejam causais ou temporais) relevantes neste tipo de diagnóstico como o tipo de alimento ingerido (como carne bovina, peixe, ovos, leite cru, etc.), estação do ano (inverno, verão, etc), nem resultados de testes laboratoriais.

### 6.1.1 Problemas Encontrados e suas Soluções

A maioria da informação temporal disponível para a solução do problema relaciona o momento da ingestão do alimento contaminado ao início da ocorrência de certas manifestações. Por exemplo, a náusea e o vômito causados pelo agente *Staphylococcus aureus* ocorrem dentro de 1 a 6 horas após a ingestão do alimento contaminado. No entanto, conforme descrito no capítulo 4, o grafo temporal representa apenas as relações temporais entre manifestações. Para adaptar-se a esta situação definiu-se uma pseudo-manifestação "x" que indica o instante em que o indivíduo ingeriu o alimento contaminado. Foram também necessárias pequenas alterações no programa original.

Outro problema encontrado refere-se ao sincronismo temporal de algumas manifestações. Por exemplo, o agente *Shigellae* causa duas síndromes. Numa síndrome as cólicas abdominais ocorrem entre 16 e 48 horas, enquanto na outra entre 16 e 72 horas. Para estas situações, o maior intervalo obtido a partir dos

intervalos existentes foi considerado. Particularmente, para este caso, o intervalo de 16 a 72 horas foi considerado para o início das cólicas abdominais.

Alguns problemas relacionados à descrição mais detalhada de uma manifestação também foram encontrados. Por exemplo, a Síndrome do Restaurante Chinês causa parestesia, enquanto a Parestesia por Envenenamento de Marisco (PSP-Crônica) causa parestesia dos lábios, língua e garganta. Note que na primeira doença a parestesia é descrita num sentido mais geral, enquanto na segunda num sentido específico. A princípio, pode-se considerar 4 manifestações, ou seja, "parestesia", "parestesia dos lábios", "parestesia da língua" e "parestesia da garganta". No entanto, isto não faz sentido na evocação de doenças, pois parestesia dos lábios, língua e garganta são um tipo de parestesia. Em outras palavras, o conjunto de todas as doenças que causam parestesia deve conter as doenças que causam parestesia dos lábios, língua e garganta, uma vez que estas são formas mais detalhadas de descrever a manifestação. Além do mais, na solução do problema de diagnóstico, se o paciente tiver parestesia da língua não se pode deixar de evocar as doenças que causam parestesia. Assim, nestas situações considerou-se a descrição mais geral da manifestação; Este problema é facilmente contornado no KMS.HT [Reg82] que é fundamentado na TCP. Da mesma forma, considera-se a descrição mais geral da manifestação, no entanto se as características da manifestação do caso (isto é, informações específicas da manifestação) são equivalentes às características da manifestação de uma doença candidata à hipótese, então a plausibilidade desta doença é aumentada.

Outro problema, que abrange o problema descrito acima, refere-se à incapacidade de representar a evolução temporal das características de uma manifestação. Por exemplo, considere o caso da diarreia causada pelo agente *Escherichia coli*. A diarreia aparece entre 16 a 48 horas após a contaminação, e depois (num intervalo de aproximadamente 48 a 72 horas após contaminação) a diarreia se torna aquosa, e em seguida (num intervalo de 72 a 120 horas após a contaminação) sanguinolenta. Por conselho de clínicos esta situação foi representada considerando o intervalo de 48 a 120 horas como o intervalo válido para a ocorrência da diarreia, uma vez que esta evolução não é relevante para o diagnóstico.

### 6.1.2 Implementação

Para representar a base de conhecimento utilizou-se de cinco predicados. Para agilizar as operações da álgebra de geradores um índice foi associado a cada doença (conforme descrito na tabela 6.1) através do predicado "doença". Por exemplo,

doença(5,salmonellae)

associa a doença por contaminação por *Salmonellae* o índice 5.

O segundo predicado, “causas”, relaciona uma manifestação com suas respectivas causas. Este predicado é equivalente à função ou conjunto *causas*. Por exemplo,

$$\text{causas}(\text{nausea}, [1, 2, 4, 12, 14, 16, 17, 19, 20, 21, 25, 26])$$

indica que a manifestação “náusea” pode ser causada por qualquer uma das doenças da lista.

Note que, ao contrário da descrição contida no apêndice A (e na maioria da descrição em [Man90]), que associa uma doença com suas manifestações, o predicado acima associa uma manifestação com suas potencias causas. A obtenção desta relação inversa foi através de um processo de compilação.

Para representar o grafo temporal e a função *DIST* utiliza-se o predicado “arcos”. Por exemplo,

$$\text{arcos}(1, [[x, \text{nausea}, [1, 6]], [x, \text{vomito}, [1, 6]]])$$

indica que náusea e vômito ocorrem entre 1 e 6 horas após a ingestão do alimento contaminado quando *Staphylococcus aureus* (índice 1) está presente. Note que, ao contrário do grafo temporal, este predicado representa *apenas* as manifestações que se relacionam temporalmente. O grafo temporal  $G_1 = (V_1, A_1)$  é tal que  $V_1 = \{x, \text{náusea}, \text{vômito}, \text{febre}\}$  e  $A_1 = \{(x, \text{náusea}), (x, \text{vômito})\}$ . A função  $DIST_1$  para os elementos de  $A_1$  é tal que,  $DIST_1((x, \text{náusea})) = [1, 6]$  e  $DIST_1((x, \text{vômito})) = [1, 6]$ .

O grafo temporal mais interessante de se representar é o da intoxicação por Cogumelo Tóxico (*Amanita phalloides*, *A. virosa* e *A. verna*). Na síndrome causada por estes agentes, cólicas abdominais e diarreia ocorrem entre 6 e 24 horas após a ingestão do alimento contaminado e são seguidas de insuficiência hepatorenal. Por esta informação e pela descrição “...cólicas abdominais e diarreia podem ser bastante severas, e usualmente se resolvem em 24 horas. O paciente então se sente bem por 1 ou 2 dias antes da evidência de insuficiência renal ou hepática...”, constrói-se o grafo temporal,  $G_{27}$ , ilustrado abaixo, cujos os rótulos representam a função  $DIST_{27}$ .

Baseando-se na descrição acima, efetuou-se os seguintes cálculos para obter a distância temporal entre o início das cólicas abdominais e diarreia e o início da insuficiência renal e hepática:  $[0, 24] + [24, 48] = [24, 72]$ . O primeiro argumento da operação soma refere-se ao intervalo válido para a duração das cólicas abdominais e diarreia (isto é, menos de 24 horas), enquanto o segundo ao intervalo de bem-estar de 1 a 2 dias que precede a insuficiência renal e hepática. Note que, conforme

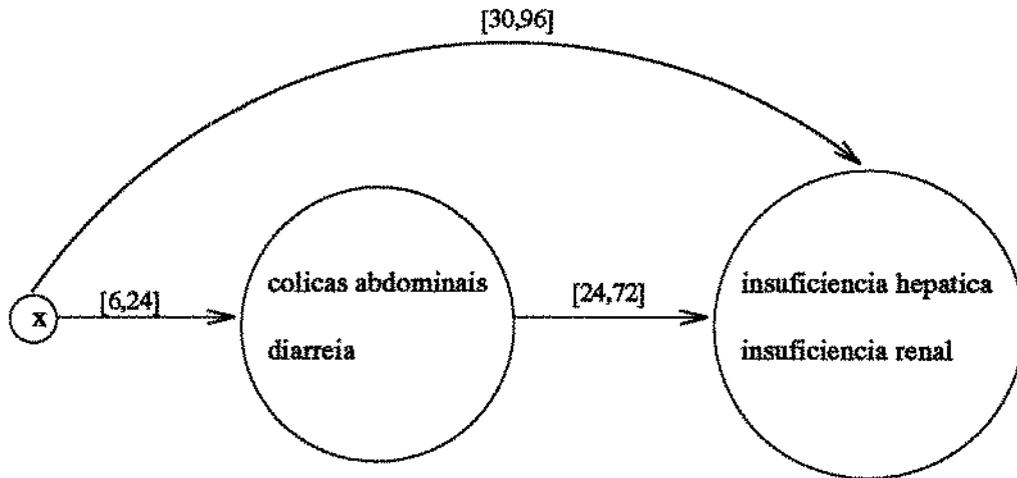


Figura 6.1: Grafo temporal do Cogumelo Tóxico (*Amanita phalloides*, *A. virosa* e *A. verna*)

descrito no capítulo 4, o rótulo do arco transitivo [30,96] corresponde à soma dos rótulos [6,24] e [24,72], isto é, representa a distância de tempo entre a ingestão do alimento contaminado e o surgimento da insuficiência renal e hepática.

Pelas descrições acima, observe que para manter a uniformidade da informação temporal representada na base de conhecimento toda informação temporal utilizada na implementação foi convertida para unidade de menor granularidade temporal, isto é, para a unidade “hora”. Assim, todos os pontos de tempo são inteiros associados a esta unidade.

Seguindo a descrição dos predicados utilizados na representação do conhecimento, tem-se que o predicado “durações”, representa a função *DUR*. Por exemplo,

$$\text{duracoes}(2,[[\text{nausea},[0,12]],[\text{vomito},[0,12]],[\text{diarreia},[0,12]]])$$

indica que duração das manifestações náusea, vômito e diarreia, causadas pelo agente *Bacillus Cereus* (incubação curta) é no máximo 12 horas.

Finalmente, o predicado “necessarias” indica todas as manifestações necessárias de uma doença, isto é, representa a função *POSS*. Por exemplo,

$$\text{necessarias}(3,[[\text{diarreia},\text{colicas-abdominais},\text{vomito},\text{febre}])$$

indica que diarreia, cólicas abdominais, vômito e febre sempre ocorrem na presença do agente *Bacillus cereus* (incubação longa). As demais manifestações são possíveis de ocorrer.

## 6.2 Representação do Caso

### 6.2.1 Quadro Clínico

O objetivo inicial era considerar um caso real, isto é, as informações que um clínico obteve de um paciente para o diagnóstico. No entanto, devido as dificuldades de se encontrar um caso de intoxicação alimentar nos registros do Instituto de Moléstias Infecciosas do HC-UNICAMP, uma vez que, na maioria das vezes, as pessoas não procuram assistência médica nestas situações, foi considerado um caso fictício. Este caso foi elaborado considerando apenas parte da informação obtida por um clínico numa situação real (por exemplo, não se considera o tipo de alimento ingerido pelo paciente), porém esta informação é suficiente para analisar os resultados fornecidos pelo programa.

Elaborou-se então a seguinte situação fictícia de um paciente:

1. o paciente se apresentou ao clínico 30 horas após ter ingerido o alimento contaminado;
2. o clínico obteve as seguintes manifestações presentes, com suas respectivas informações temporais:
  - cólicas abdominais: iniciaram entre 8 a 10 horas após a ingestão do alimento contaminado, e duraram 20 horas;
  - diarreia: iniciou entre 10 a 12 horas após a ingestão do alimento contaminado, e durou de 15 a 20 horas;
  - náusea;
  - vômito: iniciou 5 horas após a ingestão do alimento contaminado;
3. Foi notado também a ausência de parestesia.

### 6.2.2 Representação do Quadro Clínico (Caso)

Nesta seção é descrita a maneira com que a informação do quadro clínico, descrita na seção anterior, é representada através do formalismo proposto para representação do caso.

O instante atual,  $I_{atual} = 30$  corresponde ao momento em que o indivíduo procurou assistência médica após a ingestão do alimento contaminado.

O conjunto  $M^+ = \{\text{cólicas abdominais, diarreia, náusea, vômito}\}$  representa as manifestações presentes no caso, e  $M^- = \{\text{parestesia}\}$  as manifestações ausentes.

As funções  $BEG^+$  e  $DUR^+$  representando a informação de início e duração do caso, respectivamente, são definidas para as manifestações presentes da seguinte forma:

- $BEG^+(x) = [0, 0]$
- $BEG^+(\text{cólicas abdominais}) = [8, 10]$
- $BEG^+(\text{diarréia}) = [10, 12]$
- $BEG^+(\text{náusea}) = [5, 5]$
- $DUR^+(\text{cólicas abdominais}) = [20, 20]$
- $DUR^+(\text{diarréia}) = [15, 20]$

Note que embora a pseudo-manifestação “x” não pertença à  $M^+$ , o instante 0 é associado ao seu início para representar o momento em que o indivíduo ingeriu o alimento contaminado. Este instante será utilizado na verificação das restrições temporais.

### 6.3 Solução do Problema de Diagnóstico

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos durante a solução do caso descrito na seção 6.1. Por conselho de clínicos, foram consideradas apenas as hipóteses contendo uma única doença (coberturas mínimas). Assim, nesta seção, a listagem dos resultados parciais obtidos durante a solução do problema contém apenas estas hipóteses.

A lista abaixo mostra a forma com que foi fornecida a informação ao programa, e a ordem com que estas informações foram processadas.

```
[ [colicas-abdominais,[8,10],[20,20]],
  [diarreia,[10,12],[15,20]],
  [nausea,[],[]],
  [vomito,[5,5],[]],
  [parestesia] ].
```

Note que esta lista possui dois tipos de elementos diferentes. O primeiro tipo, listas contendo 3 elementos, representa as manifestações presentes. Cada elemento representa uma manifestação, seu início e sua duração, nesta ordem. A

lista vazia “[ ]” indica que o início ou duração não estão disponíveis. O segundo tipo, listas contendo 1 elemento, representa as manifestações ausentes. Observe também que a pseudo-manifestação “x” não pertence à nenhuma destas listas. Esta manifestação é acrescentada na lista das manifestações processadas (uma entrada do tipo “[x,[0,0],[ ]]”) e, ao contrário das demais manifestações, não evoca nenhuma doença, servindo apenas como referência para o início das demais manifestações.

Finalizando a descrição da maneira com que as informações foram fornecidas ao programa, tem-se que o predicado

instante-atual(30)

representa o momento da solução do diagnóstico.

A primeira informação processada pelo programa foi “cólicas-abdominais, [8,10], [20,20]”. As hipóteses iniciais foram:

1. *Clostridium Perfringens*
2. Paralisia por Envenenamento de Marisco (PSP-Crônica)
3. Ciguatera (Leve)
4. Ciguatera (Severa)
5. Cogumelo Tóxico (*Amanita phalloides*, *A.virosa*, *A.verna*)
6. Cogumelo Tóxico (*Gyromitra*).

A princípio, isto é, sem considerar nenhuma informação temporal, cólicas abdominais podem ser causadas por 20 agentes diferentes. Em outras palavras, 14 agentes foram desconsiderados devido à inconsistência com o início e/ou duração das cólicas abdominais do caso. Por exemplo, *Bacillus cereus* (incubação longa) foi considerado temporalmente inconsistente porque a duração das cólicas abdominais no caso foi superior a 12 horas. Pela definição 4.6 e considerando  $G_3$  como o grafo temporal do agente *Bacillus cereus* (incubação longa), isto equivale a dizer que

$$DUR_3(\text{cólicas abdominais}) \cap DUR^+(\text{cólicas abdominais}) = [0, 12] \cap [20, 20] = \emptyset.$$

Por outro lado, a intoxicação por Metais Pesados foi desconsiderada porque as cólicas abdominais causadas por este agente ocorrem dentro de 1 hora após a ingestão do alimento contaminado. Em outras palavras, pela definição 4.5 e considerando  $G_{14}$  como grafo temporal de Metais Pesados, tem-se que

$$(BEG^+(x) + DIST_{14}((x, cólicas abdominais))) \cap BEG^+(cólicas abdominais) = ([0, 0] + [0, 1]) \cap [8, 10] = \emptyset$$

ou seja, o arco  $(x, cólicas abdominais)$  em  $G_{14}$  é temporalmente inconsistente.

No processamento da segunda informação, “[diarreia, [10,12],[15,20]]”, as hipóteses correntes permaneceram inalteradas. Primeiramente, foram desconsideradas todas as doenças evocadas temporalmente inconsistentes no passo anterior (conforme descrito nos capítulos anteriores estas doenças não podem mais retornar às hipóteses). Entre as doenças restantes, *Bacillus cereus* (incubação curta) e *Clostridium Botulinum* foram consideradas temporalmente inconsistentes, devido à duração e início da diarreia, respectivamente. Assim, das doenças evocadas, restaram apenas as mesmas 6 doenças que constituem as hipóteses correntes.

No terceiro ciclo de solução do problema foi processada a informação “[náusea, [], []]”. Neste ciclo, nenhuma doença evocada foi considerada temporalmente inconsistente, uma vez que o início e a duração da manifestação não estavam disponíveis. No entanto, as hipóteses 5 e 6 foram desconsideradas por não causarem náusea<sup>1</sup>.

No processamento da última manifestação presente com suas respectivas informações temporais, “[vômito, [5,5], []]”, o agente Cogumelo Tóxico (*Corprios atramentarius*) foi considerado temporalmente inconsistente, pois o início do vômito neste agente é inferior a 2 horas<sup>2</sup>. Não houve alteração das hipóteses correntes, uma vez que esta manifestação pode ser causada por todas as doenças que as constituem.

O processamento da manifestação ausente, “parestesia”, incorreu na inconsistência categórica das três últimas hipóteses, isto é, das hipóteses 2, 3 e 4. Por exemplo, a Paralisia por Envenenamento de Marisco (PSP-Crônica) foi considerada categoricamente inconsistente porque a parestesia é uma manifestação que sempre ocorre entre 1 a 6 horas após a ingestão do alimento contaminado, e pelo fato de já ter havido tempo suficiente para sua ocorrência (pela informação descrita no quadro clínico tem-se que o indivíduo procurou assistência médica 30 horas após a contaminação). Pela definição 5.1 e considerando  $G_{16}$  o grafo temporal da PSP-Crônica, isto equivale a dizer que

$$BEG^+(x) + DIST_{16}((x, parestesia)) = [1, 6] \leq I_{atual} = 30.$$

A solução final apresentada pelo programa foi, então, a intoxicação pelo agente

<sup>1</sup>Na realidade, para garantir a “cobertura” de todas as manifestações presentes, estas hipóteses foram combinadas com 2 doenças evocadas pela náusea, *Staphylococcus aureus* e Cogumelo Tóxico (*Corprios atramentarius*), formando 4 hipóteses de 2 doenças cada.

<sup>2</sup>Desta forma, 2 das 4 hipóteses com múltiplas doenças foram descartadas.

*Clostridium perfringens.*

Note que esta conclusão é consistente com as informações descritas em [Man90] sobre as manifestações causadas pelo agente *Clostridium perfringens*. Em outras palavras, este agente causa uma síndrome em que cólicas abdominais e diarreia surgem dentro de 8 a 16 horas. Também estão presentes náusea, vômito e febre. Além do mais, não é especificado nenhuma duração para estas manifestações.

#### 6.4 Comparação entre as Versões Temporais e Atemporais

Na seção anterior são descritos os resultados obtidos durante a solução do caso, descrito na seção 6.2, pelo algoritmo *TEMPORAL-EXTENDED-BIPARTITE* proposto nesta dissertação. Nesta seção, apresenta-se os resultados obtidos na solução do caso pelo algoritmo *BIPARTIDO*. Também compara-se e comenta-se os resultados obtidos por cada algoritmo.

O algoritmo *BIPARTIDO* descrito no capítulo 3 processa apenas as manifestações presentes e não considera nenhum aspecto temporal. Assim, as únicas informações processadas pelo programa foram as manifestações presentes no caso, ou seja, cólicas abdominais, diarreia, náusea e vômito.

A solução final apresentada pelo programa (novamente considerando apenas as hipóteses formadas por uma única doença) foi, então

1. *Clostridium Perfringens*
2. Paralisia por Envenenamento de Marisco (PSP-Crônica)
3. Peixe Contaminado por Histamina
4. Ciguatera (Leve)
5. Ciguatera (Severa)
6. Cogumelo Tóxico (Espécie Desconhecida)

Note que, ao contrário da solução apresentada pelo algoritmo *BIPARTIDO-TEMPORAL-ABERTO*, a solução acima é formada por 6 hipóteses. Além do mais, observe que existem 2 doenças temporalmente inconsistentes com o caso (hipóteses 3 e 6). Por exemplo, a duração das cólicas abdominais causadas por Peixe Contaminado por Histamina é inferior a 4 horas, enquanto a duração das cólicas abdominais do paciente é de 20 horas.

Outro parâmetro utilizado na comparação dos resultados foi o número de hipóteses com múltiplas doenças; 2 pelo algoritmo *BIPARTIDO-TEMPORAL-ABERTO*, contra 73 pelo algoritmo *BIPARTIDO*.

Finalmente, tem-se que o tempo gasto na obtenção da solução pelo *BIPARTIDO-TEMPORAL-ABERTO* foi aproximadamente de 2 segundos contra 7 segundos pelo *BIPARTIDO*<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup>O equipamento utilizado na execução do programa foi um PCAT-286.

## Capítulo 7

# Conclusões

Nesta seção apresenta-se as contribuições, limitações e futuras extensões desta dissertação.

### 7.1 Contribuições

Nesta dissertação apresentou-se uma extensão temporal à Teoria das Coberturas Parcimoniosas. Através desta extensão foi possível selecionar as hipóteses temporalmente consistentes com o caso. Além do mais, pela extensão temporal proposta e pela noção de problema de diagnóstico aberto, apresentou-se uma solução para o problema das rejeições categóricas. Este problema ocorre, na maioria dos sistemas de diagnóstico de primeira geração, e na TCP quando se incorpora o conhecimento probabilístico, fundamental na representação das incertezas.

Além das contribuições acima, a incorporação de aspectos temporais à TCP minimizou uma das principais limitações da teoria, que é a possibilidade de incluir um grande número de hipóteses.

O algoritmo *BIPARTIDO – TEMPORAL – ABERTO* proposto para a solução de problemas de diagnósticos dinâmicos abertos verifica a presença de doenças inconsistentes a cada ciclo da solução. Conseqüentemente, conforme demonstram os resultados obtidos no capítulo 6, economiza-se um substancial esforço e tempo evitando a manipulação de hipóteses inconsistentes.

O formalismo temporal proposto para a representação da base de conhecimento e do caso considera aspectos importantes como o conhecimento incerto e incompleto. Por exemplo, conforme descrito nos capítulos anteriores, na medicina esta consideração é bastante útil.

Na seção 4.1 foi descrito que a determinação do estágio atual de uma doença

candidata à hipótese, diante das informações do caso, é um importante raciocínio no diagnóstico médico. Através deste raciocínio, pode-se por exemplo prever eventos futuros que possam colocar em risco a vida do paciente, e tomar as devidas precauções no sentido de evitar tais complicações. Pela extensão temporal proposta pode-se obter facilmente as manifestações futuras de uma doença. Por exemplo, se  $d_i$  é um elemento de hipótese, então todas as manifestações sucessoras das manifestações em  $efeitos(d_i) \cap M^+$  (obtidas através do grafo temporal de  $d_i$ ) cujo início seja superior ao instante atual,  $I_{atual}$ , são manifestações futuras da doença.

## 7.2 Limitações

Nos capítulos anteriores foram descritas algumas limitações no formalismo de representação. A primeira refere-se à incapacidade de representar eventos recorrentes. Por exemplo, no caso do diagnóstico médico, o intervalo de recorrência da febre é importante na identificação do tipo de Malária.

A forma com que a distância temporal é definida incorre em outra limitação, pois existem casos em que a única informação disponível é a distância entre o fim de uma manifestação e início de outra.

No capítulo 6 foram citadas duas outras limitações relacionadas ao formalismo de representação, encontradas durante a aplicação da TCP estendida com tempo a um problema real de diagnóstico. O primeiro foi a incapacidade de representar a evolução temporal das características de uma manifestação. O segundo, embora tenha sido facilmente contornado na implementação, refere-se à relação temporal de uma manifestação a uma outra entidade de diagnóstico que não seja outra manifestação, ou seja, a relação temporal entre o início de uma manifestação ao momento da ingestão do alimento contaminado.

A extensão temporal proposta evidencia problemas que ocorrem quando se considera múltiplas doenças. Na realidade, hipóteses com múltiplas doenças dificulta a solução de problemas de diagnóstico, pois existem casos em que há interação entre as doenças, ou seja, uma doença altera a forma de apresentação de outra [Pat81]. Para a extensão temporal proposta, estes problemas podem ocorrer quando duas ou mais doenças de uma mesma hipótese causam manifestações semelhantes presentes no caso. Por exemplo, para o problema de diagnóstico do capítulo 6, suponha que um indivíduo seja intoxicado por *Bacillus Cereus* (incubação longa) e *Salmonellae*. As cólicas abdominais causadas por estes agentes iniciam entre 8 e 16 horas e 16 e 72 horas, respectivamente. Se as cólicas abdominais surgirem no paciente antes das 16 horas, *Salmonella* será considerada

temporalmente inconsistente, e pelo raciocínio temporal proposto toda hipótese que a contém será descartada.

Assim, o raciocínio temporal proposto é ideal para domínios em que uma única doença seja capaz de justificar as informações do caso. No entanto, pode-se ainda considerar a presença de múltiplas doenças, de tal forma que para quaisquer duas doenças  $d_l$  e  $d_m$  de uma mesma hipótese  $(efeitos(d_l) \cap M^+) \cap (efeitos(d_m) \cap M^+) = \emptyset$ .

### 7.3 Extensões Futuras

O conhecimento probabilístico é fundamental para representar as incertezas do domínio de aplicação. Em [Pen90] é desenvolvido um cálculo probabilístico para a TCP. Estender a TCP para incorporar simultaneamente o conhecimento temporal e probabilístico é uma importante extensão à esta dissertação. Para isto, seria interessante responder às seguintes perguntas: Quais as conseqüências da extensão temporal proposta à TCP neste cálculo probabilístico? Qual a melhor classificação das hipóteses neste modelo? Para esta última pergunta sabe-se que deve levar em consideração alguns fatores que não sejam causais nem temporais. Por exemplo, na medicina, informações de contexto como idade, sexo e histórico médico do paciente podem afetar a plausibilidade de uma hipótese diagnóstica pois estas informações especificam o contexto particular do problema de diagnóstico. Também fatores de risco e severidade de uma doença podem afetar o processo de diagnóstico.

Embora não sejam diretamente tratados na formulação da teoria, existem dois importantes módulos que devem constar num sistema de diagnóstico:

1. *Módulo de Geração de Perguntas*: a maioria das questões geradas pelos sistemas de diagnóstico são dirigidas à hipóteses (veja capítulo 1). Estas perguntas são geradas baseando-se nas doenças que constituem as hipóteses num determinado instante durante a solução do problema. A habilidade em gerar boas perguntas a partir da informação disponível e das hipóteses correntes pode ser crucial na eficiência da solução do problema [Pen90]. Alguns fatores devem ser levados em conta como o custo e o risco na obtenção de uma manifestação. Assim, a questão é: De que maneira o formalismo temporal proposto pode auxiliar na geração de boas perguntas?
2. *Módulo de Justificação*: Justificativa de resposta refere-se a habilidade de um sistema baseado em conhecimento em explicar como e porque chegou às conclusões como diagnose. É muito importante desenvolver métodos

para justificação de respostas. Por exemplo, estudos demonstram que na medicina há necessidade de boas explicações por sistemas diagnóstico para a aceitação do médico [Ber78]. Além do mais, a justificação de resposta permite analisar erros durante a construção da base de conhecimento. Como justificar as conclusões do sistema considerando o tempo é uma interessante pergunta a ser respondida.

No processamento da primeira manifestação presente, na solução do problema de diagnóstico do capítulo 6, 14 causas potenciais foram consideradas temporalmente inconsistentes devido ao início e/ou duração das cólicas abdominais. No entanto, ao final da solução do problema algumas destas doenças podem ser justificativas razoáveis para as informações do caso, uma vez que na medicina sempre existem exceções. Assim, num sistema de diagnóstico seria interessante obter um módulo que pudesse fornecer importantes informações acerca das doenças inconsistentes e seus grafos temporais, como:

- número de arcos temporalmente consistentes;
- número de arcos temporalmente inconsistentes;
- número de manifestações necessárias que estão ausentes;
- manifestações presentes no caso que podem ser justificadas.

Talvez, baseado nestas informações pode-se reconsiderar alguma destas doenças.

## Apêndice A

### Base de Conhecimento

Neste apêndice são apresentadas as informações utilizadas na implementação do problema de diagnóstico de doenças de origem alimentar do capítulo 6. O manual “Principles and Practice of Infectious Disease” [Man90] serviu de fonte na obtenção desta informação. Cada uma das 28 tabelas está associada a um agente. A primeira coluna lista as manifestações que podem ser causadas pelo agente. A segunda e terceira colunas indicam o início e duração de algumas destas manifestações, respectivamente. O início das manifestações é descrito com relação ao momento da ingestão do alimento contaminado (exceto o início da insuficiência renal e hepática das duas últimas tabelas). Finalmente a quarta coluna lista a frequência com que as manifestações ocorrem na presença do agente; “N” e “P” indicam que a manifestação é necessária ou possível, respectivamente.

<i>Staphylococcus aureus</i>			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
náusea	1 a 6 horas		N
vômito	”		N
febre			N

<i>Bacillus cereus (incubação curta)</i>			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
náusea	1 a 6 horas	menos de 12 horas	N
vômito	”	”	N
diarréia		”	N

<i>Bacillus cereus</i> (incubação longa)			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
diarréia	8 a 16 horas	menos de 12 horas	N
cólicas abdominais	"	"	N
vômito		"	N
febre			N

<i>Clostridium perfringens</i>			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
diarréia	8 a 16 horas		N
cólicas abdominais	"		N
náusea			N
vômito			N
febre			N

<i>Salmonellae</i>			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
febre	16 a 72 horas	2 a 7 dias	N
cólicas abdominais	"	"	N
diarréia	"	"	N
vômito		"	N

<i>Shigellae</i>			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
febre	16 a 72 horas	2 a 7 dias	N
cólicas abdominais	"	"	N
diarréia	"	"	N
vômito		"	N

<i>Campylobacter jejuni</i>			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
febre	16 a 72 horas	2 a 7 dias	N
cólicas abdominais	"	"	N
diarréia	"	"	N
vômito		"	N
feses com sangue		"	N
colite		"	N

<i>Vibrio parahaemolyticus</i>			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
febre	16 a 72 horas	2 a 7 dias	N
cólicas abdominais	"	"	N
diarréia	"	"	N
vômito		"	N

<i>Escherichia Coli</i>			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
febre	16 a 72 horas	2 a 7 dias	N
cólicas abdominais	"	1 a 12 dias	N
diarréia	16 a 120 horas	1 a 12 dias	N
vômito		2 a 7 dias	N

<i>Vibrio cholerae non-01</i>			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
febre	16 a 72 horas		N
cólicas abdominais	"		N
diarréia	"		N
vômito		2 a 12 dias	N

<i>Vibrio cholerae 01</i>			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
cólicas abdominais	16 a 72 horas	72 a 96 horas	N
diarréia	"	"	N
febre		"	N
vômito		"	N

<i>Clostridium botulinum</i>			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
náusea	18 a 36 horas		N
vômito	"		N
diarréia	"		N
paralisia	"		N
constipação			N

<i>Yersinia enterocolitica</i>			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
febre	16 a 48 horas	24 horas a 4 semanas	N
cólicas abdominais	"	"	N
adenite mesentérica		"	N

<b>Metais Pesados (cobre, zinco, estanho e cádmio)</b>			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
náusea	dentro de 1 hora		N
vômito	"		N
cólicas abdominais	"		N

<b>Paralisia por Envenenamento de Marisco (PSP-Aguda)</b>			
<b>Manifestação</b>	<b>Início</b>	<b>Duração</b>	<b>Freq.</b>
parestesia	dentro de 1 hora	menos de 3 dias	N
paralisia da boca		"	N
paralisia dos lábios		"	N
paralisia da face		"	N
paralisia das extremidades		"	N
dispnéia		"	N
disfagia		"	N
fraqueza muscular		"	N
ataxia		"	N
insuficiência respiratória		"	N

Paralisia por Envenenamento de Marisco (PSP-Crônica)			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
parestesia	1 a 6 horas	menos de 3 dias	N
paralisia da boca		"	N
paralisia dos lábios		"	N
paralisia da face		"	N
paralisia das extremidades		"	N
dispnéia		"	N
disfagia		"	N
fraqueza muscular		"	N
ataxia		"	N
insuficiência respiratória		"	N
cólicas abdominais			P
náusea			P
vômito			P
diarréia			P
entorpecimento			P
parestesia dos lábios			P
parestesia da língua			P
parestesia da garganta			P
indisposição			P
cefaléia			P
prurido			P
boca seca			P
paladar metálico			P
mialgia			P
artralgia			P
visão apagada			P
fotofobia			P
cegueira transitória			P
dores pungentes nas pernas			P
sensação de frouxidão			P
dor nos dentes			P
mudança de temperatura			P
bradicardia sinusal			P
hipotensão			P
paralisia respiratória			P

Síndrome do Restaurante Chinês			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
parestesia	dentro de 1 hora	menos de 6 horas	N
sensação de ardência no pescoço		"	N
sensação de ardência no abdômem		"	N
sensação de ardência no tórax		"	N
sensação de ardência nos braços		"	N
sensação de ardência na face		"	N
sensação de ardência no tórax		"	N
cefaléia		"	N
rubor		"	N
diaforese		"	N
lacrimação		"	N
fraqueza		"	N
náusea		"	N
cólicas abdominais		"	N
sêde		"	N

"Neurotoxic Shellfish Poisoning" (NSP)			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
parestesia	dentro de 1 hora	menos de 3 dias	N
dispnéia		"	N
disfagia		"	N
fraqueza		"	N
ataxia		"	N
insuficiência respiratória		"	P

Peixe Envenenado por Histamina ("scomboid")			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
parestesia	dentro de 1 hora	menos de 4 horas	N
ardência na boca		"	N
ardência na garganta		"	N
rubor		"	N
cefaléia		"	N
vertigem		"	N
cólicas abdominais		"	N
náusea		"	N
vômito		"	N
diarréia		"	N
urticária		"	N
brôncoespasmo		"	N

Ciguatera (Leve)			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
parestesia	1 a 6 horas		N
cólicas abdominais			N
náusea			N
vômito			N
diarréia			N
entorpecimento			N
parestesia dos lábios			N
parestesia da língua			N
parestesia da garganta			N
indisposição			N
cefaléia			N
prurido			N
boca seca			N
paladar metálico			N
mialgia			N
artralgia			N
visão apagada			N
fotofobia			N
cegueira transitória			N
dores pungentes nas pernas			N
sensação de frouxidão			N
dor nos dentes			N

Ciguatera (Severa)			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
parestesia	1 a 6 horas		N
cólicas abdominais			N
náusea			N
vômito			N
diarreia			N
entorpecimento			N
parestesia dos lábios			N
parestesia da língua			N
parestesia da garganta			N
indisposição			N
cefaléia			N
prurido			N
boca seca			N
paladar metálico			N
mialgia			N
artralgia			N
visão apagada			N
fotofobia			N
cegueira transitória			N
dores pungentes nas pernas			N
sensação de frouxidão			N
dor nos dentes			N
mudança de temperatura			P
bradicardia sinusal			P
hipotensão			P
nervo craniano paralisado			P
paralisia respiratória			P

Cogumelo Tóxico ("ibotenic acid, muscinol")			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
pertubação	dentro de 2 horas	24 horas	N
agitação	"	"	N
distúrbios visuais	"	"	N
sonolência	"	"	N
pré-coma	"	"	N
confusão	"	"	N

Cogumelo Tóxico ( <i>muscarina</i> )			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
salivação	dentro de duas horas	24 horas	N
lacrimação	"	"	N
diaforese	"	"	N
visão apagada	"	"	N
cólicas abdominais	"	"	N
diarréia	"	"	N
miose	"	"	N
bradicardia	"	"	P
broncospasmo	"	"	P

Cogumelo Tóxico (" <i>psilocybin,psilocin</i> ")			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
alucinação	dentro de 2 horas	12 horas	N
comportamento inapropriado	"	"	N

Cogumelo Tóxico ( <i>Corprirus atramentarius</i> )			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
cefaléia	dentro de 2 horas		N
rubor	"		N
parestesia	"		N
náusea	"		N
vômito	"		N
taquicardia	"		N

Cogumelo Tóxico (Espécie Desconhecida)			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
náusea	dentro de 2 horas		N
vômito	"		N
cólicas abdominais	"		N
diarréia	"		N

Cogumelo Tóxico ( <i>Amanita phalloides, A. virosa, A. verna</i> )			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
cólicas abdominais	6 a 24 horas	dentro de 24 horas	N
diarréia	"	"	N
insuficiência renal	1 a 2 dias após final das		N
insuficiência hepática	cólicas abdominais e diarréia		N

Cogumelo Tóxico ( <i>Gyromitra</i> )			
Manifestação	Início	Duração	Freq.
cólicas abdominais	6 a 24 horas	dentro de 24 horas	N
diarréia	"	"	N
insuficiência hepática	1 a 2 dias após final das cólicas abdominais e diarréia		N
			N

# Bibliografia

- [All84] J. Allen, Towards a general theory of action and time, *Artificial Intelligence* 23 (1984) 123-154.
- [Ber78] L. Bernstein, E. Siegel and W. Ford, The Hepatitis knowledge Base Prototype, in: *Proc. 2th Annu. Symp. Comp. Appl. Med. Care*, Nov. (1978) 366-367.
- [Ber87] R. Berkow, *Manual Merck de Medicina*, 15ed., Roca (1987).
- [Buc70] B. Buchanan, E. Sutherland and E. Feigenbaum, Rediscovering some problems of artificial intelligence in the context of organic chemistry, *Machine Intelligence*, 5, Edinburgh University Press, (1970).
- [Cat79] V. Catanzarite and A. Greenburg, Neurologist - a computer program for diagnosis in Neurology, in: *Proc. 3th Symposium on Computer Applications in Medical Care*, IEEE, (1979) 64-72.
- [Cha79] B. Chandrasekaran, et al, An approach to medical diagnosis based on conceptual structure, in: *Proc International Joint Conference on Artificial Intelligence*, (1979), 134-142.
- [Cha85] E. Charniak and D. McDermott, Introduction to artificial intelligence, *Addison-Wesley, Reading, MA* (1985) chapters 8,10.
- [Con88] L. Console, A. Furno and P. Torasso, Dealing with time in diagnostic reasoning based on causal models, *Methodologies for Intelligent Systems* 3, North-Holland, Amsterdam, (1988) 230-239.
- [Con89] L. Console, A. J. Rivolin, D. T. Dupré and P. Torasso, Integration of causal and temporal reasoning in diagnostic problem solving, in: *Proc. 9th International Workshop on Expert Systems and Their Applications*, Avignon (1989) 309-323.

- [Con91] L. Console and P. Torasso, On the co-operation between abductive and temporal reasoning in medical diagnosis, *Artificial Intelligence in Medicine* 3 (1991) 291-311.
- [Con93] L. Console and P. Torasso, Temporal constraint satisfaction on causal models, *Information Sciences* 68 (1993) 1-32.
- [Coo87] M. Coombs and R. Harley, The MGR Algorithm and its application to the generation of explanations for Novel Events, *Technical Report, MCCS-87-97*, Computer Research Laboratory, New Mexico University, (1987).
- [Dav72] P. Davies, Symptom diagnosis using Bahadur's distribution, *Bio-Med. Comp.* 3, (1972) 69-89.
- [deD75] F. deDombal, Computer assisted diagnosis of abdominal pain, *Advances in Medical Computing*, Churchill-Livingston, (1975) 10-19.
- [deK87] J. de Kleer and B. Williams, Diagnosing multiple faults, *Artificial Intelligence*, 32, (1987), 97-130.
- [Dou93] C. Dousson, P. Gaborit and M. Ghallab, Situation recognition: representation and algorithms, in: *Proc. 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence* 1, (1993) 166-172.
- [Dud78] R. Duda, et. al., Development of the PROSPECTOR consultation system for mineral exploration, *SRI Project 5821 and 6415*, SRI International, (1978).
- [Els78] A. Elstein, L. Shulman and S. Sprafka, Medical problem Solving - An analysis of clinical reasoning, *Harvard University Press*, (1978).
- [Fin79] N. Findler, Associative networks: the representation and use of knowledge by computers, *New York, Academic Press*, (1979).
- [Ham87] I. Hamlet and J. Hunter, A representation of time for medical expert systems, *Lecture Notes Med. Informatics* 33 (1987) 112-119.
- [Kas78] J. Kassirer and G. Gorry, Clinical problem solving: A behavioral analysis, *Ann. Intl. Med* 89 (1989) 245-255.
- [Ker90] E. T. Keravnou and J. Washbrook, A temporal reasoning framework used in the diagnosis of skeletal dysplasias, *Artificial Intelligence in Medicine*, 2, 5, (1990) 239-266.

- [Ker90] E. T. Keravnou and J. Washbrook, A temporal reasoning framework used in the diagnosis of skeletal dysplasias, *Artificial Intelligence in Medicine*, 2, 5, (1990) 239-266.
- [Ker91] E. T. Keravnou, Medical temporal reasoning, *Artificial Intelligence in Medicine* 3 (1991) 289-290.
- [Led59] R. Ledley, L. Lusted, Reasoning foundation of medical diagnosis: symbolic logic, and value theory aid our understanding of how physicians reason, *Science*, 130, 9, (1959) 9-21.
- [Lon83] W. Long, Reasoning about state from causation and time in medical domain, *In:Proc. AAAI* 83, (1983).
- [Man90] G. L. Mandell, R. G. Douglas and J. E. Bennett, *Principles and practice of infectious diseases* 3ed. (1990).
- [McD82] D. McDermott, A temporal logic for reasoning about processes and plans, *Cognitive Science* 6 (1982) 101-155.
- [Mil82] R. Miller, H. Pople and J. Meyers, INTERNIST-1: an experimental computer-based diagnostic consultant for general internal medicine, *New England Journal of Medicine*, 307, (1982) 468-476.
- [Nau84] D. Nau and J. Reggia, Relationship Between eductive and abductive inference knowledge-based diagnostic problem solving, *in: Proc. 1th Intl. Workshop on Expert Database Systems*, Kiawah Island, SC, (1984), 500-509.
- [Pat81] R. S. Patil, Causal representation of patient illness for eletrolyte and acid-base diagnosis, *MIT Laboratory for Computer Science*, Technical Report, MIT/LCS/TR-267, (1981).
- [Pau76] S. Pauker, G. Gorry, J. Kassirer an M. Schwarz, Towards the simulation of clinical cognition, *Am. J. Med.*, 60, (1976) 981-996.
- [Pen85] Y. Peng, A fomalization of parsimonious covering and probabilistic reasoning in abductive diagnostic inference, *Ph.D. Dissertation*, Departament of Computer Science, University of Maryland, Dec., (1985).
- [Pen86] Y. Peng, J. Reggia, Plausibility of diagnostic hypothesis: the nature of simplicity, *in:Proc. National Conference on Artificial Intelligence*, (1986), 146-162.

- [Pen87a] Y. Peng, J. Reggia, A probabilistic causal model for diagnostic problem solving. part one: integrating symbolic causal inference with numeric probabilistic inference, *IEEE Trans. System, Man and Cybernetics*, 17 (2), (1987), 146-162.
- [Pen87b] Y. Peng, J. Reggia, A probabilistic causal model for diagnostic problem solving. part two: diagnostic strategy, *IEEE Trans. System, Man and Cybernetics special issue for diagnosis*, 17 (3), (1987), 395-406.
- [Pen87c] Y. Peng, J. Reggia, Diagnostic problem-solving with causal changing, *International Journal of Intelligent Systems*, (2), (1987), 265-302.
- [Pen90] Y. Peng and J. A. Reggia, *Abductive Inference Models for Diagnostic Problem-Solving*, Springer-Verlag, (1990).
- [Pop73] H. Pople, On the mechanization of abductive logic, in: *Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence*, (1973), 147-152.
- [Pop75] H. Pople, R. Miller, DIALOG: a model of diagnostic logic for internal medicine, in: *Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence*, (1975).
- [Pop82] H. Pople, Heuristic Methods for Improving Structure on III-structured Problems: The Structuring of Medical Diagnostics, *Artificial Intelligence in Medicine* (1982), 119-190.
- [Pun86] W. Punch, M. Tanner and J. Josephson, Design consideration for Peirce, a high-level language for hypothesis assembly, in: *Proc Expert Systems in Government Symposium*, (1986), 279-281.
- [Qui68] M. Quillian, Semantic Memory, *Semantic Information Processing*, MIT Press, Cambridge, Mass, (1968), 227-270.
- [Reg78] J. Reggia, A production rule system for neurological localization, in: *Proc. 5th Symposium on Computer Applications in Medical Care*, IEEE, (1978) 254-260.
- [Rei87] R. Reiter, A teory of diagnosis from the first principle, *Artificial Intelligence*, 32, (1987), 57-95.
- [Reg81] J. Reggia, Knowledge-based decision support system: development thorough KMS, *Technical Report, TR-1121*, Departament of Computer Science, University of Maryland, Oct., (1981).

- [Reg82] J. Reggia and B. Perricone, KMS Manual, *Department of Computer Science, University of Maryland*, Technical Report, TR-1136, (1982).
- [Reg83] J. Reggia, D. Nau and P. Wang, Diagnostic expert systems based on a set covering model, *Intl. J. Man-Machine Studies* Nov. 1983, 437-460.
- [Reg84] J. Reggia and D. Nau, An abductive Non-Monotonic Logic, *in:Proc. Workshop on Non-Monotonic Reasoning, AAAI* Oct. (1984), 385-395.
- [Reg85] J. Reggia, J. Nau, D. Wang and Y. Peng, A formal model of diagnostic inference, *Information Sciences*, 37, (1985), 227-285.
- [Rie77] C. Rieger, and N. Grinberg, The declarative representation and procedural simulation of causality in physical mechanisms, *in:Proc. 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, (1977).
- [Rub75] A. Rubin, The role of hypotheses in medical diagnosis, *in:Proc of International Joint Conference on Artificial Intelligence*, (1975), 856-862.
- [Sho76] E. Shortliffe, *Computer-based medical consultation: MYCIN*, Elsevier, (1976).
- [Sho89] Y. Shoham, Time for action, *in:Proc. 11th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, (1989).
- [Sho90] Y. Shoham, Nonmonotonic reasoning and causation, *Cognitive Science* 14 (1990) 213-252.
- [Shu82] H. Shubin and J. Ulrich, IDT: An intelligent diagnostic tool, *in:Proc. National Conference on Artificial Intelligence, AAAI*, (1982), 290-295.
- [War64] H. Warner, A. Toronto and L. Veasy, Experience with Bayes theorem form computer diagnosis of congenital heart disease, *Anns. N. Y. Acad. Sci.*, 115, (1964), 558-567.
- [Wei78] S. Weiss and C. Kulikowski, Glaucoma consultation by computers, *Comp. Biol. Med.*, 8, (1978) 25-40.
- [Zag83] R. Zagoria and J. Reggia, Transferability of medical decision support systems based on Bayesian classification, *Medical Decision Making* 3 (1983) 501-510.