

UM SISTEMA ESPECIALISTA PARA PREVISÃO DE TEMPO

Vera Helena de Ávila Duarte
Fernando Antônio de Castro Giorno

Centro Científico Rio - IBM Brasil
Estrada da Canoa, 3520
22610 - Rio de Janeiro - BRASIL
Telefone: 021-2713868 Telex: 021-23359

RESUMO

Sistemas Especialistas constituem uma área de pesquisa em Inteligência Artificial com o objetivo de desenvolver sistemas computacionais de desempenho elevado, por meio da incorporação de conhecimento de especialistas e de suas capacidades e habilidades de efetuarem inferências para a solução de problemas. Utilizando-se de técnicas de Inteligência Artificial e de uma base de conhecimento, estes sistemas apresentam um grande potencial de aplicação em diversos domínios de conhecimento.

Na área de previsão de tempo, os sistemas especialistas permitem apoiar o processo de elaboração da previsão de forma eficiente, à medida que o conhecimento do domínio está armazenado em uma base de conhecimento. A previsão pode ser elaborada em um espaço de tempo curto, por meio de interações entre meteorologistas e estes sistemas, permitindo uma dedicação maior dos meteorologistas a outras tarefas, tais como análise de fenômenos atmosféricos e revisão de previsões ocorridas.

Foi com a finalidade de apoiar os meteorologistas na previsão de tempo que foi desenvolvido o sistema especialista BOLETIM, baseado em regras de produção, cujo domínio de conhecimento é a área de previsão de tempo. Sua tarefa é fazer o prognóstico do tempo, para 24 horas, para o Estado do Rio Grande do Sul.

1.0 INTRODUÇÃO

O BOLETIM [1] é um Sistema Especialista (SE) cujo domínio de aplicação é a Meteorologia. Seu desenvolvimento tem como objetivo apoiar os meteorologistas no processo de previsão do tempo. A tarefa de prever o tempo para o Brasil é executada diariamente por um grupo de meteorologistas, que analisa as condições da atmosfera, tanto de superfície como de altitude, e com base nesta análise efetua o prognóstico do tempo para 24 horas.

Como o domínio de conhecimento dos SEs é restrito, decidiu-se fazer inicialmente a previsão do tempo para o Estado do Rio Grande do Sul (RS). Tal região foi escolhida levando-se em consideração sua importância econômica e a qualidade e quantidade de dados meteorológicos oriundos desta região, recebidos diariamente pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As fontes de conhecimento para o desenvolvimento do sistema BOLETIM foram os meteorologistas do INMET.

A ferramenta computacional adotada para construção do sistema BOLETIM foi o ESE/VM. O conhecimento é representado nesse sistema sob a forma de regras de

produção, suportando tanto o encadeamento direto como o inverso para efetuar inferências sobre a base de conhecimento. Tal ferramenta foi escolhida devido à sua disponibilidade no momento, sendo possível adotar outra ferramenta baseada em regras de produção.

2.0 SISTEMA ESE/VM

O sistema ESE/VM (indicado a seguir por ESE) foi desenvolvido pela IBM, no seu Centro Científico de Palo Alto, na Califórnia (EUA), em 1985 [3]. ESE é formado por dois subsistemas: ESDE ("Expert System Development Environment") utilizado para construir bases de conhecimento e ESCE ("Expert System Consultation Environment") utilizado para processar bases de conhecimento em sessões de consulta.

ESE opera em arquiteturas IBM/370 e acima, sob os sistemas operacionais VM/CMS ou MVS/XA. O sistema suporta regras de produção como formalismo para representação de conhecimento. O engenheiro de conhecimento usa fatos do domínio, representados por parâmetros ESE e regras para construir uma base de conhecimento relativa a um dado domínio de conhecimento. O sistema ESE tem sido aplicado nas categorias de identificação, seleção, predição, diagnóstico, planejamento e tomada de decisão em áreas diversas de conhecimento.

Algumas das características mais importantes do ESE são:

- sintaxe simples das regras de produção

As regras de produção são definidas usando uma sintaxe parecida com a da língua inglesa.

- facilidade de edição

Editores especiais, com estrutura comum para todos os objetos ESE, facilitam a construção, remoção e alteração destes objetos (descritos a seguir) na base de conhecimento. Os editores são moldados para os objetos específicos do sistema e possuem capacidade de cheque automático de erro, notificando imediatamente o engenheiro de conhecimento.

- capacidade de explanação

Durante uma sessão de consulta, o usuário pode fazer as seguintes indagações: WHAT, para solicitar uma explicação mais detalhada de uma questão efetuada pelo sistema; WHY, para indagar ao sistema porque uma certa questão está sendo efetuada e HOW, para solicitar ao sistema a linha de dedução que permitiu o mesmo atingir uma conclusão.

- suporte para depuração

Durante testes de uma base de conhecimento, o engenheiro de conhecimento pode pedir um mapeamento exato do processo de inferência utilizado (comando TRACE).

- mecanismo de inferência

O sistema possui dois mecanismos de inferência: encadeamento inverso e encadeamento direto.

- compilação incremental da base de conhecimento

Os objetos incluídos na base de conhecimento são "compilados" automaticamente para uma forma que reduz a quantidade de espaço necessária para seu armazenamento.

- suporte para decomposição de problemas

As características de controle do ESE permitem, quando viável, que um problema complexo seja decomposto em subproblemas menores e mais gerenciáveis. Esses subproblemas podem ser solucionados independentemente, implicando em maior produtividade e qualidade em termos da solução global do problema.

- facilidade para reexecutar e desfazer

Consultas a uma base de conhecimento podem ser armazenadas e reexecutadas. Durante a reexecução, qualquer resposta dada anteriormente para uma questão efetuada pelo sistema pode ser mudada para estudar seu impacto na solução do problema. Também é possível durante uma consulta desfazer ou mudar uma resposta prévia específica.

- acesso a rotinas externas

O sistema pode chamar rotinas codificadas preferencialmente em Pascal, para adquirir fatos em arquivos externos, para armazenar resultados em arquivos para processamentos subseqüentes ou para executar processamentos intermediários, modelos matemáticos ou de simulação.

- suporte para projeto de telas

O sistema ESE trabalha com formatos predefinidos de telas em termos de diálogos e apresentação de resultados. Se necessário ou desejado, o engenheiro de conhecimento pode projetar novos formatos de telas que se tornam disponíveis em adição aos gerados automaticamente pelo sistema.

- apoio em tempo real

Facilidades extensivas de apoio em tempo real estão disponíveis nos ambientes de desenvolvimento e de consulta, com explicações de como utilizar o sistema.

2.1 Objetos ESE/VM

Uma base de conhecimento contém uma representação codificada de conhecimento relativo a um determinado domínio. Esse conhecimento do domínio consiste basicamente em:

- fatos do domínio
- relacionamento entre os fatos do domínio
- especificações relativas a estrutura/controle do domínio

No sistema ESE estas entidades são representadas respectivamente por:

- PARÂMETROS
- REGRAS DE PRODUÇÃO
- BLOCOS DE CONTROLE DE FOCO (FCBs)

Também podem ser definidos GRUPOS de parâmetros, regras ou FCBs e "displays" especiais para o usuário, que são chamados de TELAS. Em suma, o sistema ESE suporta cinco tipos de objetos: parâmetros, regras, FCBs, grupos e telas.

3.0 METEOROLOGIA SINÓTICA

Meteorologia sinótica é o ramo da meteorologia que trata das análises das observações meteorológicas feitas simultaneamente em vários lugares da atmosfera, sobre a Terra ou parte dela e suas aplicações nas análises e previsões de tempo e outros problemas.

Dentre as principais ferramentas utilizadas na previsão de tempo estão os computadores, que nos anos 40 impulsionaram a previsão numérica de tempo, as telecomunicações, que nos anos 50 possibilitaram a confecção dos mapas sinóticos de superfície por meio das informações colhidas, num certo horário (dito sinótico), em todas as estações meteorológicas e enviadas ao centro nacional de previsão, e os satélites meteorológicos, que nos anos 60 passaram a fornecer imagens de todo o planeta, com certa periodicidade, sendo importantes em áreas de difícil acesso, onde é problemática a instalação e manutenção de estações meteorológicas.

Uma nova ferramenta a ser considerada é o uso de sistemas especialistas [2] [4]. Neste caso, os SEs vêm ajudar a elaborar a previsão de forma mais rápida e eficiente, à medida em que o conhecimento do domínio já está armazenado, sem perigo de ser "esquecido". Em relação ao desenvolvimento de SEs aplicados à previsão de tempo, ao invés dos meteorologistas passarem parte do dia analisando os dados de superfície e de altitude para confecção do boletim meteorológico, bastarão alguns minutos de interação meteorologista/SE para que a previsão seja elaborada. Isso faria com que os meteorologistas pudessem dedicar mais tempo à análise dos fenômenos atmosféricos, como por exemplo, análise das situações onde a previsão de tempo diferiu do ocorrido.

3.1 Previsão de Tempo

Para a execução da tarefa de prever o tempo para 24 horas, em uma determinada região do país, os meteorologistas analisam as condições em superfície e em altitude, usando as informações vindas de radiossondas, das imagens de satélites, das cartas de altitude e de superfície.

As previsões de tempo chegam ao público por meio do boletim meteorológico, emitido diariamente pelo INEMET e divulgado pela imprensa e dos avisos meteorológicos especiais, que são emitidos esporadicamente, na iminência de um fenômeno mais grave, como por exemplo, ventos fortes, geadas, enchentes e incêndios de grande extensão.

As informações comumente contidas em um boletim meteorológico são:

- tempo: determina-se a ocorrência ou não de chuvas, geadas, trovoadas, etc, assim como a existência dos sistemas sinóticos atuantes na região, como frentes frias.
- nebulosidade: verifica-se a existência de nuvens no céu, não as denominando, mas informando a cobertura do céu (céu claro, nublado ou encoberto).
- visibilidade: caracteriza-se pela presença de partículas em suspensão na atmosfera, podendo incluir nevoeiro, chuva, poeira ou névoa seca. É considerada boa quando o observador reconhece um objeto a uma distância entre 10 e 20 km, fraca para uma distância menor que 4 km e moderada para distâncias entre 4 e 10 km.
- ventos: caracterizam-se pela sua direção e intensidade, que é determinada pela velocidade do vento. Para velocidades entre 5 e 10 nós, o vento é fraco, para velocidades entre 10 e 20 nós, o vento é moderado e quando a velocidade é maior que 20 nós, é dito forte.
- umidade relativa do ar: apresenta-se como uma variação da umidade relativa mínima e a umidade relativa máxima.
- temperatura: estima-se as temperaturas máxima e mínima para o período e a variação de temperatura (estável, em declínio ou em elevação).

Dentre as informações citadas, o sistema BOLETIM só efetua a previsão de tempo, informando a ocorrência ou não de chuvas e geadas.

4.0 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

4.1 Aquisição de Conhecimento

O processo de aquisição do conhecimento de meteorologistas durou 10 meses e foi dividido em 5 fases principais:

1. familiarização com os termos técnicos em meteorologia, por meio da leitura de textos básicos;
2. acompanhamento de meteorologistas na tarefa de prever o tempo;
3. entrevistas com meteorologistas, com o intuito de estabelecer os sistemas que atuam no Rio Grande do Sul (Frente Fria, Ciclone, Sistema Convectivo do Chaco, Alta da Bolívia, Anticiclone do Atlântico, Anticiclone Polar e Cavado do Pacífico), os parâmetros de superfície e altitude que são analisados nesses sistemas para a previsão do tempo e os relacionamentos entre tais parâmetros;
4. formalização do conhecimento adquirido utilizando uma ferramenta computacional para construção de SEs (ESE/VM);
5. teste e refinamento das regras de produção que formam a base de conhecimento do BOLETIM.

4.2 Implementação Computacional

A fase 4 do processo de aquisição de conhecimento constitui-se na formalização do conhecimento adquirido durante as 3 fases anteriores.

A escolha do ESE/VM como ferramenta computacional baseou-se em uma experiência anterior feita no INPE, que culminou com o desenvolvimento de uma ferramenta para construção de SEs [5]. Essa experiência mostrou a aplicação de SEs baseados em regras de produção na Meteorologia. No caso, a aplicação era previsão de precipitação pluviométrica em São José dos Campos. Apesar do sistema possuir uma base de conhecimento reduzida (apenas 50 regras, dado que o escopo principal era a construção da ferramenta), notou-se que o uso de SEs na Meteorologia era viável e que poderia ser desenvolvido um tal sistema, baseado em regras de produção, para previsão de tempo. Essa viabilidade foi confirmada durante as fases 2 e 3 do processo de aquisição de conhecimento, onde foi observado que o conhecimento dos meteorologistas é empírico, apoiando-se em observações e experiências anteriores.

A fase de implementação computacional começou com a formalização dos fatos do domínio, relações entre os fatos e estruturas de controle que são representados por parâmetros, regras e FCBs (Blocos de Controle de Foco) no sistema ESE.

4.2.1 Parâmetros

O sistema BOLETIM possui atualmente 65 parâmetros, sendo que alguns deles podem ser analisados em mais de um sistema atuante no RS. Para melhor entendimento, os parâmetros podem ser divididos em 3 categorias:

- parâmetros cujos valores serão fornecidos pelo usuário (parâmetros de entrada), tais como, advecção de temperatura, advecção de vorticidade, temperatura do ar, etc.
- parâmetros cujos valores serão determinados pelo processamento das regras de produção e que serão usados para processar outras regras (parâmetros intermediários), tais como, convecção, umidade, intensidade da frente fria, etc.
- parâmetros cujos valores serão determinados pelo processamento das regras de produção e que serão mostrados ao usuário no final da consulta como resultado da solução do problema (parâmetros de saída), tais como, chuva fraca, geada, pancadas de chuva, etc.

4.2.2 Regras

Os relacionamentos entre os parâmetros, formalizados por meio de regras de produção, constituem a base de conhecimento do sistema BOLETIM. Ao todo são 885 regras (veja tabela 1, anexo 1), onde metaregras são regras que descrevem como outras regras devem ser usadas.

4.2.3 FCBs

O conceito e a disponibilidade de FCBs foi importante na estruturação do problema. Como os sistemas atuantes no RS são distintos, optou-se por utilizar um FCB para cada sistema, sendo que o FCB raiz (FCB_SIST_ATUA) determina qual o sistema atuante no RS. Isso possibilitou dirigir a busca, por meio de metaregras, fazendo com que somente as regras referentes ao sistema atuante sejam processadas.

A estrutura hierárquica dos FCBs pode ser vista na figura 1 (anexo 2) e a seguir tem-se uma definição sucinta dos mesmos.

4.2.3.1 FCB_FF

Como o sistema Frente Fria é o mais importante e o que possui mais regras, o FCB_FF foi subdividido com o objetivo de tornar o processo de busca da solução do problema mais eficiente. O FCB_FF possui a estrutura hierárquica da figura 2 (anexo 2).

FCB_INTENS, FCB_CONVEC, FCB_UMID e FCB_ENTR

Cada um destes FCBs resolve o subproblema particular de verificar a intensidade da frente fria, a existência ou não de convecção e umidade no RS e a possibilidade da frente fria entrar no RS, respectivamente. Portanto, todas as regras que concluem intensidade da frente fria, convecção e umidade no RS e entrada da frente fria no RS pertencerão a cada um destes FCBs e serão usadas pelo mecanismo de encadeamento direto.

FCB_TEMPO

Este FCB resolve o problema de prever o tempo no RS, utilizando os parâmetros que já foram determinados anteriormente (intensidade da Frente Fria, existência de convecção e de umidade no RS e entrada da Frente Fria no RS) pelos FCBs FCB_INTENS, FCB_CONVEC, FCB_UMID e FCB_ENTR. Para isso, o FCB_TEMPO foi dividido em 4 FCBs: FCB_BB, FCB_BP, FCB_CA e FCB_NU.

Dependendo da localização da Frente Fria (Baía Blanca, Bacia do Prata, Centro da Argentina ou Norte do Uruguai), o FCB_TEMPO irá determinar qual dos FCBs mencionados anteriormente é que vai ser processado. Por exemplo, se a Frente Fria estiver localizada no Centro da Argentina, então somente as regras contidas no FCB_NU serão utilizadas para solucionar o problema.

4.2.3.2 FCB_CICL, FCB_SCC, FCB_AB, FCB_AA, FCB_AP e FCB_CP

Cada um destes FCBs processa as suas regras, usando o mecanismo de encadeamento direto. Ao final do processamento das regras, o resultado (que é a previsão do tempo) é mostrado ao usuário.

5.0 RESULTADOS OBTIDOS

Após testes sucessivos e refinamentos da base de conhecimento, o sistema BOLETIM apresentou os resultados mostrados na tabela 2 (anexo 1).

Essa tabela foi elaborada com base em 42 casos reais, onde foi possível comparar as previsões dos meteorologistas (indicado por PREVISÃO) e do sistema BOLETIM (indicado por BOLETIM) com o que realmente aconteceu (indicado a seguir por OCORRIDO).

Analisando a tabela, observa-se que o sistema especialista BOLETIM teve um índice de erros de aproximadamente 16.66%, sendo que 9.52% dos casos, tanto os meteorologistas quanto o BOLETIM erraram. Já o índice de acertos pode ser considerado bom, atingindo aproximadamente 83.34%, sendo que 9.52% dos casos foram considerados ótimos. Esses casos ótimos são aqueles onde a previsão dos meteorologistas foi errada e a do BOLETIM foi correta, ou seja, sua previsão foi a mesma do OCORRIDO. Os 73.82% dos casos restantes foram de acertos gerais, onde as previsões do BOLETIM e dos meteorologistas foram as mesmas do OCORRIDO.

Observou-se que os erros cometidos estavam relacionados com situações consideradas anormais, tal como a ocorrência do Anticiclone Polar, com deslocamento continental, durante o verão. Esta situação é típica do inverno, onde este sistema provoca geadas no RS. Outros erros dizem respeito aos chamados "acasos", onde todos os dados levam a uma previsão e tal previsão é errada, sendo que às vezes nem os meteorologistas sabem explicar o motivo do erro.

Os casos em que ocorrem dois sistemas interagindo e atuando no RS também foram passíveis de erro, sendo algumas vezes um erro parcial, como por exemplo, o sistema BOLETIM concluindo chuva no S, SE e SW do RS e o que realmente ocorreu foi chuva só no SE.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Meteorologia pela cooperação dos seus meteorologistas, especialmente Expedito Rebello, que foi o meteorologista coordenador e principal fornecedor de conhecimento, a Sandra Aparecida Sandri, do Instituto de Pesquisas Espaciais, e ao Dr. Celso de Renna e Souza, do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, pelas suas valiosas observações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DUARTE,V. *BOLETIM - Um Sistema Especialista para Previsão de Tempo*. Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada. São José dos Campos, INPE, 1987 (a ser publicada).
2. ELIO,R.; HANN,J. Knowledge representation in an expert storm forecasting system. In International Joint Conference on Artificial Intelligence, 9., Los Angeles, Aug., 1985. *Proceedings*. IJCAI, 1985. p. 400-406.
3. IBM. *Expert system consultation environment/VM and expert system development environment/VM*; reference manual. Irving, Texas, IBM, 1985. (GH20-9609)
4. REISE,C.; ZUBRICK,S. Using rule induction to combine declarative and procedural knowledge representations. Austin, Texas, Radian Corporation, 1985. (Technical Report RI-R-00299).
5. SANDRI,S. *Sistema diagnóstico: uma ferramenta para construção de sistemas especialistas*. Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada. São José dos Campos, INPE, 1985. (INPE-3890-TDL/222).
6. WATERMAN,D. *A guide to expert systems*. Reading, MA, Addison-Wesley, 1985.

ANEXO I

<i>Sistema Atuante</i>	<i>Número de Regras</i>
<i>Frente Fria</i>	484
<i>Ciclone</i>	134
<i>Sistema Convectivo do Chaco</i>	67
<i>Alta da Bolívia</i>	93
<i>Anticiclone do Atlântico</i>	32
<i>Anticiclone Polar</i>	26
<i>Cavado do Pacífico</i>	37
<i>Metaregras</i>	12

Tabela 1: Conjunto de regras do sistema BOLETIM.

<i>Erros</i>		<i>Acertos</i>	
<i>BOLETIM</i>	<i>Previsão</i>	<i>BOLETIM</i>	<i>Previsão</i>
16.66%	9.52%	83.34%	73.82%

Tabela 2: Resultados obtidos.

ANEXO 2

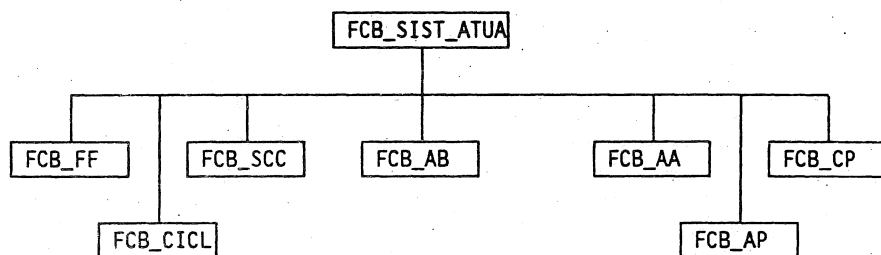


Figura 1: Hierarquia dos FCBs no BOLETIM.

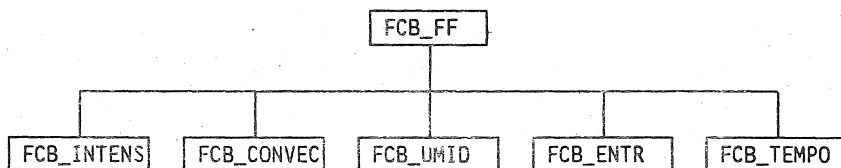


Figura 2: Estrutura hierárquica do FCB_FF.