

Sistema de Diagnóstico de Falhas em Automação

Mário M. de Macedo
Eng. Electrotécnico
Assistente (DEE/FCT/UNL)

Hermínio Duarte-Ramos
Prof. Dr. Eng. Electrotécnico
Grupo de Eng. Sistemica (DEE/FCT/UNL)

Preâmbulo

Em 1992, recebi o convite do Ministério da Indústria e Energia, através do INETI, para elaborar um parecer técnico-científico sobre a candidatura aos incentivos do PITIE (Programa Integrado de Tecnologias de Informação e Electrónica), no âmbito do PEDIP (Programa Específico de Desenvolvimento da Indústria Portuguesa), quanto ao projecto DIA – Diagnóstico Inteligente, apresentado pela empresa Tecnotron – Sistemas de Automação SA. Aceitei a tarefa, como já acontecera noutras oportunidades, por se tratar de uma proposta de desenvolvimento com inovação na área da automação industrial.

Nessa altura, a descrição dos objectivos do projecto deixava entender que se tratava, basicamente, de um sistema inteligente de documentação para apoio ao diagnóstico de avarias, com modelização de equipamentos e sistemas de diferentes tecnologias (mecânica, electromecânica, electrónica e informática) e explorando documentos técnicos de vários tipos (desenhos, esquemas, imagens e texto) com vista a assistir de maneira automática em questões de diagnóstico e manutenção correctiva de equipamentos e sistemas produtivos.

Em princípio, este manual técnico informatizado pretendia auxiliar os técnicos de manutenção no rápido diagnóstico de avarias e propor soluções adequadas às respectivas reparações. Para isso, a arquitectura do sistema previa uma base de dados documental hipermédia e um sistema pericial para exploração estrutural de ocorrências, além de interfaces com outros sistemas directamente relaci-

onados com a supervisão automática (monitorização de características dos processos) e a gestão da manutenção (historial de avarias e relatórios de diagnósticos).

A implementação destes princípios não se encontrava ainda pormenorizada, como transparecia das descrições das tarefas, sobretudo assentes no que fazer e sem chegar aos modos de como fazer. Mas a potencialidade do produto a desenvolver, para o vasto mercado das indústrias pesadas e ligeiras, reforçava o seu interesse, evidenciado pela demonstração numa fábrica de papel (Inapa). Portanto, a aprovação do incentivo requerido foi a consequência lógica das características inovadoras e de interesse industrial inerentes ao próprio projecto.

Nessa fase de concepção já se previa a participação de universitários para complementar os quadros técnicos da empresa na execução do protótipo. Por isso, não me surpreendeu que o Eng. Mário Macedo, meu assistente no Grupo de Engenharia Sistemica da FCT/UNL, tivesse sido convidado a desempenhar essas funções de complementaridade científica e tecnológica. Como seu orientador científico, dei-lhe o apoio correspondente, no sentido de aproveitar a ocasião para estreitarmos o relacionamento Universidade - Indústria (passados anos: mais uma vez sem consequências de continuidade, dadas as diferenças entre as atitudes universitárias e empresariais). De facto, o trabalho que nessa época ambos praticávamos na missão universitária enquadrava-se directamente na automação de processos pelas novas tecnologias. Nestas circunstâncias, o referido projecto permitia con-

cretizar três aspectos significativos: implementar a concha de um sistema pericial aplicado, usar na prática os conhecimentos adquiridos em relação à concepção de diagramas sequenciais em automação e entrar no campo fabril por intermédio da demonstração do protótipo de um sistema automático realizável e útil.

O desenvolvimento decorreu com a pressão normal nesta actividade tecnológica, e o produto acabado entrou na fase de comercialização. Todavia, a participação universitária ficou por evidenciar na imagem pública. Aliás, como é costume acontecer em Portugal, quando se formam equipas mistas: os intervenientes universitários raramente distiguem as suas contribuições industriais. Tudo porque o fatídico estatuto da carreira docente e, em geral, os próprios académicos nos conselhos científicos (que avaliam as actividades na carreira universitária) só valorizam convenientemente o trabalho dito "de investigação", numa época aberrante em que só se entende por investigação na área da engenharia aquilo que se faz sob contratos europeus ou internacionais (dentro da proclamada procura da "excelência"). Os esforços para dinamizar o País através de desenvolvimentos aplicados são sistematicamente depreciados. O que não deixa de ser inconsistente com as políticas apregoadas (e não realizadas) de modernização da Indústria Portuguesa.

Estas constatações levam-me a proceder, pelo menos desta vez, em consonância com o pensamento exposto – e sempre preconizado – de tornar público todos os trabalhos de actividade prática, manifestável em penetrações sociais. Assim, preocupei-me em redigir especialmente este

testemunho, no estilo que parece mais acertado, começando por motivar o Eng. Mário Macedo, agora ocupado em profundas reflexões na preparação da dissertação de doutoramento, para que sistematizasse as ideias fundamentais do trabalho elaborado há cerca de quatro anos atrás.

A intenção subjacente a esta acção reside na difusão, entre os engenheiros electrotécnicos que lêem a escrita portuguesa, de uma "metodologia

para a concepção de sistemas periciais de apoio ao diagnóstico de falhas em sistemas industriais".

Para isso, convém manter presente as diferenças entre os conceitos de defeito, falha e avaria, nem sempre bem destringidos (e até confundidos). De uma maneira breve, pode-se dizer que um "defeito" é qualquer deficiência latente, que existe mas não impede o normal funcionamento do sistema onde se localiza, podendo no en-

tanto originar a "falha" do sistema em qualquer momento e daí resultar um estado operativo chamado "avaría", a qual então requiere reparação, para que o sistema possa retomar as suas condições de operação. Pelo que se vê, diagnosticar avarias (situações finais de funcionamento defeituoso) corresponde ao diagnóstico de falhas (ocorrências degeneradas em determinados instantes).

H. D. - R.

1. Introdução

Os sistemas de diagnóstico são cada vez mais importantes nas instalações industriais, devido à crescente integração dos sistemas e ao crescimento das exigências impostas pela competitividade. Esta evolução tecnológica para a complexidade conduziu à concepção de variadas propostas, com sistemas mais ou menos complexos e em diferentes áreas de aplicação, principalmente nos domínios da electrónica, em especial nas grandes instalações fabris, como em metalomecânica (automóvel, aeronáutica) e em química (fabricação de polímeros, refinação de petróleo).

O advento das modernas tecnologias de informação veio permitir beneficiar das vantagens concedidas pelos computadores para diagnosticar a ocorrência de falhas (e mesmo a existência de defeitos com tendências degenerativas) e portanto as respectivas avarias [1]. Deste modo, os sistemas de diagnóstico constituem importantes instrumentos ao nível da manutenção operacional dos sistemas automáticos.

Neste propósito, o projecto DIA — Diagnóstico Inteligente de Avarias definiu o objectivo geral de desenvolver um produto informático para acesso expedito a documentação técnica, usando meios multimédia, e ainda para ajuda ao diagnóstico e reparação de avarias em sistemas de produção industrial.

A fim de avaliar a viabilidade da componente de diagnóstico, usou-se como indústria de demonstração a fábrica de papel Inapa S.A., em Setúbal, entre os principais sistemas automáticos, com máquinas de produção de papel, máquinas bobinadoras, empacotadora de bobinas, tapetes transportadores e armazém automático. Em geral, estes sistemas efectuam operações mecânicas, sendo formados por diversas estações e máquinas com controlo por PLCs (controladores lógicos programáveis, vulgarmente designados autómatos programáveis). As actuações solicitadas realizam-se através de motores eléctricos e actuadores hidráulicos. A recolha de informação faz-se com sensores instalados em locais adequados, baseando-se em princípios distintos conforme as detecções a estabelecer, como micro-interruptores, células fotoeléctricas e sensores indutivos ou capacitivos, entre outros. Nestes sistemas, as avarias manifestam-se geralmente por "sintomas", observáveis pelos técnicos de manutenção, por exemplo, paletas paradas no meio de tapetes rolantes ou nas suas extremidades.

A execução do projecto atingiu plenamente os seus objectivos, tendo resultado no desenvolvimento de uma metodologia de diagnóstico para instalações industriais e na concepção de uma arquitectura informática que integra duas componentes, uma de documentação técnica multimédia e outra de diagnóstico automático de avarias.

O presente artigo descreve o trabalho de investigação e desenvolvimento da parte de diagnóstico automático, quanto ao método de levantamento do conhecimento e aos procedimentos de diagnóstico.

2. Tipos de Sistemas de Desenvolvimento

Decidiu-se assentar os dois componentes básicos do desenvolvimento, o sistema de diagnóstico automático e o sistema hipermédia, em produtos informáticos disponíveis no mercado, a fim de dispensar o esforço de engenharia de programação a que obrigava, além de melhor se garantir no futuro a actualização progressiva dos sistemas de apoio ao diagnóstico. Deste modo, tornou-se possível concentrar o esforço de investigação e desenvolvimento na análise dos sistemas industriais concretos e na concepção das metodologias de diagnóstico mais apropriadas.

Consideraram-se três alternativas básicas para a componente de diagnóstico automático e para a representação do conhecimento dos sistemas e do seu diagnóstico: através de modelos estruturais, usando modelos baseados em regras e uma representação por árvores de decisão.

Entre os *sistemas de diagnóstico baseados em modelos estruturais* tomou-se a concha do sistema pericial de diagnóstico Cornelius da Attexor. Neste sistema de desenvolvimento, a representação dos sistemas e do conhecimento relevante para o diagnóstico organiza-se de acordo com um modelo que reflecte a sua estrutura física e baseia-se em quatro objectos principais, definidores de funções, componentes, ligações e testes. Os sistemas são descritos em termos de "funções", que representam a funcionalidade de cada sub-sistema. Uma função é constituída por "componentes" individuais, responsáveis pelo respectivo funcionamento. As "ligações" fazem-se entre funções, estabelecendo um grafo que exprime as dependências funcionais existentes. Os "testes" são interrogações efectuadas ao operador sobre o funcionamento de cada componente. Ain-

da há a possibilidade de criar "componentes virtuais", que não apresentam componentes concretos, mas sim testes a propriedades e/ou estados dos sub-sistemas, por exemplo, temperaturas, pressões, etc. A organização do sistema por funções e pelo seu grafo de ligações é utilizada pelo Cornelius, quer para organizar a descrição estrutural do sistema, quer para organizar a procura do componente defeituoso e causador do mau funcionamento.

Não se considerou em particular nenhum *sistema de conhecimentos baseados em regras*, embora se tivesse tomado o Nexpert Object como referência. A generalidade destes sistemas baseia-se num paradigma declarativo, competindo a um motor de inferência encontrar as regras aplicáveis a cada estado do processo de inferência, por intermédio de procura. Tais sistemas são especialmente adequados para lidar com a incerteza e problemas mal conhecidos, explorando diversas soluções alternativas com diferentes graus de confiança.

Dos *sistemas baseados em árvores de decisão* foi considerado o Emerald Diagnostic Adviser. Este sistema permite a definição de árvores de decisão, organizando-as basicamente em árvores, objectos-sintoma, objectos-solução e ligações. As "árvores" correspondem a diversos ficheiros, podendo ser dedicadas a diagnósticos específicos. Os "objectos-sintoma" são nós das árvores, nos quais pode enunciar qualquer tipo de interrogação sobre o sistema e um número indeterminado de respostas alternativas. Os "objectos-solução" constituem as folhas da árvore, que enunciam as soluções possíveis dos problemas enunciados na raiz da árvore, bem como os respectivos procedimentos de reparação. Uma sessão de diagnóstico consiste na navegação pelas árvores de decisão, visitando sucessivos objectos-sintoma, até se atingir um objecto-solução. O objecto-solução identifica a possível causa do mau funcionamento do sistema e dá indicações sobre os respectivos procedimentos de reparação.

3. Seleção do Sistema de Desenvolvimento

No projecto realizou-se em conjunto a análise dos sistemas industriais, das metodologias de diagnóstico aplicáveis e dos sistemas de desenvolvimento. Desta maneira, concluiu-se que o diagnóstico suportado apenas em modelos estruturais, tal como proposto pelo sistema Cornelius, era pouco adequado à representação deste tipo de sistemas e do seu conhecimento de diagnóstico.

Como ilustração desta propriedade, considere-se a instalação de dois tapetes rolantes que transportam paletes no sentido do tapete 1 para o tapete 2 (Fig. 1).

Neste sistema podem ser observados diversos sintomas de avaria. Por exemplo, se o sensor de saída S_{saíd} não actuar, o PLC não é informado da existência da paleta no fim do tapete 1, e assim continuará a rodar sem que a paleta possa ser transportada para o tapete 2, o qual permanecerá parado. Este comportamento também pode ser originado por alguma falha nos sistemas actuadores e manobradores, desde a saída do PLC até ao sistema motor do tapete 2.

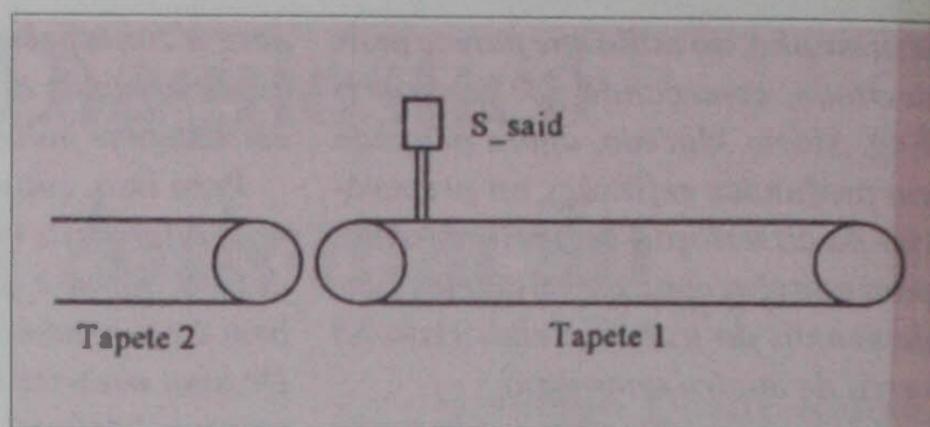


Fig. 1 - Exemplo de dois tapetes rolantes.

Se o sensor ficar sempre activo, a paleta será transferida até ao fim do tapete 2 e o tapete 1 ficará a rolar ou não, e admitirá ou não outra paleta, conforme a programação do PLC. Este comportamento ainda pode ser observado se o contactor de saída do PLC ficar colado, ou sempre activo.

A paragem de uma paleta no meio do tapete 1 pode ser atribuída aos sistemas manobradores e actuadores desde a saída do PLC até ao motor do tapete. Por sua vez, a paragem da paleta no fim do tapete pode ser explicado por aquela avaria, mas também pode ser originada por uma avaria que impeça a recepção pelo PLC da ordem de transferência da paleta do tapete 1 para o tapete 2.

Estes exemplos mostram como um modelo estrutural de diagnóstico pode não ser adequado, pois o PLC estabelece igualmente as dependências funcionais. A representação desta diversidade de sintomas de falhas e a sua atribuição a sub-sistemas e componentes tornava-se, assim, pouco natural no tipo de modelo estrutural oferecido pelo sistema Cornelius. Tal razão levou a que esse sistema não tivesse sido escolhido para sistema de desenvolvimento.

A possibilidade dos sistemas baseados em regras lidarem com conhecimento incerto e de explorarem várias hipóteses alternativas de credibilidade distintas não se apresentou útil, porque nos sistemas em análise podiam ser especificados procedimentos de teste rigorosos e sistemáticos.

Por sua vez, a representação por árvores de decisão revelava-se especialmente adequada e intuitiva para exprimir aqueles procedimentos de diagnóstico, muito semelhantes aos raciocínios normalmente usados pelos técnicos de manutenção. Tais propriedades mostraram especial interesse pela selecção deste tipo de desenvolvimento. Além disso, ainda contribuiu a simplicidade das construções básicas do Diagnostic Advisor, a sua facilidade de utilização e a qualidade da sua interface, com possibilidade de introdução e visualização simultâneas.

4. Metodologia de Diagnóstico

O princípio conceptual do diagnóstico, baseado em diversos tipos de modelos, tem vindo a ser utilizado no diagnóstico de sistemas automáticos em ambientes industriais [2]. Entre esses modelos incluem-se os "modelos comportamentais", que traduzem o comportamento dinâmico dos sistemas, além dos "modelos funcionais" e dos "modelos estruturais". Nos sistemas sequenciais, muito usados nos

automatismos em tempo-real, utilizam-se frequentemente determinados formalismos para representar os *modelos comportamentais*, como os autómatos finitos, as redes de Petri [3] e o diagrama funcional sequencial, historicamente denominado grafcet [4].

O diagrama sequencial exprime uma linguagem gráfica, concebida para representar o comportamento dinâmico de sistemas automatizados sequenciais e combinatórios e por eventos discretos em tempo-real. Trata-se de uma adaptação das redes de Petri, das quais utiliza um subconjunto das construções, adoptando uma representação gráfica mais apropriada aos sistemas industriais. A simplicidade de concepção deste diagrama justificou a generalização da sua aplicação em controlo por autómatos programáveis. Teve origem em França, mas já foi normalizado internacionalmente (norma CEI 848). Por isso, escolheu-se o diagrama sequencial (ou grafcet) para representar os modelos comportamentais dos sistemas.

No levantamento do conhecimento e dos procedimentos de diagnóstico recorreu-se a documentação existente sobre os sistemas na qual se incluíram esquemas funcionais e esquemas estruturais, nomeadamente implantações mecânicas, eléctricas e pneumáticas, e também diagramas sequenciais de alguns sub-sistemas. O levantamento dos diagramas sequenciais dos restantes sistemas fez-se a partir do código dos PLCs, com auxílio da documentação funcional e estrutural.

Na *identificação dos sintomas* de avarias observáveis utilizaram-se os modelos comportamentais expressos pelos diagramas sequenciais como principal fonte de referência, e os modelos funcionais e estruturais como fonte auxiliar da sua caracterização. Recorreu-se ainda ao conhecimento dos técnicos de manutenção para efectuar a validação e afinação das árvores de decisão produzidas.

Basicamente, a *metodologia de levantamento das árvores de falhas* a partir dos modelos comportamentais, re-

presentados pelos diagramas sequenciais, pode ser enunciada da seguinte maneira:

1. Com o auxílio dos diagramas sequenciais é possível identificar quais os componentes ou sub-sistemas cujo mau funcionamento pode causar sintomas de avaria observáveis.
2. Com o auxílio dos modelos estruturais é possível caracterizar os sintomas observáveis que são provocados por essas causas de avarias, em termos do que vêm os técnicos de manutenção.
3. Identificados e caracterizados os sintomas observáveis, procede-se de modo inverso, elaborando a árvore de decisão que, a partir dos sintomas observáveis, permite identificar as causas das avarias. Neste passo recorre-se às implantações mecânicas, eléctricas ou pneumáticas.
4. Neste processo são usadas "heurísticas", que facilitam a identificação dos sintomas observáveis e o levantamento das árvores.

Com vista a ilustrar esta metodologia, analisam-se as estações de entrada da empacotadora da instalação industrial da fábrica de papel onde se demonstrou a aplicabilidade do sistema desenvolvido.

Esta estação compõem-se de um tapete rolante, destinado aos transportes de entrada, uma estação de entrada, onde se mede o diâmetro das bobinas, uma mesa elevatória, que eleva as bobinas, na qual se faz ainda a medição do respectivo comprimento e a marcação da sua ordem de fabrico, e, finalmente, a estação de aplicação das capas (Fig. 2). Da operação deste processo elaborou-se um diagrama sequencial representativo do correspondente funcionamento (Fig. 3).

Qualquer má operação dos sistemas ou componentes (normalmente os sensores) que fornecem informações para as condições de transição, por exemplo, "entrada da bobina no centrador", impede o desenvolvimento do diagrama

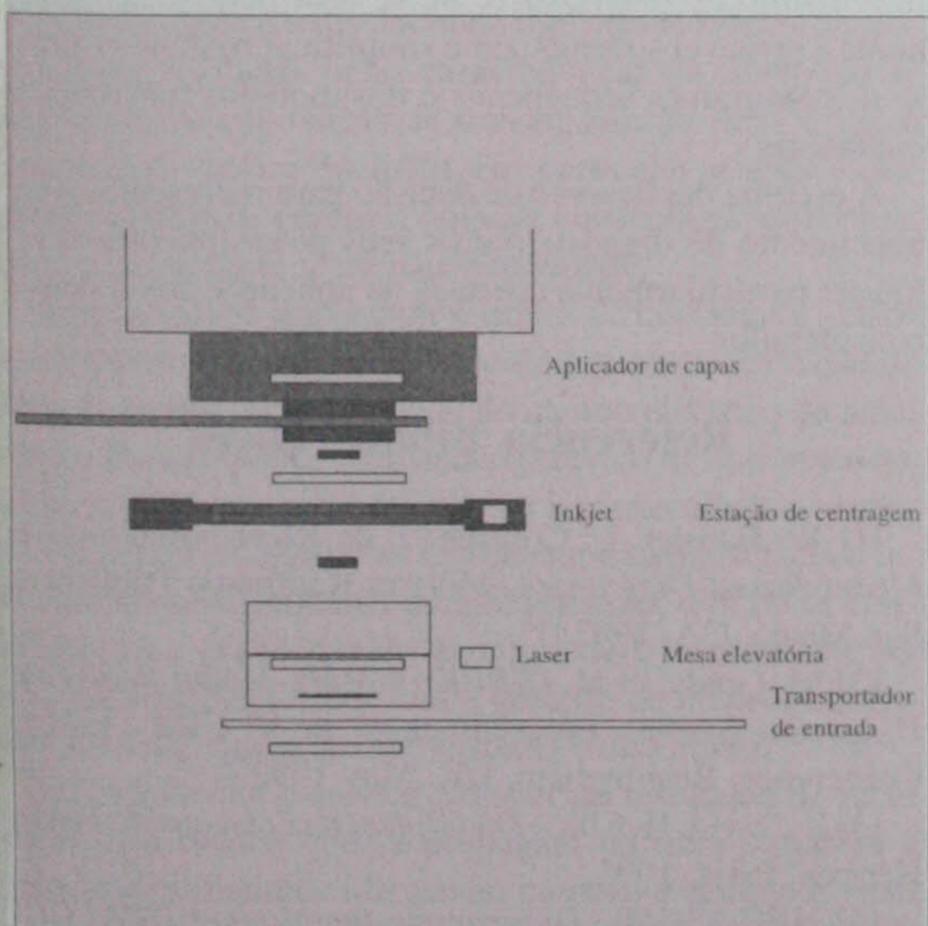


Fig. 2 - Estações de entrada de uma empacotadora de bobinas de papel.

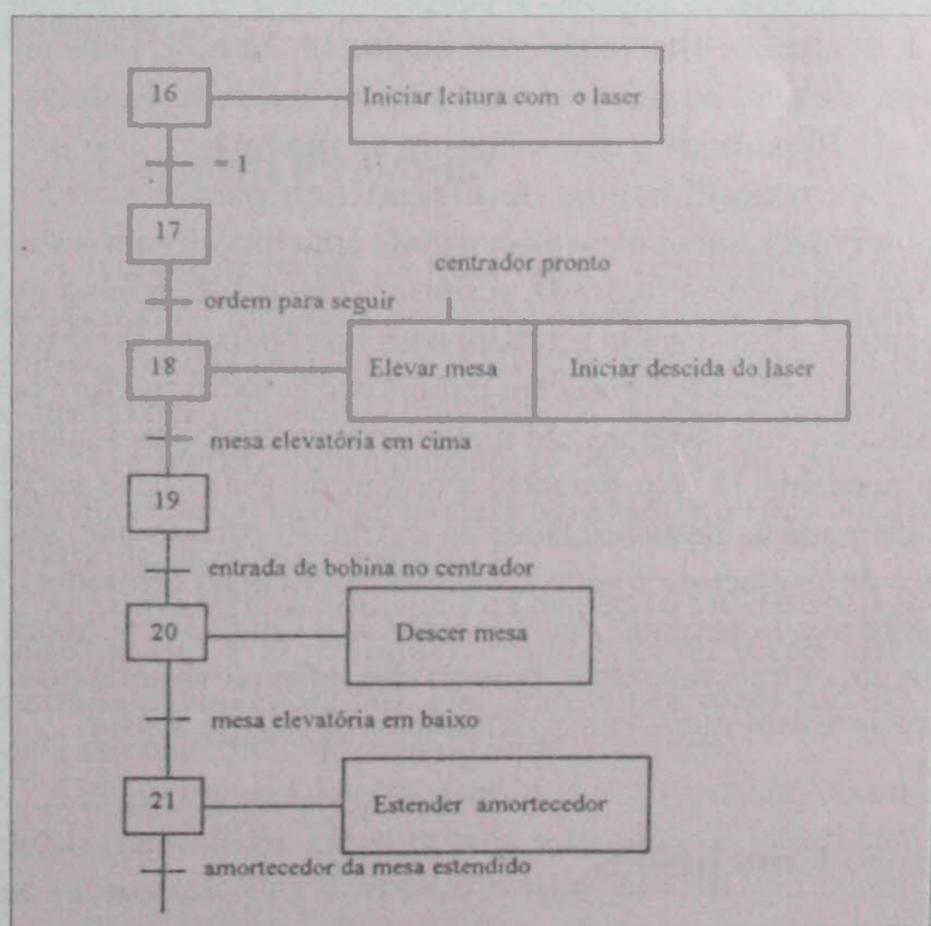


Fig. 3 - Parte do diagrama sequencial da estação elevatória de uma empacotadora de bobinas de papel.

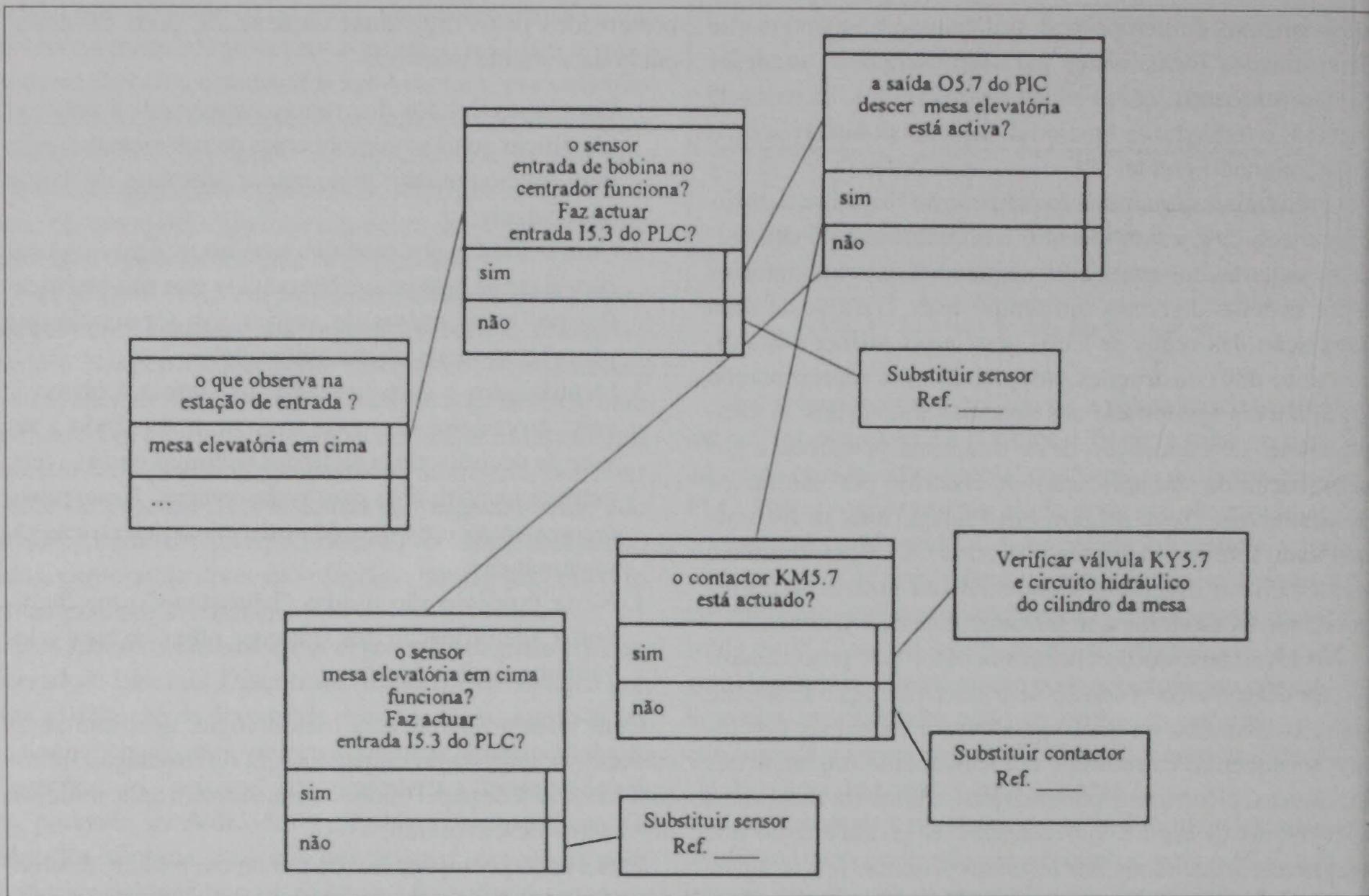


Fig. 4 - Árvore de decisão para o diagnóstico da etapa observável estacionária 20 (inserível no diagrama sequencial da figura 3).

sequencial, como seja, a execução da acção "descer mesa". De igual modo, qualquer falha nos sub-sistemas actuadores que impeça a execução de uma acção, como "descer mesa", impede geralmente o aparecimento de uma condição mecânica necessária ao funcionamento sequencial do sistema e o desenvolvimento do diagrama sequencial, eliminando o salto da própria etapa ou de outra a jusante. São estas as causas possíveis dos sintomas de avaria observáveis.

No diagrama sequencial concebido (Fig. 3) apenas são observáveis e estacionárias as etapas 18, 20 e 21. Uma árvore de decisão possível para a etapa observável estacionária 20 pode ser a que se mostra na figura 4.

Nos procedimentos de diagnóstico para o sistema observável "mesa elevatória parada em cima" foram testados, pela ordem indicada, o sensor "entrada da bobina no centrador", o sistema actuador para fazer baixar a mesa e o sensor "mesa elevatória em cima", isto é, todos os componentes e sub-sistemas até à etapa observável estacionária precedente 18. No entanto, a ordem de testes deve estar adequada às probabilidades de avaria. Repare-se que, antes de se efectuar o teste ao sensor "entrada no centrador", poder-se-ia perguntar ao operador se a estação centradora se encontra a funcionar, pois no caso afirmativo seria pouco provável que a causa da falha fosse aquele sensor.

5. Conclusões

O levantamento do conhecimento de diagnóstico dos sistemas a partir de vários modelos, tanto funcionais como

estruturais e comportamentais, provou tratar-se de uma metodologia com grande utilidade em sistemas automáticos industriais de tipo sequencial e combinatório, apesar de não dispensar a sua validação no local pelos especialistas de manutenção.

A utilização de diagramas sequenciais (ou graficets) na representação dos modelos comportamentais de sistemas revelou-se adequada e muito útil no levantamento do conhecimento de diagnóstico. Se se usar heurísticas gerais ainda é possível sistematizar e simplificar bastante a análise dos diagramas sequenciais e dos modelos funcionais e estruturais.

A escolha das árvores de decisão para representar o conhecimento de diagnóstico e os seus procedimentos revelou ser particularmente acertada na aplicação aos sistemas considerados.

Referência Bibliográficas

- [1] W. Hansler, L. Console, J. de Kleer, «*Readings in Model-Based Diagnosis*», Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, CA, 1992.
- [2] M. Guida, et al, *DIREK: A Multi-Model Real-Time Diagnostic System*, Proceedings of the 8th CIM - Europe Conference, Birmingham, UK, May 1992.
- [3] R. David, H. Alla, «*Du Graficet aux réseaux de Petri*», Hermes, Paris, 1992.
- [4] NFC 03-190, *Diagramme fonctionnel GRAFCET pour la description des systèmes logiques de commande*, Juin 1982.