SBA: Controle & Automação, Vol. 2, Nº 1, pp. 16-30, (TC)

AUTOMAÇÃO, CONTROLE E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

PARTE II: APLICAÇÕES

Mamede L. Marques, Homero M. Schneider, Maurício A. Silva
Centro Tecnológico para Informática
Instituto de Automação
C.P. 6162 - 13081 Campinas - São Paulo

Fernando A.C. Gomide
Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica
C.P. 6101 - 13081 Campinas - São Paulo

RESUMO: Em um trabalho anterior, técnicas básicas de Inteligência Artificial foram abordadas, e suas utilizações em controle e automação industrial consideradas, a partir de um modelo hierárquico de referência. Neste trabalho são apresentadas algumas aplicações, focalizando aquelas que foram desenvolvidas pelos autores e estão efetivamente incorporadas ao uso industrial. São destacadas as seguintes aplicações. Um procedimento heurístico para a sintonização de controladores industriais para controle de processos, ilustrando assim um caso típico aplicável ao primeiro nível da hierarquia. A seguir, como um exemplo correspondente ao nível de supervisão, é discutido um sistema especialista para o diagnóstico e atuação de falhas de trens. Um sistema especialista para o apoio ao planejamento e programação de produção, envolvendo processos de extrusão e moldagem de plásticos, correspondente ao nível de coordenação, é então considerado. Finalmente, são apresentadas as conclusões e desenvolvimentos futuros.

ABSTRACT: In a previous paper, some basic Artificial Intelligence techniques were reviewed, and their use in control and industrial automation were considered from the point of view of an hierarchical control system reference model. In this paper, especific dupplications of Artificial Intelligence are presented, focussing on those that have been developed by the authors and are in use by the industry. The following applications are highlighted. First, a rule based tuning procedure for a digital three-mode controller is presented, corresponding to a first level of that hierarchy example. An application, typical of the second level, is then addressed in the context of an expert system for train diagnosis and treatment. Another expert system, used to aid production planning and schedule for a plastic industry is discussed, as an example of the third hierarchical level application. Finally, the conclusions are presented and further work addressed.

1. INTRODUÇÃO

Em trabalho anterior [Cohn, Marques & Gomide, 1987], os princípios básicos da Inteligência Artificial foram considerados, procurando-se destacar a aplicação destes princípios à automação e controle, a partir de um modelo hierárquico de referência para as funções de controle necessárias à automação industrial integrada.

Sistemas Especialistas, uma das atividades mais importantes da Inteligência Artificial Aplicada, vêm sendo utilizados em quase todas as fases do ciclo de fabricação de um produto [Special Report, 1985]. Além disso, eles podem ser aplicados no diagnóstico de máquinas e processos, na supervisão, monitoração e controle [Efstathion, 1985].

Este trabalho apresenta aplicações de sistemas especialistas nas áreas de diagnóstico, planejamento e programação de produção. Em adição, um procedimento de sintonização baseado em regras de produção é considerado, dentro do contexto de controladores digitais do tipo PID. Estas aplicações correspondem a estudos de casos que foram desenvolvidos, e que estão hoje sendo utilizados na solução dos problemas característicos das respectivas áreas.

Após esta breve introdução, a seção se-

guinte apresenta o procedimento de sintonização desenvolvido, suas características e os resultados obtidos. A seguir, um sistema especialista para diagnóstico e atuação de falhas de trens é descrito, incluindo exemplos de seu uso. A seção 4 apresenta um sistema especialista, desenvolvido para auxiliar a solução de problemas de planejamento e programação de produção relacionados com processos de extrusão e amoldagem de plásticos, explicitando suas características e os resultados obtidos. Finalmente, são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

2. UM PROCEDIMENTO BASEADO EM REGRAS PARA SINTONIZAÇÃO DE CONTROLADORES DO TIPO PID

O controlador PID tem sido extensivamente utilizado na indústria de processos em razão de sua confiabilidade, compreensibilidade e simplicidade. É verdade que a "sobrevida" dos controladores com estrutura PID está diretamente relacionada à ausência de modelos matemáticos que descrevam simples e eficazmente a dinâmica da maioria das plantas industriais. Este desconhecimento matemático dos processos industriais inibe então, de certa forma, a adoção de outras estruturas de controle não convencionais. Enquanto esta barreira não for superada, queremos crer que o controlador convencional tipo PID analógico cederá espaço ao seu equivalente digital, que ainda desempenhará um papel relevante na história da Automação Industrial.

Do ponto de vista de sistemas baseados em conhecimento, todo o contexto acima colocado cria perspectivas favoráveis à criação de uma "base de conhecimento" cujo conteúdo seja, em síntese, um conjunto de regras tanto "teóricas" quanto "heurísticas" destinadas à monitoração individual de malhas de controle, consumando com a adaptação dos ganhos do controlador toda vez que os requisitos de um "padrão de operação" pré-definido não forem atendidos. A inovação deste método advém da utilização simultânea de conceitos teóricos suportados pela teoria clássica de controle e da experiência acumulada pelos operadores e engenheiros de processos.

A figura 1 ilustra, através de um diagrama de blocos, a estrutura de controle adotada neste trabalho. Note que conceitualmente o sistema especialista substitui literalmente o operador, com as vantagens de monitoração contínua, acarretando certamente economia de matéria prima, de energia, garantindo uniformidade e melhora da qualidade do produto.

Note o fluxo de informações (linhas pontilhadas) que chegam ao sistema de adaptação, observe que as decisões de alterações nos ganhos serão tomadas única e exclusivamente em função das variáveis "ref", "erro" e "u".

2.1. Uma Visão Macro do Sistema Especialista

A exemplo do operador, as regras embutidas no sistema especialista em foco não se baseiam em modelos matemáticos do processo para a tomada de decisões, quando muito avaliam grosseiramente parâmetros típicos, tais como atraso de transporte e constante de tempo do processo, para estimar valores iniciais para os ganhos do controlador.

Para entender a dinâmica do algoritmo, comecemos por seu comportamento externo, ou seja, como ele é inicialmente e como é sua interface com o processo e com o operador. Do ponto de vista de inicialização, o usuário deve especificar o padrão de operação do sistema, e isto é feito através da especificação de valores máximos para a "sobreelevação" e "amortecimento" do sistema em malha fechada. De uma maneira simplista, tudo que o sistema faz é aproveitar as perturbações exógenas ou variações na referência para estimar a possível sobreelevação e amortecimento do sistema nas circunstâncias envolvidas para então com-

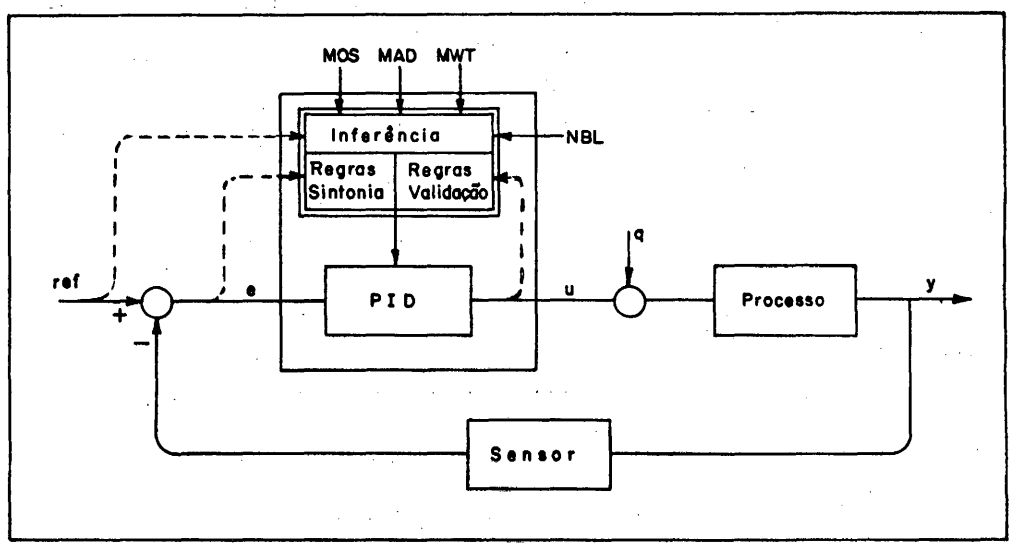


Fig. 1. - Estrutura Lógica de Controle

parar estes valores com aqueles especificados pelo usuário durante a inicialização. Feitas as comparações, o algoritmo deve então manter os ganhos atuais, ou modificá-los. Caso sejam necessárias modificações, deverão ser especificadas em que variáveis e com que magnitude elas serão processadas, levando em consideração também o aspecto de estabilidade do sistema. Uma vez processadas as alterações, o algoritmo segue monitorando à espera de novas perturbações.

2.2. Estrutura Global do Algoritmo

O algoritmo proposto está estruturado segundo blocos lógicos ligados funcionalmente conforme figura 2.

Cada um dos blocos de software referidos na figura 2 tem uma função bem definida, e seu conteúdo é que define a base de conhecimento do sistema. Isto significa que alterar a base de conhecimento do sistema passa pela modificação e/ou adição de blocos. Na próxima seção discutiremos, a título de exemplo, alguns destes blocos.

Observando a fig. 2 pode-se notar a existência de duas condições especiais: i) - mudança ganhos carga p/setpoint - e ii) mudança ganhos setpoint p/carga - a razão da inclusão destas condições é criar elementos para que o algoritmo possa decidir se deve encarar o problema de adaptação do ponto de vista de "servo" ou "regulação". Diferentemente da solução adotada por Bristol [1983], optamos neste trabalho por trabalhar com dois conjuntos de ganhos, aqui denominados de ganhos de carga (caso regulador) e ganhos de setpoint (caso servo). Desta forma o conflito "servo X regulador" desaparece.

2.3. Por trás da Base de Conhecimento

Nesta seção são feitos alguns comentários acerca da lógica de alguns dos blocos citados na seção III.

- Bloco de Inicialização:
  Este bloco pode ser visto como um bloco de partida (start-up) do sistema, uma vez que nessa etapa do processo todas as variáveis, parâmetros e requisitos de operação devem ser inicializados. Registre-se aqui que o algoritmo oferece a opção de utilização de uma rotina de pré-sintonia, baseada na curva de reação do processo [Ziegler & Nichols, 1942] que pode oferecer uma boa inicialização para o sistema.

- Bloco para forçar aparecimento de picos:
  Este bloco será executado quando, após uma perturbação no sistema, a variável "erro" não apresentar três picos necessários ao prosseguimento do algoritmo. Neste caso os ganhos proporcional e integral serão modificados no sentido de induzir na próxima vez a ocorrência dos três picos na curva do erro.

- Bloco de cálculo de parâmetros:
  Neste bloco basicamente se calculam as grandezas observadas, tais como sobreelevação, amortecimento e ângulo do controlador, para posterior comparação com os valores desejados. Este cálculo [Bristol, 1983], [Higham, 1986], é dado por:

```
Bloco de Inicializaçao;
REPEAT WHILE <Adaptaçao ativada>
        Monitaraçao de erro e setpoint;
        IF <mudança ganhos carga p/setpoint> THEN <ativa ganhos setpoint> ENDIF;
        IF <operaçao não normal> THEN
                IF <mudança ganhos setpoint p/carga> THEN <ativa ganhos carga> ENDIF
                Armazena ganhos correntes;
                IF <tempo espera esgotado> THEN <forçar aparecimento picos>
                ELSE THEN
                     deteçao de picos;
                     IF <variável controle oscila> THEN <monitorar variável controle>
                     ELSE IF <picos detectados> THEN
                                    Calculo de parametros;
                                    IF <ajuste grosso> THEN <ajuste preliminar >
                                    ELSE IF <ajuste fino> THEN  ajuste fino>
                                    ENDIF
                     ENDIF
                ENDIF
                Bloco supervisor de mudanças;
        ENDIF
        Bloco gerador de controle e de tratamento de saturaçao;
END REPEAT
```

Fig. 2. Pseudocódigo do Algoritmo Autoajustável

$$\text{Sobreelevação Observada} = \frac{|pico2|}{|pico1|}$$

$$\text{Amortecimento Observado} = \frac{|pico2| + |pico3|}{|pico1| + |pico2|}$$

Ângulo do Controlador =

$$ATAN \left\{ \frac{2 * \pi * Td}{T} - \frac{T}{2 * \pi * Ti} \right\}$$

Onde os valores de pico1, pico2, pico3 e T (período) são fornecidos pela rotina de detecção de pico e Ti e TD são os tempos integral e derivativo correntes.

- Bloco de Ajuste Fino: Neste bloco, os parâmetros estimados serão comparados aos desejados e as pequenas discrepâncias remanescentes serão corrigidas em função do tipo da perturbação, do ângulo do controlador, do período de oscilação e das magnitudes das diferenças entre as grandezas observadas e desejadas. As regras estabelecidas dentro deste bloco foram em sua maioria obtidas em pesquisa realizada em um ambiente computacional para Engenharia de Sistemas de Controle Auxiliado por computador desenvolvido pela Divisão de Metodologia Aplicada do Instituto de Automação do CTI em conjunto com pesquisadores do Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial da Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP [Relatório Interno, 1985].

As regras que compõem a base de conhecimento são implementadas na forma padrão de regras de produção, ou seja, SE <condição 1> E <condição 2>... E <condição N> ENTÃO < AÇÃO>. Exemplos de regras obtidas são fornecidas a seguir:

SE < amortecimento observado estiver entre intervado admissível > E < ângulo do controlador for maior do que -45 graus > ENTÃO < termos proporcional e integral não sofrem ajustes >.

SE < amortecimento observado for pouco maior do que o desejado > E <ângulo do controlador for menor do que -45 graus > ENTÃO <aumentar tempo integral >

SE < pico1 estiver entre intervalo especificado > ENTÃO < aumentar ganho proporcional >

SE < novo ganho proporcional maior que ganho crítico > ENTÃO < desprezar novo ganho e recuperar valor anterior >.

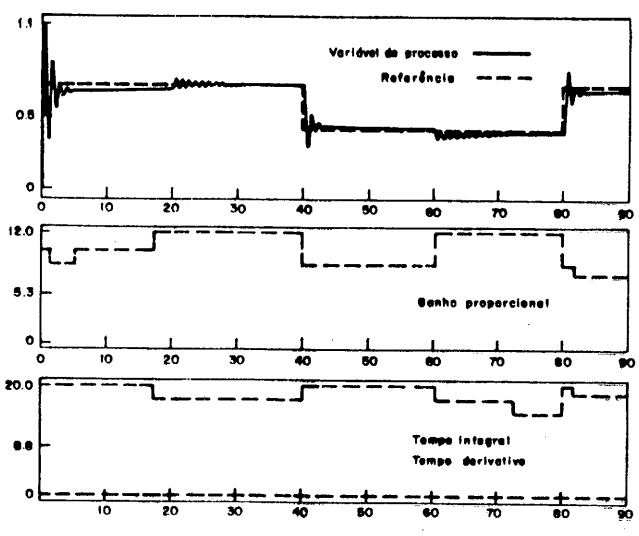
O mecanismo de inferência simplesmente verifica quais regras são aplicáveis, levando em consideração o estado atual do sistema, utilizando uma busca em uma árvore rasa.

O sistema especialista para sintonização pode assim também ser visto como um sistema de produção [Nilsson, 1980].

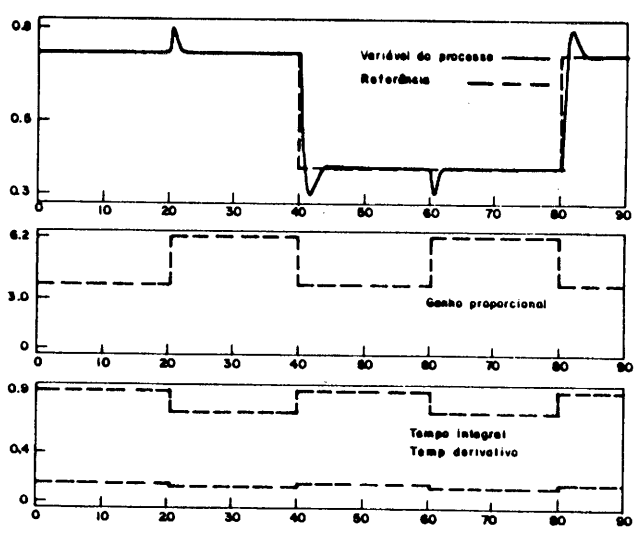
2.4. Resultados

Foram realizadas várias simulações com diversos tipos de modelos de processos, incluindo aqueles cuja curva de reação possui a forma de um "S". Alguns resultados das simulações obtidas na aplicação do procedimento são ilustrados nas curvas seguintes (Figuras 3-4). O processo simulado possui a seguinte função de transferência discreta:

$$P(Z^{-1}) = \frac{0.04877 \cdot Z^{-d}}{1 - 0.95123 \cdot Z^{-1}}$$



3a



3b

Fig. 3. Resultados de Simulação - Sem Pré-Sintonia

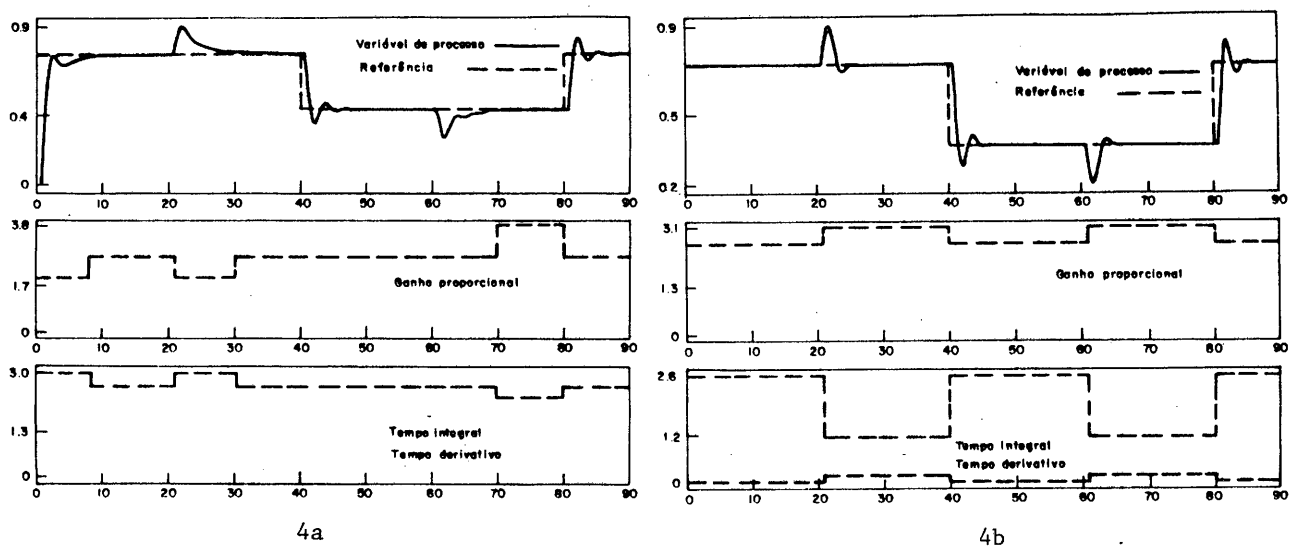


Fig. 4. Resultados de Simulação - Com Pré-Sintonia

As especificações de operação foram as seguintes: Sobreelevação máxima desejada 40%, Amortecimento máximo desejado 20%, e supõe-se um nível de ruído de 4%. Inseriu-se uma perturbação na carga em forma de uma onda quadrada, com 40% de amplitude e defasada de 90 graus do sinal de Setpoint. A figura 3a mostra a resposta obtida considerando-se a razão atraso de transporte para a constante de tempo do processo em torno de 15% (d = 3), e foram utilizados os seguintes ganhos iniciais : ganho proporcional G = 10; tempo integral I = 20; e tempo derivativo D = 0. Estes ganhos foram propositalmente mal escolhidos, a fim de ilustrar o poder de recuperação do algoritmo em qualquer circunstância. Os ganhos finais e a resposta obtida após a convergência do algoritmo, estão ilustrados na figura 3b. Para atingir este padrão o algoritmo precisou de cerca de 10 ocorrências de alterações no Setpoint e de 30 perturbações na carga. Na figura 4a, mostra-se analogamente, a resposta obtida considerando-se a razão atraso de transporte para a constante de tempo do processo em torno de 30% (d = 5), e foi utilizada a rotina de pré-sintonia. Os ganhos iniciais encontrados foram G = 1.8; I = 3.0; e D = 0. Os ganhos finais e resposta obtida após convergência estão na figura 4b. Neste caso, o algoritmo precisou de cerca de 5 alterações de Setpoint e de 8 perturbações na carga para atingir o padrão desejado. À primeira vista, a convergência pode parecer um tanto lenta, mas deve ser ressaltado que essa lentidão, principalmente para inicialização mal feita , assegura um maior grau de estabilidade para o sistema. Sempre será possível aumentar a velocidade de convergência à custa de redução da estabilidade do sistema.

3. UM SISTEMA ESPECIALISTA PARA DIAGNÓSTICO E ATUAÇÃO EM FALHAS DE TRENS - SEDAFT

A área de diagnóstico é uma das mais exploradas para a aplicação comercial de sistemas baseados em conhecimento. As tarefas neste domínio de problemas se caracterizam pelo uso intensivo de conhecimento e pela importância das experiências passadas [Pau, 1986].

Problemas de falhas de trens não fogem à regra. Em particular, o conhecimento sobre falhas é acumulado ao longo dos anos. Toda esta experiência dos peritos em falhas de trens pode ser estruturada e codificada em uma base de conhecimento. Entretanto permanece uma questão: Por que utilizar um sistema especialista? No caso do Metrô de São Paulo, além das justificativas usuais [Harmon & King, 1985], encontraremos motivações de natureza operacional.

Atualmente, nas horas de maior fluxo de passageiros, o METRÔ está operando a linha Norte-Sul com 36 trens e intervalos mínimos de até 113 segundos. Nestas condições, a obstrução da via de circulação por um trem com defeito provoca uma rápida degeneração do sistema METRÔ. Para evitar que a situação atinja níveis críticos é necessário restabelecer as condições operacionais do trem o mais breve possível.

Em geral, as atuações nos trens são realizadas pelos próprios operadores, que também informam ao Centro de Controle Operacional (CCO) a situação do trem através de um sistema de rádio. Entretanto, devido a fatores tais como presença de usuários, "pressão" para continuidade de serviço e esquecimento, a performance das atuações ficam prejudicadas.

O SEDAFT é um sistema especialista para auxiliar os operadores durante as ocorrências de falhas. Ele contém o conhecimento dos peritos sobre falhas de trens, permanentemente disponível no CCO, fornecendo diagnósticos completos, indicações de verificações e prescrevendo atuações, permitindo desta forma um atendimento rápido ao trem com problemas.

3.1. As Falhas de Trens

Existem algumas dezenas de falhas que podem causar anormalidades operacionais no trem. Estas falhas estão localizadas ao longo do trem composto por 6 carros.

As falhas são detectadas na cabine líder do trem através de indicadores específicos, como é o caso da sinalização de tração isolada, ou por anormalidades operacionais, por exemplo, a tubulação de freios não carrega.

Quando o operador do trem está diante de uma situação de falha, ele poderá ter que fazer atuações no trem com o objetivo de restabelecer as condições operacionais, mas antes terá que localizar as falhas. Isto é feito através de diagnósticos.

Após as atuações, o operador retorna à cabine líder para tentar prosseguir a sua viagem. Entretanto, dependendo das falhas e das atuações, a operação terá que ser feita pela cabine oposta. Caso ainda não seja possível conduzir o trem, todo o processo de diagnóstico e atuação poderá ser reiniciado. Das atuações, a mais radical e de maior custo operacional é o reboque. Existem duas situações que podem levar os operadores a decidirem pelo reboque do trem: se não for possível conduzir o trem por nenhuma das duas cabines de operação, ou se o processo de diagnóstico e atuação se estenderem demasiadamente.

3.2. A Estrutura do SEDAFT

Considerando-se o problema descrito acima, podem ser identificadas quatro tarefas básicas no processo de diagnóstico e atuação em falhas de trens: observação das anormalidades, formulação do diagnóstico, atuação sobre falhas e definição da condição operacional do trem. Entretanto, para a definição da estrutura funcional do SEDAFT, ainda foi levada em consideração a estratégia de ação adotada para o atendimento dos trens com falhas.

Como foi mencionado na introdução, tempo é um fator crítico, e por isso é necessário desimpedir a via o mais rápido possível. Portanto, é importante que o operador saia da cabine líder sabendo, tanto quanto possível, tudo o que deve ser feito. É inaceitável que ele fique percorrendo o trem de um lado para outro à procura de informações. Esta restrição invalida alguns modelos de diagnóstico, por exemplo, modelos do tipo utilizado no sistema MICYN [Shortlife, 1986], que procuram comprovar a ocorrência de cada uma das falhas conhecidas independentemente.

Uma solução para este problema é obter, primeiramente, uma descrição das anormalidades observadas na cabine de comando e a partir dela fazer um diagnóstico que detecte a ocorrência de falhas múltiplas. Assim, é possível definir quais as observações e atuações o operador deve fazer ao longo do trem antes que ele deixe a cabine de comando. As atuações sobre as falhas serão realizadas na medida em que as falhas do diagnóstico são comprovadas.

Baseados em considerações como estas, foram definidos quatro módulos com as seguintes funções:

MÓDULO DE MANIFESTAÇÕES: Obtém uma descrição das manifestações anormais observadas na cabine de comando;

MÓDULO DE DIAGNÓSTICO: Gera uma hipótese das falhas que devem estar ocorrendo. Durante este processo também poderão ser solicitadas informações adicionais referentes a testes ou sinalizações;

MÓDULO DE ATUAÇÃO: Fornece instruções de verificações ao longo do trem para confirmar a hipótese gerada e sugere atuações sobre as falhas confirmadas;

MÓDULO DE OPERAÇÃO: Determina como o trem poderá ser conduzido.

Cada um dos módulos pode ser visto como um especialista na sua função, que será ativado para entrar em ação em um momento oportuno. Entretanto, quando o processo de atendimento ao trem é considerado em termos da ativação destes módulos, existe um grande número de possibilidades por onde o processo poderá encaminhar-se. Isto é consequência de certas imprevisibilidades associadas à complexidade do problema. Por exemplo, algumas falhas podem mascarar a manifestação de outras falhas, fazendo com que estas não sejam detectadas no primeiro diagnóstico. Esta situação poderá levar a algum dos seguintes casos: ao se dirigir para um certo carro, o operador constata uma anormalidade que não tinha sido prevista através do diagnóstico; após terem sido feitas as atuações sobre as falhas diagnosticadas, o trem continua sem tração; etc... Casos como estes criam um problema de controle de execução do programa.

A tendência imediata é procurar resolver este problema usando os recursos da própria linguagem de implementação, por exemplo, a combinação de "Cuts" e "Fails" em Prolog. Entretanto, isto poderia requerer uma série de artifícios de programação tornando o controle intrincado e difícil de alterar. Uma solução mais elegante e interessante do ponto de vista da Engenharia do Conhecimento é introduzir um módulo de gerenciamento basedo em regras, com a seguinte função:

MÓDULO DE GERENCIAMENTO: Decide qual módulo do sistema deve ser ativado.

O resultado da integração dos módulos descritos acima é um sistema modular com um controle de execução altamente flexível. A figura 5 mostra a estrutura funcional do sistema SEDAFT.

Na próxima seção abordaremos alguns dos módulos descritos acima, do ponto de vista da Engenharia do Conhecimento, especificando as técnicas de representação e a manipulação do conhecimento.

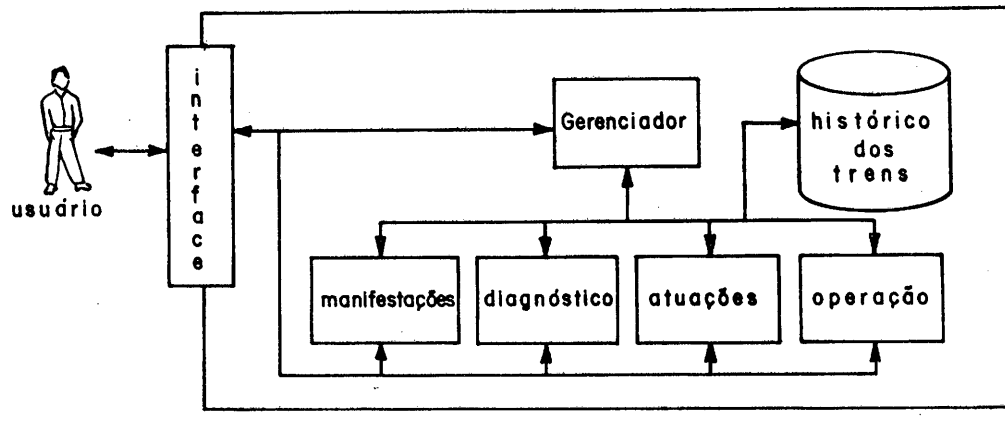


Fig. 5. A Estrutura do SEDAFT

3.3. A Representação e a Utilização do Conhecimento no SEDAFT

A escolha da representação e do mecanismo de inferência depende muito do tipo de problema que deverá ser resolvido. O SEDAFT utiliza dois tipos básicos de técnicas de representação do conhecimento, regras e descrições. As regras são manipuladas através de encadeamento para frente ("Forward Chaining") ou para trás ("Backward Chaining") [Winston, 1984]. No caso das descrições, o mecanismo de manipulação é um modelo bastante sofisticado de diagnóstico. Este modelo será discutido mais abaixo. Para ilustrar a utilização de técnicas do conhecimento serão considerados três módulos representativos do SEDAFT. Começaremos pelo diagnóstico.

O MÓDULO DE DIAGNÓSTICO

As falhas que o SEDAFT "conhece" estão representadas na forma de descrições (ou "frames") [Winston, 1984].

Cada descrição relaciona uma falha com todas as suas manifestações de anormalidade. Elas podem ser obtidas através da análise do relato de um perito. Por exemplo, "a falha' disjuntor de tração intermediário' faz com que: O trem entre em emergência, o freio de 1º nível seja aplicado, a tubulação de freio carregue apenas se for mantido o botão de carregamento pressionado e sinalize tração isolada".

A montagem de uma descrição, da forma como ela é utilizada pelo modelo de diagnóstico, envolve três etapas principais. Primeiramente, são identificados os indicadores (as expressões sublinhadas acima). A seguir, as condições dos indicadores são discretizadas em termos de níveis de degradação. Finalmente, a relação falha-indicador-nível de degradação é qualificada através de uma das seguintes modalidades: possível, esperado, e necessário. A modalidade apropriada pode ser definida através das perguntas: "Sempre que a falha X ocorre, a manifestação Y também ocorre?" e "o nível de degradação de Y permanece inalterado se qualquer outra falha ocorrer?". A figura 6a mostra a esquematização da falha relatada acima, enquanto que a figura 6b mostra a sua implementação em Prolog.

A função das modalidades é permitir que as descrições também contenham algum conhecimento de como as falhas se interagem. Através destas modalidades é possível determinar se uma falha pode ou não estar ocorrendo.

O modelo de diagnóstico consiste basicamente de duas etapas:

1) Uma análise para determinar todas as falhas que podem estar ocorrendo, e

2) A geração de uma hipótese explicativa de quais as falhas que devem estar ocorrendo.

A análise de falhas está baseada nos níveis de degradação associados aos indicadores e nas modalidades, que aparecem nas descrições das falhas. Como exemplo, considere a falha apresentada na figura 7. Para que o modelo de diagnóstico conclua que ela pode estar ocorrendo é necessário que nenhuma das seguintes condições seja violada:

i) O nível de degradação associado a emergência é 1

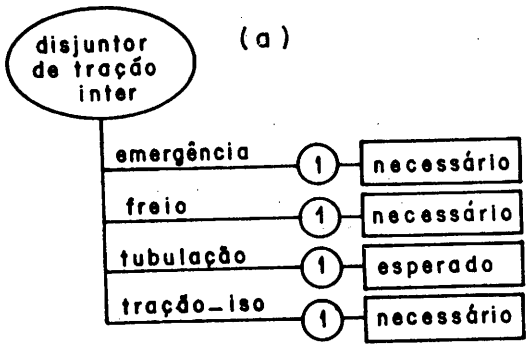
ii) O nível de degradação associado a freio é 1

iii) O nível de degradação associado a tubulação é maior ou igual a 1

iv) O nível de degradação associado a tração-isolada é 1.

As avaliações destas condições são feitas considerando-se os níveis de degradação atuais contidos na descrição de anormalidades.

Após a análise individual das falhas é



(b)

```
dbi (emergência, 1 , necessário)
dbi (freio , 1, necessário )
dbi ( tubulação, 1 , esperado).
dbi ( tração_iso, 1, necessário)
```

Fig. 6. a) Esquematização da Descrição de uma Falha
b) Sua Implementação em Prolog

obtida uma lista de todas as falhas que podem estar ocorrendo. A partir daí, é gerada uma hipótese das falhas que devem estar ocorrendo. O modelo de geração de hipóteses é baseado na teoria de recobrimento de conjuntos [4], no qual se procura um conjunto mínimo de falhas que expliquem as manifestações observadas. Uma hipótese explica um conjunto de manifestações e cada uma destas manifestações está associada a alguma falha.

Quando uma falha contida na hipótese é confirmada, inicia-se um processo de atuação sobre ela. O conhecimento sobre reparo está codificado em termos de regras que são usadas através de encadeamentos para trás, pois reparar uma falha específica constitui um objetivo que deve ser alcançado.

MÓDULO DE ATUAÇÃO

Para atuar no disjuntor da figura 6, o SEDAFT dispõe das regras mostradas abaixo.

Observe que, de acordo com o procedimento de encadeamento de regras para trás, para que o sistema tenha sucesso com a regra 1 será necessário que a regra 3 também tenha sucesso, caso contrário, será tentada a regra 2 que sugere uma atuação alternativa daquela da regra 1.

REGRA 1

SE < o disjuntor X foi rearmado > ,
ENTÃO < a falha de disjuntor X está reparada >

REGRA 2

SE < o disjuntor não foi rearmado > e
< foi possível isolar a válvula 6 > ,
ENTÃO < a falha de disjuntor X está isolada >

REGRA 3

SE < foi possível desligar o disjuntor da caixa lógica > e
< foi possível rearmar o disjuntor X > ,
ENTÃO < o disjuntor X foi rearmado >

O MÓDULO DE GERENCIAMENTO

Como observamos na seção 3.2, o controle de ativação dos módulos precisa ser flexível para que o sistema possa dar atendimento ao trem mesmo em situações imprevistas. Cada vez que o controle for devolvido ao gerenciador ele terá que decidir qual módulo deverá ser ativado em seguida, dependendo das circunstâncias. Este é um problema adequado para a aplicação de técnicas de sistemas baseado em regras com encadeamento para frente.

Considere, por exemplo, as regras abaixo.

REGRA 4

SE < todas as falhas contidas na hipótese já foram atuadas > e
< alguma outra falha não pertencente à hipótese foi constatada e atuada > ,

ENTÃO < ativar o módulo de operação >

REGRA 5

SE < nem todas as falhas contidas na hipótese foram atuadas > e
< alguma falha não pertencente à hipótese foi constatada e atuada > ,

ENTÃO < ativar o módulo de diagnóstico >

Estas regras compõem uma estratégia de solução de problemas que leva em conta a ocorrência de eventos, de certa forma inesperados, como por exemplo, a constatação de uma falha não prevista na hipótese de diagnóstico.

Devido à arquitetura deste módulo, qualquer alteração da estratégia pode ser facilmente conseguida pela modificação das regras da base de conhecimento do gerenciador sem que o controle de programação propriamente dito seja alterado.

3.4. Consulta com o SEDAFT

Quando o SEDAFT é acionado, são fornecidas as informações referentes ao número do trem e à cabine de comando. Imediatamente após, o sistema aguarda a entrada das informações referentes à anormalidades. A partir daí, o usuário poderá fornecer qualquer informação disponível, através da alteração direta da tela de aquisição de anormalidades. (veja figura 7). Esta tela é uma esquematização de informações que podem ser obtidas na cabine de comando do trem. Sua configuração inicial representa o estado normal do trem. Modificando-se o estado do quadro 'emg', por exemplo, indicará que o trem entrou em emergência.

Após terem sido entradas todas as informações conhecidas pelo usuário, o sistema inicia um diálogo com o objetivo de completar a descrição das anormalidades do trem. Na janela de diálogo da figura 7 aparece uma das perguntas feitas pelo sistema.

Ao terminar o diálogo, o sistema terá obtido uma descrição das anormalidades, tão completa quanto possível, com o operador na cabine de comando. Entretanto, é interessante notar que algumas destas informações poderão ter sido deduzidas pelo próprio sistema a partir das manifestações que estão sendo fornecidas. Além disto, algumas perguntas deste diálogo poderão estar sendo feitas durante o processo de diagnóstico. É o caso das anormalidades que o sistema tem "razões para crer" que estão ocorrendo. Por exemplo, considerando-se a configuração da tela na figura 7, o sistema perguntará:

>> Durante o teste de lâmpadas do anunciador de falhas as sinalizações referentes ao DSF ficaram apagadas?

Concluído o diagnóstico, o sistema apresentará os resultados conforme a figura 8. No quadro denominado 'Falhas possíveis' aparece uma lista das falhas que podem estar ocorrendo. Neste mesmo quadro, está indicada a hipótese das falhas que devem estar ocorrendo, ou seja, as falhas 'SISTEMA ATO', 'DISJ TRAÇÃO CAR 2' e 'DISJ BATERIA CAR INTER'.

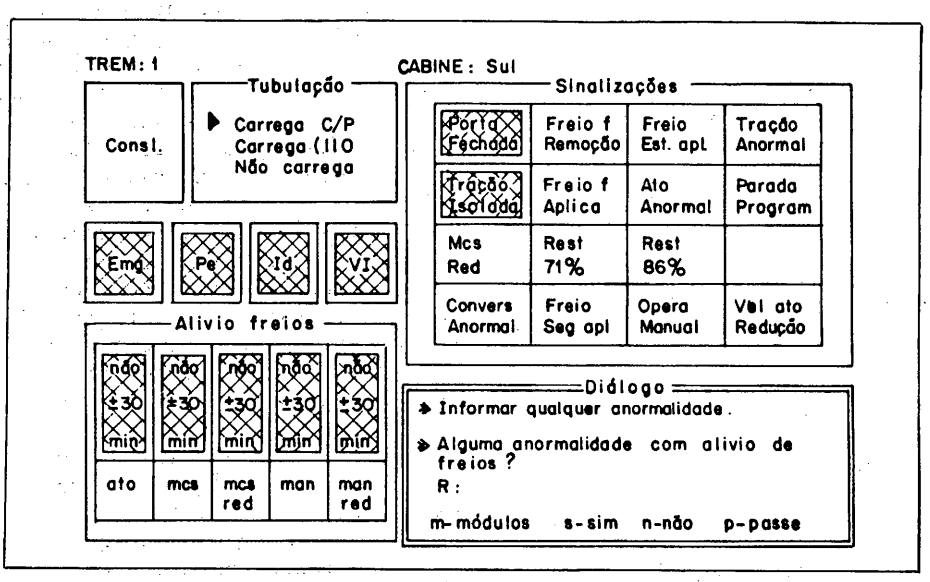


Fig. 7. A Tela de Aquisição de Anormalidades do SEDAFT

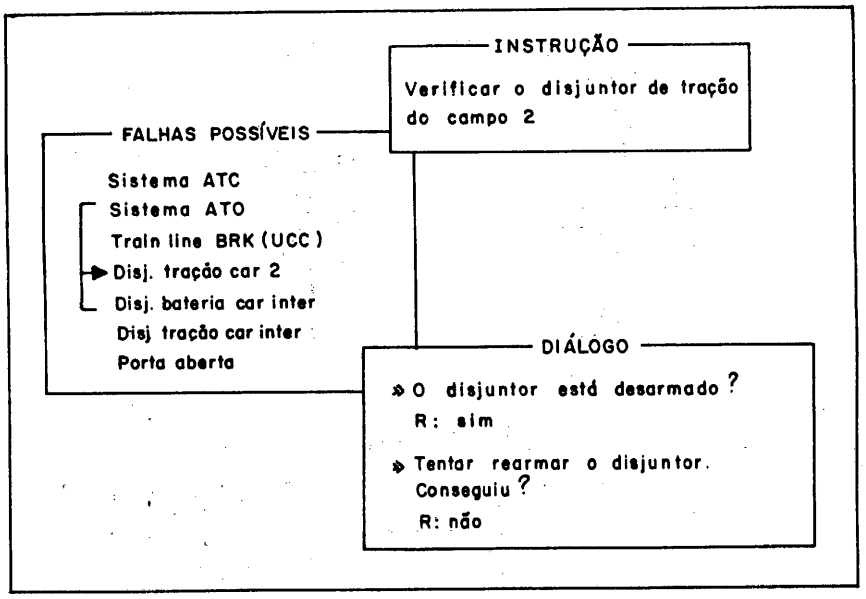


Fig. 8. A Tela de Diagnóstico e Atuações

No quadro denominado 'Instruções', o sistema solicita uma verificação correspondente a falha 'DISJ TRAÇÃO CAR 2'. Enquanto que, na janela de diálogo, aparecem duas perguntas referentes a esta falha. O diálogo continua com a sugestão de uma outra atuação.

>> Isolar o freio de serviço do carro com problema em P.

Em seguida, é considerada a próxima falha da hipótese, 'DISJ BATERIA CAR INTER', mas desta vez não ouve confirmação.

>> Algum carro intermediário está com a iluminação apagada?

R: Não

Neste momento, o sistema refaz sua hipótese de diagnóstico, é solicitada uma outra verificação e o diálogo continua.

>> Encontrou alguma porta aberta?

R: Sim

>> Em que carro?

R: 3

>> Conseguiu restabelecer a porta?

R: Sim

>> Assumir comando na cabine oposta.

O operador deve assumir comando na cabine oposta porque não foi possível restabelecer a falha 'DISJ TRAÇÃO CAR 2'. Isto impede que o trem tenha tração pela cabine líder. O diálogo prossegue.

>> Tem tração em manual?

R: Sim

>> Operar o trem em manual pela cabine oposta mantendo o botão de carregamento pressionado.

Com esta última mensagem, o sistema especifica as condições de operação do trem e a consulta termina.

4. SISTEMA ESPECIALISTA PARA APOIO À PRODUÇÃO - SEAP

O SEAP é um Sistema Especialista projetado para apoiar o planejamento e a programação da produção em uma indústria com o tipo de produção em fluxo contínuo [Marques & Haddad, 1987].

4.1. Apresentação do Problema

O problema abordado envolve processos de extrusão e moldagem de plásticos. Resumidamente, o SEAP define um pequeno planejamento entre dois centros de trabalho, o de extrusão e o de moldagem de plásticos. A indústria ao receber um pedido do cliente vai transformá-lo em uma ordem e fabricação (OF). Esta OF pode ser de produtos extrusados, ou de produtos moldados. No caso de extrusados, o processo de fabricação é feito em somente uma máquina extrusora. Esta máquina recebe o plástico em bruto, matéria prima, adiciona um pigmento para uma coloração especificada. Em seguida este material é derretido e, finalmente, será aminado, sendo oferecido sob forma de chapas ou de bobinas.

Para produtos moldados, utiliza-se o sistema de moldagem à vácuo "vacumm forming", neste caso o processo de fabricação inicia-se com a extrusão de chapas que são enviadas, posteriormente, para o centro de moldagem e transformadas em produto final.

4.2. Estrutura do Sistema

A figura 9 mostra um diagrama de blocos que descreve a estrutura do SEAP. O sistema

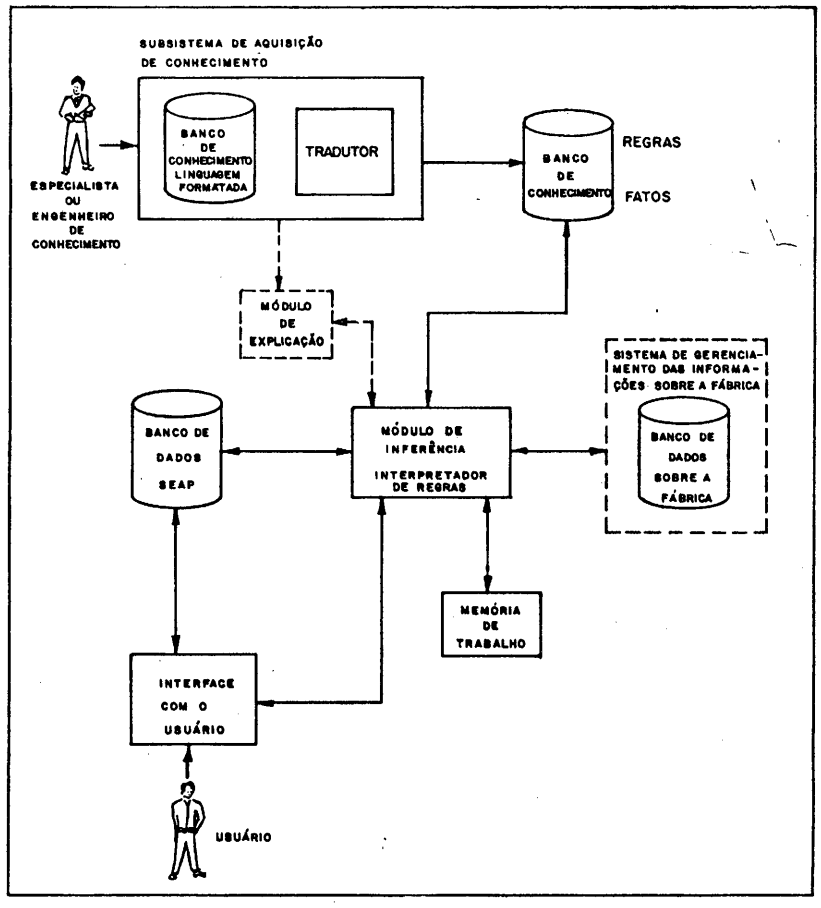


Fig. 9. Sistema Especialista para Apoio à Produção-SEAP

está conectado a um bloco de dados contendo informações sobre a fábrica. Estas informações devem descrever a fábrica, caracterizando estados de fabricação em cada centro de trabalho e em cada máquina. O estado de fabricação é um conjunto de informações que mostra a situação das OF's que estão à espera e em processamento em cada centro de trabalho e em cada máquina.

O banco de dados do SEAP contém dados especificados para a programação da fábrica e que não se encontram disponíveis no sistema de gerenciamento de informações sobre a fábrica. Estes dados são, por exemplo, gradiente de cores, intervalos de espessuras, tolerâncias de cortes de chapas, etc.

O subsistema de aquisição de conhecimento foi projetado de modo a oferecer facilidades ao especialista ou ao engenheiro de conhecimento, na especificação da linguagem de representação de conhecimento. O especialista pode especificar uma regra em uma linguagem parecida à linguagem natural, porém formatada e com características voltadas às necessidades do sistema. A figura 10 mostra exemplos de regras que podem ser interpretadas e traduzidas pelo sistema. A regra 1 é um exemplo genérico de regra de produção que ilustra mais claramente a semelhança com o Português. A regra 29 é uma regra do SEAP. Como podemos observar,

```
regra_1 ;
          se a classe for ginosperma e a forma for redonda e  o
          padrao for aleatorio ou o padrão possuir linhas_pares
          e a banda_prateada  for  sim  entao  a familia   sera
          pinheiro.
```

```
   -----> cuja traduçao para PROLOG e':

familia(regra_11,pinheiro) :-
      classe(A,ginosperma),
      forma(B,redonda),
      ( padrao(C,aleatorio)
      ; padrao(D,linha_pares
      ),
      banda_prateada(E,sim).
```

```
regra_29;
  se          o  fator_brilho para [ Brilho ] for Fator
            e  a  Maquina for igual a me_3a
            ou a  Maquina for igual a me_3b
            e  o  valor da Capacidade for ( 312.550 + 0,142 *
                     Numero_produtos * Largura * Espessura) * Fator

  então       a  capacidade para [ Maquina, Numero_produtos, Espessura,
                     Largura, Brilho ] sera Capacidade
```

```
  ----- > cuja traduçao para PROLOG e':

capacidade(regra_29,[A,B,C,D,E],F) :
    fator_brilho(G,[E],H),
    ( A == me_3a
    ; A == me_3b
    ),
    F is (312,55 + 0.142 * B * D * C) * H.
```

```
fato_2b;
a lista_maq_preferencial para [ Tipo_produto, 1, Filme, [ me_1, me_2 ] ]
                sera [ me_1, me_2 ].


fato_41;
 o fator_brilho para [ 1 ] sera 0,85
```

```
   -----> cuja traduçao para PROLOG e':

lista_maq_preferencial(fato_2b,[A,1,B[me_1,me_2]],[me_1,me_2]].

fator_brilho(fato_41,[1],0.85).
```

Fig. 10. Exemplos de Regras e Fatos e suas Traduções para Prolog

o subsistema de aquisição de conhecimento consegue reconhecer, dentro da regra, importantes representações como variáveis, ponto flutuante, listas, expressões aritméticas, átomos, etc. Podemos observar mais precisamente estas características no subconjunto da gramática do tradutor do SEAP, em notação BNF, apresentada na figura 11.

4.3. Descrição do Funcionamento do SEAP

Uma vez feita a tradução do banco de conhecimento na linguagem formatada para o banco de conhecimento propriamente dito, o SEAP está pronto para ser executado. O SEAP deve reconhecer as características de uma OF para planejar e programar a sua execução. Este planejamento consiste em identificar roteiros de percurso dentro da fábrica buscando cumprir as especificações de cada OF. Isto significa que o SEAP deve escolher para cada OF a máquina extrusora mais apropriada para a sua fabricação e, quando existir produtos moldados, escolher também a máquina para sua moldagem, ou seja, fará o planejamento da produção. Em seguida, o SEAP definirá uma sequência de execução para cada OF, em cada centro de trabalho, buscando cumprir prazos de entrega, prioridades dos clientes, levando em consideração, quando possível, as características tecnológicas e econômicas de cada OF para cada máquina.

```
<conhecimento> ::=    <regra>
                    | <fato>

<regra> ::= <Nome>; se     <oraçao> {<conectivo> <oraçao>}
                    entao  <conclusao>.

<fato> ::= <Nome>; <conclusao>.

<oraçao> ::=   <sujeito> <verbo> <objeto>
             | <avaliador> <verbo> <expressao>

<sujeito> ::= <artigo> <atomo> [<adjunto adnominal modificador>]

<adjunto adnominal modificador> ::= <preposiçao> <adm>

<adm> ::=   <atomo>
          | <variavel
          | <lista>

<objeto> ::=   <aux_objeto>
                 <comparaçao>

<aux_objeto> ::=   <atomo>
                 | <variavel>
                 | <lista>

<avaliador> ::= o valor <preposiçao> <variavel>

<conectivo> ::=  e
               | ou

<conclusao> ::= <sujeito> <verbo> <aux_objeto>
```

Fig. 11. Subconjunto da Gramática utilizada no Subsistema de Aquisição de Conhecimento

Com este recurso, o especialista ou o engenheiro de conhecimento pode manipular mais facilmente o banco de conhecimento tendo um contato mais amigável com a forma em que está armazenado o conhecimento.

O mecanismo de inferência é um interpretador de regras que utiliza a resolução como regra inferência e possui como estratégia para solução do problema e técnica de encadeamento para frente. Uma memória de trabalho é utilizada com o objetivo de gravar resultados intermediários importantes para se chegar à conclusão final [Marques, 1985 ; Cohn et alli, 1987].

Na programação da produção o SEAP se comporta como um sistema que toma decisões factíveis. Nesta fase utiliza-se uma técnica de sequenciamento heurístico, isto é, um sequenciamento baseado na experiência do especialista e não em algoritmos matemáticos como acontece classicamente. A primeira tarefa do sistema será a de definir, para cada OF que foi escolhida para entrar na programação da fábrica, as máquinas que podem processá-las, em seguida, definir uma ordem de preferência e, finalmente, calcular os seus respectivos tempos de processamento.

Na segunda etapa, o SEAP procura alocar em suas respectivas máquinas preferenciais os lotes críticos, ou seja, são lotes grandes com alta prioridade, com baixa flexibilidade e com datas mais tarde para início de fabricação dentro do horizonte de sequenciamento. Na terceira etapa, o sistema procura fazer um balanceamento de cargas nas máquinas, tomando decisões de realocação de lotes das máquinas que porventura tiveram suas cargas estouradas; logo em seguida o SEAP aloca os lotes pequenos e novamente balanceia as cargas, Nesta fase o sistema já obteve uma pré-sequência considerando a seguinte ordem:

- data mais tarde para início de fabricação;
- prioridade;
- flexibilidade;
- tempo de processamento.

Na quarta etapa, o SEAP faz um refinamento da pré-sequência obtida buscando minimizar os tempos de preparação. Para isto considera, nesta ordem, o gradiente de cores, a espessura e a melhor medida. Para se obter a melhor medida, o sistema deverá decidir fabricar o lote ou pela largura, ou pelo comprimento, considerando também o número de produtos que podem ser fabricados ao mesmo tempo. Depois de obtida esta sequência, os tempos de preparação devem ser os menores possíveis. Finalmente, um sistema de relógio, com data e horários válidos dentro do calendário da empresa é acionado para a composição da sequência final.

Esta sequência final é apresentada para o usuário sob forma de uma simulação. O usuário, portanto, tem a liberdade de aceitá-la ou não. Dependendo de novas restrições impostas, o SEAP é acionado novamente até que um sequenciamento é aceito e, então, o SEAP automaticamente atualiza o banco de dados contendo informações sobre a fábrica. A figura 12 mostra um trecho da saída do SEAP.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas algumas aplicações, com o objetivo de ilustrar o potencial da Inteligência Artificial Aplicada na solução de problemas de automação e controle.

```
Maquina, OF, Tipo produto, Cor, Grupos de espessura
Abertura Maquina, Largura ou Comprimento, Tempo processamento,
Numero de Produtos, Tipo de medida

me_3a, 103005, 10,  110, 2,  800, 800,  6.77, 1, larg
me_3a, 103003, 10,  110, 2,  845, 845, 10.74, 1, larg
me_3a, 103004, 10,  110, 2,  845, 845,  1.61, 1, larg
me_3a, 103007, 10, 1004, 1, 1200, 600,  1.41, 2, larg


Maquina, OF, Tipo produto, Cor, Grupos de espessura
Abertura Maquina, Largura, Tempo processamento,
Numero de Produtos


me_3a, 105013, 20, 100, 1, 1060,  530, 2.8,  2
me_3a, 103014, 20, 110, 1,  900,  450, 0.69, 2
me_3a, 103015, 20, 110, 1,  900,  450, 0.69, 2
me_3a, 103013, 20, 110, 1,  920,  460, 0.99, 2
me_3a, 103012, 20, 110, 1,  920,  460, 0,71, 2
me_3a, 104009, 20, 110, 2, 1000, 1000, 5.63, 1
me_3a, 105011, 20, 110, 2, 1020,  340, 0.81, 3
me_3a, 105010, 20, 110, 2, 1020,  340, 0.6,  3
me_3a, 105009, 20, 110, 3, 1020,  340, 4.32, 3
me_3a, 105014, 20, 110, 3, 1060,  530, 2.68, 2
me_3a, 105015, 20, 110, 3, 1080,  540, 2.67, 2
me_3a, 105012, 20, 110, 4, 1179,  390, 0.81, 3
me_3a, 105020, 20, 201, 1, 1100,  550, 1.36, 2
```

Fig. 12. Parte de uma Saída do SEAP-Programação de Chapas e Bobinas

Com relação ao procedimento para a sintonização de controladores industriais, os seguintes comentários são pertinentes.

Depois de inúmeras simulações, combinando diferentes padrões de resposta com diferentes processos, e com as mais diversas inicializações no espaço de parâmetros, pode-se dizer que, pelo menos para a classe de processos investigada, o procedimento converge, fornecendo um conjunto de ganhos compatíveis com o comportamento desejado da variável controlada.

Considerados os resultados obtidos, este trabalho abre perspectivas para novas investigações, no sentido de incorporar novas regras "base de conhecimento" do sistema habilitando-o a tratar de outras classes de processos, como por exemplo, fase não mínima, integradores, processos com polos complexos conjugados.

Este procedimento foi incorporado a um controlador industrial baseado no processador 8088, estando presentemente sendo testado no campo.

A implementação do SEDAFT foi feita em Prolog. A primeira versão foi concluída e está sendo submetida a testes de campo. Paralelamente, iniciou-se uma segunda versão. O objetivo desta nova versão é alcançar uma maior modularidade do sistema, introduzir o módulo de gerenciamento, reestruturar e ampliar as funções do sistema. A importância e necessidade do módulo de gerenciamento e das reestruturações na arquitetura do sistema ficaram evidentes somente nas fases finais do projeto, quando procurou-se abranger o problema de falhas de testes em toda a sua complexidade. Esta segunda versão do SEDAFT, que deverá estar concluída até o final de 1988, será utilizada comercialmente pelo Metrô de São Paulo.

O SEAP é um projeto que está sendo presentemente utilizado por uma indústria de plásticos. Os resultados obtidos até então têm possibilitado a programação da produção nos centros de extrusão de plásticos de uma forma satisfatória, uma vez que o sistema trouxe mais organização da produção, um melhor controle do fluxo de produção, acarretando economia de insumos com uma maior produtividade.

A linguagem utilizada na implementação foi também Prolog. Esta linguagem facilitou bastante a implementação do sistema principalmente nos pontos mais complexos como o módulo de inferência e o subsistema de aquisição de conhecimento.

6. REFERÊNCIAS

Aspectos Teóricos e Práticos sobre controladores industriais do tipo PID digitais e o Protótipo CADPID. Relatório Interno DTIA - RT-PDC-03-001/00 - CTI/IA Dez.1985.

Bristol, E. H. - "The Design of Industrially Useful Adaptive Controller" - ISA Transactions - Vol. 22 nº 3 - 1983.

Cohn, P. G.; Marques, M. L. & Gomide, F.A.C., "Automação, Controle e Inteligência Artificial, parte I: Uma Visão Integrada", in SBA: Controle e Automação, Sociedade Brasileira de Automática, Vol. 1 nº 4 - Out. 1987, pp 177-290.

Efstathion, J. (1985). "Knowledge-Based Systems for Industrial Control". Computer Engineering Journal.

Harmon, P., King, D. - "Expert Systems" - John Wiley, 1985.

Higham, E. - "Expert System in Self Tuning Controller".

Marques, M.L., Haddad, R.B. - "Simulador de Programação da Produção: Sistema Perito de Apoio à Programação da Produção", reg. nº ME.MD.001/0, Centro Tecnológico para Informática, Campinas, 1987, pp.48.

Marques, M.L. - "Aspectos Técnicos de um Módulo de Inferência de Sistema Perito" - 2º Simpósio Brasileiro de Inteligência Artificial, Sociedade Brasileira de Computação, 1985, pp. 85-86.

Nilsson, N.J. - "Principles of Artificial Intelligence" - Tioga Publishing Co. - 1980.

Pau, L.F. - "Survey of Expert Systems for Fault Detection, Test Generation and Maintenance" - Expert System - Vol.2, nº 2, pp. 100-111, 1986.

Reggia, J.A., Nau, D.S., Wang, P.Y. - "Diagnostic Expert Systems Based on a Set Covering Model In Developments in Expert Systems", M.J. Coombs (ed) Academic Press, 1984.

Shinskey, F.G. - "Process Control System" - McGraw, 1979.

Shortlife, E.H. - "Computer-Based Medical Consultations": MYCIN. Elsevier/North-Holland, 1076.

Special Report, "Artificial Intelligence: a Tool for Smart Manufacturing", AM. 1985.

Winston, P.H. - "Artificial Intelligence", Addison-Wesley, 1984.

Ziegler, J.G., Nichols, N.B. - "Optimum Setting for Automatic Controllers", Transactions ASME, Nov. 1942.