

FÁBIO LUÍS LOPES DE MAGALHÃES

PROJETO E SIMULAÇÃO DO CONTROLE DE
UMA ESTEIRA TRANSPORTADORA PELO
MÉTODO E-MFG

Trabalho apresentado à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção do título de Engenheiro.

Área de Concentração:

Engenharia Mecânica - Habilitação Automação e Sistemas

Orientador:

Prof. Dr. Diolino José dos Santos Filho

São Paulo

1998

8,6 (oitos e seis)



ÍNDICE

1) INTRODUÇÃO.....	1
2) DETALHES DO SISTEMA A SER CONTROLADO.....	2
3) O MFG E O E-MFG.....	8
4) MODELO DO CONTROLE PROJETADO POR E-MFG.....	14
4.1) A QUESTÃO DO TEMPO.....	14
4.2) O COMPORTAMENTO DOS ELEMENTOS EXTERNOS.....	15
4.3) GRAFOS CONFECCIONADOS: APRESENTAÇÃO EM DETALHES.....	16
5) SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DO CONTROLE PROJETADO.....	46
6) CONCLUSÃO.....	58
7) BIBLIOGRAFIA.....	59

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Diolino José dos Santos Filho, pela orientação e compreensão.

Ao Marco Antonio de Almeida Silva e ao Daniel de Miranda e Silva Ferreira, colegas de turma, por toda a ajuda na etapa final deste trabalho.

Ao Márcio Rodrigues Pereira da Silva, colega de turma, pelas dicas e informações importantes.

Aos meus pais, pela educação que me abriu as portas da vida.

RESUMO

Este trabalho busca obter um controle de uma esteira transportadora de alumínio adequado ao funcionamento e às exigências de segurança impostos por seu fabricante. O funcionamento desta esteira pode ser modelado como um sistema a eventos discretos; assim foi escolhido o método E-MFG (variação do mais conhecido MFG, Mark Flow Graph), adequado a sistemas desse tipo, como ferramenta de projeto do controle. Posteriormente, para simulação e validação desse controle projetado, se implementou este em um programa de computador emulador de grafos E-MFG (Etna), enquanto que a dinâmica da esteira foi implementada num programa na linguagem Visual Basic. A interação entre ambas as partes foi realizada por meio de interface DDE (Dynamic Data Exchange).

ABSTRACT

This work aims for obtaining a control of a aluminum transporting band conveyor which is adequate to the functioning and to the requirements imposed by its manufacturer. The functioning of this band conveyor can be modeled as a discrete event system; so the E-MFG (a variation of the better known MFG, Mark Flow Graph) method , adequate to systems of this kind, was chosen as a control project tool. Subsequently, for simulation and validation of this projected control, it was implemented in an E-MFG graph emulator computer program (Etna), while the conveyor dynamics was implemented in a program written in Visual Basic language. The interaction between both parts was achieved by means of DDE (Dynamic Data Exchange) interface.

1) INTRODUÇÃO

A crescente complexidade dos processos industriais e dos equipamentos tecnológicos de nossa época deram à palavra “controle” um significado e uma importância novas na engenharia moderna. Nesse contexto, controlar algo significa fazer com que esse algo se comporte de acordo com requisitos determinados pelas necessidades daqueles que o controlam. Essas necessidades podem visar à própria viabilidade física de um processo, ou podem objetivar apenas um aumento de eficiência neste.

No entanto, dependendo da natureza de um objeto a ser controlado (entenda-se por objeto um processo, uma máquina, etc.), ele pode ser classificado em um sistema a eventos contínuos ou um sistema a eventos discretos. Essas duas classificações requerem técnicas de controle totalmente diferentes (embora existam atualmente tentativas de controle misto em sistemas de classificação ambígua).

Neste trabalho será abordado o projeto do controle de uma esteira transportadora de rolos de alumínio associada a uma laminadora de alumínio a frio, fabricada pela Alcan. As características de seu funcionamento, descritas no capítulo 2, pedem técnicas de controle de sistemas a eventos discretos para o planejamento de seu controle. Será utilizada a técnica PFS / E-MFG, uma combinação das técnicas PFS (Production Flow Schema) e E-MFG (Enhanced MFG, uma variação do MFG - Mark Flow Graph). Antes de se aplicar esse projeto de controle à esteira, deve-se validá-lo, ou seja, testá-lo para que se verifique sua adequação às necessidades de funcionamento da esteira. Esta validação será feita preparando-se um programa de computador em linguagem Visual Basic que simulará a dinâmica do funcionamento da esteira. Ao mesmo tempo, o projeto do controle será implementado em um outro programa capaz de emular o funcionamento de grafos E-MFG, denominado “Etna”. A interação entre ambos será possível através de uma interface DDE (Dynamic Data Exchange), que a linguagem Visual Basic suporta. Após simulações com esta estrutura e observação dos resultados, será possível dizer se o controle projetado é adequado.

2) DETALHES DO SISTEMA A SER CONTROLADO

O sistema físico que será o objeto de controle neste trabalho é uma esteira transportadora de material, que serve a uma máquina laminadora de alumínio a frio. O processo de laminação de uma chapa metálica consiste em diminuir sua espessura fazendo-a passar entre dois rolos separados por uma folga menor que sua espessura original. A máquina laminadora em questão deve operar com chapas de diferentes espessuras originais e diferentes espessuras finais. Reduções de espessura além de um determinado limite não podem ser obtidas de uma só vez, exigindo mais de uma laminação. Assim, se faz necessário um sistema de transporte capaz de levar as chapas que saem da máquina de volta à entrada, para que estas possam sofrer novos afinamentos até que atinjam a espessura final desejada. Essa função é cumprida pela esteira transportadora, que leva uma bobina (chapa enrolada) de alumínio desde a saída até a entrada da laminadora e é capaz de, enquanto esta não completa seu trajeto, fornecer-lhe outras chapas, aumentando a eficiência do processo.

A esteira é composta por 26 módulos, cada um deles uma mini-esteira, capaz de ser acionada separadamente de todas as outras. Conforme mostra a figura 2.1, as mini-esteiras são conjuntos de rolos que ficam abaixo do nível do solo. As bobinas são transportadas sobre paletes (apoios para transporte de itens em sistemas de produção em série), possuidoras de duas saliências que entram em contato com os rolos do módulo através de duas ranhuras no solo. A figura 2.2 ilustra que o transporte das bobinas de alumínio é feito pelo acionamento simultâneo de dois módulos adjacentes. O fabricante da esteira (Alcan) impõe que não se deve tentar transportar a paleta com a bobina do módulo X para o módulo Y acionando apenas o primeiro e deixando o segundo imóvel, mas sim acionando ambos ao mesmo tempo até que a paleta tenha passado totalmente ao módulo Y.

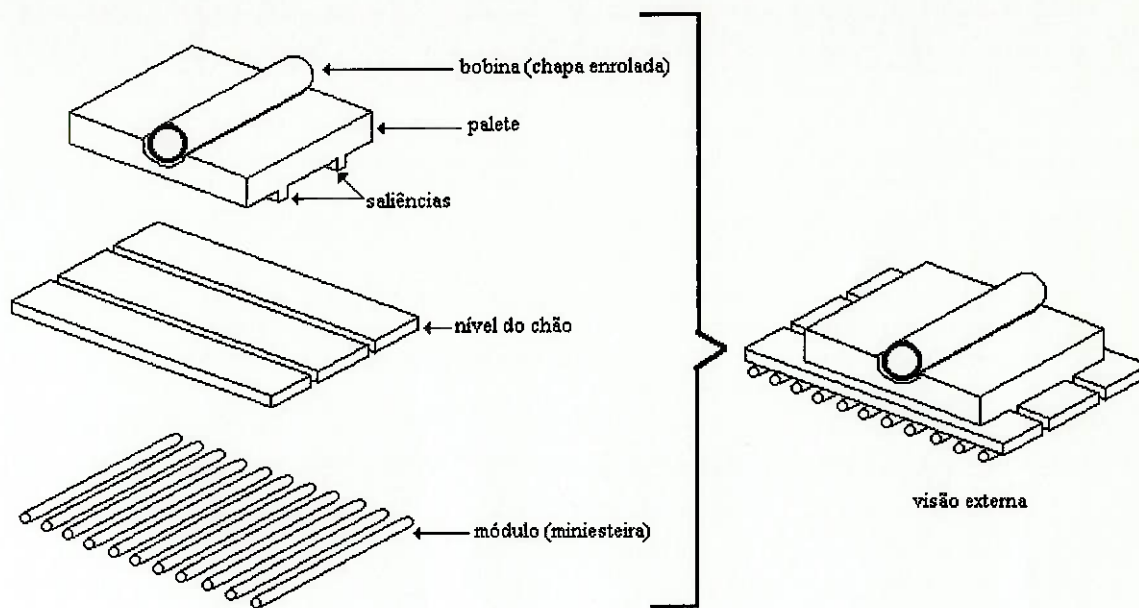


Figura 2.1 - Representação dos módulos, paletes e bobinas

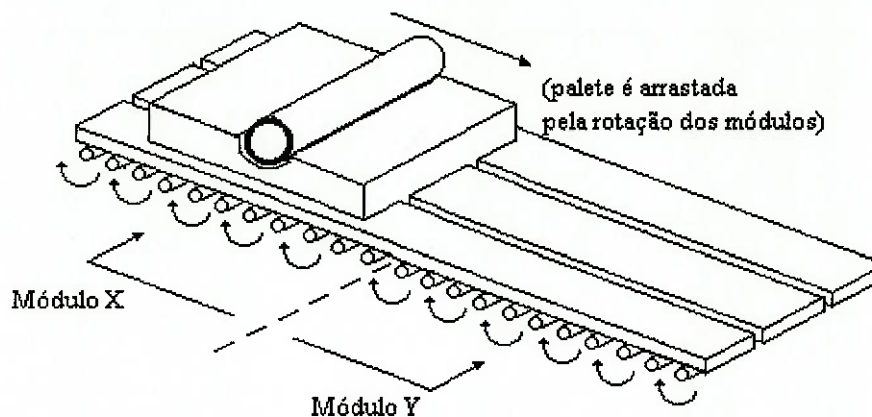


Figura 2.2 - Método de transporte das bobinas de alumínio

Os módulos 2 a 13 formam o chamado “lado oeste”, enquanto que os módulos 15 a 26 formam o “lado leste”. Os módulos 1 e 14 podem se mover lateralmente, sendo destinados a transportar rolos de um lado para o outro. A figura 2.3 mostra, de forma estilizada, o formato geral da esteira e a posição relativa de outros elementos do sistema (laminadora, coletor de restos) em relação a ela. Cada módulo possui um sensor aplicado a

si, do tipo chave de fim de curso ou sensor de proximidade, capaz de reconhecer a presença de uma bobina sobre si. Os sensores são calibrados de forma a que, mesmo que dois módulos vizinhos possuam sensores de tipos diferentes, quando um rolo estiver sendo transportado de um para o outro, um e apenas um deles terá o seu sensor acusando a presença da bobina num determinado instante.

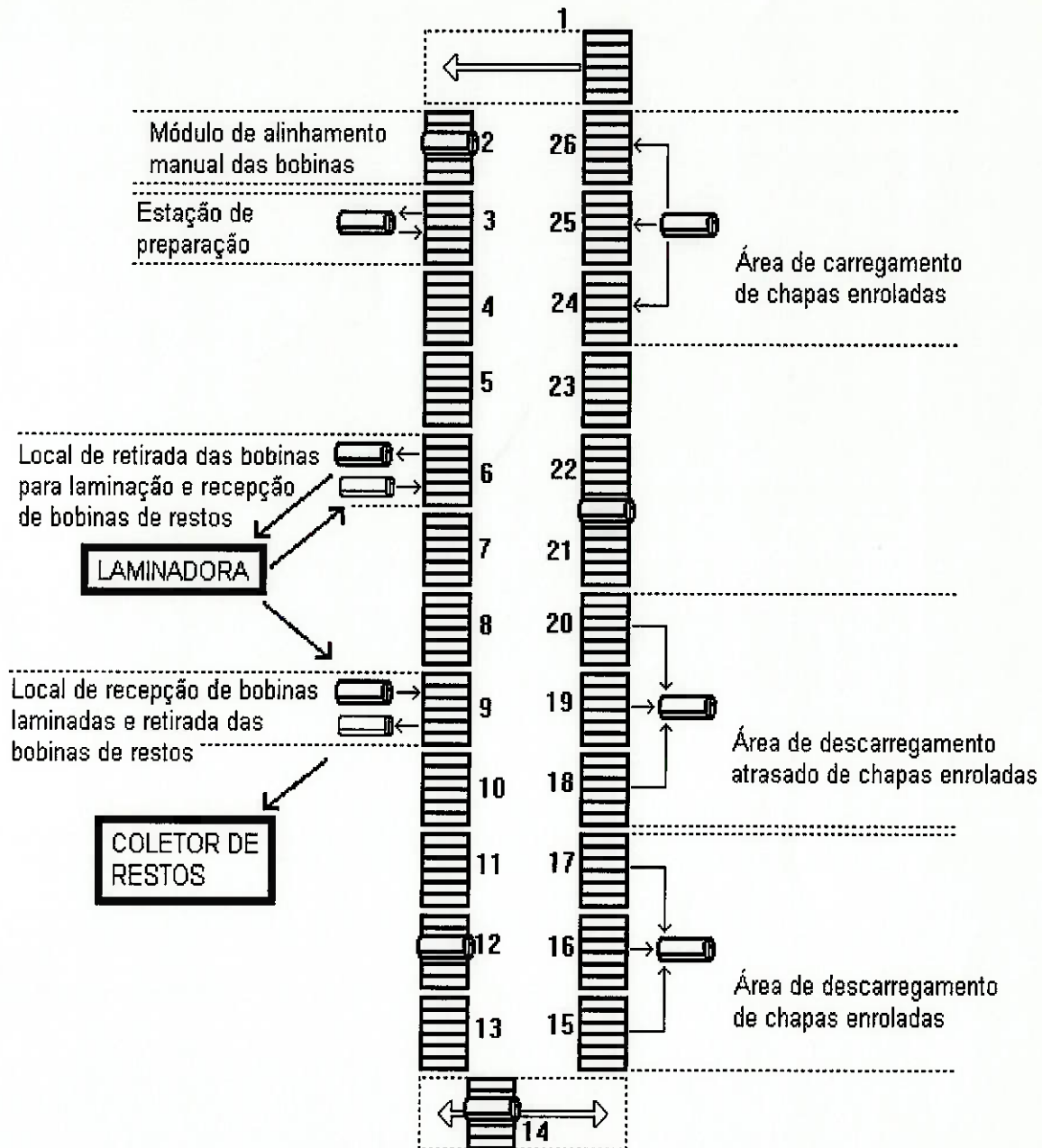


Figura 2.3 - Esquema geral da esteira e posição relativa dos demais elementos do sistema

A interação da esteira com a laminadora e com fatores externos é feita através de módulos determinados. Por exemplo, a ponte rolante que deposita bobinas de alumínio que irão começar a receber o tratamento de laminação só pode fazê-lo nos módulos 24, 25 e 26 (área de carregamento). Um operador humano deve escolher um destes módulos que esteja apto a receber uma bobina (deve estar vazio e parado) e movimentar a ponte de acordo com a escolha. Caso nenhum dos três módulos esteja disponível, o operador deve esperar a liberação de um deles para depositar a carga da ponte.

Sempre que uma bobina recém-chegada à esteira (ou seja, que tenha acabado de ser colocado na área de carga e ainda não tenha passado por laminação) atinge o módulo 2, o funcionamento de toda a esteira é interrompido. Um operador então ajeita manualmente a bobina no módulo 2. Este procedimento é necessário porque as bobinas não são depositadas perfeitamente alinhadas na área de carga, e um eventual desalinhamento poderia causar problemas nos módulos seguintes. Um botão acionado pelo operador reinicia a operação automática do sistema.

O módulo 3, logo em seguida, é a estação de preparação. Uma bobina que tenha acabado de passar pelo ajeitamento manual do módulo 2 é temporariamente retirada da esteira aqui com palete e tudo por meio de um carro que corre sobre um trilho, para ter sua ponta desenrolada e aparada de forma regular. Este procedimento é necessário porque as chapas que chegam a este sistema passam previamente por uma laminadora de alumínio a quente, que deixa irregulares as bordas das chapas. Caso a laminadora a frio tente processar uma chapa de borda de entrada irregular, acabará sofrendo danos. Uma bobina que já tenha passado pelo menos uma vez por este módulo não precisa ter sua borda novamente cortada.

O módulo 6 é o local de onde as bobinas são retiradas da esteira para serem processadas pela laminadora a frio. Elas são retiradas e repostas da mesma forma que no módulo 3, ou seja, por meio de um carro correndo sobre um trilho que recolhe a paleta com a bobina. Cada uma delas deve passar um número fixo de vezes por isso antes de ser

retirada do sistema, e esse número é determinado, conforme já foi comentado, pelas espessuras atual e desejada da chapa de alumínio. Um sensor verifica o diâmetro da chapa enrolada que está sendo carregada na laminadora e assim modifica o espaçamento entre os rolos desta. O trecho final da chapa laminada poderá sobrar: o sistema corta a chapa num tamanho fixo, enrola o resto e o manda de volta à esteira, para que esta leve o resto até o módulo 9.

O módulo 9 possui duas características relevantes: a primeira é que é dele que as bobinas de restos são retiradas da esteira para serem juntadas por um coletor de restos numa só grande bobina (que é substituída sempre que atinge um dado tamanho para fins de reciclagem). A segunda é que é nele que a laminadora deixa as chapas recém-laminadas e recém-cortadas no tamanho exato, para que elas dêem uma volta no sistema e entrem novamente na laminadora pelo módulo 6. Assim como nos módulos 3 e 6, um carro sobre um trilho efetua a retirada e a recolocação das paletes na esteira.

Os módulos 15, 16 e 17 formam a área de descarregamento da esteira, pois são reservados para a retirada das chapas que já tenham passado pelo número total de laminações. Essa retirada é feita pela mesma ponte rolante que entrega as bobinas novas nos módulos 24, 25 e 26. Os módulos 18, 19 e 20 fazem a área de descarregamento atrasado, pois a ponte rolante pode se dirigir para cá em caso de um erro do sistema que permita a passagem de chapas já prontas para além do módulo 17. Caso uma chapa nestas condições atinja o módulo 20, o funcionamento da esteira deve ser totalmente interrompido para que ela seja retirada.

A velocidade do movimento dos módulos é muito baixa para ser necessário se preocupar com sua aceleração ou desaceleração, e essa informação é irrelevante no caso dos carros; assim, para todos os elementos do sistema, sejam eles módulos, carros, sensores ou outros, as informações relevantes são sempre do tipo discreto, ou seja, será muito mais eficiente modelar o sistema da esteira como um sistema a eventos discretos do que como

um sistema a eventos contínuos. Uma forma eficiente de modelar este sistema será o E-MFG, descrito no próximo capítulo.

3) O MFG E O E-MFG

A metodologia MFG (Mark Flow Graph) é uma forma gráfica, derivada das redes de Petri, de se modelar e controlar sistemas a eventos discretos. Ele é composto pelos seguintes elementos estruturais (MIYAGI, 1996; SANTOS Fo., 1995; SANTOS Fo., 1993):

- Box: indica uma condição para a ocorrência de um evento, disponibilidade de um elemento no sistema produtivo, ou uma operação em processo;

- Transição: indica um evento capaz de alterar o estado do sistema modelado, ou o início ou fim de um processo;

- Arco orientado: ligando boxes a transições, mostra a relação entre eventos e condições para, ou decorrentes de, suas ocorrências;

- Marca: mostra a ocorrência de uma condição, disponibilidade de um elemento ou operação em processo, estas já representadas por um box;

- Porta (habilitadora ou inibidora, interna ou externa): habilita ou inibe a ocorrência de um evento, já representado por uma transição, através de um sinal interno (originário de um box) ou externo (vindo de um dispositivo externo).

- Arco de sinal de saída: manda um sinal binário de um box para dispositivos externos.

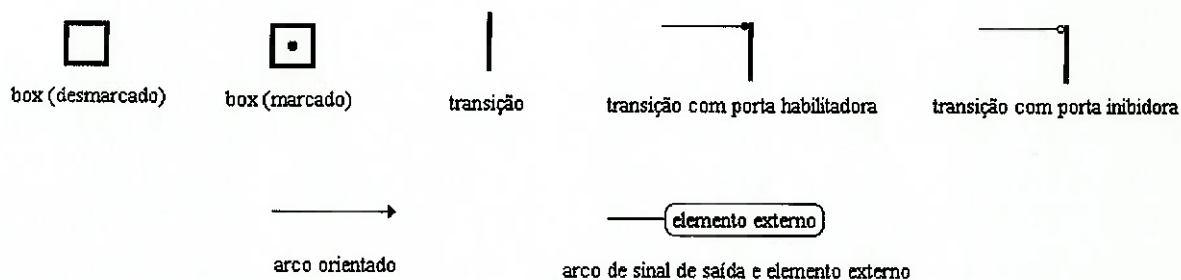


Figura 3.1 - Elementos estruturais do MFG

A evolução temporal do sistema é representada pelo deslocamento das marcas pelo grafo, ou seja, enquanto se diz que cada evento que ocorre no sistema é provocado por um

conjunto de condições satisfeitas, se diz de forma equivalente, em termos de representação em MFG, que cada transição no grafo é disparada por um conjunto de boxes marcados, ligados àquela por arcos orientados dos boxes para a transição.

Para que uma transição dispare, ela precisa antes de mais nada estar habilitada. Para isto, as condições são (SANTOS Fo., 1993):

- Todos os boxes na entrada da transição devem ter uma marca (estar marcados);
- Nenhum box na saída da transição deve ter marca;
- Todas as portas habilitadoras internas aplicadas a essa transição devem ter sinal de origem igual a 1 (o box no outro extremo de cada porta deve estar marcado);
- Todas as portas desabilitadoras internas aplicadas a essa transição devem ter sinal de origem igual a 0 (o box no outro extremo de cada porta deve estar desmarcado).

Além de estar habilitada, uma transição será disparável se (SANTOS Fo., 1993):

- Todas as portas habilitadoras externas estiverem no estado habilitado;
- Todas as portas desabilitadoras externas estiverem no estado desabilitado.

A figura 3.2 ilustra uma transição disparável e a marcação do grafo MFG antes e depois do disparo. Deve-se observar que, não sendo a transição temporizada e não havendo boxes temporizados envolvidos (explicação sobre estes termos a seguir), a mudança na marcação do grafo ocorre no mesmo instante em que a transição se torna disparável.

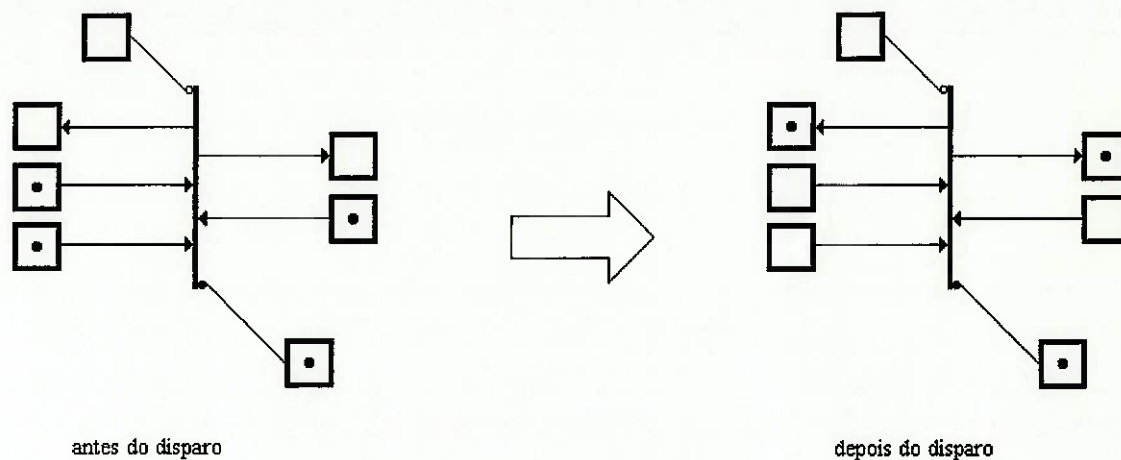


Figura 3.2 - Situação de um grafo MFG antes e depois do disparo de uma transição

Nenhum dos elementos estruturais do MFG citados anteriormente leva em conta o elemento tempo em suas características. Assim, existem os seguintes elementos extras no MFG, para utilização quando o tempo é um fator relevante na dinâmica do sistema controlado (MIYAGI, 1996; SANTOS Fo., 1993):

- Box temporizado: tem associado a si, a partir do momento em que é marcado, um intervalo de tempo durante o qual suas transições de saída não podem ser disparadas, ou seja, ele “prende” a marca durante esse intervalo de tempo;
- Transição temporizada: a partir do momento em que esta transição se torna disparável, começa a ser contado um intervalo de tempo que lhe é associado, e só após o término desse intervalo de tempo a transição é disparada; porém, caso uma das condições que torna a transição disparável se invalide durante a passagem do intervalo de tempo, a contagem de tempo é interrompida, e a transição não disparará mais por enquanto.



Figura 3.3 - Elementos estruturais do MFG temporizados

O E-MFG (Extended MFG) é uma metodologia de modelagem derivada do MFG (Mark Flow Graph) original, e como este é utilizado para modelar e controlar sistemas a eventos discretos. Dentre as diferenças entre ambos, destacam-se (SANTOS Fo., 1995; SANTOS Fo., 1993):

- a possibilidade de uma marca ser individualizada por um vetor de atributos;
- a possibilidade de uma transição possuir regras adicionais de disparo dependentes dos atributos das marcas nos boxes que representam suas pré-condições.

O significado dos itens acima é que uma marca pode carregar consigo atributos, ao contrário das marcas do MFG comum que são totalmente abstratas e idênticas entre si. A natureza dos atributos que uma marca E-MFG pode carregar é definida para todo o grafo; por exemplo, para um determinado grafo, os atributos podem ser $\langle a1, a2, a3, a4 \rangle$, onde $a1$ é o nome de uma peça, $a2$ é o nome de uma máquina, $a3$ indica o processo que deve ser executado na peça pela máquina e $a4$ é um código de composição, que será explicado mais adiante.

Os atributos das marcas podem ser alterados por um novo elemento, o box controlador (figura 3.4), através de relações se-então; ou pela filtragem seletiva, forma de se fazer um atributo “desaparecer” (tornar-se indefinido) ao se passar sua marca correspondente de um lado para o outro de uma transição (figura 3.4). (Deve-se observar que, se uma marca possui atributos, eles não precisam estar necessariamente definidos o tempo inteiro.) Outros elementos estruturais do E-MFG além do box controlador são:

- Box capacidade: capaz de armazenar até um número $N > 1$ de marcas em seu interior. Essas marcas mantêm entre si sua individualidade. O box capacidade pode ser tipo fila ou tipo pilha, dependendo da ordem em que as marcas armazenadas saem do box (figura 3.4);
- Box agrupador: também capaz de armazenar um número $N > 1$ de marcas em seu interior, porém suas transições de saída só dispararão quando houverem exatamente N marcas ali, e a marca de saída será uma única marca composta, com todos os atributos indefinidos com exceção de um: o código de composição (a4 no exemplo dado anteriormente) que permite identificar as marcas individuais no interior da composição (figura 3.4);
- Box dispersor: recebendo na entrada uma única marca composta, sua função é decompô-la, gerando na saída, uma a uma, tantas marcas forem as contidas na marca composta. Dependendo do tipo de box dispersor, a primeira marca a sair pode ser a primeira da composição ou a última (figura 3.4);
- Box temporizador: semelhante ao box temporizado do MFG, porém, ao invés de possuir um intervalo de tempo fixo associado a si, esse intervalo de tempo é definido por um dos atributos da marca que entra no box.

Cabe lembrar que no F-MFG (Functional MFG), variação do MFG anterior ao E-MFG, já existiam os boxes capacidade, agrupador e dispersor, porém sem individualização das marcas.

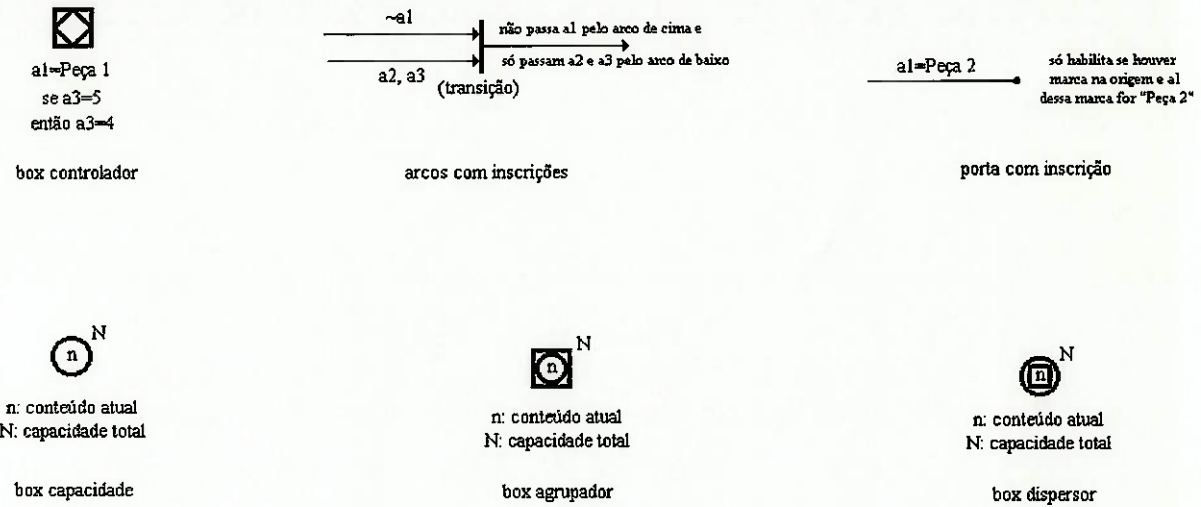


Figura 3.4 - Elementos estruturais extras do E-MFG

A utilização da metodologia E-MFG em lugar da MFG é justificada quando se é possível simplificar grafos MFG demasiadamente complexos pela adoção das particularidades do E-MFG. No caso deste trabalho, por exemplo, cada bobina encontrada no sistema deve percorrer um determinado percurso e sofrer determinadas operações repetidamente por um número finito de vezes. Percursos e operações idênticas geram trechos MFG idênticos; um grafo gigantesco formado por trechos idênticos entre si pode ser evitado fazendo-se um único desses trechos como um circuito fechado e utilizando-se um número finito, decrementado a cada fim de ciclo, como atributo indicador de quantas vezes aquele circuito deve ser repetido. Este comentário será ilustrado pela própria solução encontrada para o problema.

4) MODELO DO CONTROLE PROJETADO POR E-MFG

Este capítulo irá apresentar um modo de controle da esteira considerado adequado às necessidades expressas no capítulo 2, expresso em grafos MFG e E-MFG. Antes da apresentação dos grafos, serão feitos alguns comentários sobre elementos que tiveram de ser levados em conta em sua confecção.

4.1) A QUESTÃO DO TEMPO

Na confecção dos grafos E-MFG que representam a solução encontrada para o problema proposto, deve-se levar em conta a forma com que a passagem do tempo influi na dinâmica dos grafos.

Conforme já foi exposto, a esteira transportadora real possui sensores em cada um de seus módulos com a função de detectar a presença ou ausência de paletes sobre si. Idealmente, o controle da esteira deveria ser baseado apenas nas informações deduzíveis a partir do estado de cada sensor no sistema, pois é fácil monitorar paralelamente o estado destes para uma verificação imediata de falha em um deles; e, sendo isso possível, não haveria motivo para se fazer diferente, tanto no caso real como na simulação. Assim, ao invés de se usar boxes e transições temporizadas para controlar a dinâmica temporal dos grafos de controle, optou-se primordialmente por controlar essa dinâmica a partir de portas habilitadoras saindo dos sensores e agindo sobre as transições não temporizadas dos grafos do sistema de controle; e, na simulação da esteira, esses sensores seriam modelados como elementos temporizados. Essa decisão será ilustrada na exposição dos grafos projetados.

Detalhe: o movimento dos módulo da esteira real é lento o suficiente para se desprezar os períodos de aceleração e desaceleração dos mesmos. Isso permite que o

controle sobre os módulos seja baseado apenas no estado dos sensores; caso, por exemplo, o tempo de desaceleração de um módulo fosse considerável, assim como o deslocamento de uma paleta sobre ele durante esse tempo, não haveria informação dedutível de sensores que pudesse informar em que momento essa desaceleração deveria começar, obrigando ao uso de elementos de MFG temporizados para uma avaliação desse instante.

4.2) O COMPORTAMENTO DOS ELEMENTOS EXTERNOS

Quanto aos demais elementos do sistema da esteira, eles podem ser divididos em duas categorias de acordo com a forma pela qual sua influência no funcionamento da esteira é modelada:

- as pontes rolantes que entregam bobinas nos módulos 24 a 26 e as recolhem nos módulos 15 a 20 têm comportamento aleatório do ponto de vista do sistema, visto serem controladas puramente por seres humanos; sua ação na esteira é detectada por variações específicas no estado dos sensores dos módulos citados que só podem ocorrer após sua intervenção. Na simulação, o usuário ordenará manualmente a colocação e a retirada de bobinas, havendo também a opção de simplesmente permitir uma colocação automática com intervalos de tempo aleatórios entre cada entrega;
- O funcionamento da laminadora, dos carros associados aos módulos 3, 6 e 9 e dos sistemas de retirada e colocação de paletes nestes módulos pode ser simulado da mesma forma que a dinâmica dos módulos, ou seja, com uma temporização do funcionamento dos sensores daqueles módulos.

4.3) GRAFOS CONFECCIONADOS: APRESENTAÇÃO EM DETALHES

De acordo com a prática recomendada no projeto de grafos MFG, o grafo do problema em questão foi dividido na representação dos chamados objeto de controle e sistema de controle.

Este objeto de controle foi representado por vinte e seis grafos MFG separados, cada um deles modelando o comportamento de um dos módulos da esteira transportadora em estudo. Entretanto, todos os vinte e seis módulos, com duas exceções, são idênticos entre si. O grafo que modela o comportamento dos módulos 2 a 13 e 15 a 26 é mostrado na figura 4.1, particularizado como modelo do módulo 8:

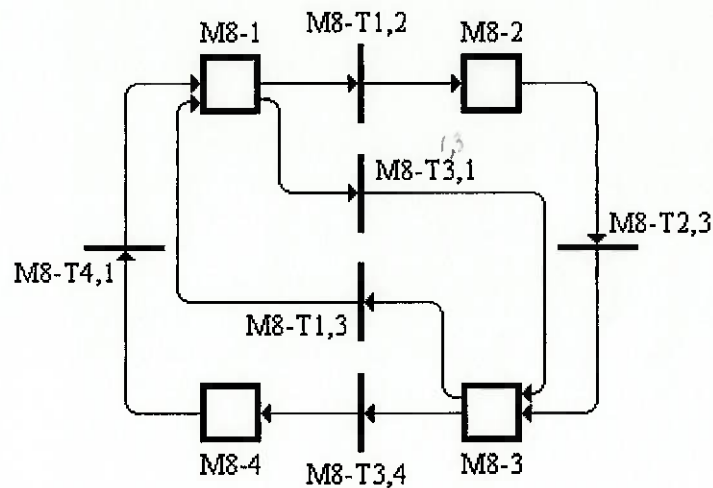


Figura 4.1 - Modelo MFG do comportamento do módulo 8

A função de cada box do grafo da figura 4.1 é descrita a seguir:

- M8-1 - Uma marca neste box significa que o módulo 8 encontra-se vazio, ou seja, não tem uma paleta sobre si, e desativado, ou seja, seus rolos não estão se movendo. Este é o estado em que o grafo é inicializado.

- M8-2 - Movimento de recepção estabelecido. Os rolos do módulo 8 estão se movendo e uma paleta com bobina está sendo passada do módulo 7 a ele.
- M8-3 - O módulo 8 está desativado e carrega uma paleta com uma bobina de alumínio.
- M8-4 - Movimento de passagem estabelecido. Os rolos do módulo 8 estão se movendo e uma paleta está sendo transferida dele ao módulo 9.

A notação utilizada na figura 4.1 para denominar os boxes e transições será estendida aos modelos dos demais módulos de 2 a 13 e 15 a 26. Assim, M10-1 representa um box do grafo do módulo 10 equivalente em função ao box M8-1; M21-T1,2 representa uma transição do grafo do módulo 21 equivalente em função à transição M8-T1,2. É importante frisar que, pelo grafo da figura ser um modelo genérico para vinte e quatro grafos realmente implementados, não foi representada nenhuma porta habilitadora ou inibidora associada às transições do grafo; elas variam de módulo para módulo e estão representadas nos desenhos do sistema de controle, como se verá mais adiante. Existem três coisas, porém, que devem ser ditas acerca do grafo acima;

- Em muitos dos módulos (todos eles exceto os de 15 a 20), a transição T3,1 não existe;
- Nos grafos dos módulos 3, 24, 25 e 26, existem duas transições T1,3. Isso ocorre porque existem duas portas que podem liberar a passagem de uma marca do box 1 para o box 3, e elas não precisam estar acionadas ao mesmo tempo para que a passagem de marca ocorra; assim, cada uma delas age sobre uma das transições T1,3 separadamente. Caso ambas as portas estivessem agindo sobre a mesma transição, esta só dispararia quando as portas estivessem acionadas ao mesmo tempo;
- Pelos mesmos motivos expostos acima, os grafos dos módulos 6 e 9 possuem três transições T1,3.

No caso da implementação na esteira de verdade, os boxes do grafo acima seriam reconhecidos pelo estado do sensor e do motor associados a um dado módulo. Por exemplo:

o motor do módulo 8 desligado e o sensor do módulo 8 idem representam a marcação do box M8-1.

Os módulos 1 e 14, que se diferenciam dos demais por sua capacidade de se mover lateralmente, têm seu comportamento modelado pelo grafo da figura 4.2, particularizado para o caso do módulo 1:

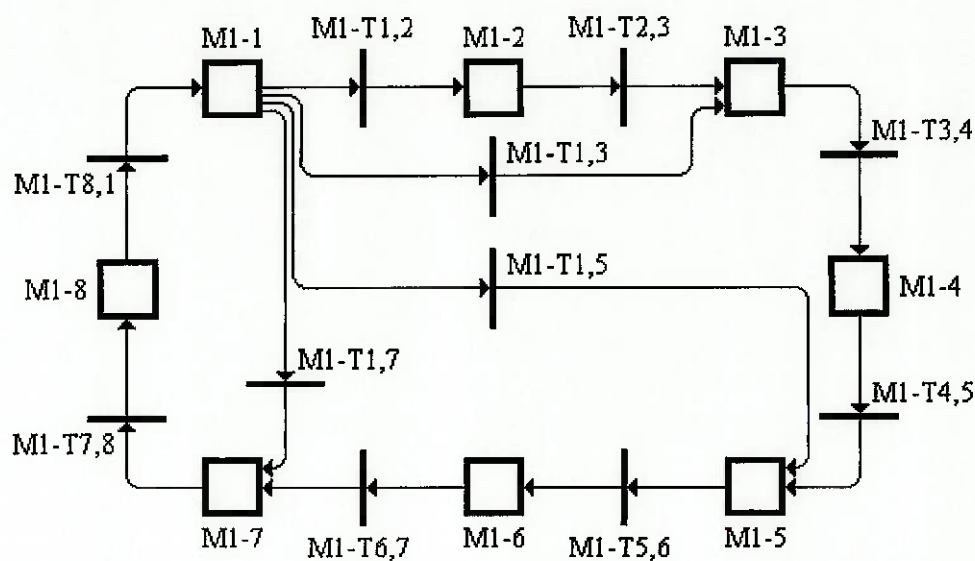


Figura 4.2 - Modelo MFG do comportamento do módulo 1

Cada box na figura 4.2 tem o seguinte significado:

- M1-1 - Uma marca neste box significa que o módulo 1 encontra-se vazio, ou seja, não tem uma paleta sobre si, e desativado, ou seja, seus rolos não estão se movendo. Além disso, está em sua posição original, vizinha ao módulo 26. Este é o estado em que o grafo é inicializado.
- M1-2 - Movimento de recepção estabelecido. Os rolos do módulo 1 estão se movendo e uma paleta com bobina está sendo passada do módulo 26 ao 1.
- M1-3 - O módulo 1 está desativado, em sua posição original e carrega uma paleta com uma bobina de alumínio.

- M1-4 - Movimento lateral de avanço estabelecido. O módulo 1 começa a se alinhar ao módulo 2.
- M1-5 - O módulo 1 está desativado e carrega uma paleta com uma bobina de alumínio fora de sua posição original (está ao lado do módulo 2 agora).
- M1-6 - Movimento de passagem estabelecido no módulo 1. Este encontra-se passando sua bobina ao módulo 2.
- M1-7 - O módulo 1 está desativado, fora de sua posição original e vazio.
- M1-8 - Movimento lateral de retorno estabelecido. O módulo 1, desocupado, inicia o retorno a sua posição original, adjacente ao módulo 26.

Seguindo o exemplo do primeiro modelo, os boxes e as transições do grafo do módulo 14 são representados utilizando-se a notação apresentada na figura 4.2 para o grafo do módulo 1. Da mesma forma, não foram representadas portas habilitadoras e inibidoras nas transições. Também, um sistema real reconheceria qual box do grafo acima estaria marcado num determinado momento pelo estado dos sensores e motores associados ao módulo em questão.

Quanto ao projeto do grafo principal do sistema de controle (será dito principal devido à existência dos blocos [ESTEIRA PARADA], [ESTEIRA PRONTA] e [LAMINAÇÃO EM PROCESSO], apresentados em momento oportuno mais adiante), a abordagem PFS (Production Flow Schema) foi utilizada como forma de facilitá-lo. A figura 4.3 traz o grafo PFS obtido:

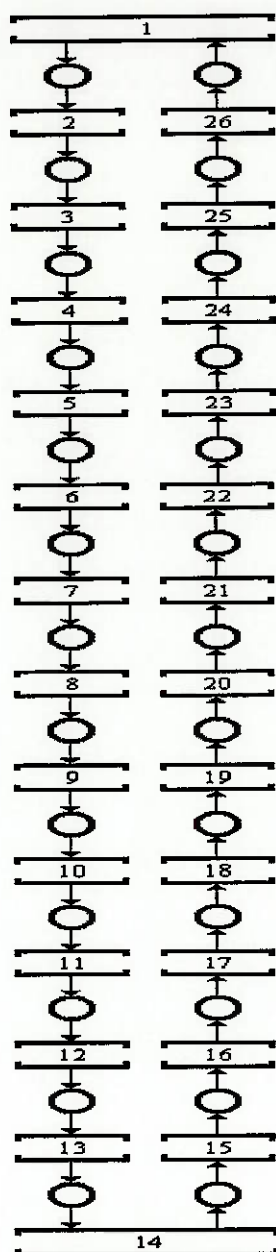


Figura 4.3 - Grafo principal (PFS) do sistema de controle

É notável a semelhança visual deste grafo com a própria esteira transportadora em estudo. Isto porque cada uma das partes numeradas do grafo está relacionada com a passagem das bobinas de alumínio pelo módulo de mesmo número.

Cada marca que trafega pelo grafo da figura 4.3 é uma marca E-MFG que representa uma bobina sendo transportada pela esteira. Uma marca assim possui três atributos:

- a1 - Um código de identificação para a bobina representada.
- a2 - O número programado de vezes que a bobina deve passar pela laminadora.
- a3 - Uma variável booleana que indica se a bobina já passou pela preparação feita no módulo 3 às bobinas recém-chegadas ao sistema. S indica que sim, N indica que não.

Formas possíveis de se passar estes atributos para o sistema de controle incluem a digitação manual por parte de um operador sempre que as bobinas correspondentes entrarem no sistema, ou o uso de etiquetas sobre as bobinas com os atributos presentes de uma forma facilmente identificável por uma máquina (por exemplo, os atributos podem estar codificados em código de barras, e um leitor de barras pode rapidamente obtê-los assim que as bobinas correspondentes chegarem à esteira).

Cada um dos trechos numerados da figura 4.3 está representado em detalhe nos grafos que se seguem neste capítulo.

Caso não houvesse movimento lateral nos módulos 1 e 14, nem retirada de bobinas e colocação de novas, nem operação de laminação, ou seja, se a operação da esteira se resumisse a transportar bobinas numa trajetória retilínea infinita, então todos os (infinitos) trechos seriam idênticos ao representado na figura 4.4:

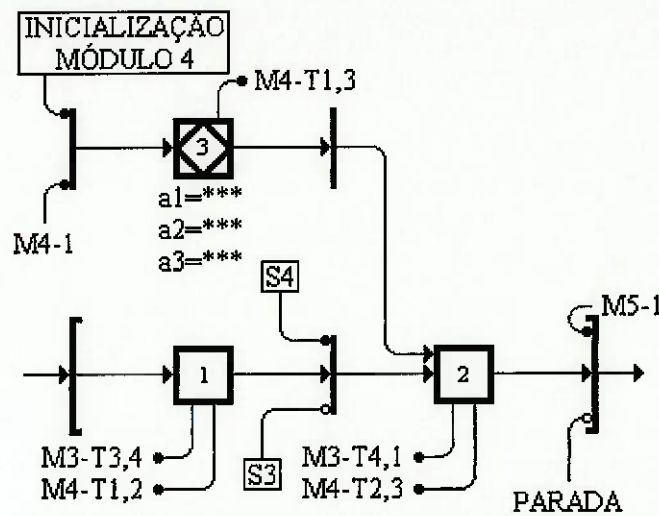


Figura 4.4 - Detalhamento da parte [4] do grafo PFS do sistema de controle

O trecho [4] foi escolhido arbitrariamente dentre aqueles correspondentes a módulos onde nada de especial ocorre, pois estes trechos são idênticos entre si.

Antes da explicação do grafo da figura 4.4, deve-se expor o bloco [ESTEIRA PARADA]:

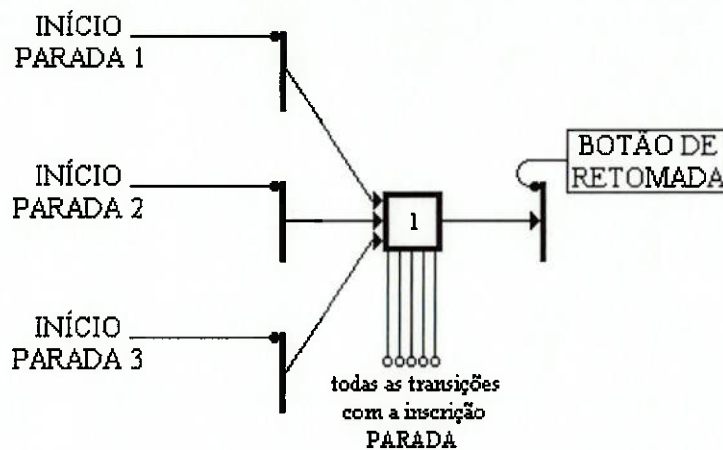


Figura 4.5 - Detalhamento do bloco [ESTEIRA PARADA] do sistema de controle

Esse bloco implementa uma situação que ocorre algumas vezes durante o funcionamento da esteira, a de que todos os módulos desativados devem permanecer assim

até o acionamento de um botão de retomada de funcionamento, enquanto que os módulos em movimento devem completar sua atividade corrente para então permanecerem desativados (por exemplo, se uma bobina está sendo transferida do módulo 5 para o 6 durante a ordem de parada da esteira, essa transferência será completada antes da parada destes dois módulos). As transições INÍCIO PARADA 1 e INÍCIO PARADA 2 são disparadas por portas provenientes de boxes de dentro do sistema de controle, e portanto interrompem o funcionamento da esteira sem a interferência direta de um operador humano; já INÍCIO PARADA 3 é acionada por um botão externo.

O box 1 do bloco [ESTEIRA PARADA] é o único box dos grafos de sistema de controle a ser inicializado marcado, ou seja, a esteira é mantida paralisada durante a ativação do sistema de controle. Dele partem portas inibidoras com destino a todas as transições anteriores a boxes que comandam ou o início do acionamento de algum par de módulos, ou o início do movimento lateral dos módulos 1 e 14, ou o acionamento dos carros associados aos módulos 3, 6 e 9. Ele possui tantas transições de entrada quanto forem as chamadas ao bloco pelo resto do sistema de controle, que neste caso são duas, e possui uma transição de saída habilitada apenas pelo acionamento do botão de retomada de funcionamento.

Voltando ao grafo do trecho [4], serão descritos os significados de cada um de seus três boxes:

- Box 1 - Uma marca só atinge este box se o módulo 4 estiver desativado e vazio (box M4-1 marcado) e se o módulo 3 estiver desativado e ocupado (box M3-3 ocupado). O box 1 do trecho [4] comanda a transferência da paleta com bobina do módulo 3 para o módulo 4. Ele habilita, nos grafos de objeto de controle correspondentes aos módulos 3 e 4, a marcação dos boxes M3-4 e M4-2, que indicam movimento nos rolos dos módulos. É dele também que sai a ordem física de acionamento para os motores dos módulos.

- Box 2 - Só é marcado quando o evento de ativação de S4 (sensor associado ao módulo 4) e desativação de S3 indicarem que a transferência da paleta foi completada. A avaliação dos dois sensores é necessária porque a calibração dos sensores não é perfeita: pode existir uma janela de tempo de 2ms durante a qual ambos os sensores estão ativados ou ambos estão desativados. Esse box dá a ordem física de parada dos motores dos módulos 3 e 4, assim como permite a marcação dos boxes M3-1 e M4-3. Para que a marca no box 2 avance, o módulo 5 precisa estar desativado e vazio, e o bloco [ESTEIRA PARADA] não pode estar exercendo sua influência.
- Box 3 - Este box está ligado às reinicializações em que a operação da esteira é retomada com a presença de bobinas sobre ela, e é importante frisar que só é marcado nessa situação. Caso a esteira seja reinicializada com a presença de uma paleta no módulo 4, a ordem INICIALIZAÇÃO MÓDULO 4 habilita o surgimento de uma nova marca no box 3. Essa marca recebe os mesmos atributos que possuía antes da interrupção do sistema, inclusive o atributo a3 que sempre tem o valor N nas marcas geradas nos trechos 24, 25 e 26 e associadas ao recebimento de novas bobinas pela esteira. Ao mesmo tempo, o box M4-3 é marcado, indicando módulo 4 desativado e ocupado. Quando a marca passa ao box 2, ela não causa nenhum efeito, pois, como a esteira está sendo reinicializada, nenhum módulo está em movimento, e assim M3-4 e M4-2 não podem estar marcados (e inclusive não poderão enquanto houver uma marca no trecho [4] - a razão será exposta mais adiante). A marca será mantida ali pela ação de [ESTEIRA PARADA], até que o botão de retomada de operação seja acionado. A condição de M4-1 estar marcado para o disparo da transição de entrada do box 3 impede o aparecimento de uma nova marca neste quando o box 2 é ocupado.

Uma olhada nos grafos dos demais trechos presentes nas páginas seguintes mostra que todos eles possuem em seus boxes 1, 2 e 3 uma estrutura muito semelhante à ilustrada para o trecho [4]. Além disso, também possuem condições idênticas de disparo para a última transição do trecho. Uma observação mais atenciosa do conjunto de grafos permitirá algumas deduções:

- Só poderá haver uma marca com atributos no interior de cada trecho. No exemplo do trecho 4, enquanto houver uma marca nos boxes 1 e 2, o módulo 4 nunca estará parado e vazio, portanto M4-1 não poderá estar marcado e a última transição do trecho 3 não poderá ser disparada. No instante em que houver uma marca no box 3 e a ordem de habilitar a transição M4-T1,3 não houver sido obedecida, o bloco [ESTEIRA PARADA] não permitirá o disparo da última transição do trecho 3. Razões semelhantes existem para cada um dos vinte e seis trechos. No caso dos trechos que permitem a geração de novas marcas, estas não possuem atributos, por não representarem bobinas, e não percorrem o mesmo caminho das marcas com atributos. O resultado de tudo isto é que, dependendo da implementação utilizada do E-MFG em um equipamento como um CLP, fica fácil identificar uma marca em relação às outras pelo trecho em que ela se encontra;
- Enquanto cada box 1 indica de forma geral o transporte de bobina do módulo anterior para o módulo atual (por atual entende-se correspondente àquele trecho), cada box 2 indica o repouso de uma bobina naquele módulo. É por isso que todas as transições de saída de um box 2 podem ser inibidas por [ESTEIRA PARADA];
- Após uma reinicialização com presença de bobinas na esteira, antes que o botão de retomada seja ativado, todas as marcas geradas em boxes 3 estarão paradas em boxes 2, refletindo a realidade do sistema.

Quando uma bobina chega à esteira pelo caminho próprio, ou seja, sendo entregue pela ponte rolante ao invés de ser registrada numa reinicialização, uma marca é gerada no trecho 24, 25 ou 26. Estes estão ilustrados a seguir:

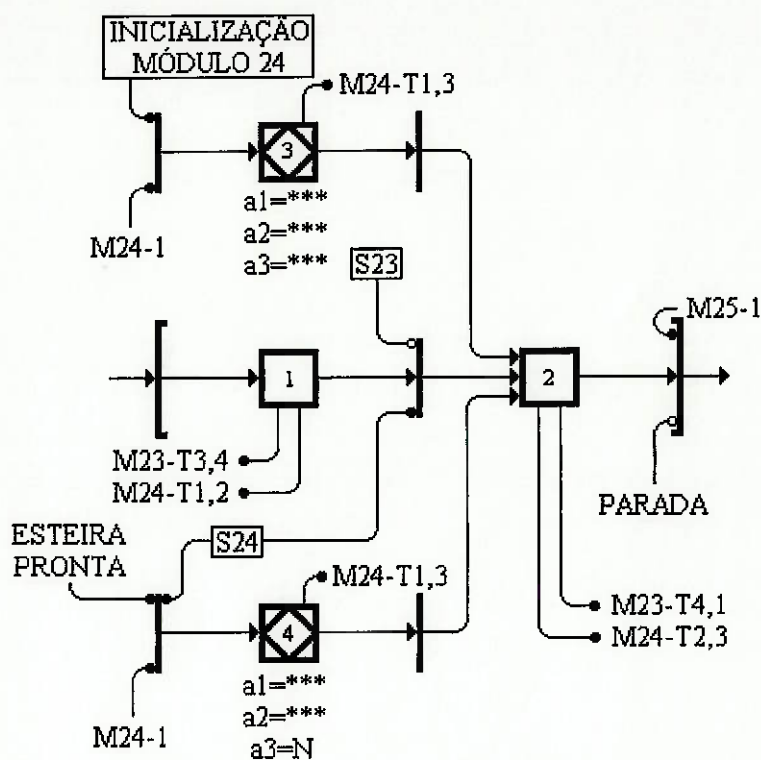


Figura 4.6 - Detalhamento da parte [24] do grafo PFS do sistema de controle

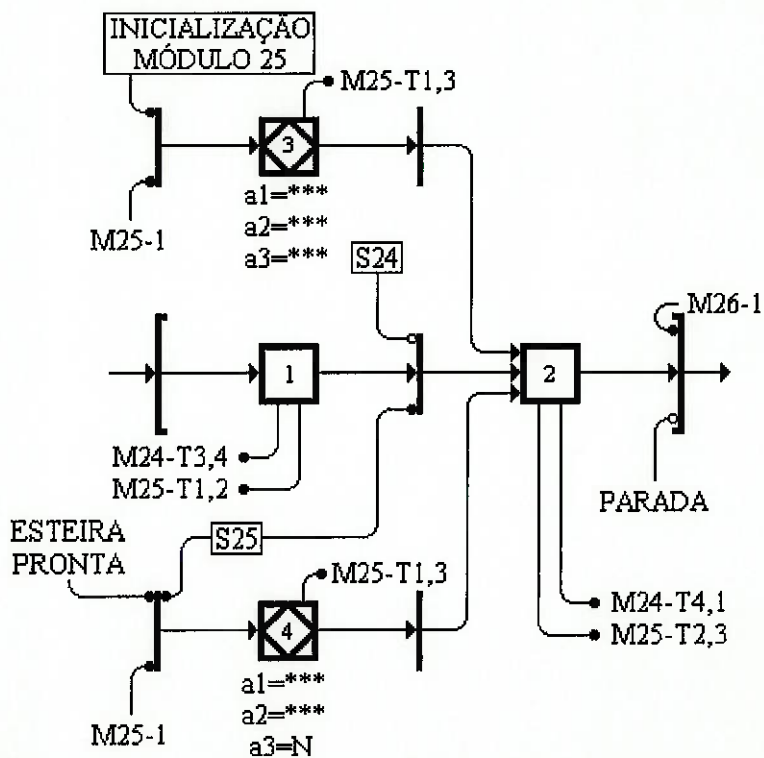


Figura 4.7 - Detalhamento da parte [25] do grafo PFS do sistema de controle

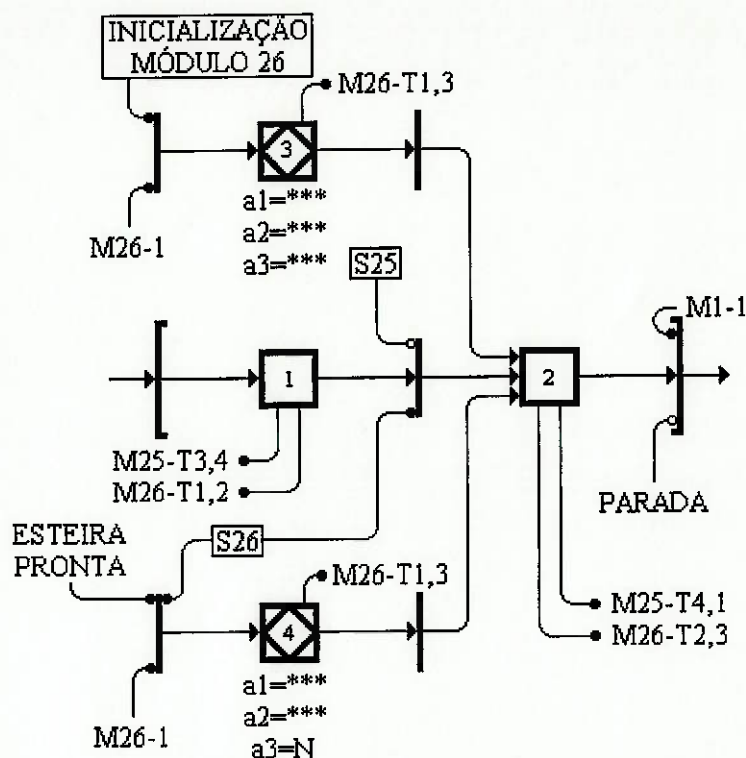


Figura 4.8 - Detalhamento da parte [26] do grafo PFS do sistema de controle

Como os três grafos são idênticos, apenas o grafo [24] será explicado. Entretanto, é preciso expor antes o funcionamento do bloco [ESTEIRA PRONTA]:

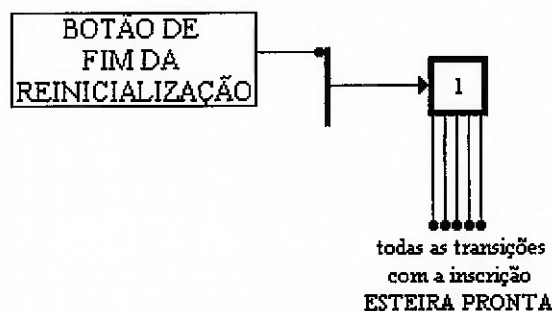


Figura 4.9 - Detalhamento do bloco [ESTEIRA PRONTA] do sistema de controle

Uma marca no box único deste bloco indica que as ordens de uma eventual reinicialização, ou mesmo de uma inicialização sem quaisquer bobinas já presentes na esteira, já foram processadas e a esteira já pode entrar no que seria chamado de “funcionamento normal”. Essa marca apareceria quando um operador apertasse um botão

de fim da reinicialização alguns segundos depois das ordens desta haverem sido recebidas pelo CLP. O uso deste botão seria necessário mesmo no caso de não haver nenhuma paleta já na esteira, ou seja, no caso de uma inicialização normal. A marca se manteria ali até um eventual desligamento do CLP.

Voltando ao trecho [24] do grafo principal, a função dos boxes 1, 2 e 3 já foi exposta. O box 4 é responsável pelo registro de uma bobina recém-entregue pela ponte rolante. Caso o sensor S24 acuse a presença de uma paleta enquanto o módulo estiver desativado, fica claro que houve uma entrega de bobina, e sistema responde criando uma nova marca e dando a ela os atributos necessários. O problema está no caso de uma reinicialização com presença de bobina no módulo 24 em que os sensores já estejam em funcionamento quando o sistema de controle começar a funcionar, pois o sistema de controle poderia interpretar a bobina já presente durante a reinicialização como uma bobina chegada da ponte rolante. Daí a presença da porta habilitadora vinda de [ESTEIRA PRONTA] aplicada à transição de entrada de 4.

Após ser entregue num dos três módulos acima e seguir adiante, a paleta ocupada passa ao módulo 1:

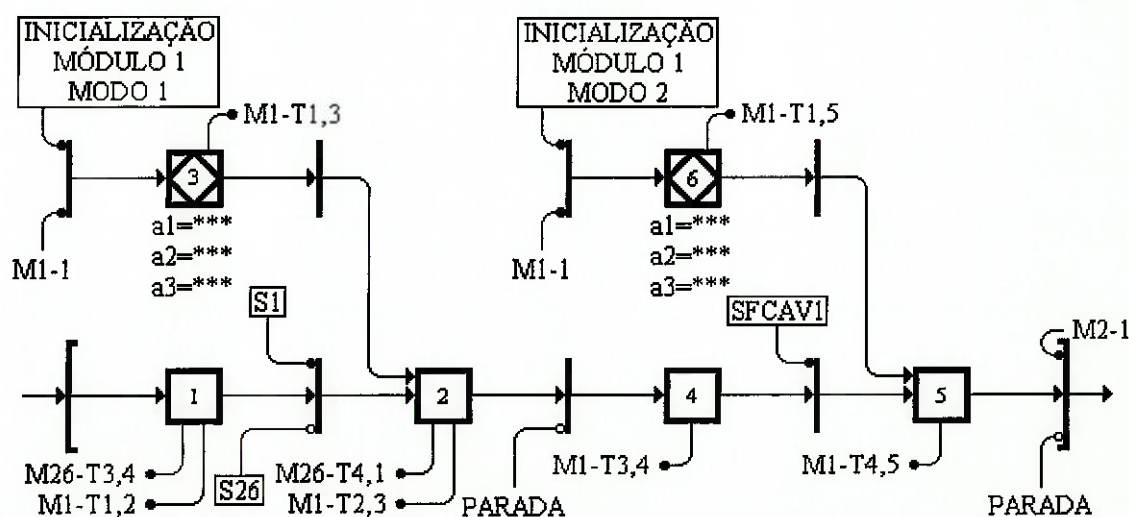


Figura 4.10 - Detalhamento da parte [1] do grafo PFS do sistema de controle

O que salta aos olhos no grafo acima são os modos de inicialização do módulo 1, que são:

- Modo 1 - o módulo está ocupado e alinhado com o módulo 26. O deslocamento lateral para o lado oeste deve iniciar-se imediatamente.
- Modo 2 - o módulo está ocupado e alinhado com o módulo 2. A próxima ação é entregar sua paleta ao módulo 2, caso este esteja vazio.
- Modo 3 - o módulo está vazio e alinhado com o módulo 2. Este modo está implementado no trecho [2]. Neste caso, o deslocamento lateral para o lado leste deve ser comandado de imediato.

Deve-se lembrar que o módulo 1, assim como o 14, possui características diferentes dos demais módulos, assim como um grafo de objeto de controle diferente. Após o box 2, procede-se ao deslocamento lateral do módulo, através do box 4, que comanda os motores que levam o módulo do lado leste da esteira para o oeste. Após o disparo de SFCAv1 (sensor de fim de curso do avanço do módulo 1), o box 5 desativa esses motores. O módulo 1 agora aguarda adjacente ao módulo 2 por uma oportunidade de passar sua carga.

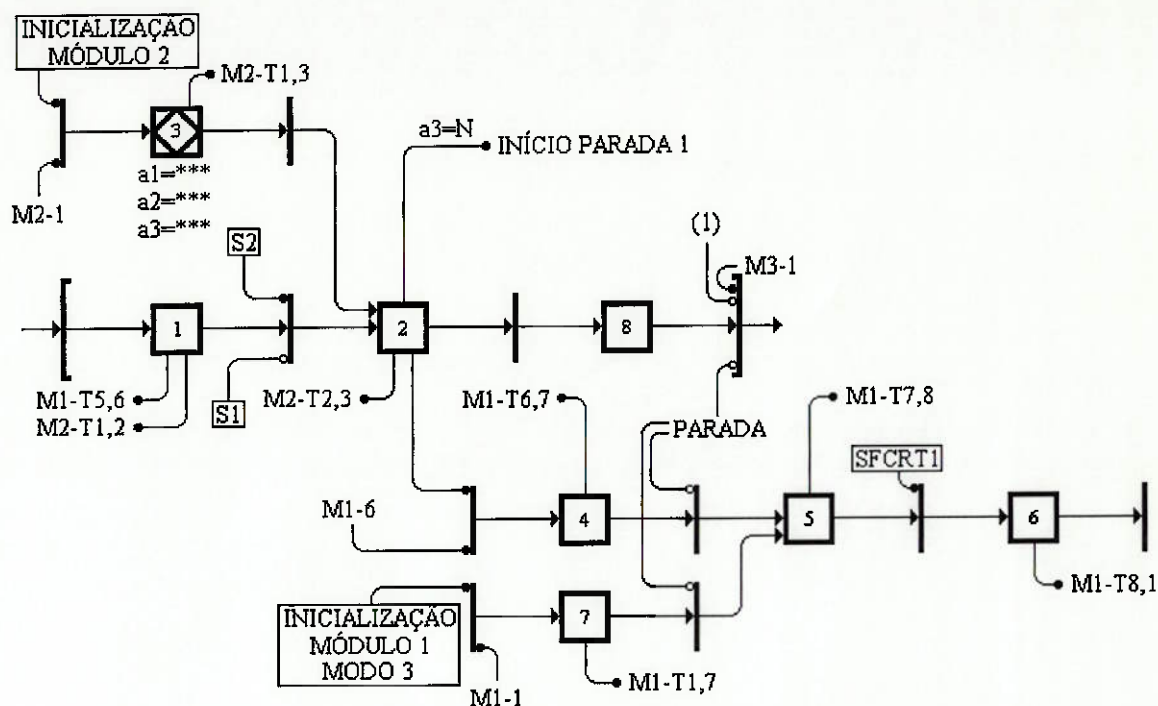


Figura 4.11 - Detalhamento da parte [2] do grafo PFS do sistema de controle

Três aspectos do grafo acima devem ser citados:

- A chamada ao bloco [ESTEIRA PARADA] no caso de a bobina ser recém-chegada e necessitar de ajuste manual na esteira (caso em que $a3=N$). Assim que o operador concluir sua atividade e pressionar um botão de retomada da operação, esta continua normalmente. O box 8 existe para que [ESTEIRA PARADA] não seja chamado continuamente caso o módulo 3 não esteja livre para o prosseguimento do caminho da marca.
- O caminho formado pelos boxes 4/7, 5 e 6. O fim da atividade do módulo 1 não pode ser comandado apenas por uma habilitação vinda do box 2 como em todos os outros trechos, pois o módulo 1 ainda necessita mover-se lateralmente para retornar à sua condição original; então, projetou-se o trecho de forma que uma habilitação vinda do box 2 gerasse uma marca auxiliar que realizasse a função de resolver o problema do módulo 1 e depois se dissipasse. Essa marca não representa nenhuma bobina, e não possui nenhum atributo. O box 5 ativa os motores de retorno do módulo 1, e o box 6 os

desliga após o disparo de SFCRt1 (sensor de fim de curso no retorno do módulo 1). A passagem da marca auxiliar ao box 5 pode ser inibida por [ESTEIRA PARADA], impedindo o movimento lateral do módulo 1. Essa marca também pode ser gerada pela inicialização do módulo 1 no modo 3.

- A porta (1), cujo box associado encontra-se no trecho [3], impede que a bobina no módulo 2 seja transportada para o módulo 3 caso este último esteja vazio, porém esperando o retorno de uma bobina que esteja sofrendo o processo de preparação ao largo da esteira.

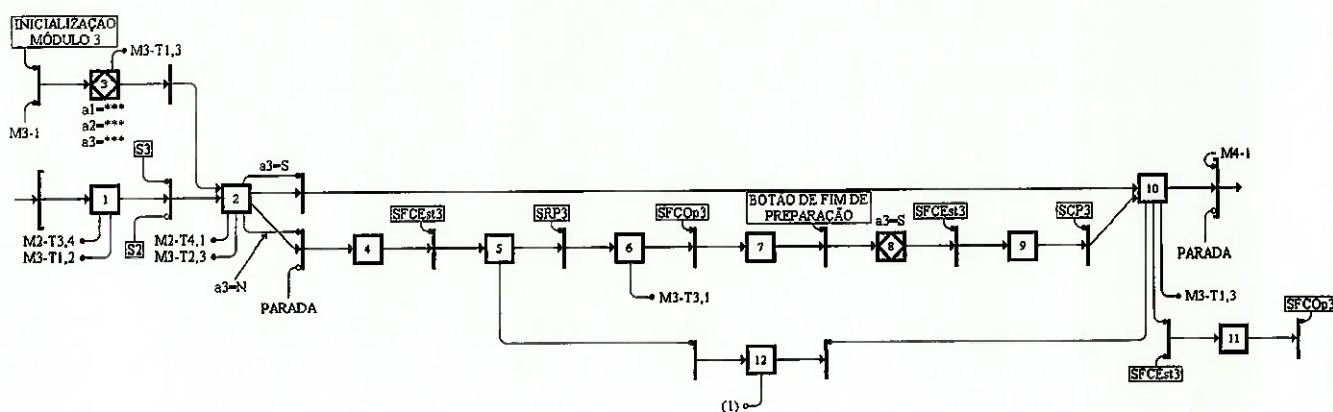


Figura 4.12 - Detalhamento da parte [3] do grafo PFS do sistema de controle

No módulo 3, o interesse está no caminho seguido pela marca no caso de ela ser recém-chegada à esteira (quando $a3=N$). O processo ao qual a bobina é submetida é aparentemente complexo, porém linear: de início, o box 4 aciona o carro adjacente ao módulo 3 para que este se aproxime da esteira. Quando uma chave de fim de curso (SFCEst3) indica que o carro se aproximou o suficiente, o box 5 comanda a retirada da paleta do módulo 3. Um sensor apropriado (SRP3) avisa que o processo se encerrou (pode não ser apropriado simplesmente se usar a ausência de sinal no sensor de presença de paleta) e em seguida o box 6 faz com que o carro leve a paleta até o alcance do operador responsável pela preparação da bobina através do corte de sua borda ondulada. Outra chave de fim de curso (SFCOp3) permite a marcação do box 7, que representa a espera pela

conclusão da tarefa do operador. Este, apertando um botão, habilita a passagem da marca ao box 8, que comanda ao carro que retorne para junto da esteira. A mesma primeira chave de fim de curso (SFCEst3) libera o preenchimento do box 9, sendo este o responsável pela recolocação da paleta no módulo 3. Finalmente, um sensor indicando o fim da operação de recolocação (SCP3 - novamente, pode não ser recomendável simplesmente usar o sensor de presença de bobina para se averiguar o fim desta operação) passa a marca ao box 10, que significa apenas a espera pela transferência ao módulo 4 sem que nenhuma operação seja executada. Caso a bobina já tenha sido preparada, a marca vem direto do box 2 para o box 10. Dos boxes restantes, o box 11 leva o carro para junto de seu outro fim de curso mesmo que durante esse processo a marca que carrega os atributos da bobina passe ao trecho [4]; e o box 12 impede que uma paleta passe ao módulo 3 vinda do módulo 2 enquanto o primeiro estiver esperando a volta do carro com a bobina preparada, através da porta (1). A presença do sensor de fim de curso SFCEst3 na esteira condicionando a marcação do box 11 evita que este seja marcado, e por conseguinte acione o movimento do carro, por uma marca vinda diretamente do box 2 para o box 10; ou que seja seguidamente marcado caso o módulo 4 não esteja imediatamente livre para a passagem de paleta, fazendo com que a marca que carrega os atributos da bobina permaneça no box 10 por algum tempo.

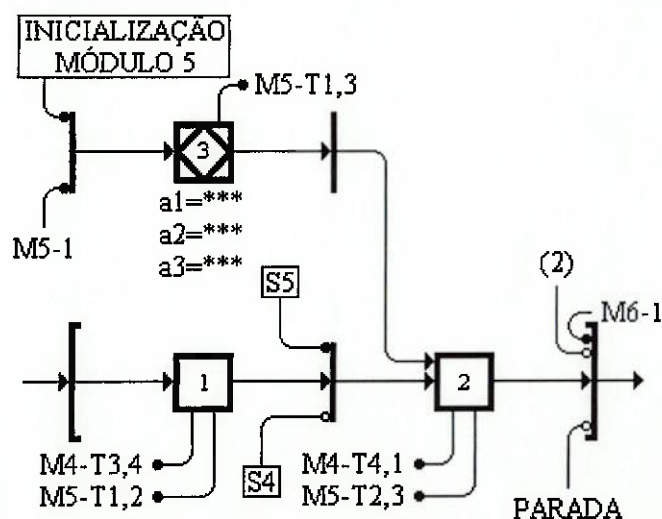


Figura 4.13 - Detalhamento da parte [5] do grafo PFS do sistema de controle

O funcionamento do trecho [4] já foi exposto, e o do trecho [5] é idêntico a este, a menos da porta inibidora (2) aplicada à sua última transição. O objetivo desta é impedir que a bobina no módulo 5 passe ao módulo 6 enquanto este está vazio esperando pela paleta com a bobina de restos de laminação. O box associado à porta (2) encontra-se no trecho [6].

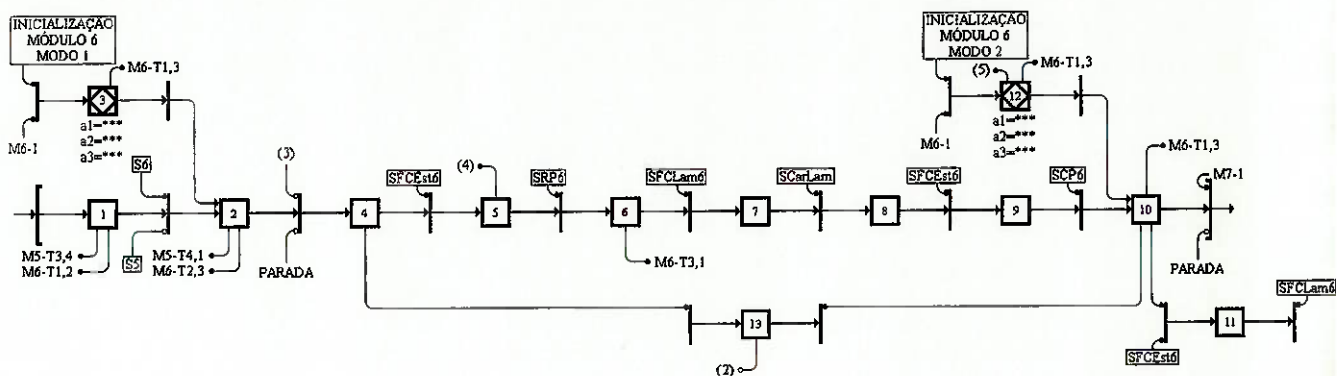


Figura 4.14 - Detalhamento da parte [6] do grafo PFS do sistema de controle

O bloco [LAMINAÇÃO EM PROCESSO] deve ser apresentado antes da explicação do funcionamento do trecho [6]:

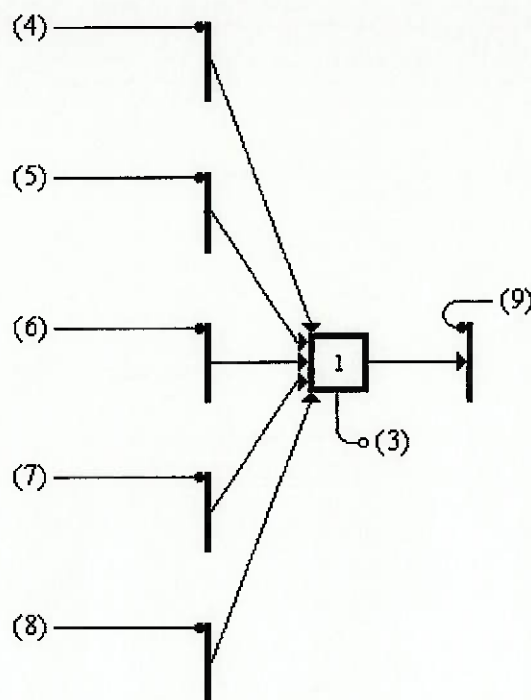


Figura 4.15 - Detalhamento do bloco [LAMINAÇÃO EM PROCESSO] do sistema de controle

A única função deste bloco é impedir que o carro do módulo 6 retire a paleta deste último antes que a laminadora esteja disponível para o carregamento de uma nova bobina. Isso é conseguido através da porta (3), que inibe o disparo da transição posterior ao box 2 do trecho [6]. As portas (4) e (5) vêm do próprio trecho [6]; a porta (6), do trecho [7]; a porta (7), do trecho [8]; e as portas (8) e (9), do trecho [9].

O procedimento no trecho [6] é muito semelhante ao procedimento no trecho [3]: o box 4 aciona o carro no sentido da esteira, uma chave de fim de curso (SFCEst6) permite a passagem da marca ao box 5, que comanda a retirada da paleta do módulo 6; concluída esta tarefa, o que é detectado através de um sensor (SRP6), o box 6 faz com que o carro vá para junto da laminadora, onde há outra chave de fim de curso (SFCLam6); o box 7 comanda o carregamento da laminadora pela bobina e a retirada da bobina de restos. Um sensor indica o fim deste processo (SCarLam) e aciona o box 8, que, além de conduzir o carro com a paleta e a bobina de restos de volta à esteira, comanda o prosseguimento da laminação; após o disparo do sensor de fim de curso SFCEst6, a ordem do box 9 recoloca a paleta no

módulo 6 da esteira; após o término desta tarefa, indicado pelo sinal do sensor SCP6, o box 10 representa apenas a espera pela passagem da paleta para o módulo 7. O box 11 leva o carro de volta às proximidades da laminadora (este box só é marcado uma vez devido à presença de SFCEst6 como condicionador de sua marcação, da mesma forma que no trecho [3]), enquanto que o box 12 inicializa uma bobina de restos no módulo 6 (isto é o modo 2 de inicialização no módulo 6; assim como o módulo 1 possui três modos de inicialização, o módulo 6 possui dois para poder distinguir entre uma bobina de restos e uma bobina normal), e o box 13 evita que uma bobina venha do módulo 5 no intervalo em que o módulo 6 está vago através da porta (2).

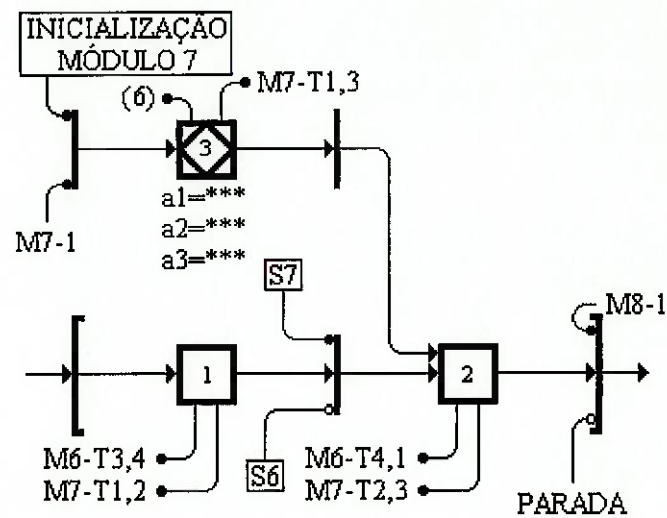


Figura 4.16 - Detalhamento da parte [7] do grafo PFS do sistema de controle

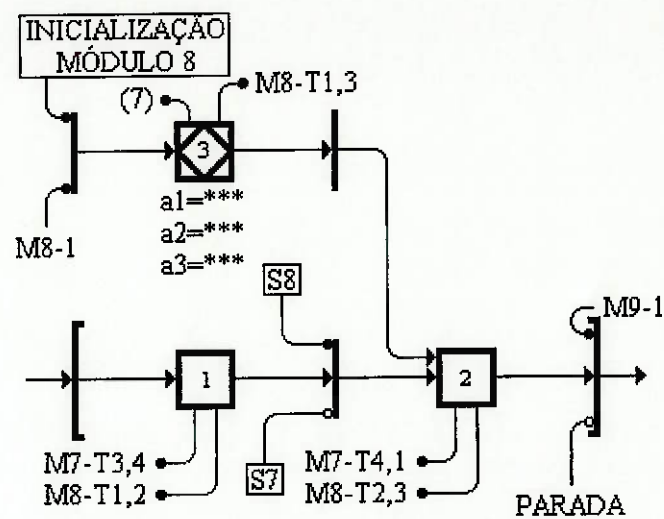


Figura 4.17 - Detalhamento da parte [8] do grafo PFS do sistema de controle

Os trechos [7] e [8] se assemelham em funcionamento ao [4]. A única diferença são as portas (6) e (7) que liberam a marcação do box de [LAMINAÇÃO EM PROCESSO], uma vez que, se uma bobina é inicializada num destes trechos, é porque já havia uma laminação ocorrendo antes do desligamento da esteira.

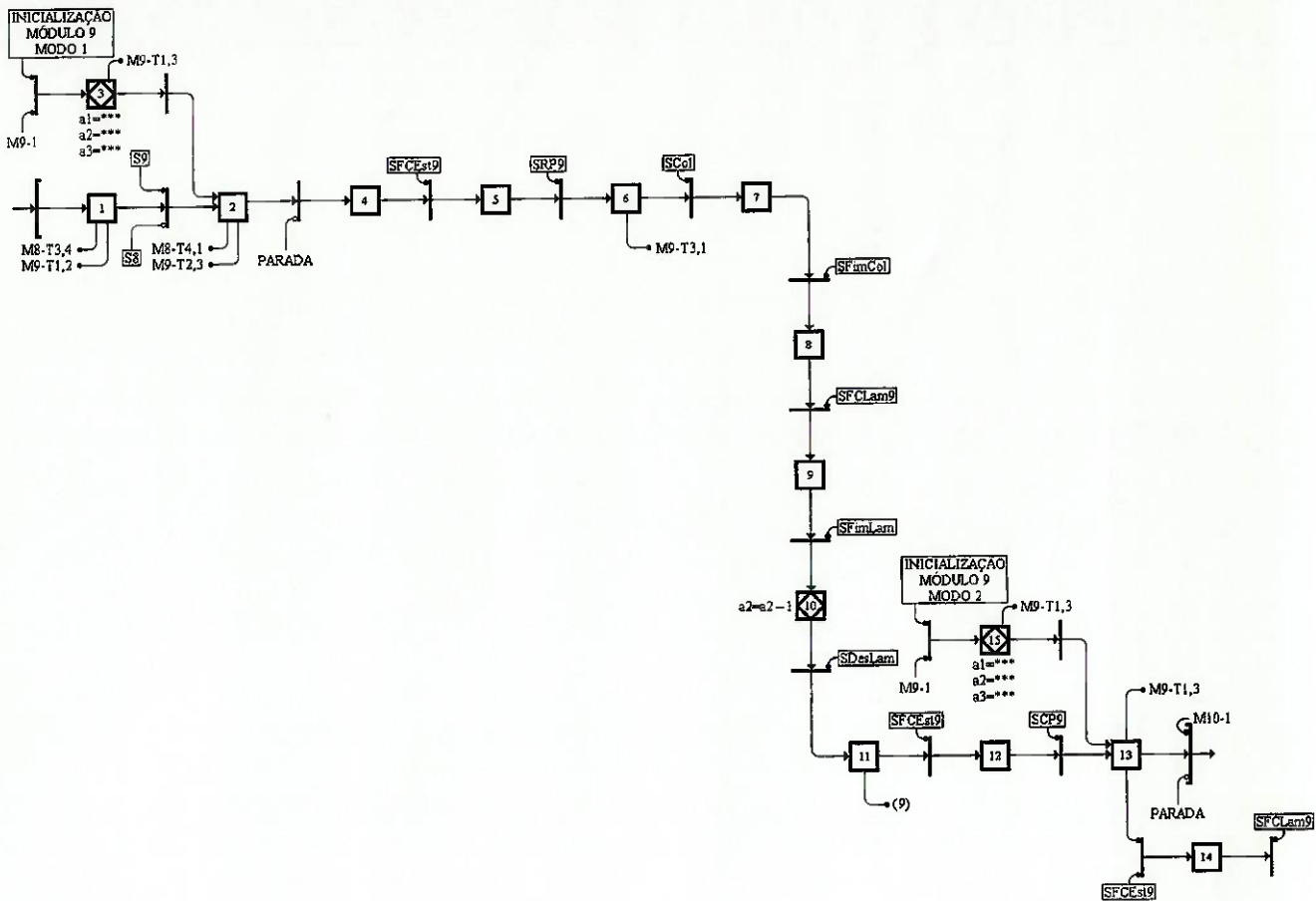


Figura 4.18 - Detalhamento da parte [9] do grafo PFS do sistema de controle

O trecho [9], embora mais extenso que qualquer outro, é notavelmente semelhante aos trechos [3] e [6]. O box 4 aciona o carro associado ao módulo 9 na direção da esteira; o sensor SFCEst9 de fim de curso junto à esteira permite que o box 5 seja marcado, e este comanda a retirada de palete do módulo 9; o box 6, marcado após o disparo do sensor SRP9 de retirada de palete, leva o carro para junto do coletor de restos a meio caminho da laminadora, o que é conseguido quando o sinal do sensor SCol é ligado; o box 7 faz a retirada do resto da paleta e seu enrolamento no coletor até que o sensor SFimCol indique que o carro pode prosseguir para junto da laminadora (box 8); ali o sensor SFCLam9 de fim de curso junto à laminadora permite a marcação do box 9, que apenas espera o sensor SFimLam acusar o fim do processo de laminação (embora geralmente esta se encerre bem

antes da bobina de restos atingir o módulo 9). O box 10 realiza o descarregamento da bobina da laminadora, até que o sensor SDesLam acuse o fim dessa atividade; o box 11 libera a desmarcação do box único de [LAMINAÇÃO EM PROCESSO] e comanda o transporte da paleta com a bobina laminada para junto da esteira, o que aciona o sensor SFCEst9; o box 12 ordena o descarregamento da paleta na esteira, enquanto o sensor SCP9 não indicar que isto foi realizado. O box 13 apenas aguarda que o módulo 10 esteja disponível para o transporte da paleta adiante; o box 14 leva o carro para junto da laminadora, onde ficará esperando por um novo acionamento; e o box 15 é responsável pelo modo 2 de inicialização de bobina no módulo 9, em que ele começa com uma bobina normal, ao contrário do modo 1 em que ele começa com uma bobina de restos.

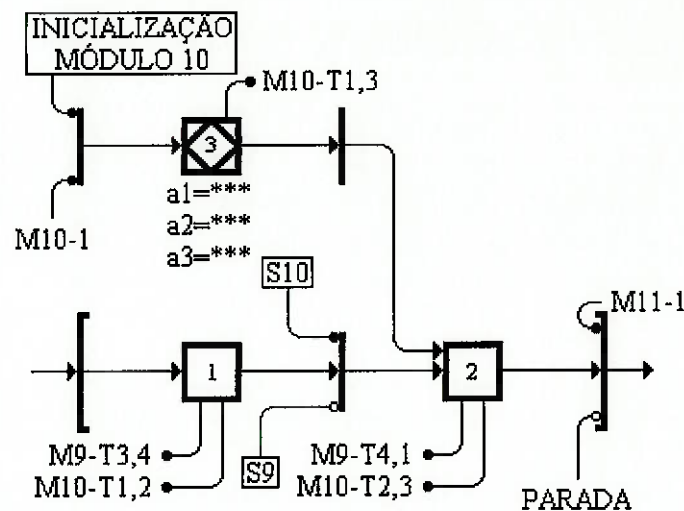


Figura 4.19 - Detalhamento da parte [10] do grafo PFS do sistema de controle

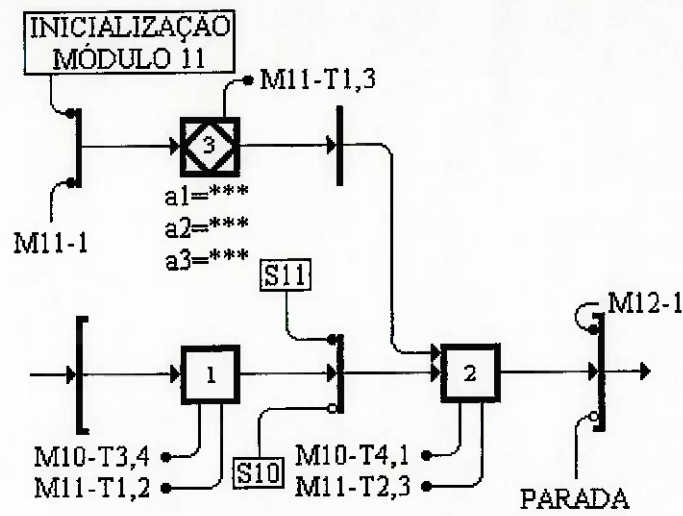


Figura 4.20 - Detalhamento da parte [11] do grafo PFS do sistema de controle

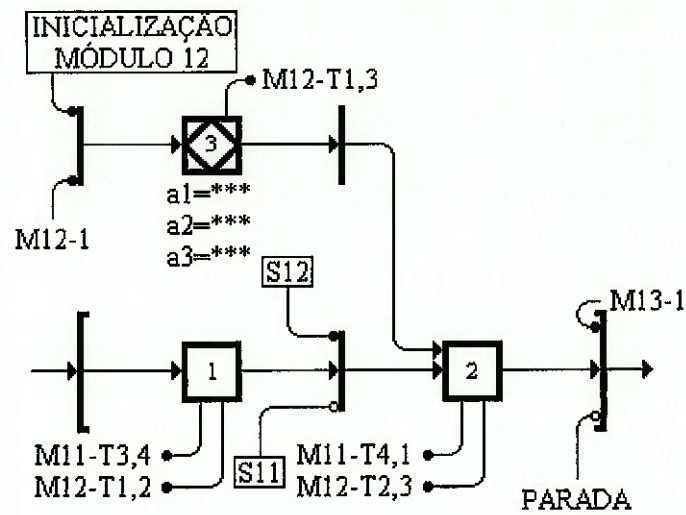


Figura 4.21 - Detalhamento da parte [12] do grafo PFS do sistema de controle

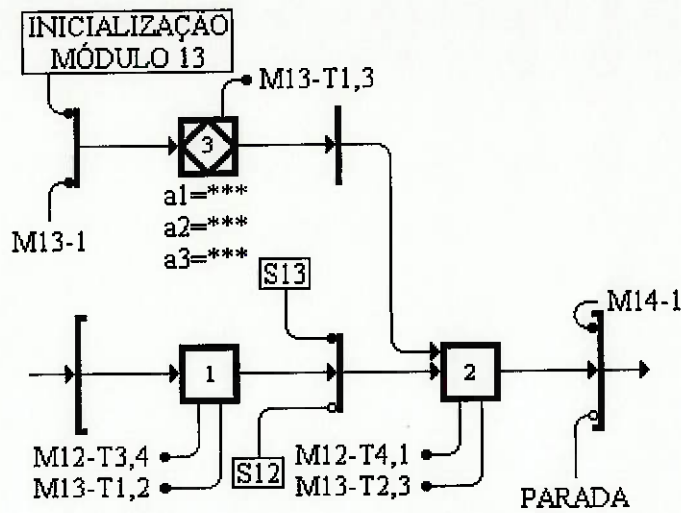


Figura 4.22 - Detalhamento da parte [13] do grafo PFS do sistema de controle

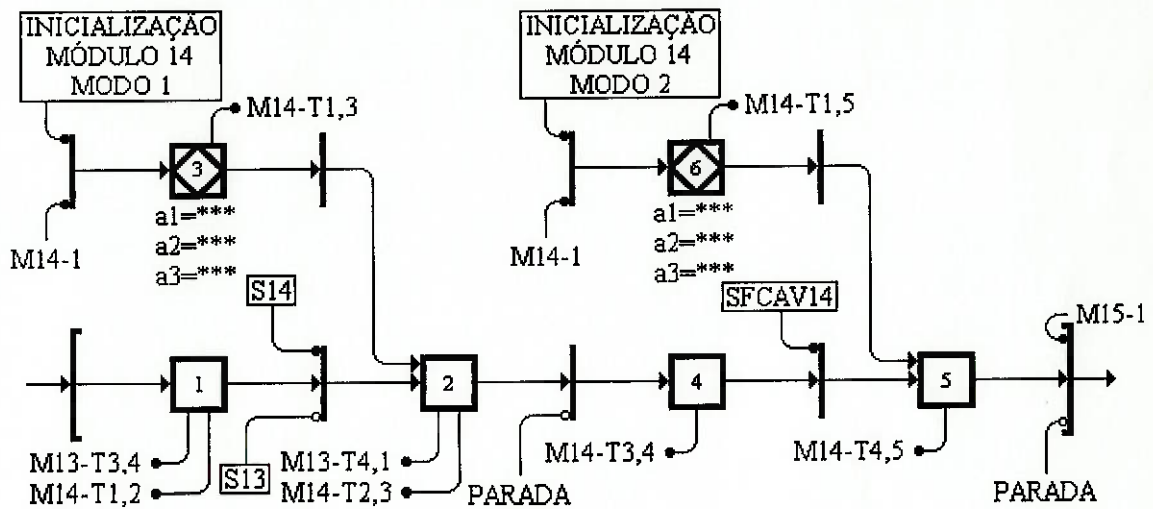


Figura 4.23 - Detalhamento da parte [14] do grafo PFS do sistema de controle

Os trechos [10] a [13] não apresentam diferença em relação ao [4], e o [14] é semelhante ao [1].

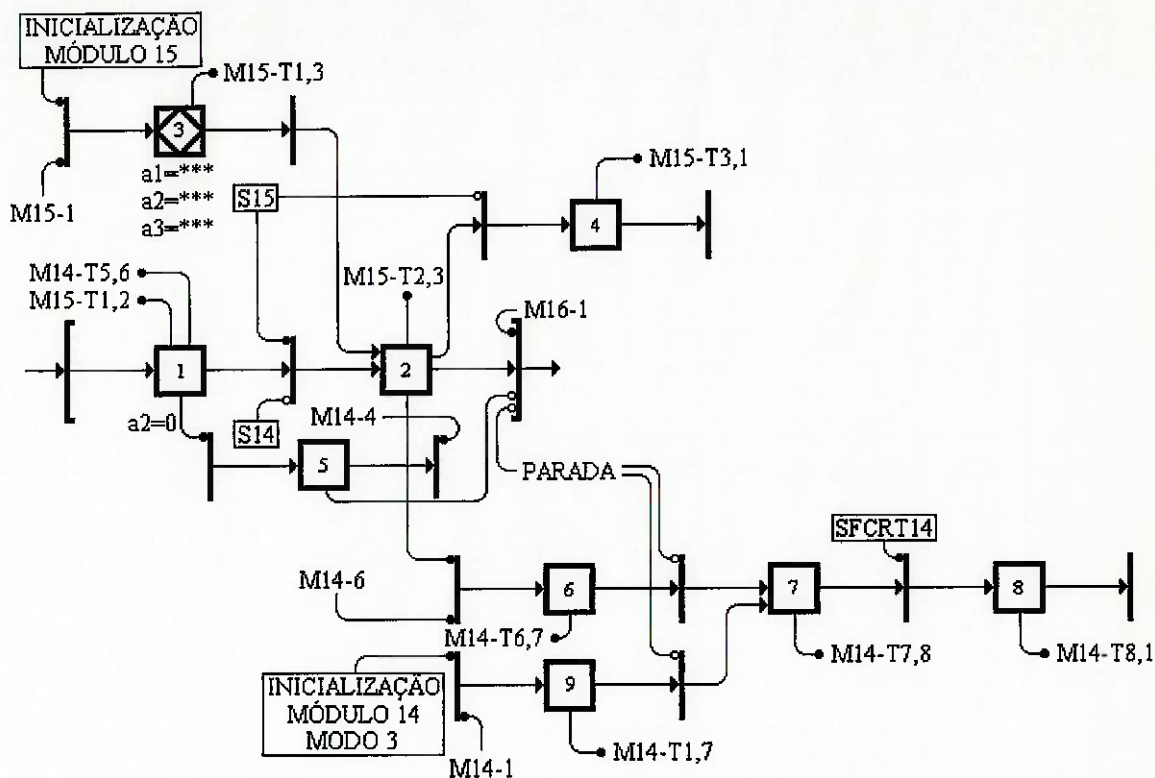


Figura 4.24 - Detalhamento da parte [15] do grafo PFS do sistema de controle

Além de um caminho paralelo semelhante ao existente no trecho [2], o que há de especial no trecho [15] são os boxes 4 e 5, que modelam a saída de bobinas no módulo 15. A porta inibidora que parte do box 5 tem a função de manter a bobina já totalmente processada imobilizada naquele módulo até que o desligamento do sensor S15 indique a retirada da bobina, caso em que a marca do trecho passa do box 2 ao 4 e aí desaparece. Caso por qualquer motivo a ponte rolante não possa atender ao módulo 15 por algum tempo e o box M14-4 seja marcado, indicando que o módulo 14 está se movendo lateralmente trazendo uma nova bobina para o lado leste, a marca no box 5 desaparece permitindo que a bobina seja transferida ao módulo 16 e não cause um engarrafamento na esteira. Se uma bobina pronta for inicializada neste módulo, o box 5 é automaticamente marcado.

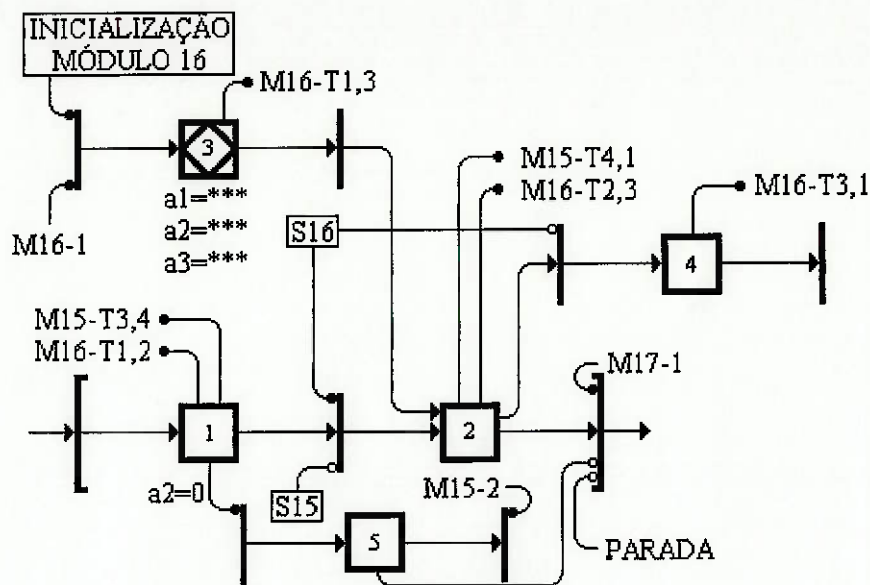


Figura 4.25 - Detalhamento da parte [16] do grafo PFS do sistema de controle

O funcionamento deste último trecho é similar ao do [15], com o box M15-2 (módulo 15 recebendo uma bobina do 14) permitindo a passagem adiante da bobina já totalmente processada.

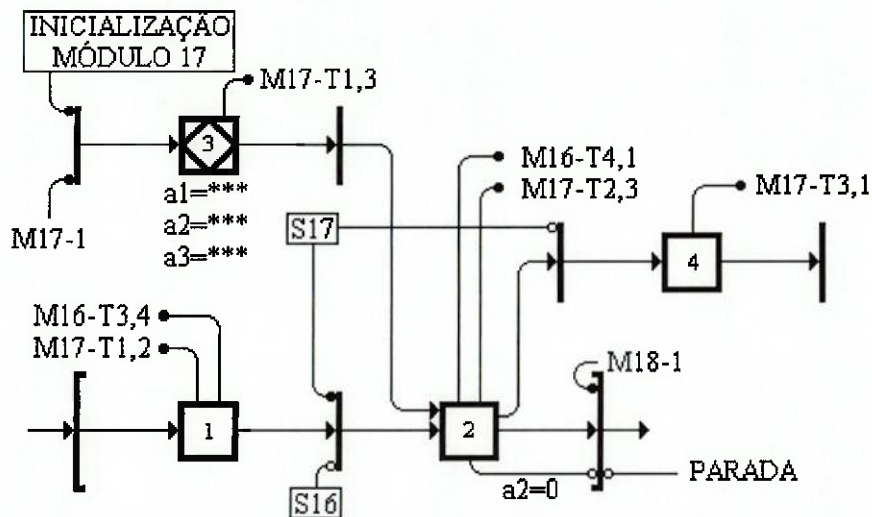


Figura 4.26 - Detalhamento da parte [17] do grafo PFS do sistema de controle

O trecho [17] se assemelha aos dois anteriores, porém sem a possibilidade de se avançar a bobina encerrada para se evitar o acúmulo de bobinas atrás do módulo 17,

conforme o parâmetro de projeto que determina que nenhuma bobina de processamento já terminado pode passar deste ponto.

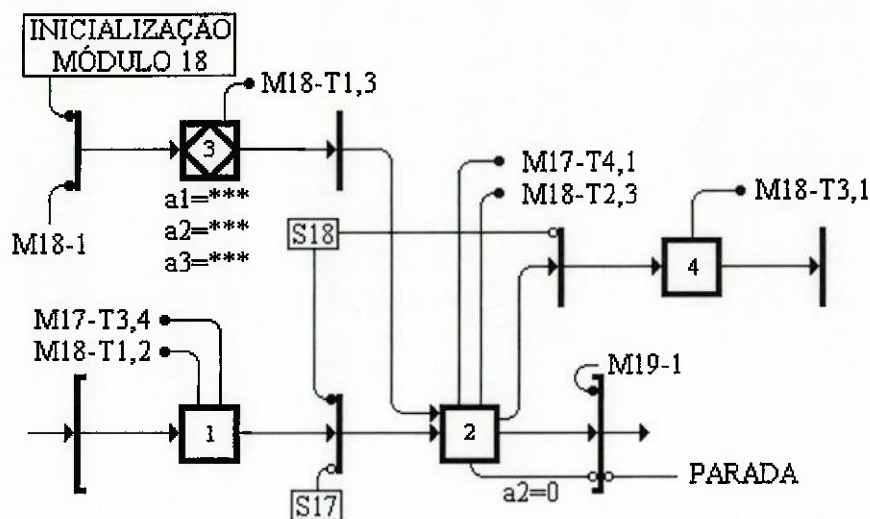


Figura 4.27 - Detalhamento da parte [18] do grafo PFS do sistema de controle

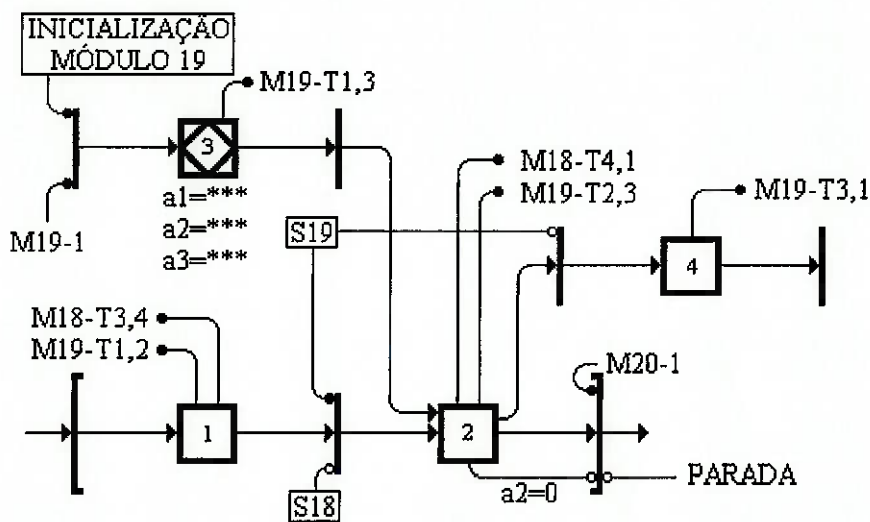


Figura 4.28 - Detalhamento da parte [19] do grafo PFS do sistema de controle

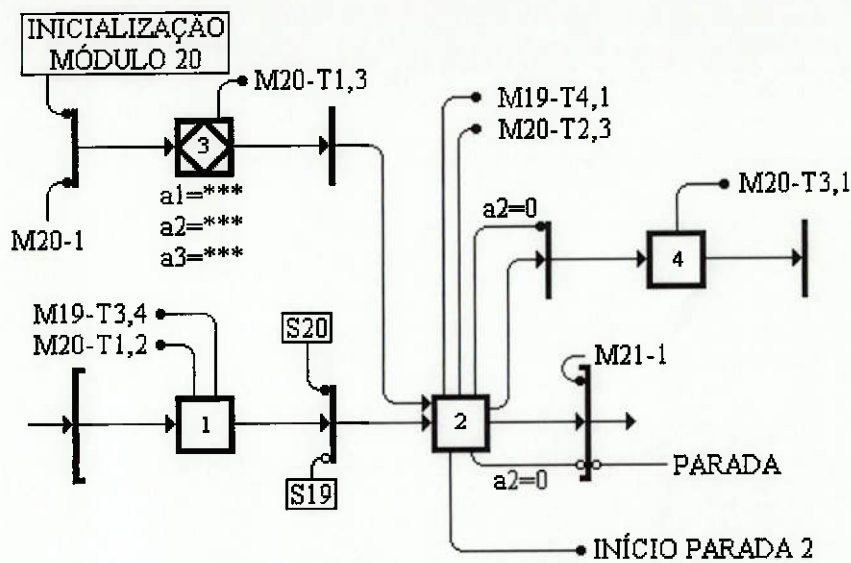


Figura 4.29 - Detalhamento da parte [20] do grafo PFS do sistema de controle

Os trechos [18] e [19] seguem o modelo do [17], para o caso de uma falha do sistema permitir que uma bobina terminada atinja os módulos 18 e 19. Se essa bobina chegar ao módulo 20, deve ser executada uma parada da esteira, para retirada da bobina e imediata averiguação do motivo da falha do controle. De qualquer forma, do box 2 devem partir ordens para o desligamento imediato de todos os motores do sistema, uma vez que apenas confiar na ação de [ESTEIRA PARADA] pode não ser confiável.

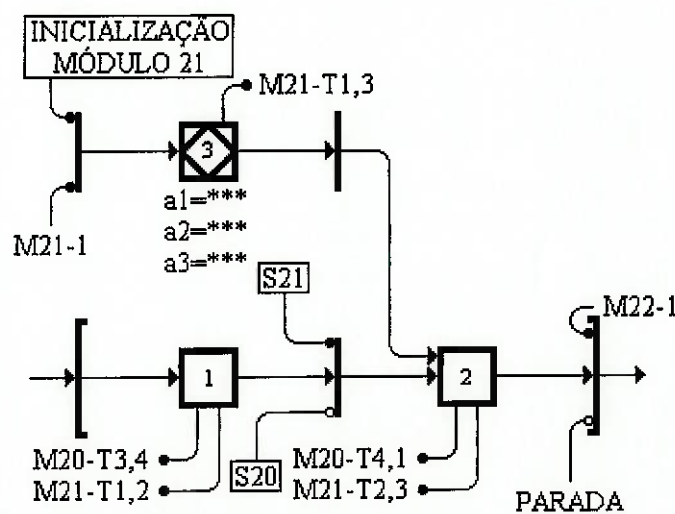


Figura 4.30 - Detalhamento da parte [21] do grafo PFS do sistema de controle

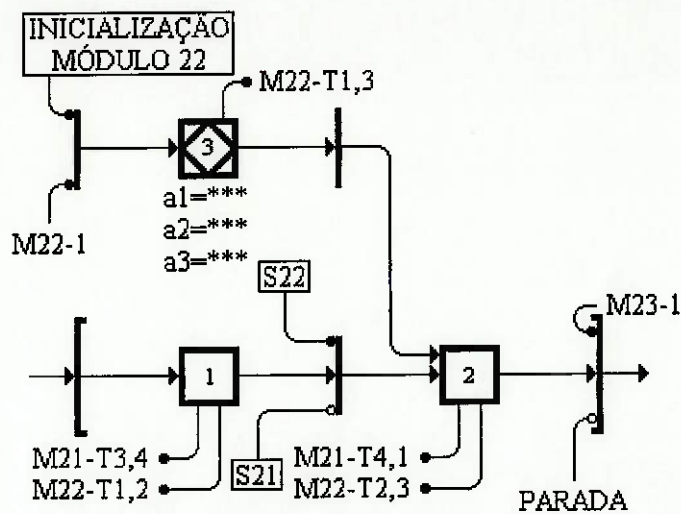


Figura 4.31 - Detalhamento da parte [22] do grafo PFS do sistema de controle

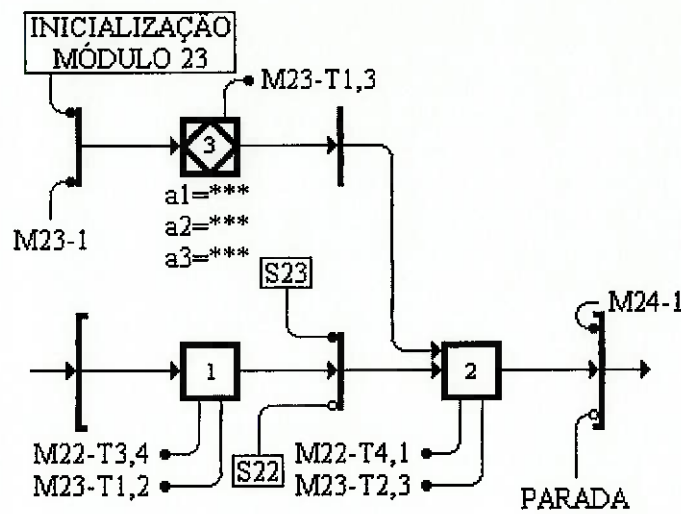


Figura 4.32 - Detalhamento da parte [23] do grafo PFS do sistema de controle

Encerrando os trechos do grafo PFS, temos os trechos [21], [22] e [23], idênticos em funcionamento ao trecho [4].

5) SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DO CONTROLE PROJETADO

Antes de se aplicar os grafos acima no controle do sistema real da esteira, se deve validá-los de alguma forma. A solução encontrada, conforme já foi comentado, foi:

- Implementar os grafos do sistema de controle em um programa de computador capaz de emular o funcionamento de grafos E-MFG;
- Simular a dinâmica da esteira (grafos de objeto de controle e temporizações, como por exemplo o tempo que um dado sensor leva para disparar) em um outro programa capaz de se comunicar com o primeiro.

Como os itens acima foram implementados:

- O programa utilizado para o primeiro item foi o Etna (figura 5.1), de autoria de dois alunos da Escola Politécnica [FERREIRA e SILVA, 1998]. Trata-se de um programa desenvolvido na linguagem Visual C++ capaz de construir e simular o funcionamento de grafos E-MFG que tenham sido nele implementados através de uma linguagem “script” semelhante ao HTML (embora a substituição desta por uma interface gráfica esteja nos planos de evolução do programa). Ele também possui um recurso inédito que a dupla de autores propõe como adição ao E-MFG: a porta de dados (figura 5.3), capaz de transferir dados não booleanos (strings e números inteiros) do sistema controlador para dentro de um grafo [FERREIRA e SILVA, 1998]. A utilidade da porta de dados está no fornecimento dos atributos das marcas E-MFG no grafo, e o uso desta porta resolveria o problema de se passar os atributos das bobinas que chegam à esteira pela ponte rolante. A comunicação do Etna com outros programas é feita por meio de interface DDE (Dynamic Data Exchange) (figura 5.2), embora outras formas de comunicação sejam adicionadas a esta em versões futuras daquele programa.
- Para se simular a dinâmica da esteira, se utilizou um programa na linguagem Visual Basic, que suporta a interface DDE requerida pelo Etna.

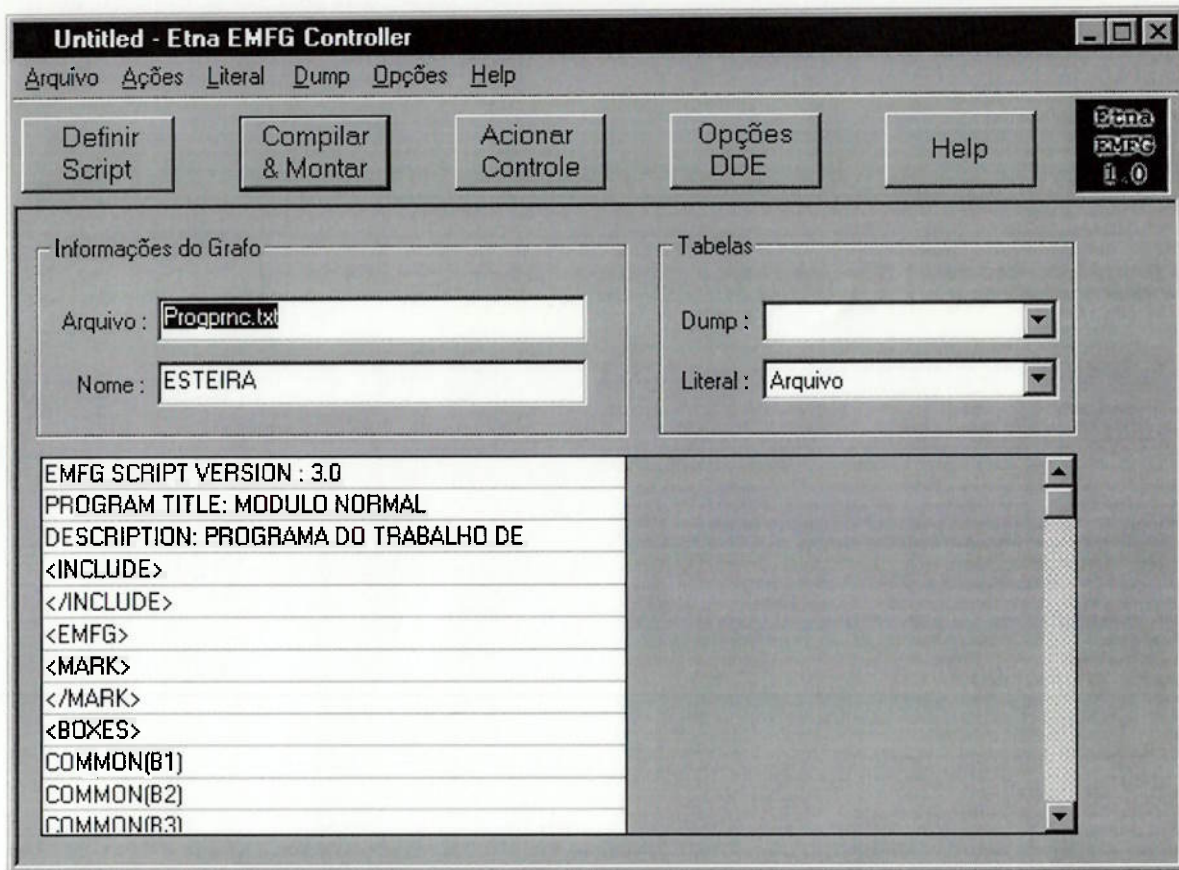


Figura 5.1 - Interface do programa Etna (versão atual)

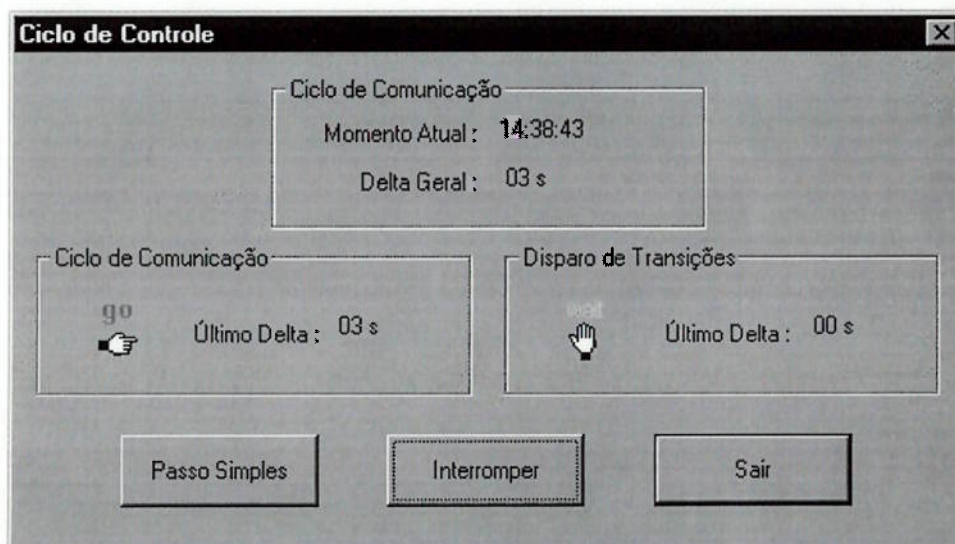


Figura 5.2 - Janela de controle de comunicação do programa Etna (versão atual)

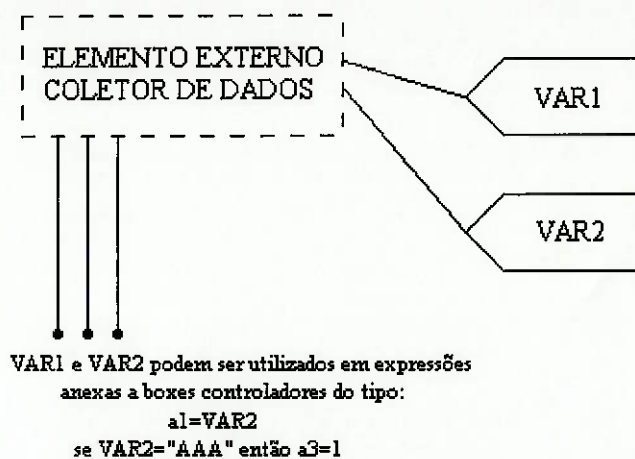


Figura 5.3 - Porta de dados (elemento E-MFG proposto em [FERREIRA e SILVA, 1998])

O programa em Visual Basic desenvolvido, na verdade, acumula as funções de simulação da dinâmica da esteira e de controle supervisorío, conforme a figura 5.4, da interface do programa, ilustra:

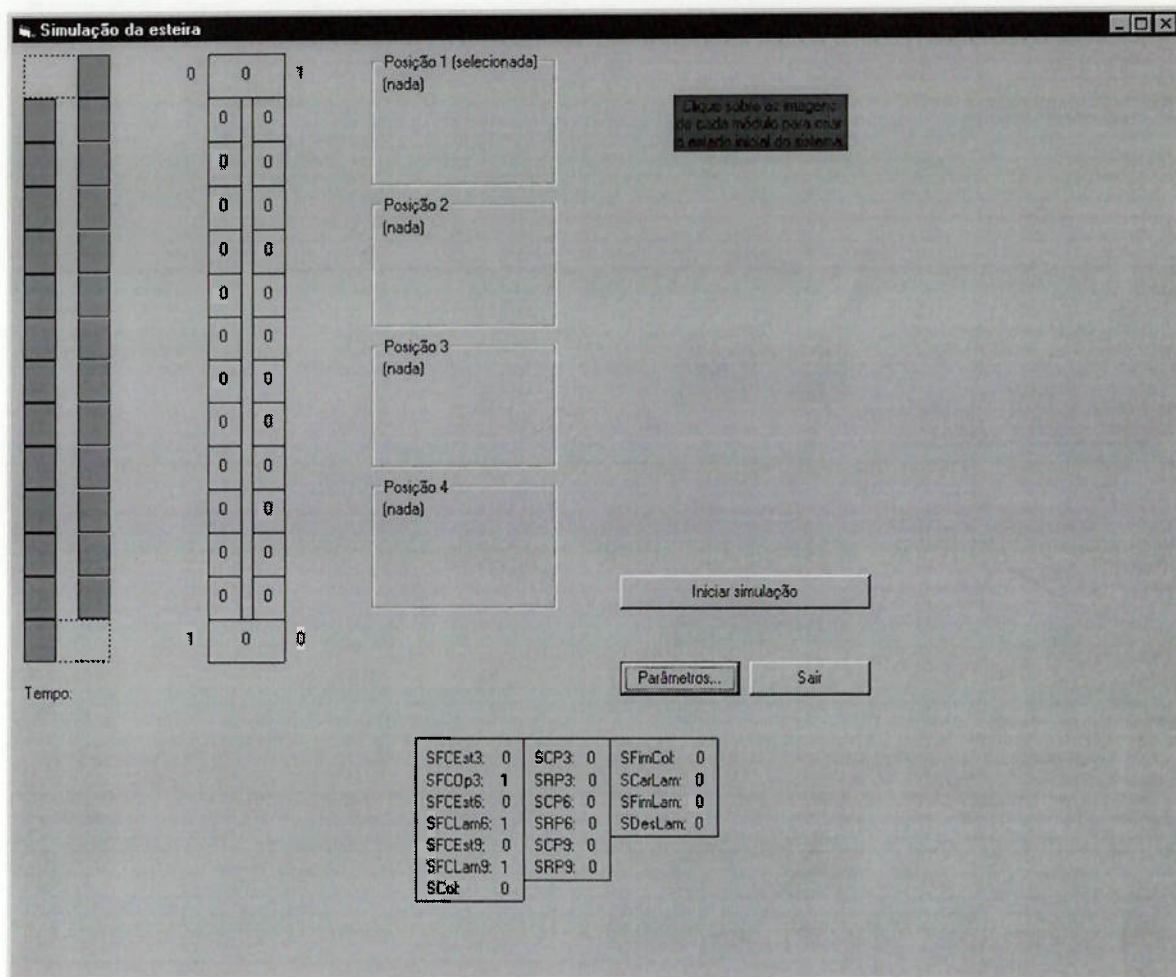


Figura 5.4 - Interface do programa em Visual Basic

A estrutura da parte superior esquerda da janela é uma representação estilizada da esteira, de onde se pode visualizar seu estado atual durante a simulação (ver figura 5.6 para uma idéia melhor do que isso significa). Também é clicando-se nela que é realizada a inicialização de bobinas na esteira; quando se clica num determinado módulo, uma janela aparece pedindo que o usuário entre com os atributos de uma bobina que já esteja ali presente no momento de acionamento da esteira (figura 5.5).

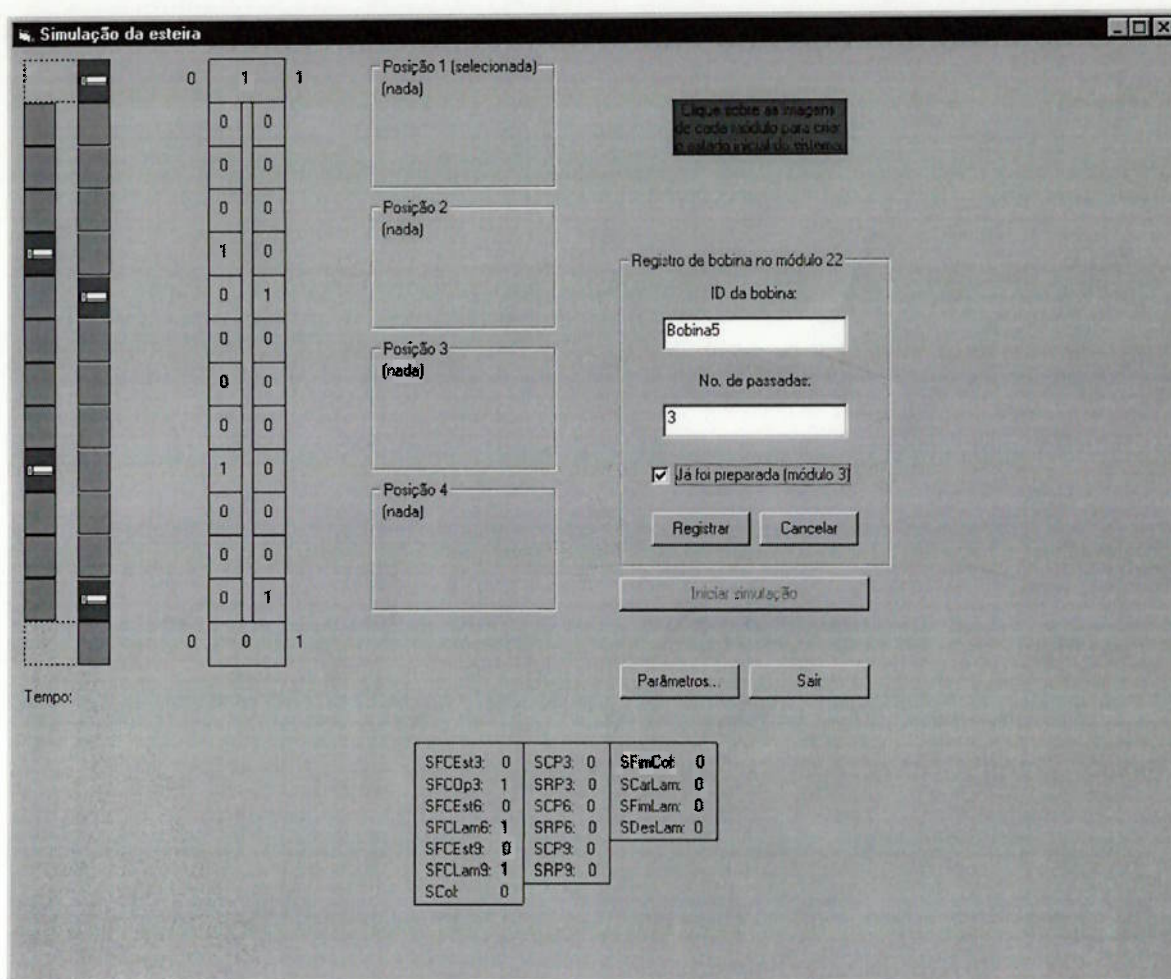


Figura 5.5 - Registro de uma bobina inicializada na esteira

Feitas as inicializações desejadas, clica-se no botão “Iniciar simulação” para ativar o funcionamento conjunto do programa em Visual Basic e do Etna. Após as inicializações individuais de cada bobina presente no sistema e a definição pelo usuário do tempo que deverá se passar até a entrega da primeira bobina pela ponte rolante, a interface estará como a da figura 5.6.

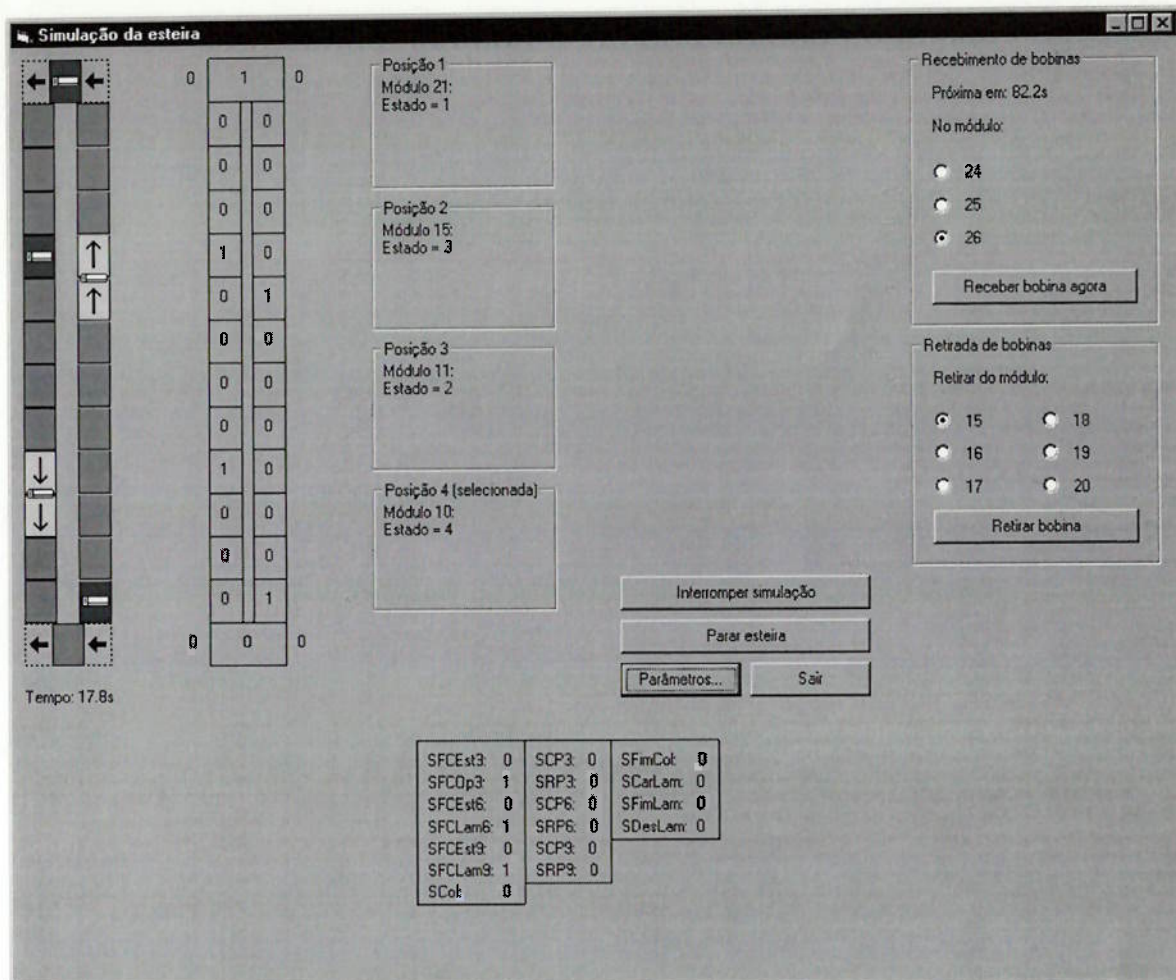


Figura 5.6 - Funcionamento estabelecido da simulação

Nota-se a simulação do movimento da esteira na representação da parte superior esquerda da interface. A simples visualização de um módulo em particular permite saber em que estado ele se encontra (entendendo por estado o box que se encontra marcado no grafo de objeto de controle correspondente - maiores explicações mais adiante e nas figuras 5.8 a 5.11), porém clicar numa dos quatro espaços com a inscrição “Posição 1 a 4” e depois num módulo permite obter um valor numérico do estado do módulo, conforme também está representado na figura 5.6.

Para uma visualização mais aprofundada do processo, a estrutura à direita da mencionada acima, e com um formato semelhante a esta, representa o estado de todos os

sensores de presença de palete no sistema, além dos sensores de fim de curso dos módulos 1 e 14 (estes são os números “soltos” nos quatro cantos da estrutura). Abaixo dos botões de mudança de parâmetros e de saída, há uma lista dos sensores extras utilizados nos módulos 3, 6 e 9, com a mesma nomenclatura com que foram denominados nos trechos [3], [6] e [9] dos grafos de sistema de controle.

A diferença entre os botões “Interromper simulação”, que substituiu o botão “Iniciar simulação”, e “Parar esteira”, é que o primeiro literalmente paralisa todos os relógios e movimentos gráficos da simulação (uma bobina que esteja sendo passada de um módulo para outro permanece “sendo passada” indefinidamente), enquanto que o segundo não pára nenhum relógio e só interrompe o funcionamento dos módulos/carros/laminadora quando cada um deles termina a tarefa que estiver executando no momento. Na verdade, o botão “Parar esteira” é uma representação de um botão que muito provavelmente deve existir num painel de controle real, e seu acionamento habilita a marcação do box do bloco [PARADA] do sistema de controle através da porta INÍCIO PARADA 3.

O botão “Parâmetros” permite, a qualquer momento, modificar as características da dinâmica da esteira, através do surgimento da janela mostrada na figura 5.7.

Mudança de parâmetros

Comprimento dos módulos:	60	Tempo gasto pelo carro do módulo 3 no seu curso:	1
Deslocamento lateral dos módulos 1 e 14:	20	Tempo gasto pelo carro do módulo 6 no seu curso:	1
[valores acima em centímetros]		Tempo gasto pelo carro do módulo 9 no seu curso:	1
Velocidade de rolamento dos módulos:	60	Tempo gasto pelo carro do módulo 9 entre o coletor e o módulo 9:	0.5
Velocidade lateral dos módulos 1 e 14:	10	Tempo gasto pelo operador preparando uma bobina no módulo 3:	1
[valores acima em centímetros por segundo]		Tempo gasto pelos carros colocando uma paleta na esteira:	0.5
Tempo mínimo de intervalo entre bobinas:	30	Tempo gasto pelos carros retirando uma paleta da esteira:	0.5
Tempo máximo de intervalo entre bobinas:	40	Tempo gasto carregando uma bobina na laminadora:	0.5
Tempo mínimo gasto numa laminação:	1.5	Tempo gasto descarregando uma bobina da laminadora:	0.5
Tempo máximo gasto numa laminação:	2.5	[valores acima em segundos]	
Tempo gasto carregando restos de alumínio no coletor de restos:	0.5	Mudar valores	Cancelar

Figura 5.7 - Janela de mudança dos parâmetros da simulação

À direita e acima, fica o controle de bobinas que chegam à esteira. Sempre que o tempo para a próxima bobina chega a zero e o módulo indicado pelas caixas de opção está vazio e parado, a simulação é automaticamente interrompida e uma janela de registro semelhante à utilizada na inicialização da esteira, porém sem o campo de preparação no módulo 3 visto que a bobina nova obviamente ainda não foi preparada, aparece para que o usuário entre com os atributos da mesma. O usuário pode cancelar a chegada da bobina se assim o desejar. Caso o módulo selecionado não esteja disponível para entrega, o sistema aguarda que ele se torne disponível ou que outro módulo seja selecionado. O botão abaixo das caixas de opção ordena a chegada de uma paleta com bobina imediatamente, qualquer que seja o tempo que teoricamente faltaria para esse evento.

Finalmente, abaixo da seção descrita acima, fica o controle de bobinas que saem da esteira. Quando uma paleta estiver imobilizada sobre um dos módulos de retirada, o botão “Retirar bobina” faz com que essa paleta seja retirada da esteira.

Conforme foi dito anteriormente, existem duas formas de se verificar na interface do programa em Visual Basic em que estado se encontra um dado módulo, ou, em outras palavras, qual box do grafo de objeto de controle correspondente àquele módulo está marcado: uma é pela utilização dos quatro espaços no centro da interface, a outra é pela simples inspeção visual da figura que representa aquele módulo na representação da esteira, conforme ilustrado a seguir:

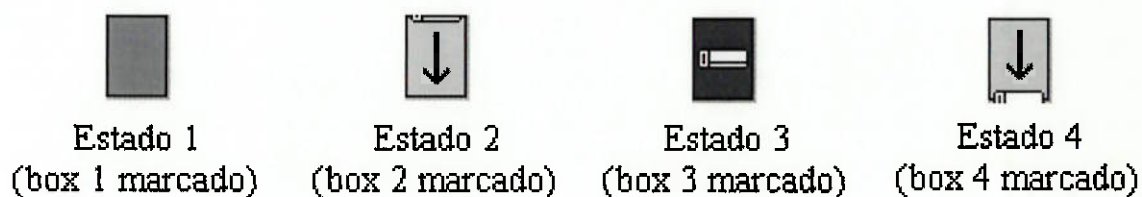


Figura 5.8 - Correspondência entre figuras e boxes nos módulos 2 a 13

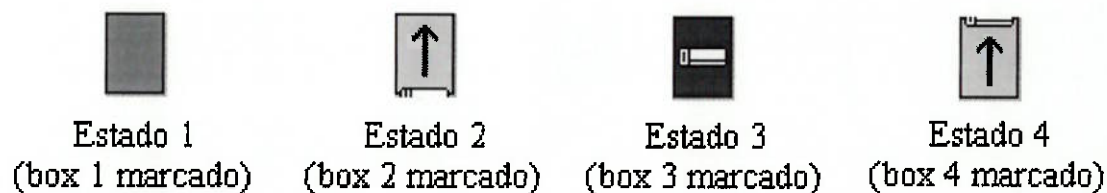


Figura 5.8 - Correspondência entre figuras e boxes nos módulos 15 a 26

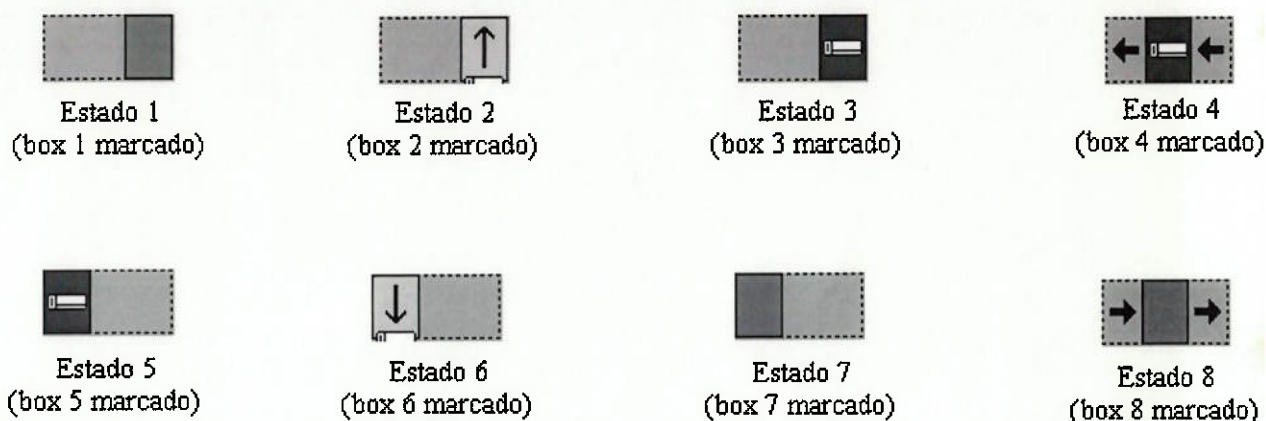


Figura 5.9 - Correspondência entre figuras e boxes no módulos 1

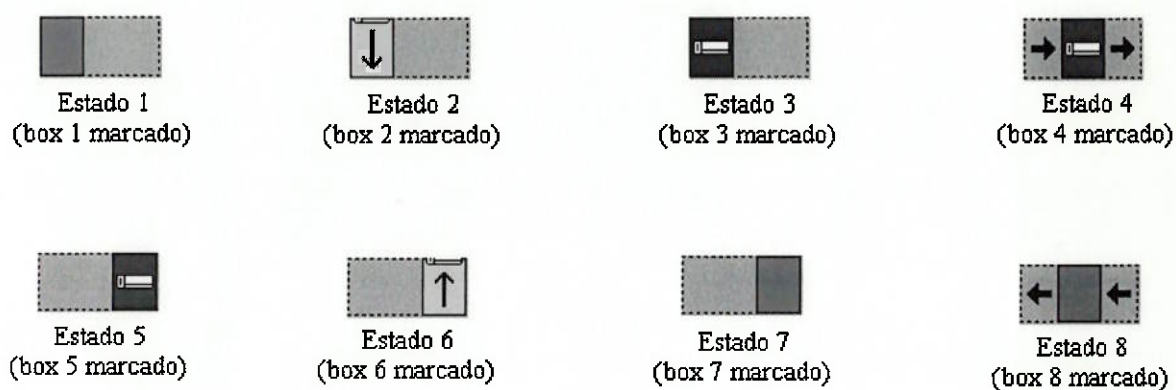


Figura 5.10 - Correspondência entre figuras e boxes no módulos 14

Nota-se que o evento descrito pelas figuras corresponde à descrição do significado de cada box dos grafos de objeto de controle exibida no capítulo 4. As únicas observações são:

- Nos módulos 3, 6 e 9, as figuras nos módulos podem ser um pouco diferentes das acima devido à diferença de representação entre bobinas normais e bobinas de restos, porém essas figuras ainda são facilmente reconhecíveis;

- Também nesses módulos, a representação de um módulo vazio que espera o retorno do carro trazendo uma paleta é um espaço vazio, igual ao que representa o estado 1, porém com reticências (...). Isso apenas serve para uma explicação visual rápida de por que aquele módulo não pode receber um transporte de paleta vindo do módulo imediatamente anterior e portanto também representa o estado 1.

A dinâmica do acionamento de sensores é implementada através de relógios que acionam sensores quando atingem um valor pré-determinado de tempo e são acionados por boxes determinados dos grafos de controle. Estes últimos também controlam a mudança de estados dos módulos.

Exemplo 1: Uma marca no box 1 do trecho [4] dos grafos de sistema de controle indica que os módulos 3 e 4 devem passar de seus estados “parado-ocupado” e “parado-vazio” (boxes 3 e 1 marcados) para “entregando” e “recebendo” (boxes 4 e 2 marcados), e assim os motores dos módulos 3 e 4 devem ser acionados para a passagem de paleta de um para o outro. Na implementação utilizada, uma porta habilitadora externa partindo do box 1 do trecho [4] da implementação dos grafos no programa Etna chega ao programa simulador da dinâmica através da interface DDE. Este último reconhece o sinal vindo do Etna e, além de modificar o estado dos módulos 3 e 4 conforme as portas que saem daquele box na representação do grafo, aciona dois relógios, cada um deles correspondendo ao tempo necessário para que a paleta seja transportada de um módulo para o outro, de acordo com os valores exibidos na janela de mudança de parâmetros. Um desses relógios, disparando, aciona o sinal do sensor de presença de bobina do módulo 4, que os grafos compreendem através de portas de origem externa, conforme exibido nos grafos do sistema de controle; o outro desliga o sinal do sensor de presença de bobina do módulo 3.

Exemplo 2: Uma marca no box 4 do trecho [3] dos grafos do sistema de controle indica que o carro do módulo 3 deve se mover de junto do operador da preparação das bobinas para junto da esteira. Uma porta habilitadora externa saindo do box citado é compreendida

pelo programa simulador da dinâmica da esteira como uma ordem para disparar um relógio que conta o tempo necessário para o movimento do carro de um fim de curso para o outro de acordo com o definido nos parâmetros de simulação. Quando esse relógio termina de contar o tempo determinado, o simulador de dinâmica gera um sinal que é entendido pelo Etna, através de uma porta habilitadora com origem externa, como o sinal da chave de fim de curso do carro 3 ao lado da esteira. Assim o Etna desliga o box 4 do trecho [3] e liga o box 5.

Com essa dupla de programas operando junta, foram realizados testes e simulações do funcionamento da esteira, com o intuito de verificar possíveis falhas e ineficiências no projeto do controle. Os resultados estão comentados no capítulo seguinte (conclusão).

6) CONCLUSÃO

Após a condução de testes e simulações com os dois programas descritos no capítulo anterior, verificou-se a correção do controle proposto no capítulo 4. Esse controle, então, poderia ser implementado seguramente na esteira transportadora real, garantindo um controle eficiente e de acordo com todas as regras de funcionamento impostas pelo fabricante, ou seja, o objetivo deste trabalho foi atingido.

Porém, a implementação do controle na esteira real pode não se dar por meio de um programa de computador como o Etna; uma opção popular nos meios industriais seria o uso de um ou mais CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), havendo ainda outras formas possíveis de implementação. Ainda na questão de hardware, deve ser considerada a forma como os atributos das bobinas que chegam à esteira deverão ser transferidos para o sistema (conforme já foi comentado no capítulo 4, formas possíveis são a leitura de um código de barras preso à bobina ou a simples digitação dos dados anteriormente à colocação da bobina).

7) BIBLIOGRAFIA

MIYAGI, P. E.; **Controle Programável: Fundamentos do Controle a Eventos Discretos**. Edgard Blücher, São Paulo, 1996.

SANTOS Fo., D. J.; **Proposta do Mark Flow Graph Estendido para a Modelagem e Controle de Sistemas Integrados de Manufatura**. Escola Politécnica - USP, Tese de Mestrado, Brasil, 1993.

FERREIRA, D. M. S. e SILVA, M. A. A.; **Controlador E-MFG para Sistemas Integrados e Flexíveis de Produção**. Escola Politécnica - USP, Trabalho de Formatura, Brasil, 1998.

SANTOS Fo., D. J. e MIYAGI, P. E.; Enhanced Mark Flow Graph to Control Flexible Manufacturing Systems, **RBCM – Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**, v. 17, n. 2, 1995, p. 232 – 248.