



**FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC
ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO, CONTROLE E ROBÓTICA**

JOUSIEL COSTA VILELA

**MODELAGEM DE CONTROLE DE UMA PLANTA CIM UTILIZANDO
REDE DE PETRI**

Salvador
2016

JOUSIEL COSTA VILELA

**MODELAGEM DE CONTROLE DE UMA PLANTA CIM UTILIZANDO
REDE DE PETRI**

Trabalho de Conclusão de curso apresentada à Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do Título de Especialista em Automação, Controle e Robótica.

Orientador: Prof. MSc. Milton Bastos de Souza
Coorientador: Prof. Dr. Oberdan Rocha Pinheiro

Salvador
2016

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

V695m Vilela, Jousiel Costa

Modelagem de controle de uma planta CIM utilizando rede de Petri / Jousiel Costa Vilela. – Salvador, 2017.

34 f. : il. color.

Orientador: Prof. MSc. Milton Bastos de Souza.
Coorientador: Prof. Dr. Oberdan Rocha Pinheiro.

Monografia (Especialização em Automação, Controle e Robótica) – Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Salvador, 2017.

Inclui referências.

1. Redes de Petri. 2. Modelagens de SEDs. 3. Sistema Flexível. 4. FMS (Sistema Flexível de Manufatura). 5. Simulação RdPs. I. Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC. II. Souza, Milton Bastos de. III. Pinheiro, Oberdan Rocha. IV. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que tem me dado direção, tranquilidade e paz, pois sem ele eu não sou ninguém, a minha mãe que me deu a direção moral, para que trilhe o meu caminho com sucesso.

A minha esposa Priscila Laura que me ajuda nos momentos de superação e com quem passo as ocasiões mais felizes de minha vida.

Ao meu orientador pela paciência e atenção na confecção deste projeto.

Aos meus amigos que sempre me ajudaram nas situações de dificuldades e estão presentes nos momentos de confraternização.

A todos os professores, colaboradores e colegas que cooperaram diretamente e indiretamente.

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano”.
Isac Newton

RESUMO

Os FMS (Sistema Flexível de Manufatura) são a união de vários subsistemas como transportadores, robôs, máquinas operatrizes etc., que conciliam a eficiência da linha de produção, com a flexibilidade, a fim de atender uma demanda versátil a baixo custo. Uma FMS didática é uma ferramenta pratica que tem por finalidade simular as aplicações das FMS industriais para discentes dos cursos voltados a automação e tecnologia. As RdPs (Redes de Petri) são um método gráfico e matemático de modelagem que pode ser aplicada para representar diversos tipos de sistemas, inclusive as FMS. E mesmo com seu alto poder de modelagem e simulação, são de fácil implementação em controladores de diversos fabricantes utilizados no ambiente industrial, o que permite facilmente a aplicação deste método em ambientes industriais.

Palavras-chave: Sistema Flexível de Manufatura; Redes de Petri; Modelagem de SEDs.

ABSTRACT

FMS OS (Flexible Manufacturing System) are a number of subsystems Union How Conveyors, Robots, Machine tools etc., Which reconciles the Efficiency of Production Line with the flexibility to meet demand End A versatile one Low Cost. A teaching FMS is a practical which aims to simulate how applications of FMS students paragraph industries of courses directed Automation and Technology. As PDR (Petri Nets) are hum Method Graphic and mathematical modeling que can be applied to represent Several types of systems, including as FMS. And even with Its high power modeling and simulation, it is easy to implement in Miscellaneous Manufacturers controllers used in industrial environment, which easily allows application of this method in industrial environments.

Key words: Flexible Manufacturing System; Petri nets; SEDs modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	- Sistema de manufatura gerenciado por um SCADA	12
Figura 2	- Comportamento de uma variável de um SED	13
Figura 3	- Exemplo de uma RdP	15
Figura 4	- Rede de Petri exemplo para árvore de alcançabilidade	18
Figura 5	- Árvore de alcançabilidade da RdP	19
Figura 6	- Exemplo de um sistema com arco habilitador	20
Figura 7	- Exemplo de um sistema com arco inibidor	21
Figura 8	- Estação de Distribuição Didática FMS195780 - FESTO	24
Figura 9	- Módulo de Alimentação - MAGAZINE	25
Figura 10	- Braço Manipulador Pneumático	25
Figura 11	- Modelagem de dispositivos	28
Figura 12	- Modelagem do controle	29
Figura 13	- Modelagem da Estação de Distribuição	30
Figura 14	- Hardware empregado no projeto	31
Figura 15	- Comparação entre a simulação (a) e a aplicação em Grafcet	31
Figura 16	- Implementação de Controle da Estação de Distribuição	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Identificação dos dispositivos	27
Tabela 2	- Identificação dos Lugares	28
Tabela 3	- Identificação das Transições	39
Tabela 4	- Identificação dos dispositivos I/O	33

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
2.	CONCEITOS GERAIS	13
2.1	SISTEMAS FLEXÍVEIS DE MANUFATURA	13
2.2	SISTEMA A EVENTOS DISCRETOS	14
2.2.1	REDES DE PETRI.....	16
2.2.2	Estrutura das Redes de Petri	17
2.2.3	Representação Matricial das Redes de Petri	18
2.2.4	Árvore de Alcançabilidade	20
2.2.5	RdP com Arcos Habilitadores	21
2.2.6	RdP com Arcos Inibidores	22
3.	CONTROLE SUPERVISÓRIO UTILIZANDO REDES DE PETRI.....	24
3.1	DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE DE CONTROLE.....	24
4.	ESTUDO DE CASO: ESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO FESTO	26
4.1	ESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DESCRIÇÃO DO FMS DIDÁTICO	26
4.2	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO FMS UTILIZANDO RDP	29
4.3	IMPLEMENTAÇÃO DE ESPECIFICAÇÃO DE CONTROLE.....	32
5.	CONCLUSÃO	36
6.	REFERÊNCIAS	36

1. INTRODUÇÃO

Sistemas a eventos discretos (SEDs) são aqueles em que as mudanças de estados se dão pela ocorrência de eventos instantâneos, como por exemplo o início ou o final de operação de uma máquina. Assim como os eventos, os estados de tais sistemas também são definidos por variáveis discretas. (LIMA II, 2002)

Muitos SEDs, como é o caso notadamente dos Sistemas de Manufatura, são compostos por subsistemas cujo funcionamento conjunto deve obedecer a uma série de restrições de coordenação, como por exemplo, impedir que seja iniciada a operação de uma máquina antes de a peça bruta ser posicionada. A especificação de controle visa justamente a coordenar o funcionamento do SED de modo a assegurar o respeito a tais restrições. Este controle possui, assim, uma natureza permissiva, agindo apenas no sentido de inibir a ocorrência de eventos que levem à violação das restrições (RIBEIRO, 2009).

Uma das abordagens muito utilizadas para a modelagem de SEDs são as Redes de Petri, já que produzem modelos mais compactos e de mais fácil análise gráfica que outras abordagens. O Presente trabalho, apresenta um método para especificação de controle para FMS utilizando o método formal de Rede de Petri (Rdp). Esse método é validado através da modelagem, especificação de controle e programação dos controladores de um FMS didático composto por uma célula que realiza a etapa de abastecimento de uma linha de produção.

2. CONCEITOS GERAIS

2.1 SISTEMAS FLEXÍVEIS DE MANUFATURA

Um sistema de manufatura (sistema produtivo) pode ser considerado como um sistema composto de vários subsistemas (processos produtivos) como transportadores, robôs, células de produção, máquinas operatrizes etc., no qual cada subsistema realiza uma determinada operação produtiva, a qual pode ser uma transformação física (ex. usinagem, corte, estampagem etc.) ou um deslocamento físico (carregamento ou descarregamento de peças). Uma característica básica destes subsistemas é que por eles fluem diversos itens como peças, materiais, recursos etc., que passam sequencialmente pelos subsistemas, onde transformações apropriadas são realizadas até obter o produto final requerido (de acordo com especificações técnicas, desde geometria até controle de qualidade) (Palomino, 1995).

Uma definição geral de Sistema Flexível de Manufatura (FMS, na sigla em inglês), apresentada por Severiano Filho (1995), sustenta a ideia de que os FMSs são sistemas de produção altamente automatizados, capazes de produzir uma grande variedade de diferentes peças e produtos usando o mesmo equipamento e o mesmo sistema de controle.

Os FMS são uma tentativa de conciliar a eficiência da linha de produção, com a flexibilidade, a fim de atender uma demanda versátil a baixo custo (Silva e Valette, 1989).

No FMS, pode-se introduzir novas famílias de produtos no sistema durante o seu funcionamento e com pouco esforço, enquanto o sistema processa simultaneamente uma grande variedade de famílias de produtos em um determinado momento. A fim de atender a esses requisitos, um Sistema de Manufatura Flexível deve ser formado de:

- a) um conjunto de máquinas flexíveis;
- b) um sistema de transporte automático;
- c) um sofisticado sistema de tomada de decisão, para gerir a cada instante o que tem que ser feito e em que máquina.

Máquinas flexíveis têm a capacidade de executar diversas operações. Eles têm o armazenamento de ferramentas automático, sistema de recuperação e programas de usinagem que podem ser baixados a qualquer momento. Esta flexibilidade pode ser chamada de flexibilidade física (Erschler, 1988).

Nesse contexto, um elemento essencial de integração entre os sistemas é o computador. Por meio de redes, um computador central rodando um software SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) (Daneels, 1999) é capaz de se comunicar com o processador de cada elemento do processo produtivo (CLPs, CNCs, robôs, elementos transportadores etc.), de modo a coordenar todas as operações com o objetivo de produzir peças de acordo com especificações previamente estabelecidas. A figura 1 descreve um sistema em que um supervisor controla cada subsistema de manufatura através de uma rede industrial.

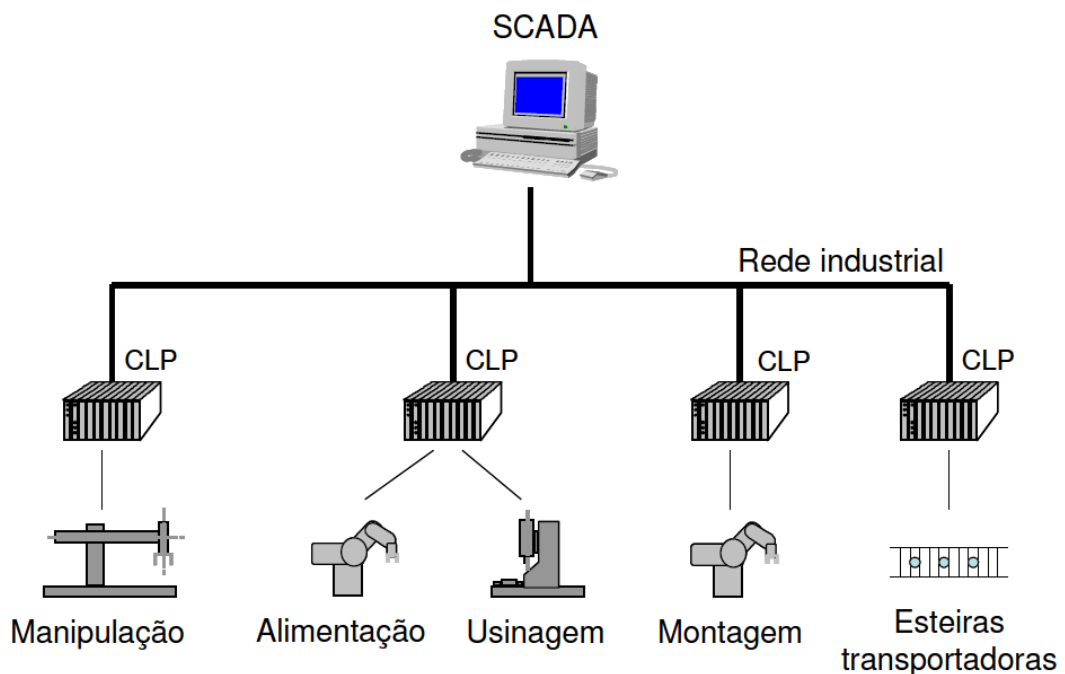


Figura 1 - Sistema de manufatura gerenciado por um SCADA.
Fonte: Ribeiro e Lima II, 2005

2.2 SISTEMA A EVENTOS DISCRETOS

A maior parte dos sistemas dinâmicos que encontramos na Natureza podem ser descritos por equações diferenciais em que o tempo conduz a evolução do sistema. Esses sistemas são estudados, desde os tempos de Galileu e Newton

existindo uma extensa bibliografia a par com numerosas aplicações de sucesso (Ho, 1992). No entanto, a tecnologia moderna tem vindo a criar sistemas dinâmicos que não são facilmente descritos por equações diferenciais. Estes sistemas apresentam uma diferença fundamental relativamente aos que podemos encontrar na Natureza: são conduzidos por eventos assíncronos e não pelo fluxo contínuo do tempo, ou seja, apenas modificam o seu estado quando da ocorrência de determinados eventos. Como exemplos de sistemas deste tipo temos: uma linha de montagem de uma fábrica automatizada, um elevador de um prédio ou uma rede de comunicações que envia e processa pacotes de informação. Todos eles têm em comum a existência de um conjunto de recursos (máquinas, elevadores, linhas de comunicação) e de tarefas (fabricar automóveis, enviar elevador para o andar x, enviar pacotes de informação). As tarefas deslocam-se de recurso para recurso competindo pelos serviços. Estes sistemas são normalmente denominados: sistemas dinâmicos a eventos discretos ou, simplesmente, sistemas a eventos discretos (SED) (HO, 1992). Vide figura 2.

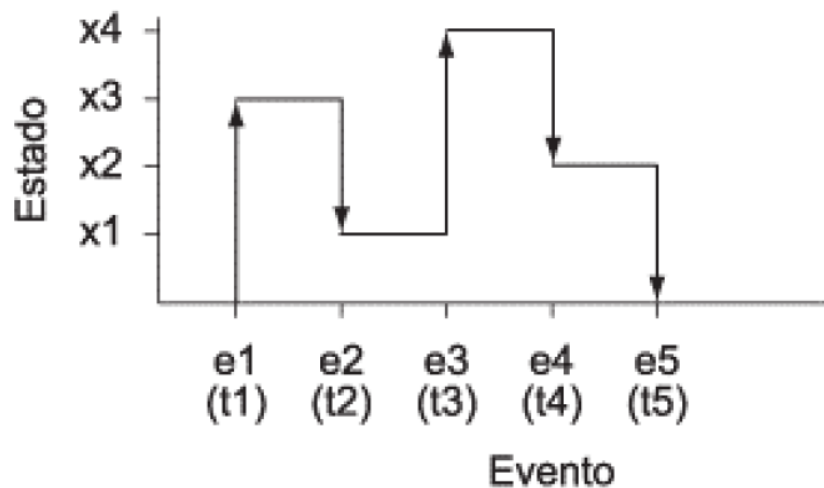


Figura 2 - Comportamento de uma variável de um SED
Fonte: Carvalho 2003

Um sistema de manufatura flexível é um exemplo típico de um sistema a eventos discretos. Como a análise e controle desses sistemas é de grande importância prática, grande parte dos formalismos de controle de SED são apresentadas como resolvendo ou contribuindo para esses objetivos. Entre os vários tipos de modelagem de SED e respectivo controle, encontram-se os modelos baseados em autômatos entre os quais se contam as máquinas de estado e seus

derivados, como por exemplo, os diagramas de transição de estado, Statecharts (Harel, 87) e redes de Petri (daqui em diante referenciada apenas RdP).

2.2.1 REDES DE PETRI

A teoria inicial das RdPs surgiu da tese *Kommunikation mit automaten* (Comunicação com autômatos), defendida por Carl Adam Petri em 1962, na Alemanha.

RdPs são uma ferramenta gráfica e matemática de modelagem que pode ser aplicada para representar diversos tipos de sistemas, fornecendo um bom nível de abstração em relação a outros modelos gráficos (Peterson, 1981). Trata-se de um modelo do tipo estado-evento, onde cada evento possui pré-condições que possibilitam a sua ocorrência e pós-condições decorrentes desta, as quais são por sua vez pré-condições de outros eventos posteriores.

Uma RdP também pode ser vista como um grafo orientado que permite modelar propriedades estáticas de um sistema de eventos discretos, constituído de dois tipos de nós: transições (correspondem a eventos que caracterizam mudanças de estados do sistema), e lugares (correspondem a condições que devem ser satisfeitas) interligados por arcos direcionados ponderados. Marcas (em manufatura, normalmente representam recursos disponíveis) podem estar associadas aos lugares da rede (Peterson, 1981).

Existem várias classificações para RdPs na literatura. A seguinte classificação é encontrada em (P. Maciel, 1996):

- a. RdPs de baixo nível;
- b. RdPs Binárias ou Condição-Evento;
- c. RdPs Lugar/Transição;
- d. RdPs de alto nível;
- e. RdPs Predicado-Transição.
- f. RdPs Coloridas.
- g. RdPs Hierárquicas.

RdPs têm sido amplamente utilizadas para a modelagem, análise, simulação e controle de sistemas de manufatura (Desroches 1995), pois:

- a) A representação gráfica ajuda na visualização de sistemas complexos;
- b) Conflitos e buffers podem ser modelados de forma fácil e eficiente;
- c) Travamentos do sistema (deadlocks) podem ser detectados;
- d) Várias extensões de RdPs permitem análises qualitativas e quantitativas da utilização de recursos, falhas, etc;
- e) Os modelos de RdPs representam uma ferramenta de modelagem hierárquica com bases matemáticas bem desenvolvidas;
- f) Permite a modelagem através de vários níveis de abstração;
- g) Possibilita a modelagem de sistemas paralelos e concorrentes;
- h) Sincronização de eventos;
- i) Verificação metódica de propriedades do sistema.

2.2.2 ESTRUTURA DAS REDES DE PETRI

Uma rede de petri (RdP) é definida como uma quádrupla $(P, T, \text{Pré}, \text{Pós})$ onde P é um conjunto de lugares, T um conjunto de transições, Pré um conjunto de arcos e Pós a marcação inicial dos lugares. Uma RdP é representada graficamente na Figura 3.

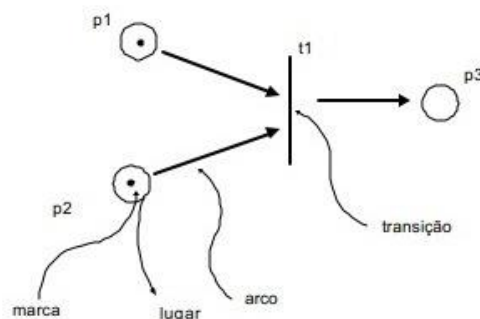


Figura 3 - Exemplo de uma RdP
Fonte: José Guimaraes, 2006

$R = (P, T, \text{Pré}, \text{Pós})$ onde:

- a) $P = \{ p_1, p_2, \dots, p_n \}$ é um conjunto finito de lugares;
- b) $T = \{ t_1, t_2, \dots, t_m \}$ é um conjunto finito de transições;
- c) $P \cap T = \emptyset, P \cup T \neq \emptyset$;

- d) Pré: $P \times T \rightarrow N$ é o conjunto de arcos de entrada nas transições;
- e) Pós: $T \times P \rightarrow N$ é o conjunto de arcos de saída das transições (É a marcação inicial da rede);
- f) $P = \{ \text{lugar1, lugar2} \}$
- g) $T = \{ \text{transição} \}$
- h) Pré = $\{ \text{lugar1, transição} \}$
- i) Pós = $\{ \text{transição, lugar2} \}$
- j) N : é o conjunto dos números naturais.

2.2.3 REPRESENTAÇÃO MATRICIAL DAS REDES DE PETRI

Segundo (Palomino, 1995) A informação contida na representação gráfica pode também ser organizada numa matriz de incidência $C = (c_{ij})_{n \times m}$ definida a partir de Pré (p,t) (ou C-) e Pós (t,p) (ou C+).

$$C = \text{Pós} - \text{Pré}$$

ou:

$$(p_i, t_j) \quad c_{ij} \quad \text{Pós}(t_j, p_i) \quad \text{Pré}(p_i, t_j)$$

ou

$$C = C+ - C- \quad (3.6.a)$$

Considerando a RdP da figura 3.2 ela pode ser definida algebricamente da seguinte maneira:

$$P = \{p_1, p_2, p_3\}$$

$$T = \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$$

$$\text{Pre}(p_i, t_j) = \begin{array}{cccc} & t_1 & t_2 & t_3 & t_4 \\ \begin{array}{l} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{array} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$\text{Post}(p_i, t_j) = \begin{array}{cccc} & t_1 & t_2 & t_3 & t_4 \\ \begin{array}{l} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{array} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

tem-se então:

$$C(p_i, t_j) = \begin{array}{cccc} & t_1 & t_2 & t_3 & t_4 \\ \begin{array}{l} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{array} & \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & -3 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$M_0 = \begin{array}{l} \begin{bmatrix} 0 \\ 3 \\ 0 \end{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{array}$$

A matriz de incidência associada a uma RdP corresponde então a sua estrutura, independente da marcação.

Na matriz de incidência, cada coluna vai corresponder à modificação de uma marcação quando a transição associada é disparada. Por exemplo a primeira coluna da matriz anterior vai significar que quando t_1 é disparada, uma ficha é movida desde p_2 , enquanto uma ficha é depositada em p_1 e assim sucessivamente.

2.2.4 ÁRVORE DE ALCANÇABILIDADE

Quantos estados ou marcações são possíveis extrair de uma Rede de Petri? Que tipo de notação pode ser utilizado para representar cada uma destas marcações?

Uma árvore de alcançabilidade (Bressan, 2002) é capaz de responder estas duas perguntas. Através de uma árvore com raiz igual à marcação inicial é possível representar todas as marcações alcançáveis. É importante ressaltar que o conjunto de alcançabilidade pode ser finito, no entanto, é comum encontrarmos situações onde as marcações alcançadas não nos levam a um estado inicial, ou à marcação inicial, a raiz de nossa árvore.

Portanto, o conjunto de alcançabilidade só é finito se em algum momento uma determinada marcação nos levar novamente à marcação inicial.

A RdP da figura 4 é um exemplo de conjunto finito de marcações. A árvore de alcançabilidade desta rede está ilustrada na figura 11. O estado inicial é representado pela marcação $M_0(2, 0, 0, 0)$, e, portanto, esta é a nossa raiz. Durante a construção da árvore deve ser observado quais são as transições habilitadas para disparo para criação de cada nó (nova marcação).

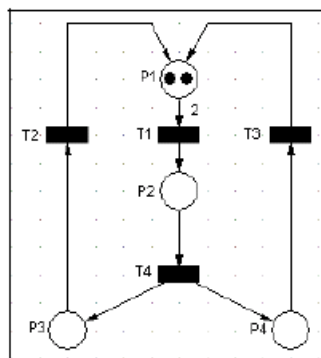


Figura 4 - Rede de Petri exemplo para árvore de alcançabilidade
Fonte: Murata, 1989

A situação da figura 5 é a seguinte:

- Após a definição da raiz, devemos observar quais transições estão habilitadas.
- Somente a transição T1 está habilitada e a marcação resultante é $M_1(0, 1, 0, 0)$.
- O lugar P2 não recebeu dois tokens porque o arco de saída de T1 tem peso 1.

- d) A próxima transição habilitada é T4 resultando em uma marcação M2(0, 0, 1, 1).
- e) Neste momento possuímos duas marcações habilitadas, T2 e T3 resultando em um nível com dois nós (marcações M3 e M4).
- f) Se dispararmos T2 a marcação resultante será M3 (1, 0, 0, 1).
- g) Se dispararmos T3 a marcação resultante será M4 (1, 0, 1, 0).
- h) No momento em que RdP chega ao estado M3 ou M4 passamos a ter dois places com tokens (M3: P1 e P4 ou M4: P1 e P3), porém, a transição T1 não ficará habilitada enquanto o place P1 não tiver dois tokens. Esta situação só vai acontecer quando houver o disparo de T3 ou T4 resultando novamente no estado inicial M0.

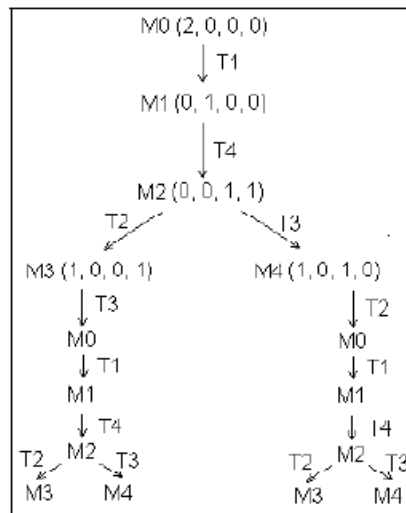


Figura 5 - Árvore de alcançabilidade da RdP
Fonte: Bressan, 2002

2.2.5 RDP COM ARCOS HABILITADORES

Para que uma transição t_j seja habilitada é necessário que as condições associadas aos seus lugares de entrada, $l(t_j)$, sejam atendidas. Essas condições dependem do número de marcas presentes em cada um dos lugares de entrada e do peso do arco que conectam esses lugares de entrada a transição t_j .

Isso significa que para uma transição t_j está habilitada é necessário que o número de marcas presentes em cada um dos lugares de entrada desta transição seja maior ou igual que o peso dos arcos que conectam esses lugares à transição t_j (Silvestre, 2010).

Um arco habilitador, obedece às mesmas condições acima, porém ao habilitar uma determinada transição as marcas do lugar habilitador não serão removidas após o disparo (figura 6).

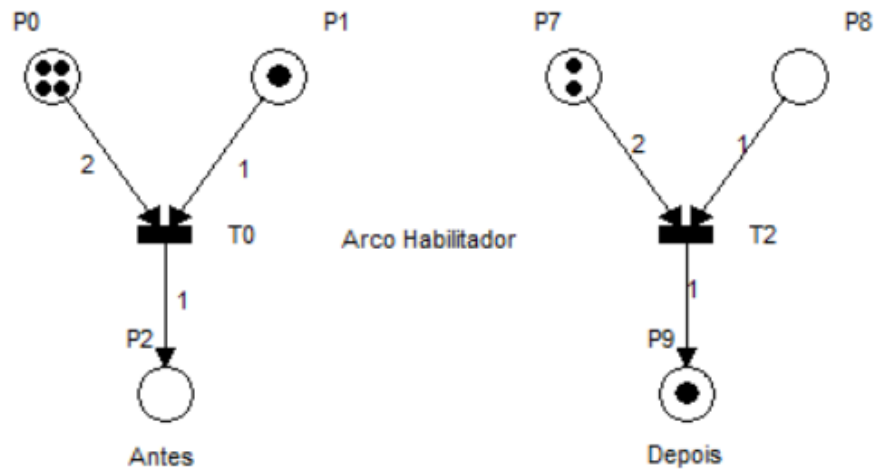


Figura 6 - Exemplo de um sistema com arco habilitador
Fonte: Autor, 2012

2.2.6 RDP COM ARCOS INIBIDORES

Quando duas transições estão em conflito, a priorização é um problema comum numa RdP. Para dar solução ao mesmo, aumentando assim o poder de modelagem das RdPs (Peterson 1981) foram criados os arcos inibidores.

Um arco inibidor é um arco dirigido que une um lugar p_i a uma transição t_j . O extremo final é marcado por um círculo pequeno como mostrado na figura 7. O arco inibidor entre p_2 e t_4 significa que a transição t_4 pode disparar se o lugar p_2 não contém nenhuma ficha. O disparo de t_4 consiste em tomar uma ficha de cada lugar de entrada de t_4 , com exceção de p_2 , e depositar uma ficha em cada lugar de saída de t_4 . As expressões teste zero e RdPs estendidas são frequentemente também usadas na literatura (Murata 1989) para se referir aos arcos inibidores.

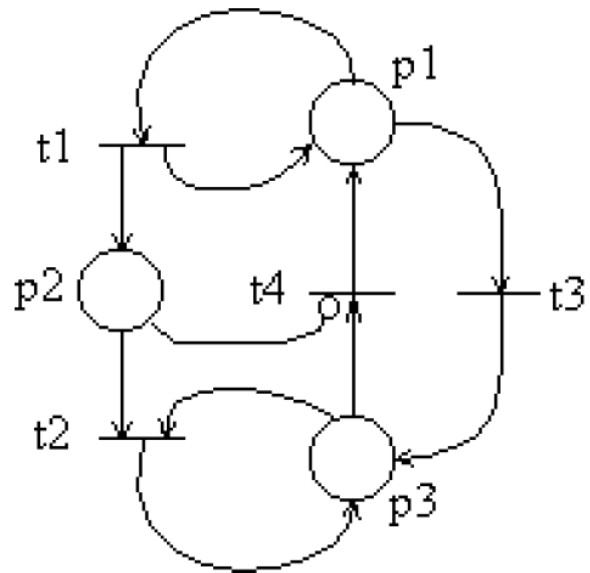


Figura 7 - Exemplo de um sistema com arco inibidor
Fonte: Murata, 1989

3. CONTROLE SUPERVISÓRIO UTILIZANDO REDES DE PETRI

Além de modelar SEDs, as redes de Petri podem também ser utilizadas para se especificar supervisores para tais sistemas. A estratégia de supervisão geralmente utilizada é impedir que o sistema alcance certos estados indesejados, ou seja, forçar a rede a obedecer determinadas restrições. Isso é obtido através da observação da ocorrência de eventos do sistema e da inibição de eventos de modo a impedir que o sistema alcance estados indesejados.

A Teoria do Controle Supervisório foi proposta por Ramadge e Wonham (abordagem R&W) (Ramadge e Wonham, 1989). Essa teoria é baseada em linguagens formais e autômatos de estado finito e estabelece condições necessárias e suficientes para a existência de um supervisor minimamente restritivo, além de fornecer uma metodologia formal para o cálculo desses supervisores. A partir do conceito de linguagens controláveis, é possível lidar com o fato de que a ocorrência de alguns eventos em um SED não pode ser impedida por uma ação de controle. Um fator que limita bastante o uso desta abordagem, no entanto, é a “explosão” do número de estados com o crescente número de componentes do sistema. Apesar deste problema ter como ser reduzido com o uso da abordagem modular (Queiroz e Cury, 2000), a complexidade do controlador resultante pode dificultar sobremaneira sua implementação prática. Como uma alternativa à complexidade inerente à abordagem R&W, diversos trabalhos têm explorado a simplicidade e o poder gráfico das Redes de Petri.

3.1 DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE DE CONTROLE

A evolução do software para sistemas flexível de manufatura tem estado fortemente relacionada com os avanços tecnológicos nas áreas de manufatura e de ciências da computação. A integração dos dispositivos de manufatura tem sido realizada através da automação destes dispositivos, a partir da utilização de unidades de controle numérico e do desenvolvimento de interfaces de software que facilitem esta integração. A tarefa de integração dos vários dispositivos de um sistema de manufatura apresenta requisitos como: suporte de hardware (conexão física dos componentes) e suporte de software (conexão lógica dos componentes) adequado.

Além disto, é necessário um software adicional para coordenar as operações dos diversos dispositivos e para implementar as estratégias de controle destes sistemas integrados. Este software, usualmente, recebe o nome de software de controle (RIBEIRO, 2009).

Na maioria dos casos, o software de controle é desenvolvido, utilizando-se linguagens gráficas, como diagramas lógicos de relés (Relay Ladder Logic). Estes diagramas especificam os procedimentos de entrada e saída de um Controlador Lógico Programável (CLP), que dirige as operações dos dispositivos de manufatura. Todas as combinações das entradas de um CLP, que são significativas ao processo controlado, devem ser capturadas pelo diagrama. Estes diagramas são considerados de baixo nível de abstração e difícil interpretação. Em alguns casos outras linguagens gráficas, com nível de abstração mais alto, são utilizadas. É o caso dos diagramas de funções sequenciais (Sequential Function Chart), ou Grafcet, onde o fluxo de controle é descrito através da utilização de fluxogramas; e as ações e decisões são descritas, utilizando-se diagramas lógicos ou linguagem C.

O desenvolvimento de software de controle para sistemas flexíveis de manufatura é considerado como uma tarefa difícil, principalmente devido à complexidade que estes sistemas apresentam tanto em nível conceitual como em nível de implementação. Além disto, o desenvolvimento do software de controle representa um custo alto no que diz respeito ao desenvolvimento de sistemas de controle de chão-de-fábrica.

A utilização de esquemas de representação convenientes e ambientes de desenvolvimento que possibilitem a criação de sistemas de controle flexíveis (genéricos) e de fácil utilização, são importantes na busca da diminuição dos custos de desenvolvimento e da complexidade de implementação desses sistemas.

4. ESTUDO DE CASO: ESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO FESTO

O Sistema de estudo é a Estação de Distribuição FMS195780, que é uma das células de manufatura didáticas fabricadas pela FESTO. A estação simula a distribuição de uma linha de produção onde as peças armazenadas no magazine são movidas para segunda estação que fará a separação dessas peças quanto cor, material e espessura.



Figura 8 - Estação de Distribuição Didática FMS195780 - FESTO
Fonte: Catálogo FESTO

4.1 ESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DESCRIÇÃO DO FMS DIDÁTICO

A alimentação de peças brutas se dá na estação de distribuição. Essas peças são empilhadas no magazine do tipo FIFO (first in, first out - primeiro a entrar, primeiro a sair), ou seja, as peças brutas são colocadas no topo da pilha e o sistema utiliza sempre a peça de sua base.

Esta estação é separada pelos módulos de alimentação conforme figura 9 e transferência, figura 10.



Figura 9 - Módulo de Alimentação - MAGAZINE
Fonte: Catálogo FESTO

O módulo de alimentação é composto por um magazine com capacidade para 8 peças que devem ser empilhadas com o lado aberto virado para cima, onde a presença dessas peças é monitorada por um sensor de barreira. Além de um atuador, cilindro de dupla ação pneumático (também chamado de empurrador), que empurra a peça de trabalho até a parada mecânica na posição que serve como um ponto de transferência para o próximo módulo. A posição desse cilindro é detectada por dois sensores indutivos e a velocidade de avanço e retração é ajustada por meio de válvulas de controle de fluxo unidirecional. A peça ao chegar no ponto de transferência é detectada por meio de um segundo sensor de barreira.



Figura 10 - Braço Manipulador Pneumático
Fonte: Catálogo FESTO

O módulo de transferência é constituído por um atuador de manipulação pneumático (manipulador) semi-rotativo ajustado entre 0° e 180° por dois sensores de

fim de curso, e utiliza uma ventosa para segurar a peça que chega no ponto de transferência e levar para a estação de separação.

O objetivo da estação de distribuição é:

1. monitorar a presença de peça no magazine;
2. retirar uma peça por vez do magazine e colocar na posição de apanha;
3. posicionar a peça na estação seguinte.

A sequência de operação indicada pelo fabricante é a seguinte:

Condições iniciais:

- a) Empurrador recuado (cilindro avançado)
- b) Manipulador em 0° (posição no magazine)
- c) Vácuo desligado

Sequência:

- 1) Se identificado peça no magazine e botão START pressionado, levar manipulador para 180°;
- 2) Empurrar peça;
- 3) Levar manipulador para 0°;
- 4) Ligar vácuo;
- 5) Recuar empurrador;
- 6) Levar manipulador para 180°;
- 7) Desligar vácuo;
- 8) Levar manipulador para 0°;
- 9) Posição inicial.

Verifica-se que se houver mais de uma peça na pilha essa não é a sequência ótima. Tomando como exemplo o caso em que haja duas peças na pilha, o tempo de processamento utilizando a sequência sugerida é de 7 segundos para cada peça. Como uma peça não pode ser retirada da pilha enquanto o atuador de manipulação está na posição 0°, este faz um movimento para 180° sem peça. O processamento de 2 peças provoca esse movimento 2 vezes com peça e 2 vezes sem peça. Uma programação alternativa é retirar a segunda peça da pilha enquanto a primeira é levada para a estação seguinte. Desse modo, quando é solicitada a segunda peça, o atuador de manipulação realiza o movimento de 0° para 180° apenas uma vez. Isso será implementado durante a modelagem.

4.2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO FMS UTILIZANDO RDP

Um FMS pode ser visto como dois sistemas: Um sistema físico e um sistema lógico. Do ponto de vista físico, um FMS é um conjunto de máquinas, ferramentas, matérias primas e produtos. Do ponto de vista lógico, um FMS é um conjunto de processos, assim como o estado das máquinas e materiais num job-shop. O processo de manufatura significa, portanto, a evolução do sistema, o qual pode ser estudado pela árvore de alcançabilidade. Ambos os aspectos, físico e lógico de um FMS, podem ser descritos, portanto por uma só RdP (Favrel, 1985).

Existem outros métodos formais para realizar tal tipo de modelagem, porém o método adotado é o que mais se aproxima da linguagem Grafcet, que será a linguagem utilizada neste estudo.

Para execução da modelagem da estação de distribuição, foi utilizado o software HPSim versão 1.1, seguindo os seguintes passos:

- 1) Modelagem dos dispositivos;
- 2) Modelagem do sistema de controle;
- 3) Comunicação por arcos habilitadores e inibidores.

Antes de iniciar a modelagem dos dispositivos, todos eles foram identificados e classificados por TAG, conforme tabela 1

TAG	DESCRIÇÃO
B1	Botão de START
S0	Sensor de Presença de Peça no Magazine
S1	Sensor do Empurrador Recuado
S2	Sensor do Empurrador Avançado
S3	Sensor FDC do Braço Manipulador Lado Magazine
S4	Sensor FDC do Braço Manipulador Lado Esteira
S5	Sensor de Vácuo

Tabela 1 – Identificação dos dispositivos
Fonte: Autor, 2016

Nessa modelagem são especificados todos os dispositivos identificados no sistema e por serem discretos eles serão representados por dois estados, acionado (on) e desacionado (off), conforme figura 11.

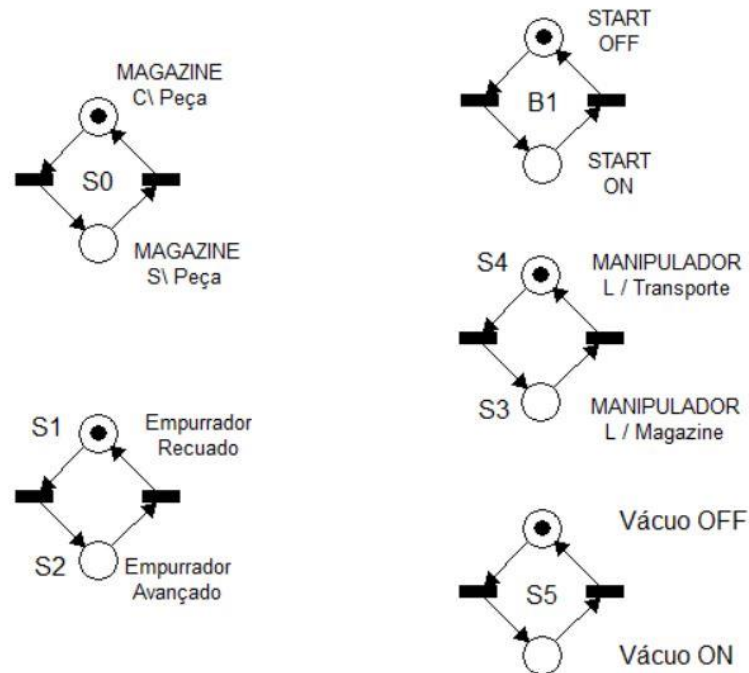


Figura 11 - Modelagem de dispositivos
Fonte: Autor, 2016

Na modelagem do sistema de controle (figura 12), são especificados todos os lugares e transições, onde os lugares (estados) e transições obedecem a sequência determinada pelo processo da planta de distribuição, conforme informações contidas nas tabelas 2 e 3.

LUGAR	DESCRIÇÃO
P0	Magazine com peça / Ordem para iniciar
P1	Ordem para avançar empurrador
P2	Peça na posição de apanha / Ordem para pegar peça
P3	Ordem para ligar vácuo
P4	Ordem para recuar empurrador
P5	Ordem para levar peça para próxima estação
P6	Ordem para desligar vácuo

Tabela 2 – Identificação dos Lugares
Fonte: Autor, 2016

TRANSIÇÕES	DESCRIÇÃO
T1	Início confirmado
T2	Confirma Empurrador Avançado
T3	Confirma Braço Manipulador no Lado do Magazine
T4	Confirma Vácuo Ligado
T5	Confirma Empurrador Recuado
T6	Confirma Braço Manipulador no Lado da Esteira
T7	Confirma Vácuo Desligado

Tabela 3 – Identificação das Transições
 Fonte: Autor, 2016

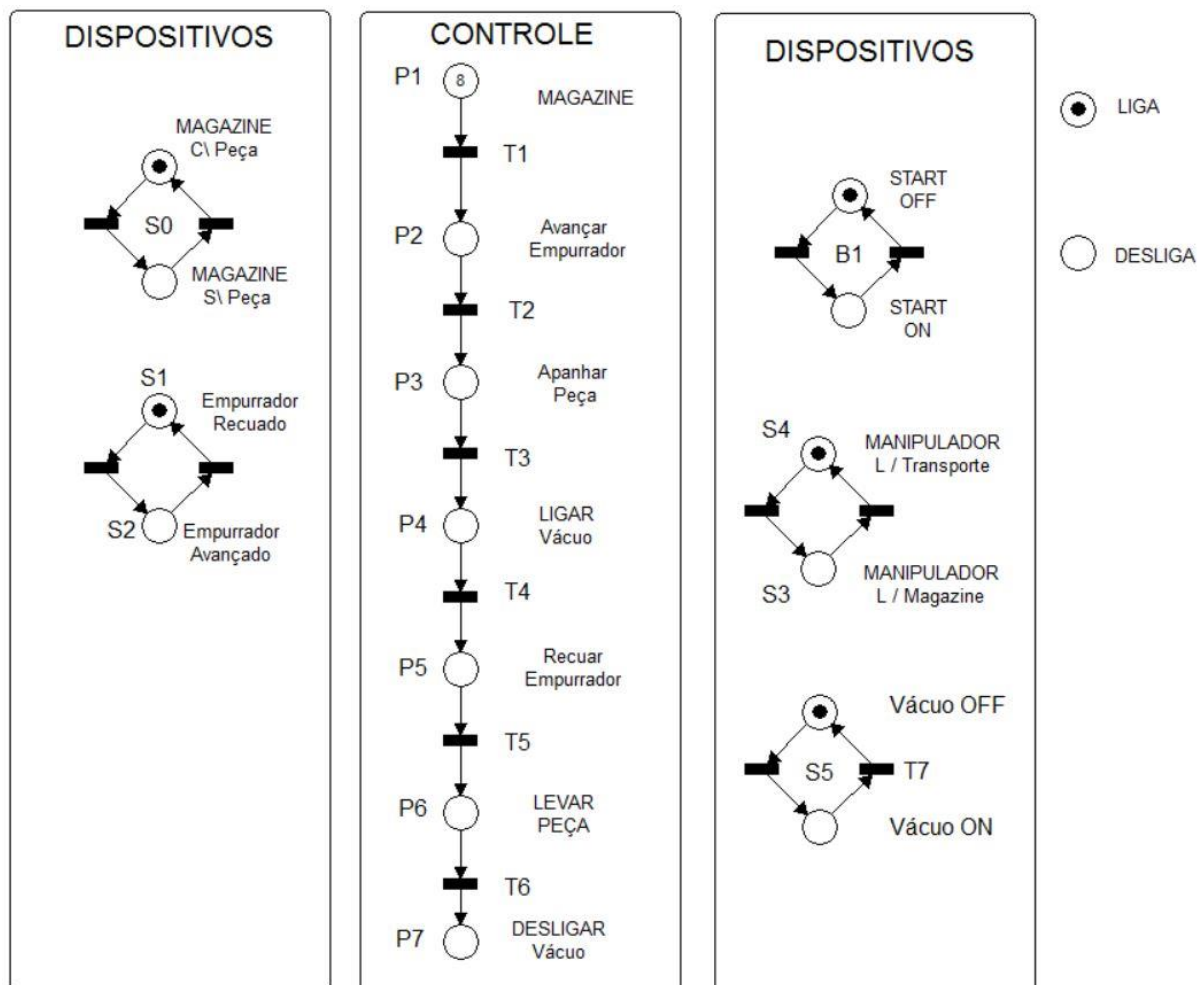


Figura 12 - Modelagem do controle
 Fonte: Autor, 2016

Desta forma o sistema evolui quando todas as pré e pós condições de uma transição forem satisfeitas.

Para finalização da modelagem da estação de distribuição, são adicionados os arcos habilitadores e inibidores conforme figura 13,

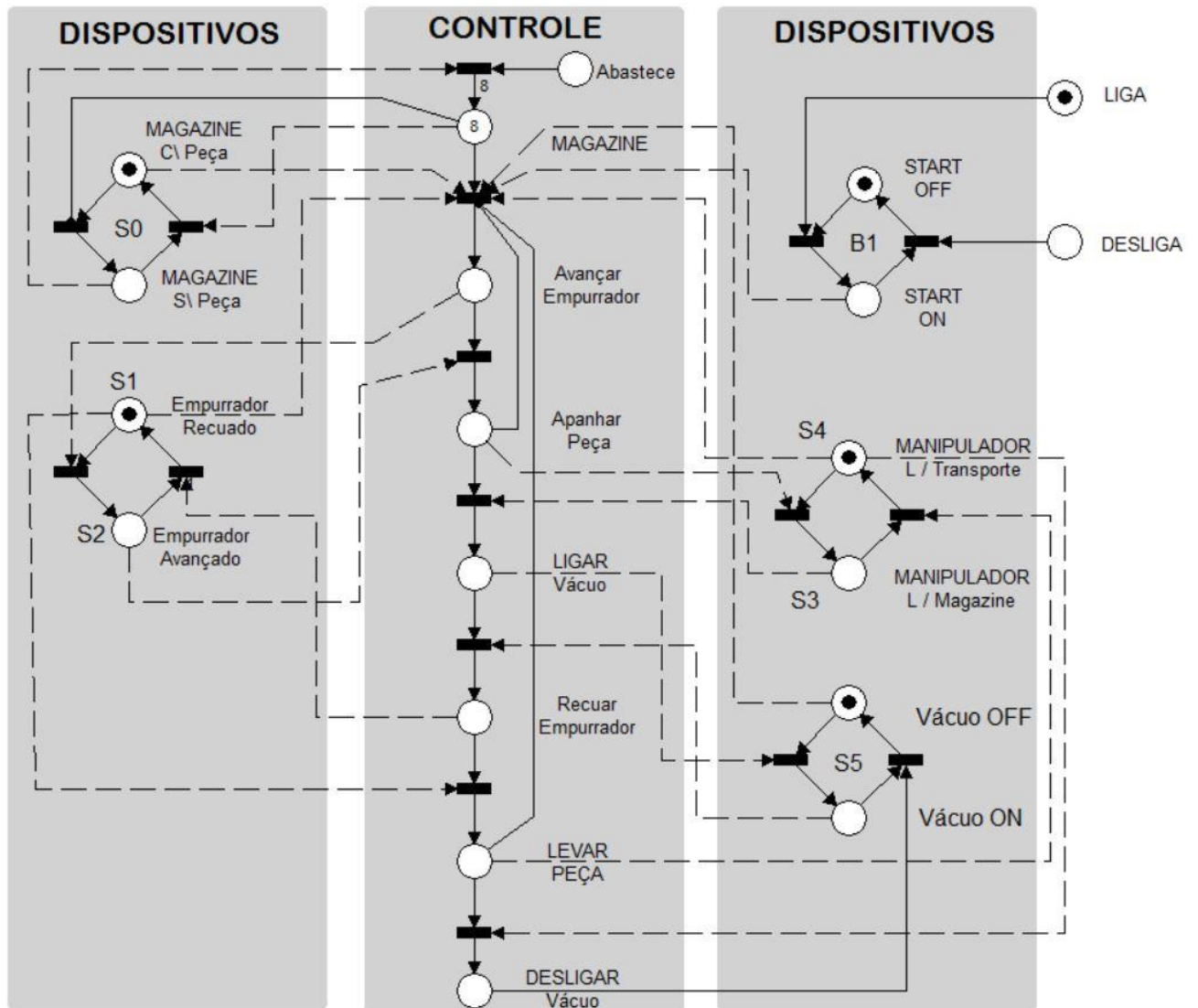


Figura 13 - Modelagem da Estação de Distribuição
 Fonte: Autor, 2016

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DE ESPECIFICAÇÃO DE CONTROLE

Cada estação é originalmente controlada por um PLC modelo F640 da FESTO.

Nesse experimento será usado o PLC 312 (6ES7 312-1AD10-0AB0 / V2.0) e um cartão i/o DI16/DO16x24V/0.5A (6ES7 323-1BL00-0AA0).

Slot	Module	Order number	Firmware	MPI address	I address	Q address
1	PS 307 10A	6ES7 307-1KA00-0AA0				
2	CPU 312	6ES7 312-1AD10-0AB0	V2.0	2		
3						
4	DI16/DO16x24V/0.5A	6ES7 323-1BL00-0AA0			1...2	4...5
5						
6						

Figura 14 – Hardware empregado no projeto.
Fonte: Autor, 2016

A implementação do controle foi desenvolvida utilizando a metodologia de programação chamada Grafcet, onde os estados da RdP passam a ser steps, mantém-se as transições e os sensores antes representados por dispositivos passam a ser contatos abertos e fechados (figura 15).

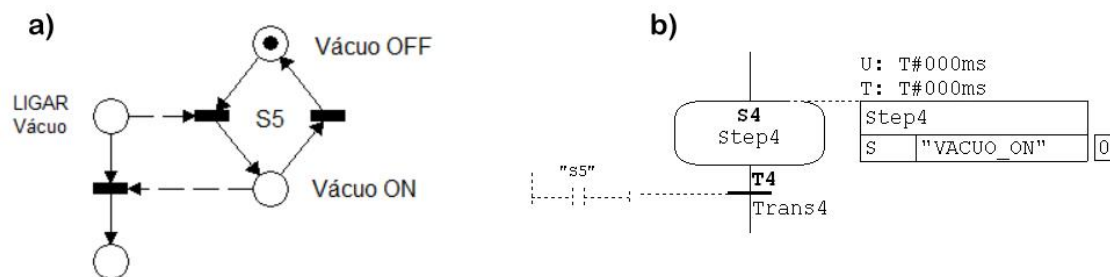


Figura 15 – Comparação entre a simulação (a) e a aplicação em Grafcet.
Fonte: Autor, 2016

Quando a condição se faz verdadeira habilita as transições e os steps (estados) onde são dados as ordens de funcionamento como pode ser visto na figura 16.

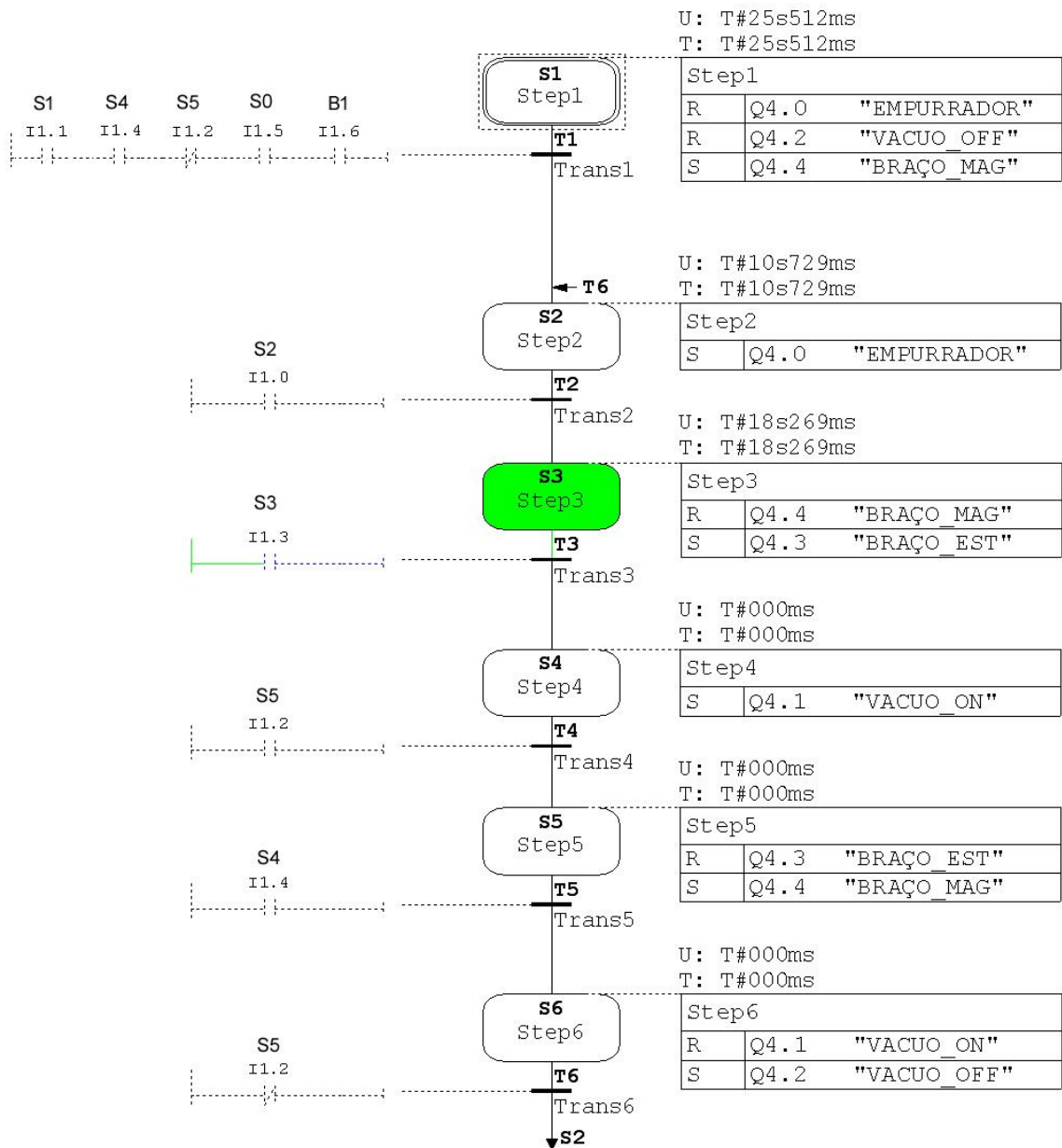


Figura 16 – Implementação de Controle da Estação de Distribuição
Fonte: Autor, 2016

No Step1 é colocado a ação de SET no atuador Q4.4 e RESET nos atuadores Q4.0, Q4.2 que determina a estação na posição HOME. A descrição dos dispositivos I/O é encontrado na tabela 4.

SYMBOL	I/O	TIPO	DESCRIÇÃO
S2	I 1.0	BOOL	Sensor do Empurrador Avançado
S1	I 1.1	BOOL	Sensor do Empurrador Recuado
S5	I 1.2	BOOL	Sensor de Vácuo
S3	I 1.3	BOOL	Sensor FDC do Braço Manipulador Lado Magazine
S4	I 1.4	BOOL	Sensor FDC do Braço Manipulador Lado Esteira
S0	I 1.5	BOOL	Sensor de Presença de Peça no Magazine
B1 - START	I 1.6	BOOL	Botão de START
EMPURRADOR	Q 4.0	BOOL	Atuador do Empurrador
VACUO_ON	Q 4.1	BOOL	Atuador do Vácuo Ligado
VACUO_OFF	Q 4.2	BOOL	Atuador do Vácuo Desligado
BRAÇO_EST	Q 4.3	BOOL	Atuador do Braço Manipulador Lado Esteira
BRAÇO_MAG	Q 4.4	BOOL	Atuador do Braço Manipulador Lado Magazine

Tabela 4 – Identificação dos dispositivos I/O
 Fonte: Autor, 2016

O Step1 (S1) é seguido pela transição1 (T1) que contém os contatos I1.1, I1.2, I1.4, I1.5 e I1.6 que habilitará assim que atendidas todas as condições.

No Step2 Q4.0 é setado, ordem para avançar o empurrador de peças, que habilitará a transição T2 quando a condição do contato I1.1 for verdadeira.

O Step3 seta Q4.3 e reseta Q4.4, ordem para levar o braço manipulador para o lado do magazine, que habilitará T3 quando a condição do contato I1.3 for verdadeira.

No Step4 é setado Q4.1, ordem para ligar a ventosa (vácuo), o contato I4.2 habilitará T4 quando a condição for verdadeira.

O Step5 seta Q4.4 e reseta Q4.3, condições que ordena levar o braço manipulador para o lado da esteira na estação de separação, que habilitará T5 quando a condição do contato I1.4 for verdadeira.

O Step 6 seta Q4.2 e reseta Q4.1, essas condições ordena desligar a ventosa que após a condição do contato I1.2 for falsa, será disparado T6 e o ciclo continuará a partir do Step2.

5. CONCLUSÃO

O formalismo da Rede de Petri permite verificar e validar sua simulação antes de iniciá-la, garantindo que erros não aconteçam nesta fase. Além de suprir uma carência do mercado em documentação nas implementações de software, otimiza o tempo de programação e sua representação gráfica dá uma visão mais clara ao programador principalmente quando forem substancialmente altos os números de dispositivos a serem programados. Essas vantagens proporcionadas, reduz o tempo de implantação, comissionamento e start-up em projetos que envolvem FMS, aumentando a produtividade e conseqüentemente reduzindo custos.

As RdPs, mesmo com seu alto poder de modelagem e simulação, são de fácil implementação em controladores de diversos fabricantes como por exemplo Siemens (Grafcet), Rockwell (SFC - Sequential Function Chart), Schneider (SFC) entre outros que são de larga utilização no ambiente industrial, o que permite facilmente a aplicação deste método em ambientes industriais.

Trabalhos futuros podem integrar outras estações didáticas de manufatura simular uma planta CIM completa, como também pode ser desenvolvido sistema supervisorio para monitoramento das variáveis de processo.

6. REFERÊNCIAS

BERIO, Giuseppe, DI LEVA. "The M* Object Methodology for Information System Design in CIM Enviroments". January, 1995.

BRESSAN, G. Modelagem e simulação de sistemas computacionais. Capítulo sobre Redes de Petri, LARC-PCS/EPUSP, 2002. 2002.

CAULLIRAUX, Heitor; "Integração de Sistemas de Produção e CIM: Modelos e Aplicações" - Manufatura Integrada por Computador - cap. 2 - Ed. Campus - 1995.

DANEELS, A. e Salter, W. (1999) What is SCADA? International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, Trieste, Italy.

DESROCHES, A. A. and R. Y. Al-Jaar. Applications of Petri Nets in Manufacturing Systems. IEEE Press, 1995.

ERSCHLER, J. and Tersac, G., 1988. "Flexibilité et rôle de l'opérateur humain dans l'automatisation intégrée de production" Rapport LAAS, No 88173

FAVREL, J.; Lee, K.H. Hierarchical Reduction Method for Analysis and Decomposition of Petri Nets. 1985.

HO, Yu-Chi, "Introduction" in Discrete Event Dynamic Systems: Analysing Complexity and Performance in the Modern World, IEEE PRESS, 1992.

LIMA II, E.J. Uma Metodologia para a implantação através de CLPs de controle supervisorio de células de manufatura utilizando redes de Petri. Mestrado apresentado no programa de pós-graduação em engenharia elétrica da escola Politécnica da UFBA, 2002.

PALOMINO, R. C. (1995) Uma Abordagem para a Modelagem, Análise e Controle de Sistemas de Produção Utilizando Redes de Petri. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Peterson, J. L. Peterson. Petri Nets an Introduction. Prentice-Hall, 1981.

P. Maciel, R. Lins, and P. Cunha. Introdução as Redes de Petri e Aplicações. Escola de Computação Campinas-SP, julho de 1996.

RAMADGE, P.J.; WONHAM, W. M. The control of discrete event systems, Proceedings of IEEE, Special Issue on Discrete Event Dynamic Systems, 77, p. 81-98, 1989.

RIBEIRO, As. Modelagem e especificação de controle de sistemas flexíveis de manufatura utilizando redes de Petri de alto nível. Mestrado apresentado no programa de pós-graduação em engenharia Mecatrônica da escola Politécnica da UFBA, 2009.

Russell, R. S. e Taylor III, B. W.: Production and Operation Management - Focusing on Quality and Competitiveness, Prentice-Hall, 1995

SEVERIANO FILHO, Cosmo. O Enfoque Vetorial da Produtividade em um Sistema de Avaliação para a Manufatura Avançada na Indústria de Alimentos. Tese de Doutorado, Florianópolis, UFSC, 1995.

SILVA, M. e Valette, R., 1989. "Petri Nets and Flexible Manufacturing" Lecture Notes in Computer Science, pp. 374-417.

SEVERIANO FILHO, C. Produtividade & manufatura avançada. João Pessoa: Edições PPGE. 1999.

FENG 2016, Automacao e Controle, Acessado em 30/04/2016:

http://www.feng.pucrs.br/professores/tergolina/Automacao_e_Control/APRESENTA_CAO_-_Lab_01_Identificacao_dos_Componentes_da_Arquitetura_de_Control.pdf

FESTO 2016, Catalogo - Estação de distribuição. Acessado em 15/04/2016:

<http://www.festo-didactic.jp/jp-ja/3640/mps/mps/3943.htm?fbid=anAuamEuNTYwLjE4LjE4LjYwNi4zOTQz>