

SIMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA CÉLULA DIDÁTICA DE MANUFATURA INTEGRADA

SIMULATION AND IMPLEMENTATION OF AN INTEGRATED MANUFACTURING TEACHING CELL

Data de entrega dos originais à redação em: 01/02/2015
e recebido para diagramação em: 07/02/2017.

Clayton José Torres ¹
John Faber Archila Diaz ²
Mário Luiz Tronco ³

A indústria nacional visando maior integração e participação no mercado global tende a investir na automação de suas linhas de produção, buscando maior eficiência e qualidade em seus produtos, procurando responder de forma rápida e eficiente às mudanças impostas pelo mercado. Nesse contexto, os sistemas flexíveis de manufatura (FMS), têm apresentado bons resultados, entre eles, vale destacar, a melhor utilização de máquinas e equipamentos, redução de estoque intermediário, entre outras vantagens. No entanto, a sua utilização requer um amplo conhecimento técnico, o qual permitirá que a empresa desfrute dos benefícios gerados pelo emprego do FMS. Considerando essas necessidades o presente trabalho visa aliar o conhecimento teórico deste conceito de manufatura, com simulação e aplicação prática, apresentando uma modelagem simulada e a implementação de um FMS para a seleção de peças de acordo com o tamanho e material. O modelo desenvolvido tem como principal proposta aprimorar técnicas de ensino, para que possam ser aplicadas em cursos técnicos e tecnológicos com matérias multidisciplinares como, por exemplo, no curso de mecatrônica. Para tal foi utilizado um equipamento didático, o qual integrou dois manipuladores robóticos a uma esteira transportadora com dispositivos mecatrônicos utilizados em automação industrial; simulando um ambiente semelhante a uma planta fabril, cujo emprego pode ser tanto para a pesquisa como, na aplicação de conceitos teóricos estudados pelas várias áreas de conhecimento. A modelagem quando trabalhada em paralelo com as simulações melhora a compreensão do sistema por parte do aluno, permitindo uma redução significativa no tempo de aprendizagem e na instalação do equipamento, quando comparado ao ensino teórico sem o recurso da simulação.

Palavras chave: FMS. Simulação. Robótica. Automação.

The national industry, seeking greater global market integration and participation, tends to invest in the automation of the production lines, resulting in greater efficiency and quality in products and quicker and more efficient response to changes imposed by the market. In such context, flexible manufacturing systems (FMS) have shown good results, including the best use of machinery and equipment, reduction of intermediate stock, among other advantages. However, its use requires extensive technical knowledge. Taking these requirements into consideration, this paper aims to combine theoretical knowledge of this manufacturing concept with simulation and practical application, presenting a model and implementing FMS for the selection of pieces according to size and material. The model is mainly aimed at improving teaching techniques for application in technical and technological courses with multidisciplinary studies, such as mechatronics. For that matter, a device integrating two robotic manipulators to a conveyor belt with mechatronic components has been developed. This device simulates a manufacturing plant which can be used both for research and in the application of theoretical concepts studied by the various fields of knowledge. This model, when worked in parallel with simulations, helps students to learn more effectively, reduce study and installation time when comparing to theoretical teaching without simulation resources.

Keywords: FMS. Simulation. Robotics. Automation.

1 INTRODUÇÃO

No cenário atual, mudanças tecnológicas tem motivado o aprimoramento de conceitos e tecnologias empregados na indústria de produtos manufaturados, com o surgimento de novas ferramentas, um exemplo, são os Sistemas Flexíveis de Manufatura (FMS). Tais ferramentas promovem o melhor aproveitamento de máquinas e equipamentos e, proporcionam produtos de melhor qualidade, além de aumentar significativamente a produtividade e consequentemente a lucratividade. Fatores considerados essenciais para manter as indústrias ativas em um mercado competitivo.

Entretanto, tais mudanças exigem o aprimoramento de conhecimentos e habilidades, por parte dos gestores e, mão de obra especializada para alcançar bons resultados e os benefícios gerados pela implantação dessas ferramentas.

O presente trabalho, tem como principal objetivo apresentar um modelo, no qual se aplica um Sistema de Manufatura Flexível. Para tal, é utilizado uma simulação do FMS proposto, com Redes de Petri Coloridas utilizando o *Software CPNtools*, uma simulação com o *Software Matlab* da cinemática do manipulador robótico e, um conjunto de equipamentos para fins

1 - Professor Instituto Federal de São Paulo Araraquara. < claytoncjt@yahoo.com.br >.

2 - Professor Instituto Federal de São Paulo Araraquara.

3 - Professor Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

didáticos que possui: dois braços robóticos, os quais foram integrado por um controlador lógico programável (CLP), uma correia transportadora dotada de diferentes tipos de sensores e atuadores utilizados na indústria. O trabalho se inicia com um contexto geral sobre FMS, descreve os materiais e os métodos empregados, apresenta um modelo matemático da cinemática dos manipuladores robóticos e, as simulações com a rede de Petri e das cinemáticas direta e inversa, e se encerra com as conclusões.

2 SISTEMAS DE FABRICAÇÃO

Com um mercado consumidor cada vez mais exigente, o qual procura qualidade, rapidez e diversidade nos produtos, a indústria moderna passa por uma readequação em sua forma de produzir. Para se adequar a essas necessidades, se faz necessária uma reformulação no sistema de produção para que se possam diminuir os estoques intermediários durante a produção e aumentar a diversificação dos produtos, sem prejudicar a produtividade (SIMA, 1995).

Uma solução encontrada pela indústria de manufatura nacional para atender tal exigência dos consumidores e se tornar competitiva, mantendo-se integrada e participativa no mercado nacional e mundial, está sendo o investimento na automação de suas linhas de produção e a utilização de conceitos empregados em sistemas modernos de manufatura com o objetivo de melhorar a eficiência e a qualidade em seus produtos. Entre os inúmeros conceitos empregados atualmente no setor produtivo, o presente trabalho destaca o Sistema Flexível de Manufatura ou simplesmente FMS, o qual será descrito a seguir.

3 SISTEMA FLEXÍVEL DE MANUFATURA

Os sistemas flexíveis de manufatura têm como característica, a capacidade de alterar sua forma de

produzir, alternando na produção de uma grande variedade de produtos, utilizando-se dos mesmos equipamentos e sistemas de controle. Essa flexibilidade, quando empregada na indústria de manufatura traz inúmeros benefícios para o seu sistema de produção, entre eles, a mínima intervenção dos operadores e a possibilidade de produzir em pequenos lotes, mantendo a boa qualidade das peças. Isso só é possível devido ao layout do FMS, o qual se utiliza de esteiras transportadoras e manipuladores robóticos para movimentação e posicionamento das peças em suas respectivas estações de trabalho.

Um FMS pode ser definido como um sistema que contém máquinas automatizadas, para o processamento da matéria-prima em produto final, sendo que, as máquinas obedecem a uma configuração que as interligam através de um sistema de transporte, manipulação e armazenagem, também automatizados e controlados por um computador industrial (SLACK, et al., 2002; SANTOS, 2007).

Segundo Groover (2007), os sistemas flexíveis de manufatura, seguem duas configurações básicas, que são elas, em linha e em escada, tais formas estão descritas abaixo e seus layouts característicos são apresentados na Figura 1.

- Em linha, onde as máquinas e estações de trabalho ficam dispostas na lateral da esteira transportadora que trabalha em ambos os sentidos.
- Em escada, onde as estações de trabalho e as máquinas estão localizadas entre as esteiras transportadoras.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção descreve o experimento e a simulação com as redes de Petri e também apresenta os modelos matemáticos utilizados nos manipuladores robóticos e o processo na qual será aplicada, neste caso, para um processo de separação de peças de acordo com o tamanho e o material utilizado. Tal processo tem como foco facilitar a aprendizagem do aluno e gerar um ambiente semelhante ao encontrado em uma planta industrial, o ambiente educativo tem o objetivo

de facilitar a inserção dos conceitos empregados em automação e robótica de forma prática. Os equipamentos integrados fazem parte do laboratório de robótica e automação industrial do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, campus Araraquara (IFSP) e podem ser visto na Figura 2.

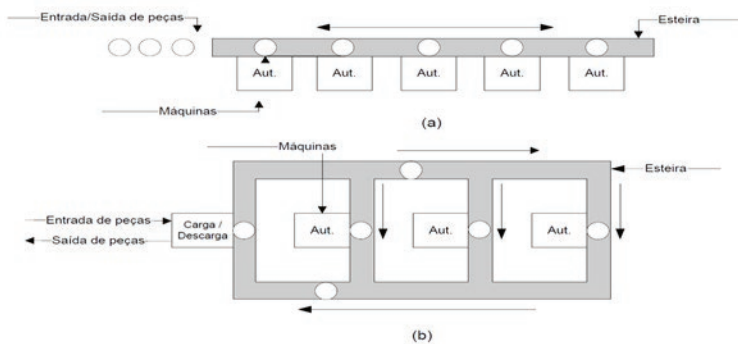


Figura 1 - Layouts do FMS, (a) em linha, (b) em escada adaptado (GROOVER, 2007).

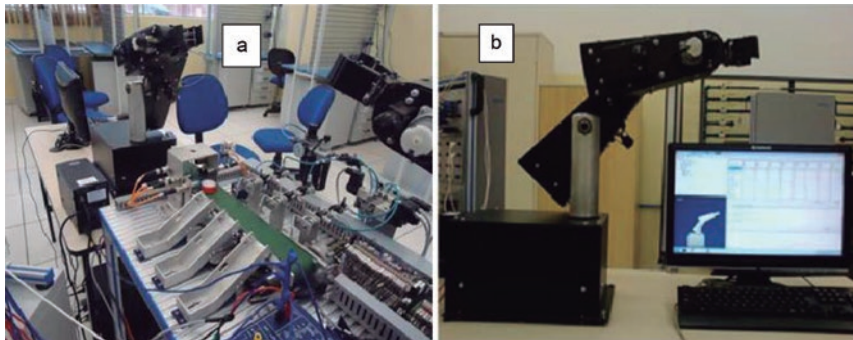


Figura 2 - Equipamento didático utilizado no FMS, a) esteira transportadora, b) robô.

4.1. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

O equipamento utilizado no FMS proporciona a integração entre dois manipuladores robóticos e, diferentes sensores como, por exemplo, capacitivo, indutivo, óptico e fotoelétrico, motor elétrico DC com codificador, atuadores elétrico-pneumáticos e uma correia transportadora. Os elementos foram mostrados na Figura 2, onde é possível observar nas fotos os seguintes componentes:

a) correia transportadora com sensores e componentes elétrico-pneumáticos; b) apresenta o braço robótico.

Um dos desafios do modelo proposto de FMS é a integração entre os equipamentos utilizados, o qual se deve a vários fatores como, por exemplo, diferentes conexões e tensões de trabalho. Para possibilitar tal integração dos equipamentos, foi empregado um sistema de controle independente com um CLP e um conversor digital/analgógico (D/A). Sendo que o presente trabalho tem seu modelo real contruído com base no esquemático do FMS mostrado na Figura 3. Em seu desenvolvimento juntamente com os alunos, o FMS passa por um processo de simulação utilizando redes de Petri coloridas, que possibilita entender e analisar seu funcionamento, também foram gerados modelos matemáticos e simulações referentes à cinemática empregada nos braços robóticos, com o intuito de reduzir o tempo de integração. Um desenho com o esquema do FMS implementado pode ser visto na Figura 3.

Na Figura 3 são mostrados, os sensores e equipamentos que compõe a célula didática composta pelos seguintes equipamentos:

- Um buffer de entrada de peças com um sensor capacitivo, utilizado para indicar a presença de peça e enviar o sinal para o robô pegar;
- Dois braços robóticos didáticos, dos quais, um é responsável por alimentar o processo e, o outro, é utilizado para retirada de peças metálicas na saída da esteira;
- Um selecionador de peças composto por três sensores ópticos que seleciona as peças de acordo com o seu tamanho e, um sensor indutivo instalado em série para fazer a identificação do material da peça;

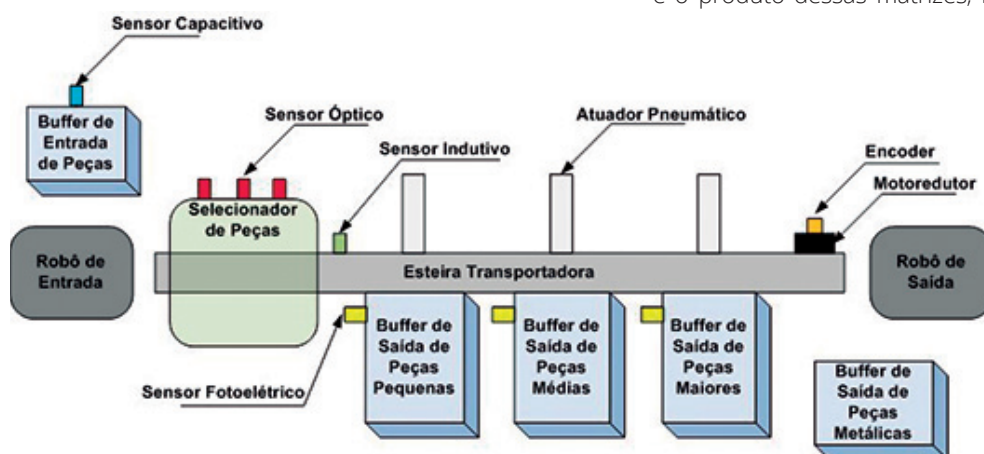


Figura 3 - Esquemático do FMS didático

- Uma esteira transportadora com motor DC, um encoder utilizado para indicar posicionamento velocidade e sentido de giro e, um conversor D/A para controle da velocidade da esteira.

4.2. Modelos Matemáticos

Para a representação dos movimentos espaciais existem vários métodos, tais como: matriz de rotação, vetores, quaternions, pitch oscilação e de guinada, ângulos de Euler e matriz homogênea, entre outros (BARRIENTOS, 1997). O método selecionado utilizado para o desenvolvimento do modelo matemático neste trabalho é a matriz homogênea. As matrizes são homogêneas 4x4, que podem representar rotações, traduções, escalas e perspectivas (OLLERO, 2001).

Em geral, as matrizes homogêneas representam transformações lineares. A forma geral é apresentada na equação (1).

$$A = \begin{bmatrix} R(3 \times 3) & T(3 \times 1) \\ P(1 \times 3) & E(1 \times 1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$R(3 \times 3)$ corresponde a uma matriz de três linhas por três colunas, e representa as rotações,

$T(3 \times 1)$ corresponde a uma matriz de três linhas por uma coluna que representa a translação,

$P(1 \times 3)$ corresponde a um vetor de uma linha e três colunas que representa a perspectiva,

$E(1 \times 1)$ corresponde a um escalar que representa a escala da transformação.

Para este caso, $p = 0$ e $E = 1$ (KURFLES, 2005). O movimento é representado por uma matriz resultante do produto entre as matrizes homogêneas, cada uma mostra o sistema de coordenadas associado a cada posição e movimento.

Modelo cinemático: o modelo cinemático é composto pela cinemática direta e a inversa (TSAI, 1999). Para encontrar o modelo cinemático direto, usando o método de matriz homogênea, é necessário definir um sistema de coordenadas a partir da base fixa até o último link (DENAVID, 1955). Para cada movimento, matrizes homogêneas são obtidas e o resultado final é o produto dessas matrizes, incluindo os graus de

liberdade DOFs (FU, 1987), em resumo, com a cinemática direta obteve-se a posição final do manipulador, em função do sistema de coordenadas. No outro caso, a cinemática inversa procura as coordenadas de cada grau de liberdade (conjunto), com base, na posição final do robô (Figura 4).

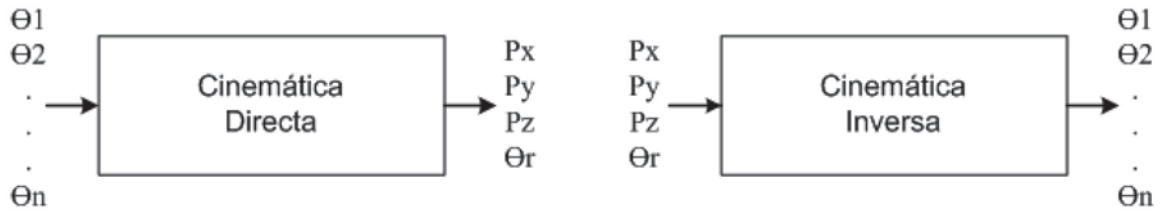


Figura 4 - Definição cinemática direta e inversa (ARCHILA, 2007)

Na Figura 4, podem ser observados os modelos cinemáticos direto e inverso, no caso para integração entre os robôs e a esteira transportadora, é preciso conhecer ambos modelos cinemáticos e considerar as fases de cada processo, cujo conceito é apresentado a seguir.

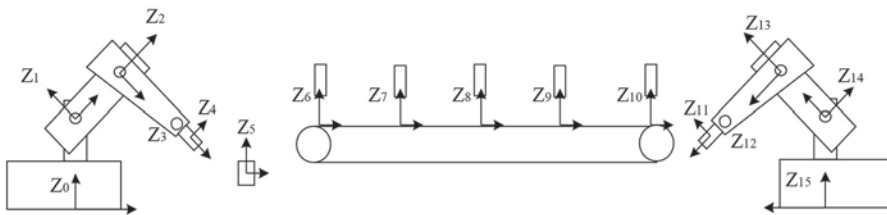


Figura 5 - Sistema de referência dos robôs e do FMS

Na Figura 5 são apresentados os sistemas de coordenadas gerais do modelo do FMS didático, sendo que de Z0 a Z4, formam os sistemas de coordenadas do robô de entrada, Z5 está associado à presença da peça no início do processo, os pontos marcados de Z6 a Z10 são as etapas intermediárias que compõem o processo, Z10 é o ponto de referência para o acionamento do robô de saída. Z11 a Z15 são os sistemas de coordenadas do robô de saída.

Para um dado Z5, é obtido um valor (posição) aqui chamado de Θ , que move o braço de Θ_0 para Θ_4 , este movimento está diretamente associado as coordenadas utilizadas pelo robô de Z0 a Z4, empregando o modelo cinemático inverso, o robô se move para uma nova posição, no caso a Z6, onde ele deposita a peça na esteira. Na sequência, de acordo com o tamanho e tipo de material que a peça foi confeccionada a esteira pode parar em qualquer ponto de Z6 a Z10, porém, quando parar no ponto Z10 o robô de saída calcula a posição por meio de equações cinemática direta e/ou inversa e, posiciona o robô em Θ_{11} e após a retirada da peça o movimenta para a posição Θ_{15} e a entrega na posição final. Os modelos matemáticos são dados pelas seguintes equações de 2 a 4.

$$T_0^4 = A_0^1 \times A_1^2 \times A_2^3 \times A_3^4 \quad (2)$$

$$T_6^{10} = A_6^7 \times A_7^8 \times A_8^9 \times A_9^{10} \quad (3)$$

$$T_{15}^{11} = A_{15}^{14} \times A_{14}^{13} \times A_{13}^{12} \times A_{12}^{11} \quad (4)$$

A equação 2, representa a cinemática direta do robô utilizado para o início do processo e localizado na entrada da esteira;

A equação 3, representa a cinemática direta do processo de separação de peças em seus respectivos buffers;

A equação 4, representa a cinemática direta do robô de saída, com as equações (2) e (4) encontra-se a cinemática inversa e resolve no caso as condições presentes no processo de separação: $Z_5 = Z_4$, $Z_5 = Z_6$ e $Z_{10} = Z_{11}$, as quais dependem diretamente do material e do tamanho da peça.

5 RESULTADOS

Nesta seção são apresentadas duas simulações juntamente com seus respectivos resultados. A primeira é uma simulação de um modelo de FMS utilizando redes de Petri coloridas com o auxílio do *Software CPNTools*. A segunda é realizada com o *Software Matlab®* e está diretamente relacionada com os modelos matemáticos da cinemática direta e inversa dos robôs de entrada e saída do processo.

Em seguida são apresentados alguns resultados referentes à implementação do FMS utilizando os equipamentos didáticos, sendo os dados obtidos de forma prática durante o período de quatro semestres, com diferentes turmas durante as aulas de robótica do curso técnico em mecatrônica, onde foram realizadas comparações entre a implementação do FMS com e sem o auxílio das simulações.

5.1. SIMULAÇÃO COM REDES DE PETRI COLORIDAS

A utilização de Redes de Petri Coloridas nas simulações tem como objetivo auxiliar o aluno assimilar o processo de implementação do FMS, sendo possível diferenciar as *marcas* por meio da adição de números ou etiquetas, as quais associam um conjunto de cores das *marcas* que podem pertencer a um determinado *lugar* e, cada *transição* por sua vez, está associada a um conjunto de cores que corresponde à sua forma de disparo.

Uma definição formal desse modelo pode ser encontrada em Cardoso e Valette (1997), onde os autores descrevem uma rede de Petri colorida associada a uma marcação inicial como sendo uma sêxtupla dada por:

$$N_0 = \langle P, T, C_{or}, C_{sc}, W, M_0 \rangle$$

- P é um conjunto finito de lugares;
- T é um conjunto finito de transições;
- C_{or} é o conjunto finito de cores;
- C_{sc} é a função de cores que a cada *lugar* e a cada *transição* associa um subconjunto de

- C_{or} (cores possíveis para este lugar ou esta transição): $C_{cs}: P \cup T \rightarrow P(C_{or})$;
- W é a função de incidência (equivalente a $C = Post - Pre$); cada elemento $W(p,t)$ de W é também uma função
 - $W(p,t): C_{sc}(t) \times C_{sc}(p) \rightarrow IN$
 - M_o é a marcação inicial que associa, para cada lugar e cor possível nesse lugar, um número de marcas.

O presente trabalho utiliza a rede de Petri colorida na sua forma mais simples, onde as cores estão relacionadas de forma direta ao processo a ser executado, o que, facilita a compreensão e o entendimento por parte do aluno. Nesse caso específico de uma célula de separação de peças didática simula um FMS, utilizando o Software CPNTools, uma tela da simulação gerada pelo programa durante sua execução pode ser vista a seguir na Figura 6.

Para facilitar a compreensão do sistema, todos os lugares e as transições utilizadas na simulação receberam um nome em forma de texto, que representa rigorosamente sua função no processo de separação de peças. Desta forma é possível acompanhar e entender o funcionamento da célula. Essa metodologia

acarreta uma série de benefícios como, por exemplo, a compreensão do processo através de uma visão geral e menos abstrata, a qual facilita a geração do programa de CLP responsável pela integração e controle de todo o processo, além de gerar um relatório de fácil compreensão pelo Software, entre outras. Na Figura 6, é possível observar duas legendas que foram acrescentadas, nas quais é possível identificar as marcas e suas respectivas cores como, por exemplo, marca (Encoder) e sua respectiva cor (sem(5)).

5.2. SIMULAÇÃO COM MATLAB

Na simulação realizada com o auxílio do Software Matlab®, a cinemática direta e inversa apresentada é utilizada para orientação do braço robótico. As representações gráficas dos robôs são simplificadas e representadas por linhas, onde cada linha corresponde a um link do robô. Para a cinemática direta são empregados cinco conjuntos de coordenadas referentes as articulações, com incrementos iguais na angulação obtendo-se a posição x, y, e z. No caso de cinemática inversa foi dada uma posição no espaço em coordenadas x, y e z, (posição da peça) para obter as posições das juntas, neste caso, as posições são dadas com incrementos iguais em uma linha reta.

Ambos os modelos simulados servem de base e podem ser utilizados como base na definição do posicionamento dos braços robóticos reais. Os modelos resultantes da simulação podem ser vistos na Figura 7.

A Figura 7 mostra a simulação (a) direta e (b) inversa, do modelo matemático da cinemática do manipulador robótico utilizado pelo FMS. Considerando os três primeiros graus de liberdade, a simulação valida o modelo cinemático e, gera uma opção para desenvolver um planejamento de trajetória que seja mais adequado e eficiente.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta uma modelagem matemática com a simulação de manipuladores robóticos empregados em um FMS e uma simulação geral do processo de separação de peças utilizando redes de Petri colorida, sendo que, tais recursos estão voltados para o ensino de conceitos de automação industrial.

Nesse contexto, após quatro semestres alternando a forma de ensino com e sem o uso das simulações, foi

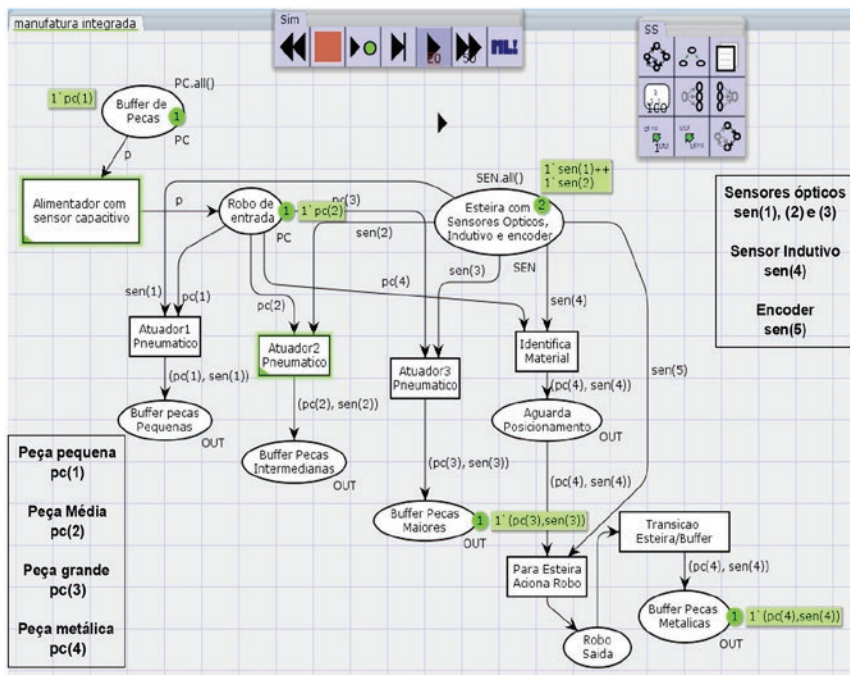


Figura 6 - Tela da simulação do FMS didático durante execução

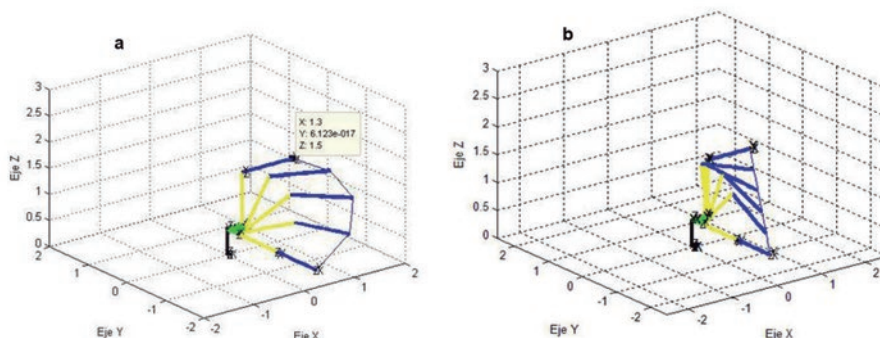


Figura 7 - Simulação cinemática: direta (a) e inversa (b)

notório que o uso das simulações aguça o interesse dos alunos, facilita o entendimento sobre o funcionamento do sistema proposto e diminui significativamente o tempo de aprendizagem. Fato constatado na montagem prática do FMS e na programação do CLP e dos braços robóticos envolvidos no processo, principalmente por alunos dos cursos técnicos noturnos.

REFERÊNCIAS

Archila, J. F.; Dutra, M. S., 2007, "Design and construction of a SCARA Type Manipulator, implementing a control system". In: **Proceedings of the 9th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2007**. Brasília, Brazil.

Barrientos, A. 2001, **Fundamentos de robótica**, McGraw Hill, Madrid, pp. 15 - 38.

Cardoso, J.; Valette, R. **Redes de Petri**. Editora da UFSC, Santa Catarina, Brasil, 1997.

Denavit, J.; Hartenberg, R. S., 1955, A Kinematic Notation for Lower- Pair Mechanism Based on Matrices, **Journal of Applied Mechanics**. V 22: 215 -221.

Fu, K. S., 1987, **Control, Sensing, Vision, and Intelligence**, McGraw H, New york, pp. 82 - 102.

Groover, M. P., 2007, "**Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems**". Terceira Edição. Editora John Wiley & Sons.

Kurfles, T., 2005, **Robotics and Automation Handbook**. CRC Press, New York, pp 26 - 84.

Murata, T., 1989, "Petri Nets: Properties, Analysis and Applications", **Proceedings of the IEEE**, Vol. 77, pp. 541-580.

Ollero, A., 2001, **Manipuladores y robots móviles**, Primera edición, Alfaomega, Barcelona. pp. 43 - 80.

Santos, H. G., 2007, "**Desenvolvimento de um supervisório modular para uma célula flexível de manufatura**", UFSC- Universidade Federal de Santa Catarina, Dissertação de Mestrado, Florianópolis, Santa Catarina. pp. 186.

Sima, A. A. F., 1995, "**Manufatura integrada por computador - Sistemas Integrados de Produção: estratégia, organização, tecnologia e recursos humanos**". Capítulo 5. Rio de Janeiro. Editora Campus.

Slack, N.; Chambers, S.; Johnston, R., 2002, "**Administração da Produção**". Tradução: Maria Teresa Correa de Oliveira, Fábio Alher. Segunda edição. São Paulo: Atlas.

Tsai, L. Wen., 1999. **Robot Análisis**. The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. John Wiley & Sons, Inc. New york. pp. 55-72.

Vieira, G. E. 1996. "**Integração, Gerenciamento e Implantação Didática de Células Flexíveis de Manufatura**". Dissertação de Mestrado, Florianópolis, pp. 179.