

Desenvolvimento de uma Célula Automatizada para o Ensino de Sistemas Integrados de Manufatura

José Alberto Naves Cocota Júnior, Rafael de Souza, Giuliana Ferreira Santos e Roberto Akira Kitahara
Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia
Universidade Paulista (UNIP)
Brasília, Brasil

Resumo—Esse artigo relata a experiência de docência da disciplina de sistemas integrados de manufatura, associada ao projeto e desenvolvimento de uma célula de manufatura. O conteúdo da disciplina de sistemas de manufatura do curso de engenharia elétrica da UNIP é amplo e compreende, e.g., sistemas CAD, CAE, CAM e CIM, robótica fixa, redes de automação, modelagem matemática, controle e acionamento de motores. Como metodologia, optou-se pelo ensino do conteúdo teórico e o desenvolvimento de um trabalho prático, que consistiu em desenvolver uma célula de manufatura com controle descentralizado, que representa o processo de tratamento térmico de uma peça que é manuseada por um manipulador serial com dois graus de liberdade e uma garra de dois dedos.

Palavras-chave—manufatura integrada, educação, barramento de comunicação digital, sistemas embutidos, arquitetura distribuída.

I. INTRODUÇÃO

O objetivo da educação de Manufatura Integrada por Computador (CIM) é prover a indústria de uma nova geração de engenheiros, que possuam habilidades interdisciplinares necessárias para lidar com o estado da arte da tecnologia em projeto, manufatura, manutenção, seleção e aquisição de sistemas de engenharia de manufatura [1]. Um sistema de manufatura é composto por um grupo de estações de processamento, interligadas por um sistema automatizado de manuseio e armazenamento de material e controladas por um sistema distribuído de computação [2]. O controle distribuído, que permite o controle das partes de um processo de forma independente, formando ilhas de automação independentes, passou a ser considerado como uma possibilidade de controle, conforme foram sendo introduzidos os dispositivos digitais programáveis de reduzidas dimensões e baixo custo (microprocessadores, microcontroladores, PLC e DSP) [3].

Em aplicações de manuseio de materiais em células de manufatura, o robô é comumente encontrado tendo uma forte relação com sistemas flexíveis de manufatura (FMS). Uma das primeiras instalações de robô industrial foi feita em 1961, quando o primeiro manipulador Unimate foi usado em uma linha de montagem em uma fábrica da General Motors em Nova Jersey para levantar e empilhar peças de metal fundido retiradas quentes de seus moldes.

Do ponto de vista das disciplinas de engenharia clássica, um curso de nível superior que objetiva abordar o sistema CIM para um engenheiro deveria tipicamente conter tópicos

relacionados ao Projeto Auxiliado por Computador (CAD) e a Manufatura Auxiliada por Computador (CAM), Planejamento de Processos, Automação, Programação de Computadores, Robótica, Planejamento das Necessidades de Materiais (MRP) e Controle de Qualidade [1]. Além desses, a comunicação entre os elementos que compõem um sistema é outro tópico também importante. A cada dia, o uso de controladores automáticos e de dispositivos de medida, na indústria, torna-se cada vez mais comum, passando a comunicação a ser uma tarefa essencial na coordenação dos elementos, para que realizem um trabalho útil. Em geral, a comunicação moderna entre os dispositivos é realizada por meio das denominadas redes digitais [3].

Devido à característica multidisciplinar do tema, no campo de ensino e de pesquisa existem diversos trabalhos que abordam desde a programação de robôs, para operarem em uma célula de manufatura, a estratégias de planejamento e controle de processos de manufatura. O desenvolvimento de uma célula de manufatura robotizada de arquitetura aberta, para realizar tarefas cooperativas envolvendo múltiplos robôs compartilhando e trocando informações por meio de uma rede, foi apresentado em [4]. Uma inovadora interface homem-máquina para um sistema de controle de uma célula de manufatura robotizada, que permite fácil reconfiguração do sistema de controle, como um sistema flexível de manufatura (FMS), para reagir a mudanças em ambas as operações de seqüências de manuseio de peças e na configuração do hardware do sistema de manufatura foi implementada em uma bancada [5]. Trabalhos para reduzir o *lead-time* de processos de engenharia de manufatura, desde a fase de projeto do sistema de manufatura à fase de implementação do sistema de manufatura, foram discutidos em [6] [7]. Outro tópico que tem atraído a atenção das indústrias é a aplicação de ferramentas e princípios de manufatura enxuta [8].

Nesse artigo, o desenvolvimento de uma célula de manufatura, para representar o processo de tratamento térmico de uma peça com o uso de um robô com dois graus de liberdade (GDL) para carregar e descarregar peças em uma câmara de tratamento térmico, é proposto como prática para a disciplina de sistemas integrados de manufatura. O principal objetivo do trabalho proposto foi desafiar os alunos de graduação, que alcançariam a motivação plena quando concluído o trabalho.

II. SISTEMAS INTEGRADOS DE MANUFATURA

A disciplina de sistemas integrados de manufatura do curso de graduação em Engenharia Elétrica da UNIP possui um conteúdo amplo e uma carga horária limitada a 40 horas-aula, sendo duas horas-aula por semana, incluindo o tempo necessário para a avaliação dos alunos no semestre. Para o ensino da disciplina, o conteúdo foi organizado como apresentado na Tabela I. O trabalho proposto aos alunos ajudou no aprendizado da disciplina, suprimindo o tempo limitado do curso, facilitando na fixação de conceitos relacionados ao controle, robótica, redes digitais, sensores inteligentes, programação e acionamento de motores e cargas.

Tabela I
CONTEÚDO PROGRAMÁTICO

Semana	Conteúdo
1	Apresentação do curso e da proposta de trabalho aos alunos
2	Laboratório: apresentação e discussão do trabalho prático
3-4	Projeto Auxiliado por Computador (CAD)
5	Engenharia Auxiliada por Computador (CAE)
6	Laboratório: esclarecimento de dúvidas sobre o trabalho
7	Manufatura Auxiliada por Computador (CAM)
8-9	Introdução a Robótica
10	Manufatura Integrada por Computador (CIM)
11	Redes Industriais
12	Avaliação teórica
13-15	Modelagem matemática de sistemas mecânicos, elétricos e de servomecanismos
16	Acionamento de motores
17	Laboratório: esclarecimento de dúvidas sobre o trabalho
18	Laboratório: avaliação do trabalho - primeira fase
19	Definição do protocolo para integração dos dispositivos
20	Laboratório: avaliação do trabalho - segunda fase

A avaliação dos trabalhos foi efetuada em duas etapas, valendo 50% da nota do semestre. Primeiro, o funcionamento dos dispositivos foi demonstrado de forma isolada, como ocorre em testes de *start-up* em plantas industriais. Depois, os alunos apresentaram o funcionamento dos dispositivos de forma integrada, comunicando em uma rede industrial, para a realização de uma tarefa em conjunto, como em uma célula de manufatura. A nota da avaliação dos trabalhos foi dividida entre apresentação, relatório e trabalho prático.

III. FILOSOFIA DE TRABALHO

As atividades relacionadas ao projeto e à construção do robô foram realizadas por quatro grupos de alunos e envolveram dois encontros para a apresentação de seus trabalhos. É importante notar que a escolha do material, componentes e linguagem da programação foi de responsabilidade dos alunos, dando a eles maior liberdade. Apenas as metas a serem alcançadas pelos grupos foram definidas e, eventualmente, algumas sugestões foram dadas para solucionar os problemas que surgiam durante a execução do projeto. Essa filosofia foi denominada de: “sem regras, apenas metas”, o que estimulou a

criatividade dos alunos e o espírito de equipe, e.g., liderança, a execução das atividades, o cumprimento das metas e dos prazos. Tais atividades os preparariam melhor para enfrentar os desafios no futuro, na condição de profissionais.

A. Grupos

As atividades de cada grupo apresentaram um certo grau de interação com os demais grupos. O grupo 1 ficou responsável pelo desenvolvimento do hardware para o acionamento das juntas do robô manipulador de 2 GDL e da garra de dois dedos. O grupo 2 desenvolveu o hardware para a comunicação de um PC em um enlace RS-485 e um sensor inteligente para medir a temperatura, como mostrado em [9]. O terceiro grupo ficou responsável pelo desenvolvimento de um encoder incremental para a leitura da posição angular do giro do corpo do manipulador. O grupo 4 construiu uma caixa de madeira para representar uma câmara de tratamento térmico e desenvolveu o hardware necessário para o acionamento de um aquecedor (secador de cabelo) e um resfriador (*cooler* de uma fonte de computador).

B. Apresentações

A primeira apresentação do trabalho tinha como finalidade verificar o funcionamento de cada dispositivo de forma isolada. Assim, foram verificados o acionamento das juntas do robô e da garra, a leitura da temperatura, a amostragem da rotação do eixo da junta do giro do corpo do robô, bem como o acionamento do aquecedor e do resfriador do processo de tratamento térmico. O grupo 3 também apresentou a leitura da velocidade angular, acoplando o disco do encoder incremental no eixo de um motor de corrente contínua acionado por uma ponte H de transistores.

A segunda apresentação foi realizada no final do semestre e marca a consolidação do trabalho. Os alunos necessitavam apresentar o funcionamento de todos os dispositivos em conjunto, de forma coordenada para representarem uma célula de manufatura responsável pelo processo de tratamento térmico, no qual o manuseio de uma peça seria realizado por um robô.

IV. PROJETO

Os conceitos relacionados ao projeto e sua execução são apresentados a seguir:

A. Componentes e Estrutura do Robô

O robô com estrutura em cinemática aberta, com 2 GDL, possui configuração geométrica RP (seqüência começando da junta mais próxima à base), onde R denota uma junta de rotação, e P uma junta prismática (ver Fig. 1).

Os elos que compõem a estrutura do manipulador foram confeccionados com chapas de compensado, um material barato, leve e fácil de ser encontrado. Para o acionamento das juntas foram utilizados dois motores de passo de quatro fases. O sistema mecânico que permite efetuar o movimento prismático foi aproveitado de um driver de disquete de 5.25 [in] em desuso. Para abrir e fechar a garra do manipulador foi utilizado um servomotor.

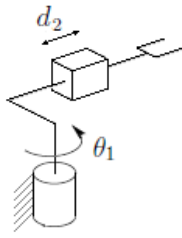


Figura 1. A estrutura do robô.

B. Câmara de Tratamento Térmico

A câmara de tratamento térmico foi representada por uma caixa feita com chapas de compensado. A fonte de calor foi um secador de cabelo acoplado em uma das faces da caixa. Para o resfriamento do interior da caixa utilizou-se um cooler de 12 [Vdc] na parte superior da caixa para a exaustão do ar quente ao final do processo de tratamento térmico da peça. Para o acionamento do secador de cabelo (1,800 [W] de potência em uma rede elétrica de 220 [Vac]) foi utilizado um contator.

C. Hardware

O hardware foi totalmente desenvolvido pelos alunos, sem intervenção do docente. Todos os dispositivos eram microcontrolados para que fosse possível a identificação em uma rede digital com topologia do tipo barramento. Eles deveriam possuir um circuito integrado para a conversão dos sinais TTL dos microcontroladores em sinais do enlace RS-485, e vice-versa, como mostrado na Fig. 2. O PC supervisor era conectado ao enlace RS-485 através de um hardware desenvolvido pelos alunos para a conversão dos sinais da porta USB em sinais do enlace RS-485, e vice-versa (ver Fig. 3).

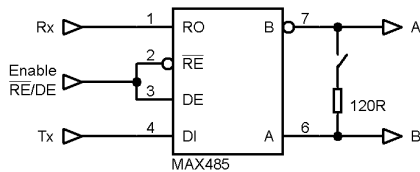


Figura 2. Diagrama esquemático da interface TTL-RS-485.

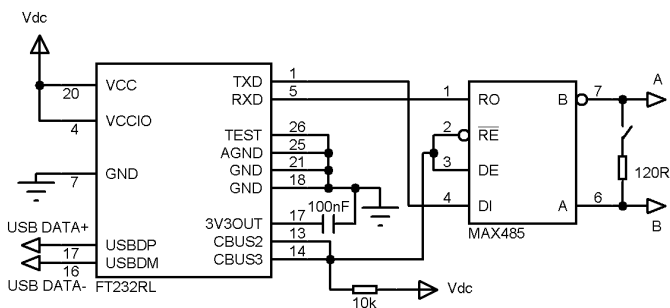


Figura 3. Diagrama esquemático da interface USB-RS-485.

Para o comando dos motores de passo das duas juntas do robô, o grupo 1 optou por utilizar o microcontrolador ATmega168. Ao todo foram utilizados dez (10) canais de E/S desse microcontrolador, sendo oito (8) saídas digitais para o acionamento dos dois motores de passo das juntas através do circuito integrado UNL 2003, uma (1) saída digital para enviar o sinal de referência do servomotor da garra, e uma (1) entrada digital para a leitura do sinal do fototransistor que indica quando a junta prismática está na posição inicial. Um diagrama esquemático da interface de comando do robô manipulador é apresentado na Fig. 4.

O grupo 2 utilizou o microcontrolador PIC16F690 para a medição da saída analógica do sensor de temperatura LM35, que apresenta uma tensão de saída linear e proporcional à variação de temperatura. O microcontrolador utilizado, com conversor A/D de 10-bit, possibilita obter aproximadamente a resolução de 5 [mV/bit]. Na Fig. 5 temos o diagrama esquemático para essa interface.

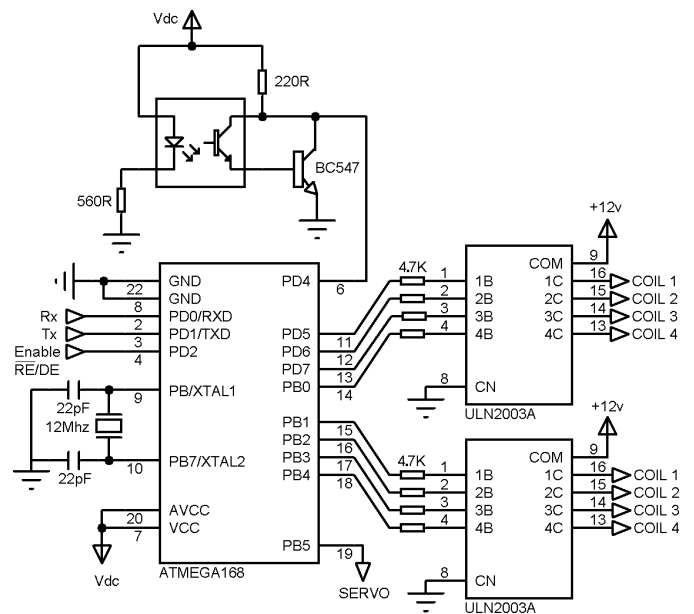


Figura 4. Diagrama esquemático da interface de comando do robô manipulador.

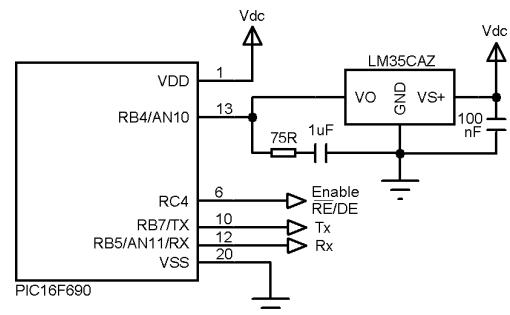


Figura 5. Diagrama esquemático do sensor inteligente de temperatura

Para desenvolver o encoder incremental, o grupo 3 utilizou

o microcontrolador PIC16F690 e um fotodiodo para a leitura da rotação do disco do encoder que foi acoplado no eixo da junta R (ver Fig. 6). O grupo 4 optou pelo microcontrolador PIC12F675 para acionar o resfriador em CC, e um optoacoplador MOC3021 para ligar/desligar o aquecedor em CA, conforme diagrama esquemático da Fig. 7.

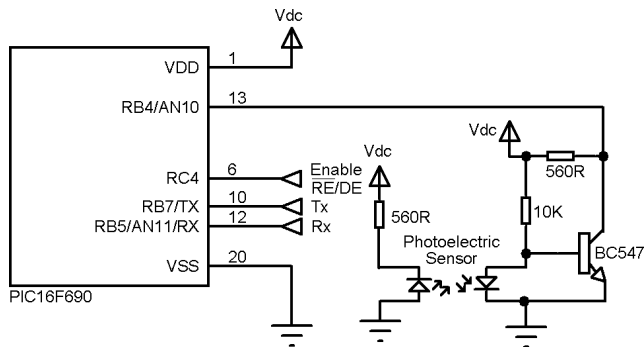


Figura 6. Diagrama esquemático do encoder incremental.

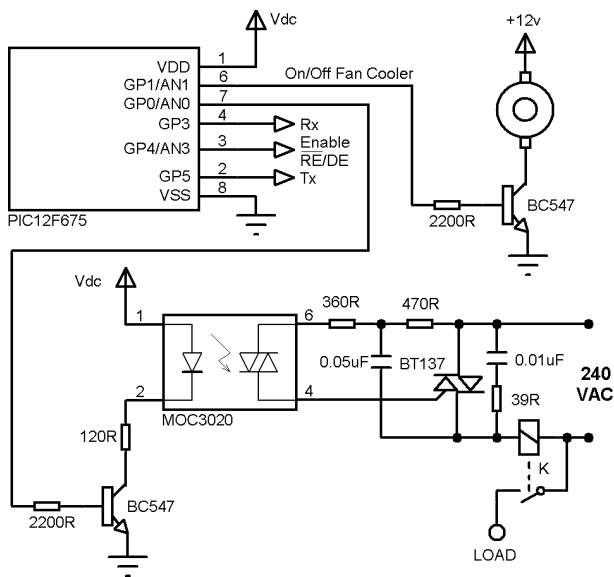


Figura 7. Diagrama esquemático da interface para acionamento do cooler e do aquecedor.

D. Rede Digital

Para a comunicação dos terminais em uma rede digital optou-se pelo enlace RS-485, que permite a implementação de um barramento de campo com conexão multiponto. A transmissão dos dados é serial do tipo *half-duplex*. Esse enlace é um dos mais utilizados na indústria, por apresentar alta imunidade a ruído e necessitar de apenas dois fios para transmissão do sinal.

Foi implementada uma rede com arquitetura distribuída, ao desenvolver um protocolo que usa a estratégia de mestre flutuante por meio da técnica de controle de acesso à rede

por *token passing*. O diagrama da rede implementada está apresentado na Fig. 8.

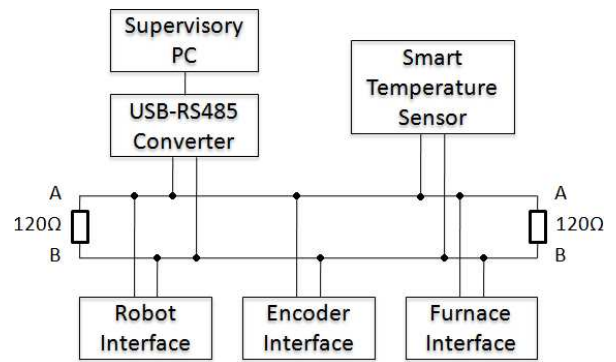


Figura 8. Diagrama de conexão da rede.

E. Software

Cada grupo desenvolveu o seu próprio programa para o microcontrolador. Entretanto, os alunos precisaram definir um protocolo comum para que os dispositivos trabalhassem de forma integrada. O fluxo de dados ocorria pela troca de caracteres, como apresentado na Tabela II.

Tabela II
CARACTERES UTILIZADOS NA COMUNICAÇÃO

Caractere	Descrição da Tarefa	Emissor	Receptor
A	Pegar a peça	PC	Grupo 1
B	Medir a posição angular durante o giro do robô no sentido horário	Grupo 1	Grupo 3
C	Ângulo alcançado, depositar a peça na câmara	Grupo 3	Grupo 1
D	Peça na câmara, ligar o aquecedor	Grupo 1	Grupo 4
E	Medir temperatura	Grupo 4	Grupo 2
F	Temperatura máxima alcançada, desligar o aquecedor e ligar o cooler	Grupo 2	Grupo 4
G	Medir temperatura	Grupo 4	Grupo 2
H	Temperatura mínima alcançada, desligar o cooler	Grupo 2	Grupo 4
I	Pegar a peça na câmara	Grupo 4	Grupo 1
J	Medir a posição angular durante o giro do robô no sentido anti-horário	Grupo 1	Grupo 3
K	Ângulo alcançado, depositar a peça no cesto	Grupo 3	Grupo 1
Z	Tarefa finalizada	Grupo 1	PC

Dessa forma, o processo de tratamento térmico de uma peça em uma célula de manufatura pode ser efetuado executando-se as atividades na seqüência abaixo:

- 1) o grupo 1 aciona o robô para capturar a peça que passará pelo tratamento térmico;

- 2) o robô gira no sentido horário até a câmara, tendo como referência a posição angular medida pelo grupo 3;
- 3) o robô deposita a peça no forno a partir de um comando do grupo 1, o aquecedor é acionado pelo grupo 4, mantendo-se ligado até alcançar a temperatura máxima medida pelo grupo 2;
- 4) o cooler é acionado pelo grupo 4, a peça é resfriada até alcançar a temperatura mínima medida pelo grupo 2;
- 5) o robô retira a peça da câmara a partir de um comando do grupo 1, que também faz girar seu corpo no sentido anti-horário até alcançar uma posição determinada para o depósito da peça, tendo como referência a posição angular medida pelo grupo 3.

O sistema supervisorio foi realizado em Delphi e permite testar a comunicação de todos os dispositivos, acionar o processo e monitorar todas as fases das tarefas efetuadas na célula de manufatura.

V. RESULTADO

O principal resultado foi a motivação dos alunos pela prática do projeto, desenvolvimento e programação dos dispositivos que comunicavam em um barramento executando um controle de forma descentralizada em uma célula de manufatura integrada. A fim de ilustrar o trabalho, na Fig. 9 são apresentados os elementos da célula de manufatura conectados em um barramento.

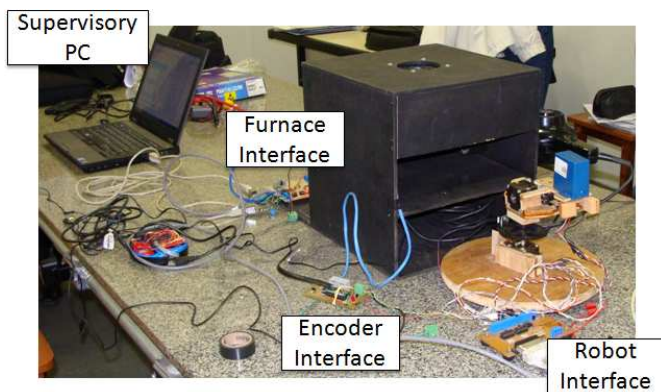


Figura 9. Os elementos da célula de manufatura (o sensor inteligente de temperatura está no interior da câmara de tratamento térmico).

VI. CONCLUSÕES

Esse trabalho propôs o desenvolvimento de um sistema para representar uma célula de manufatura de um processo de tratamento térmico, que fosse de baixo custo, e que pudesse motivar os alunos de graduação no ensino de sistemas integrados de manufatura. O desenvolvimento de todos os elementos da célula custou aproximadamente US\$ 200. A execução do trabalho possibilitou desenvolver habilidades com os estudantes de engenharia elétrica nas áreas de eletrônica, sistemas embarcados, instrumentação, controle, redes e robótica, configurando um trabalho multidisciplinar.

Em trabalhos futuros, a célula de manufatura desenvolvida pode receber novos elementos ou até mesmo interagir com outras células em uma cadeia de um processo maior, explorando, assim, o uso de outros sensores, atuadores e mecanismos.

AGRADECIMENTO

Os autores gostariam de agradecer a todos os alunos que se dedicaram ao desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS

- [1] A. A. Chowdhury and A. M. Mazid, "Computer integrated manufacturing education to mechanical engineering students: Teaching, research and practice," *IEEE Int. Conf. on Ind. Technol.*, pp. 1–5, Feb. 2009.
- [2] M. P. Groover, *Industrial Automation and Manufacturing Systems*. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011, (in Portuguese).
- [3] M. A. P. García, J. C. A. Antón, J. C. C. Rodríguez, F. J. F. Martín, and G. J. G. Ortega, *Electronic Instrumentation*. Madrid: Thomson, 2008, (in Spanish).
- [4] M. Moallem and R. Khoshbin, "An environment for programming and control of multi-robot manipulators," *IEEE Int. Conf. on Mechatronics*, pp. 587–591, Jul. 2006.
- [5] C. D'Onofrio and M. Bruccoleri, "A user-friendly control system to easy reconfigure a manufacturing cell," *IEEE Int. Conf. on Ind. Technol.*, pp. 1642–1647, Dec. 2006.
- [6] H. Hibino and Y. Fukuda, "Emulation in manufacturing engineering processes," *IEEE Winter Simulation Conf.*, pp. 1785–1793, Dec. 2008.
- [7] H. Hibino, "Simulation model driven manufacturing to control and monitor manufacturing cell," *IEEE Int. Conf. on Ind. Informat.*, pp. 875–879, Jul. 2010.
- [8] N. Fang, R. Cook, and K. Hauser, "Work in progress - an improved teaching strategy for lean manufacturing education," *Frontiers in Education Conf.*, pp. T3C-1–T3C-2, Oct. 2007.
- [9] J. A. N. J. Cocota, "Temperature and humidity monitoring system, and proposal for control of air conditioning in museums," B. Eng. monograph, Department of Control and Automation Engineering, Federal University of Ouro Preto, Ouro Preto, Brazil, Jun. 2005, (in Portuguese).