

UMA PROPOSTA PARA O DESENVOLVIMENTO DE ROBÔS MODULARES

Anselmo Rafael Cukla, cukla.anselmo@gmail.com¹

Rafael Crespo Izquierdo, rcrespo9@hotmail.com¹

Eduardo André Perondi, eduardo.perondi@ufrgs.br¹

Flavio José Lorini, lorini@ufrgs.br¹

José Barata, jab@uninova.pt²

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rua Sarmento Leite, 425, CEP: 90050-170, Porto Alegre - RS, Brasil

²UNINOVA, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Quinta da Torre, CP: 2829-516, Caparica, Portugal

Resumo: Um Sistema flexível de manufatura é definido como um sistema que apresenta a capacidade de reagir a mudanças esperadas ou inesperadas de um processo de fabricação. Atualmente, uma das opções para implementar um sistema de manufatura flexível, consiste na utilização de tecnologias avançadas que forneçam maior flexibilidade, menor custo e capacidade de reutilização. Neste contexto, os robôs modulares (baseados em módulos mecatrônicos) podem ser uma alternativa em relação aos manipuladores convencionais, pois apresentam uma estrutura cinemática variável, sendo adaptáveis às mudanças provenientes das linhas de produção, os quais tornam-se econômicos para implementações industriais. Neste trabalho, levando-se em conta as características de flexibilidade dos robôs modulares, é apresentada uma proposta para o projeto e desenvolvimento de módulos mecatrônicos na montagem de diferentes arquiteturas robóticas. Assim, considerando sistemas modulares com acionamento pneumático, propõe-se o uso de módulos mecatrônicos flexíveis e de rápida configuração na formação de sistemas robóticos. A metodologia proposta é conceitualmente proposta como: caracterizar os módulos mecatrônicos na montagem de robôs modulares; especificar as características mecânicas e elétricas de um módulo mecatrônico; descrever o funcionamento do Sistema MultiAgente no gerenciamento de um robô modular; e, por fim, detalhar as tarefas necessárias (algoritmos de controle e planejamento de trajetória) para movimentação de robôs modulares. Os resultados mostram que os robôs modulares baseados em agentes mecatrônicos são sistemas viáveis na utilização em chão de fábrica ou linhas de produção dinâmicas.

Palavras-chave: robôs modulares; módulos mecatrônicos; sistemas de acionamento pneumático; sistemas multi-agentes

1. INTRODUÇÃO

No últimos anos, devido ao reaquecimento da economia mundial após a crise financeira no ano de 2009, a robótica é uma das áreas de pesquisa que mais têm apresentado crescimento, retomando-se a tendência no aumento constante da demanda por robôs manipuladores industriais (World Robotics, 2016).

Conceitualmente, os robôs modulares são constituídos por novos tipos de sistemas de controle dedicados, os quais possibilitam incorporar diferentes e novas funcionalidades através da integração de seus componentes físicos e lógicos (Atta-Konadu *et al.*, 2005). Além disso, estes robôs são formados por módulos mecatrônicos, e apresentam alto grau de escalabilidade e flexibilidade, possibilitando, assim, a formação de diferentes configurações cinemáticas de acordo a aplicação do usuário (Atta-Konadu, 2006; Larizza *et al.*, 2006). Na sua estrutura, os módulos mecatrônicos incorporam como componentes, uma unidade de acionamento eletromecânico, uma unidade eletrônica de comunicação (associada a um software de controle) e uma unidade mecânica de acionamento (Cavalcante, 2012).

Os sistemas modulares surgiram a partir do conceito de linhas de manufatura reconfiguráveis, os quais vêm sendo utilizadas desde a década de 90 (Koren *et al.*, 2003). Nesta perspectiva, visando aplicações robóticas em sistemas distribuídos, Atta-Konadu (2006), propõe o uso de robôs reconfiguráveis com base na utilização de módulos lógicos baseados em FPGA (Field Programmable Gate Array), que permitem interações entre cada módulo. Em Larizza *et al.* (2006), estuda-se a formação de robôs formados a partir da utilização de módulos mecatrônicos, propondo-se um

sistema de controle distribuído com uma rede de comunicação em tempo real, a fim de formar cadeias cinemáticas do tipo série e/ou paralelo. Entre os estudos que contribuíram na padronização e produção de montagem de sistemas modulares, pode-se citar estudos na área de sistemas flexíveis baseados em Sistemas MultiAgentes (Farid e Ribeiro, 2015) e em estratégias de otimização para o trabalho em conjunto destes módulos mecatrônicos, aplicados em linhas de produção (Rocha *et al.*, 2014, 2015).

Os módulos mecatrônicos, na concepção de robôs manipuladores, realizam operações de controle, interação com o meio (leitura de sensores e atuação) e comunicação com outros módulos do robô. Quanto ao acionamento, estes sistemas, na maioria de suas aplicações, podem ser do tipo elétrico, hidráulico ou pneumático. No presente trabalho, assume-se que os sistemas modulares se caracterizam por atuarem com acionamento pneumático, os quais, além de não serem poluentes, apresentam características tais como baixo custo, fácil utilização e boa relação peso/potência, de forma que os mesmos se tornam atrativos para diversas aplicações, inclusive na área de robótica. No entanto, as não linearidades presentes neste tipo de dispositivo dificultam aplicações onde alta precisão de posicionamento é necessária, resultando na necessidade, ainda atual, de investimentos na área de pesquisa sobre controladores para esses tipos de sistema (Perondi, 2002; Sarmanho, 2014; Sobczyk, 2009).

Na literatura sobre robôs modulares, apesar de existirem linhas de pesquisa que tratem especificamente de sistemas modulares e as interações entre os módulos mecatrônicos (Atta-Konadu, 2006; Farid e Ribeiro, 2015; Larizza *et al.*, 2006), observa-se que são escassas as pesquisas que abordam o uso de Sistemas MultiAgentes na robótica. Dentre os trabalhos que aplicam o Sistema MultiAgentes pode-se citar (Barata e Camarinha-Matos, 2002; Cavalcante, 2012; Farid e Ribeiro, 2015; Ribeiro e Barata, 2011; Rocha *et al.*, 2014).

Nesse sentido, o presente trabalho objetiva apresentar uma proposta relativa aos aspectos funcionais e construtivos de um robô manipulador (pneumático) baseados em Módulos Mecatrônicos. Para tanto, assume-se que o robô é constituído por uma estrutura modular, de forma que seus elos possam ser intercambiáveis. A fim de demonstrar o funcionamento deste sistema, propõe-se seguinte metodologia: 1) descrição das unidades mecatrônicas, apresentando os aspectos mecânicos e elétricos necessários para o funcionamento deste sistema; 2) definição dos algoritmos de gerenciamento de robôs modulares; e 3) descrever as etapas necessárias para a execução de uma tarefa, como, neste caso, o planejamento de trajetória. Nesta abordagem, quanto à funcionalidade destes sistemas, define-se que são estruturas reconfiguráveis, ou seja, um robô cartesiano pode ser transformado em um robô esférico, entre outras configurações cinemáticas. Desse modo, uma vez definida a configuração desejada do manipulador, o Sistema MultiAgente realiza o gerenciamento e as configurações deste sistema, de forma que cada módulo mecatrônico fornece as suas características (tipo de acionamento, sua localização, entre outras). Por fim, como estudo de caso, apresenta-se um robô modular cartesiano, onde o Sistema MultiAgente realiza o gerenciamento e planejamento de uma trajetória definida pelo usuário.

2. MÓDULOS MECATRÔNICOS

Para a junção modular de um sistema mecânico de uso industrial, existem alguns requisitos que são importantes para o seu funcionamento, como, por exemplo, a homogeneidade, o controle distribuído e a reconfiguração dinâmica. Nesse sentido, os robôs modulares são definidos como sistemas que apresentam a capacidade de alterar sua forma geométrica e funcionalidades, utilizando sempre os mesmos módulos mecatrônicos (Farid e Ribeiro, 2015; Guttman, 2001; Larizza *et al.*, 2006).

Um módulo é caracterizado como um bloco construído com interfaces bem definidas que pode ser reutilizável e configurável facilmente, tratando-se de um elemento, uma unidade, uma estação de trabalho, uma célula produtiva ou uma linha de produção (Barata e Camarinha-Matos, 2002). Autores como (Cavalcante, 2012; Ferreira *et al.*, 2012; Ribeiro *et al.*, 2011), entre outros, explicam que, de maneira análoga aos módulos convencionais, existem os módulos mecatrônicos, que consistem em unidades formadas por partes mecânicas, eletroeletrônicas e de comunicação de software integrados, com capacidade de percepção (sensores) e de atuação (atuadores) (Cavalcante, 2012). Segundo Gotz (2007), os módulos mecatrônicos definem-se por componentes que, quando conectados em diferentes configurações, são capazes de formar um sistema mecânico com maiores funcionalidades como, por exemplo, um robô manipulador industrial (robô antropomorfo, cilíndrico, cartesiano, etc.).

Para caracterizar os módulos mecatrônicos na montagem de robôs modulares, a Fig. 1 ilustra a representação de um robô cartesiano (Fig. 1.a) e um módulo de acionamento linear (Fig. 1.b), na qual o primeiro grau de liberdade (1 GDL) corresponde a um módulo conectado a uma base fixa por meio de módulos auxiliares, enquanto que, para formar as duas juntas restantes (2 e 3 GDL), dois módulos são ligados entre si.

2.1. Sistema mecânico

De acordo com Larizza *et al.* (2006), os módulos utilizados na construção de robôs modulares podem ser definidos em dois tipos: ativos e passivos. Os módulos ativos consistem em sistemas mecânicos que, no seu interior, dispõem de dispositivos eletrônicos que realizam o controle ou processamento de dados. Já os módulos passivos são sistemas que apresentam um elemento de união entre dois módulos mecânicos (módulos auxiliares). A união entre os módulos mecatrônicos por meio dos módulos auxiliares, permitem a transmissão de energia (elétrica e pneumática), movimentos e esforços mecânicos entre os demais módulos mecatrônicos que constituem o sistema.

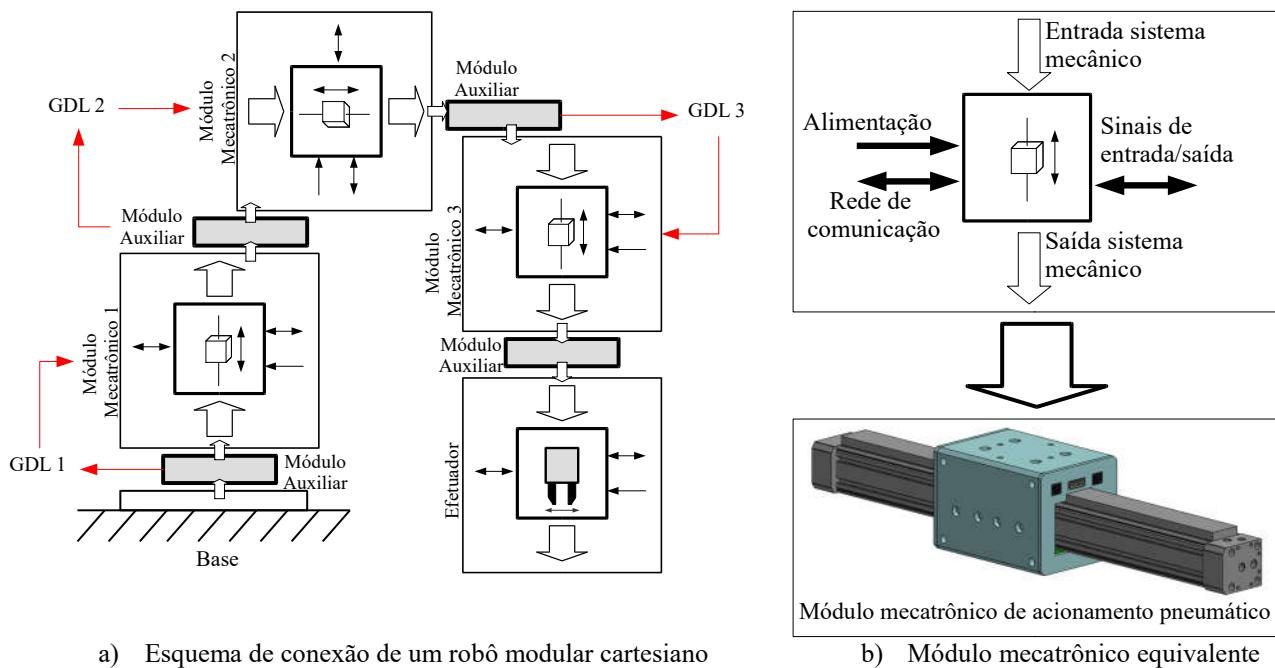


Figura 1. Exemplo de robô modular cartesiano com acionamento pneumático.

Um módulo mecatrônico de acionamento pneumático, objeto de estudo neste trabalho, caracteriza-se pela capacidade de tomada de decisões no seu acionamento. Os movimentos deste atuador são provenientes da ação de uma válvula proporcional reguladora de vazão, enquanto que o sinal de controle é obtido através de um sistema eletrônico que processa diferentes variáveis físicas. Como os módulos mecatrônicos tratam-se de sistemas compostos por elementos acionados por diferentes fontes de energia (elétrica, mecânica e pneumática), é necessário estabelecer o posicionamento adequado de seus componentes, a fim de atender os limites físicos da estrutura e, conseqüentemente, sem perder as características operacionais do sistema modular. Este sistema é composto por um cilindro pneumático, uma válvula proporcional, um sistema eletroeletrônico, sensores (posição, aceleração, orientação e pressão), suporte metálico do circuito eletroeletrônico e conectores elétricos. A Fig. 2.a ilustra um modelo de um módulo mecatrônico de atuação linear, e na Fig. 2.b apresenta-se um esquema detalhado do mesmo módulo e seus componentes internos.

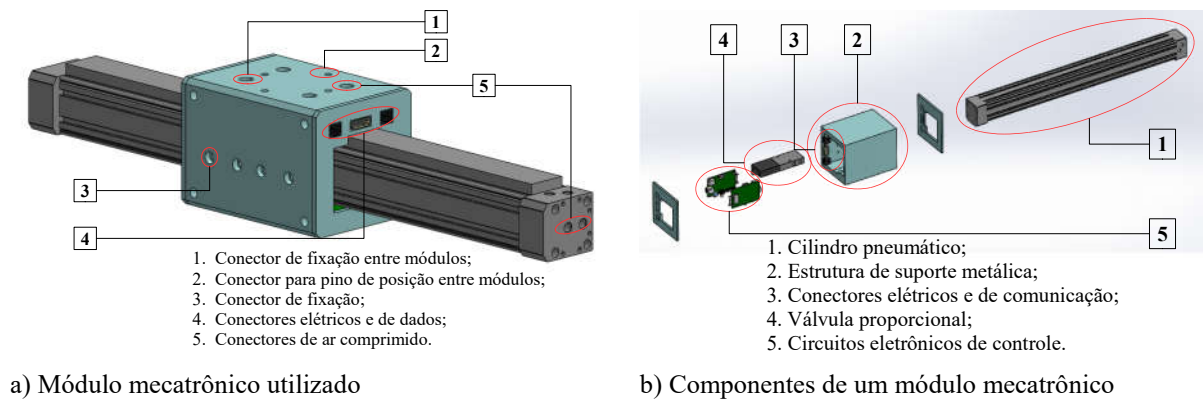


Figura 2. Módulo mecatrônico de acionamento linear.

Como ilustrado, os principais componentes pneumáticos de um módulo mecatrônico de acionamento linear, são o cilindro e a válvula proporcional. O cilindro pneumático deve ser de dupla ação e sem haste, pois facilita a montagem dos componentes eletrônicos, bem como a interligação entre os demais módulos mecatrônicos do sistema. Nesta abordagem, sugere-se o modelo DGPIL-32-300-PPV-AIF-KF-GK da Festo®, que possui interface de comunicação para leitura de sua posição absoluta. A válvula proporcional permite controlar o fluxo de ar através de um sinal elétrico, limitando o fluxo apenas em um sentido. O modelo da válvula aqui proposta é a MPYE-5-1/8-LF-010-B da Festo®.

2.2. Sistema elétrico

Este estudo, para integrar as informações e realizar o controle distribuído de um robô modular, propõe uma plataforma eletrônica integrada a cada módulo mecatrônico. A plataforma eletrônica suporta o processamento de dados

em tempo real e a execução do Sistema MultiAgente, como também execução dos algoritmos de controle, o planejamento de trajetória e a comunicação com os outros módulos. A mais baixo nível, estão implementados os códigos de aquisição de dados e atuação, já a nível físico, encontram-se os circuitos de condicionamento, filtros analógicos e alimentação do sistema elétrico. A Fig. 3 apresenta um diagrama lógico de funcionamento do sistema elétrico modular.

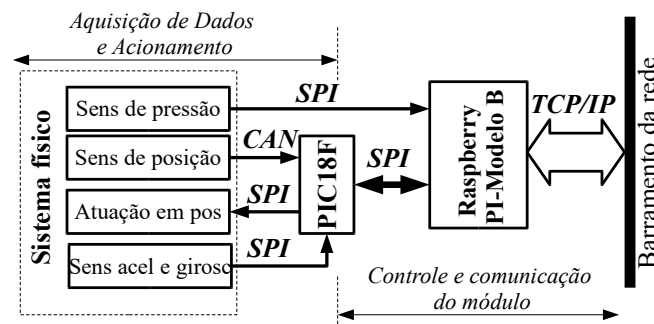


Figura 3. Controlador eletrônico de um módulo mecatrônico.

Como ilustrado na Fig. 3, o circuito elétrico proposto é composto por: Módulo Eletrônico de Controle local e Sistema de Comunicação, cujos principais componentes incluem: microcontrolador PIC18F4580 da Microchip® e o Raspberry Pi Modelo B; e Sistema de Aquisição de Dados e de Acionamento, os quais utilizam sensores de posição (embutidos no cilindro pneumático com interface de comunicação CAN - Controller Area Network), sensores de pressão, aceleração e orientação (giroscópio), tratando-se da interface digital (SPI - Serial Peripheral Interface) do controlador.

2.3. Sistema de Arquitetura Distribuído

Uma arquitetura de sistema distribuído, baseado na utilização de módulos mecatrônicos, permite a escalabilidade e a rápida reconfiguração das estruturas modulares formadas por estes dispositivos. Para tanto, é necessário uma adequada concepção de software para manter a compatibilidade do sistema, pois, no funcionamento correto destes sistemas, requer-se alta taxa de troca de informações entre os componentes (Larizza *et al.*, 2006).

Como já mencionado, cada módulo mecatrônico dispõe de um microcomputador (Raspberry PI) com conexão do tipo Ethernet, possibilitando, assim, a comunicação TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) entre as unidades da estrutura. Assim, o presente trabalho propõe a utilização de uma arquitetura de gerenciamento dos módulos mecatrônicos por meio de Sistemas MultiAgentes, a serem aplicados na montagem de manipuladores reconfiguráveis, integrando os dispositivos mecatrônicos baseados nas abordagens apresentadas por (Cavalcante, 2012; Ferreira *et al.*, 2012). Na Fig. 4 ilustra-se a arquitetura hierárquica de interconexões dos módulos mecatrônicos a nível físico.

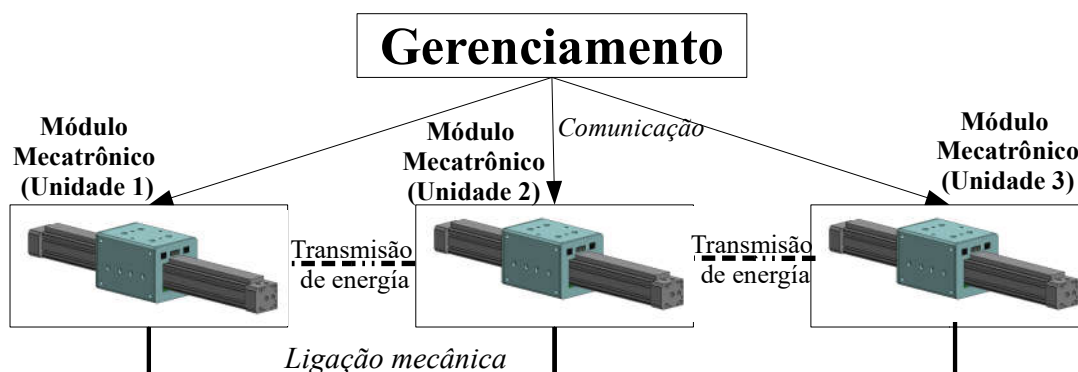


Figura 4. Sistema MultiAgente e os módulos mecatrônicos.

3. GERENCIAMENTO DOS MÓDULOS MECATRÔNICOS BASEADOS EM SISTEMAS MULTIAGENTES

A fim de compreender os conceitos associados ao gerenciamento dos módulos mecatrônicos baseados em Sistemas MultiAgentes, primeiramente, é necessário definir as funcionalidades de um agente informático, que, quando implementados em um módulo mecatrônico (agentes mecatrônicos), são entidades importantes no funcionamento de sistemas modulares. Segundo Wooldridge (2009), um agente, como uma entidade informática autônoma, caracteriza-se por sua capacidade de conhecimento parcial do ambiente dinâmico circundante, bem como pela habilidade em interagir

com outros agentes na execução de uma determinada tarefa. Neste trabalho, da mesma forma abordada por (Ferreira et al., 2012; Rocha et al., 2014), considera-se que um agente mecatrônico é um algoritmo computacional executado por um módulo mecatrônico, o qual é encarregado de realizar as tomadas de decisões a partir das informações do meio (condições de contorno), do conhecimento prévio do próprio agente (modelos matemáticos) e das informações fornecidas por outros agentes.

Como os robôs modulares são constituídos pela coalizão de módulos mecatrônicos, um aspecto importante no gerenciamento destes sistemas trata-se em definir as funcionalidades dos agentes os quais operam nos módulos mecatrônicos, para, assim, realizar o gerenciamento a nível global, no caso, um sistema modular. Desta forma, os agentes, na concepção de um módulo mecatrônico, são responsáveis pela execução das tarefas, pela habilitação das ações do sistema robótico, entre outras funcionalidades. Neste trabalho, um Sistema MultiAgente baseia-se na interação dos agentes mecatrônicos que, de forma conjunta, realiza o gerenciamento do sistema modular. Os agentes mecatrônicos são classificados de acordo a suas funcionalidades, e podem ser diferenciados dois grandes grupos: cognitivos e motores.

Um agente cognitivo é responsável pelas execuções de processos lógicos (processamento de algoritmos, comunicação, etc.) e a integração com os demais agentes. Já um agente motor é responsável pela interação no ambiente físico, realizando atividades de acesso ao hardware (e.g. sensoriamento e atuação). A Fig. 5 ilustra representa uma abstração dos agentes cognitivos e motores no funcionamento de um módulo mecatrônico.

Assim, posterior a montagem da uma determinada estrutura (robô modular), é necessário definir a organização funcional do Sistema MultiAgente. Neste trabalho, o Sistema MultiAgente é responsável pelo gerenciamento das ações e movimentos de um sistema modular, o qual destacam-se as ações relacionadas ao controle, planejamento de trajetória e análise da estrutura cinemática modular. Ainda Cavalcante, 2012; Ferreira et al., 2012, definem que um sistema MultiAgente é formado por agentes cognitivos e motores, os quais podem ser ainda classificados de acordo com as suas funcionalidades, tais como o agente líder de coalisão, agente recurso, agente pagina amarela e agente de distribuição. Ainda estas habilidades são classificadas como atômicas (tais como a leitura de um sensor ou a execução de um único algoritmo) e complexas (execução do planejamento de trajetórias de todas as juntas, interface com o usuário, etc.).

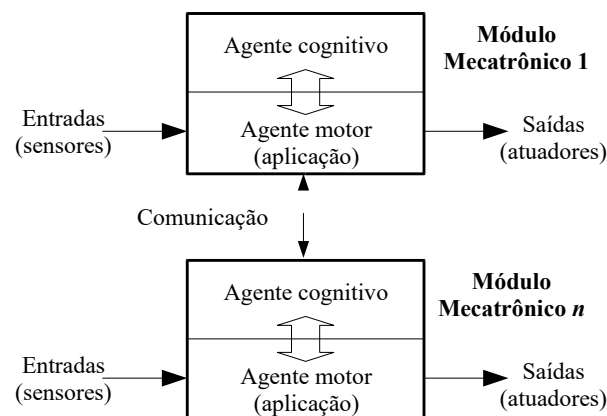


Figura 5. Arquitetura proposta: visão geral, adaptado de Cavalcante, (2012).

3.1. Definição de uma estrutura modular a partir coalisão de módulos mecatrônicos

Para que um robô modular possa executar suas tarefas, a estrutura composta por módulos mecatrônicos deve conter uma organização a nível lógico bem definida. Nesta perspectiva, o presente trabalho apresenta um sistema modular com três níveis hierárquicos, o qual funciona da seguinte maneira: Primeiramente, o agente cognitivo “Cognitivo1” executa remotamente as funcionalidades dos agentes “Atuador1”, “Atuador2” e “Cognitivo2”. A comunicação entre o agente “Cognitivo 1” e os demais agentes são chamadas atômicas, isto é, indivisíveis e são simplesmente chamadas às funcionalidades remotas. Entretanto, o agente “Cognitivo2” implementa a sua funcionalidade como um processo, isto é, através de um diagrama de blocos que representa o conjunto de suas atividades, que, por sua vez, encapsulam as chamadas aos agentes “Atuador3” e “Atuador4”. Note que o agente “Cognitivo1” não percebe a existência do “Atuador3” e “Atuador4” no sistema, de acordo com a representação apresentada na Figura 6a.

Um exemplo típico de tal arranjo é o caso de um manipulador de três graus de liberdade do tipo cartesiano (Fig. 6.b), onde cada elo é um módulo mecatrônico, o qual possui um agente motor e um agente cognitivo associado a cada elo. Assim, o sistema implementado é visto de fora do módulo mecatrônico como um agente cognitivo que faz uso de chamadas aos agentes responsáveis pelas movimentações de cada articulação.

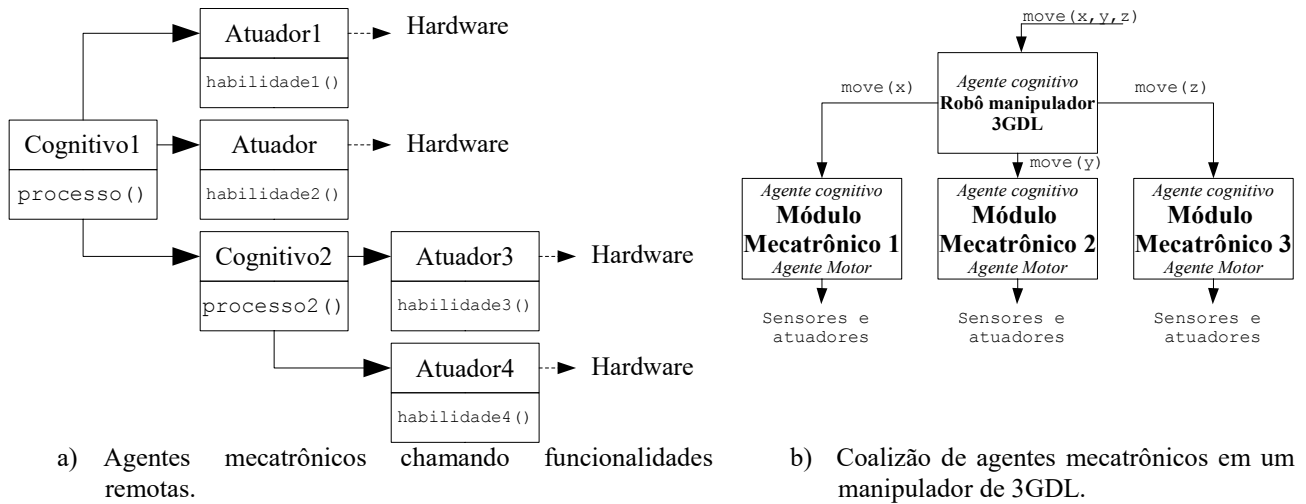


Figura 6. Interação dos agentes mecatrônicos para o gerenciamento de um robô modular

3.2. Execução das tarefas de um Sistema MultiAgente

Inicialmente, para que um robô modular possa executar suas tarefas, é necessário conhecer as características da estrutura modular formada, a fim de, posteriormente, planejar suas ações. Neste trabalho, o método proposto parte do pressuposto que a estrutura do manipulador e suas características são fornecidas por meio de Sistemas MultiAgentes (cinemática, volume de trabalho, carga máxima, etc.), de modo que estas características permitem a interface com o usuário, o processamento dos algoritmos de planejamento de trajetória e controle das atividades de gerenciamento a nível robô, bem como na negociação com outros robôs que possuam esta plataforma. Portanto, como o presente trabalho trata-se de um estudo em relação aos aspectos funcionais de um robô modular baseados em Sistemas MultiAgentes, propõe-se, como estudo de caso, uma abordagem referente ao planejamento de trajetórias através de algoritmos de interpolação por splines de 3º grau.

A escolha por este método deve-se ao fato de que os atuadores pneumáticos, quando utilizados em estruturas robóticas, necessitam executar movimentos suaves (efetuator e espaço de juntas), melhorando o desempenho do sistema e diminuindo os esforços dos atuadores durante a execução dos algoritmos de controle.

Há na literatura diversas técnicas que são utilizadas na resolução dos problemas de interpolação por splines de 3º grau. Autores como (Chapra e Canale, 2008; Ruggiero e Lopes, 1996), entre outros, explicam que, para obtenção de polinômios de terceiro grau entre cada intervalo de nós, como o apresentada na Eq. (1), são necessários atender os seguintes requisitos:

$$f_i(x) = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i \quad (1)$$

Desse modo, para que os pontos sejam interpolados, existem n intervalos e, por consequência, incógnitas para serem obtidas. As condições impostas para a spline são:

- os valores das funções devem ser iguais nos nós internos ($2n-2$ condições);
- as funções do primeiro e do último segmento devem passar, respectivamente, pelos pontos inicial e final (2 condições);
- as primeiras derivadas nos nós internos devem ser iguais ($n-1$ condições);
- as derivadas segundas nos nós internos devem ser iguais ($n-1$ condições); e
- a segunda derivada no nó inicial e no final devem ser nulas (2 condições).

A última condição, aplicada aos nós extremos da função, caracteriza a chamada spline natural, de forma que, se necessário, pode-se fazer com que a segunda derivada tenha valor diferente de zero nas extremidades da função.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho, os robôs modulares caracterizam-se pela coalizão de módulos mecatrônicos acionados pneumáticamente, de modo que o agrupamento destes módulos, os quais podem ser constituídos por atuadores lineares e/ou rotacionais, permite a formação customizada de diferentes tipos de cadeias cinemáticas. Assim, a fim de caracterizar os robôs modulares, o presente estudo apresenta uma abordagem genérica para sistemas com cadeias cinemáticas seriais (robôs SCARA, cartesiano, articulado, etc.).

Quanto aos aspectos construtivos de um robô modular, estabelece-se que os principais componentes envolvidos na montagem destes sistemas são os módulos auxiliares e os módulos mecatrônicos. Os módulos auxiliares são dispositivos mecânicos que interligam dois módulos mecatrônicos, determinando, assim, o tipo de acionamento

(prismático ou rotacional) e o arranjo (paralelo, perpendicular, vertical) dos módulos mecatrônicos envolvidos na conexão (por exemplo, R-R, P-R, P-P, etc.). Com relação aos módulos mecatrônicos, destaca-se que não foram especificadas as características mecânicas (conectores mecânicos, dimensionamento dos componentes, etc.) e elétricas (diagramas e circuitos elétricos, códigos de programa, tipos de sinais, etc.), tratando-se somente das funções básicas e requisitos necessários para a implementação de sistemas robóticos modulares, como, por exemplo, descrição do princípios de funcionamento dos módulos e agentes mecatrônicos, caracterização da montagem de robôs modulares, execução de tarefas, etc.

No que tange o funcionamento de um robô modular (e.g. robô cartesiano), assume-se que, uma vez definida a configuração desejada do manipulador, o Sistema MultiAgente inicializa o gerenciamento e as configurações deste sistema, onde cada módulo mecatrônico fornece as suas características (tipo de acionamento, sua localização, entre outras).

Como já mencionado, o Sistema MultiAgente, para que possa gerenciar as movimentações de um robô modular, deve, primeiramente, reconhecer o tipo de estrutura robótica formada pelos módulos mecatrônicos (cilíndrico, cartesiano, etc.), identificando os parâmetros físicos da estrutura (volume de trabalho, cinemática, velocidade máxima dos atuadores, etc.). Assim, após conhecer estas informações, o Sistema MultiAgente gerencia as ações associadas à movimentação do sistema (execução das tarefas), as quais relacionam-se aos cálculos de trajetória, aos algoritmos de controle e as configurações globais de controle.

Uma vez que o presente trabalho apresenta uma abordagem relacionada aos requisitos funcionais de robôs modulares, não foram tratadas as características de controle, trajetória e dinâmicas associadas aos módulos mecatrônicos. Nesse sentido, quanto às características de controle, visando futuras implementações destes sistemas, é necessário analisar o comportamento dinâmico dos atuadores pneumáticos, bem como a dinâmica da estrutura modular formada. Já em relação ao planejamento de trajetória, foram abordadas curvas formadas por splines de 3º grau. A escolha por este tipo de formulação deve-se ao fato que, além de serem aplicadas em diversos trabalhos na área da robótica, podem ser encontradas facilmente na literatura. Assim, levando-se em conta as particularidades mencionadas, o estudo de caso proposto, descrito com maiores detalhes na seção 4.1, não considera os aspectos relativos à formação de um robô com acionamento pneumático, de maneira que é possível considerar a metodologia proposta para robôs com diferentes tipos de acionamento, desde que seja conhecida as características cinemáticas e dinâmicas do sistema.

Em síntese, observa-se que os aspectos discutidos neste trabalho mostram-se viáveis na definição de um robô modular, visto que, conhecidos tais propriedades, é possível as características associadas à movimentação do sistema, como, por exemplo, estabelecer as leis de controle, planejar as trajetórias, calcular os esforços dinâmicos, entre outros, as quais não foram tratadas neste trabalho. Com intenção de ilustrar as características de um sistema como proposto, apresenta-se um estudo de caso para um robô modular pneumático cartesiano.

4.1. Estudo de caso

Nesta abordagem, para caracterizar os sistemas modulares baseados em módulos mecatrônicos, é apresentado um modelo virtual de um robô modular cartesiano com acionamento pneumático de 3 GDL, conforme ilustrado na Fig. 7.

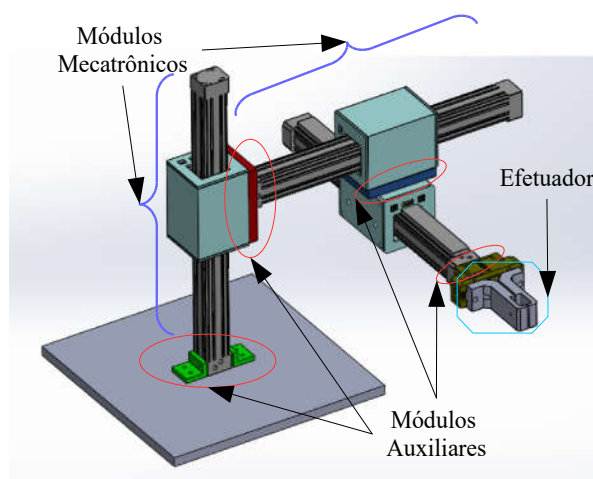


Figura 7. Robô modular cartesiano com acionamento pneumático.

Como ilustrado, os módulos mecatrônicos de acionamento pneumáticos lineares são compostos por, basicamente, um atuador pneumático, uma válvula proporcional e um sistema elétrico, de maneira que, acoplado ao êmbolo do atuador, são instalados todos os componentes periféricos da estrutura. A fim de estabelecer a conexão mecânica entre cada módulo mecatrônico da estrutura, propõe-se a utilização de módulos auxiliares, cuja finalidade é acoplar as superfícies dos êmbolos de dois atuadores, no caso, dois módulos mecatrônicos. Quanto aos módulos de acionamento rotacional, embora não discutido neste trabalho, é importante destacar que estes sistemas apresentam o mesmo princípio

de funcionamento do sistema de acionamento linear, diferenciando-se na modelagem dinâmica do atuador. Além disso, em relação às características do robô proposto, o Sistema MultiAgente realiza a identificação da estrutura (inicialização dos serviços e funções de gerenciamento), bem como o controle dos módulos e planejamento de trajetória. A programação do Sistema MultiAgente é implementada utilizando a ferramenta NetBeans, enquanto que as simulações de movimentação da estrutura são realizadas em Matlab e V-REP.

Quanto ao planejamento de trajetória, a metodologia proposta baseia-se na implementação de splines de 3º grau em função das características dos atuadores pneumáticos, apresentadas na Seção 3.2. Para tanto, considera-se que os pontos da trajetória são fornecidos no espaço de trabalho do robô, de modo que, utilizando a cinemática inversa da estrutura modular, é possível analisar as trajetórias nas juntas (módulos mecatrônicos). Nesta abordagem, o efetuador percorre um conjunto de 5 pontos alocados em seu espaço de trabalho, que, nesta pesquisa, são interpolados no espaço de juntas (módulos mecatrônicos) mediante funções splines de 3º grau. Os pontos-chave para geração da trajetória são estabelecidos arbitrariamente. Para ilustrar o problema, consideram-se as seguintes restrições: 1) Os pontos iniciais e finais são $p_1 = (0.12; 0.1; 0)$ e $p_5 = (0.32; 0.32; 0.3)$, respectivamente; 2) Os pontos intermediários são $p_2 = (0.0942; 0.0980; 0.0567)$, $p_3 = (0.1542; 0.1467; 0.1930)$ e $p_4 = (0.3000; 0.1028; 0.2999)$ respectivamente. A Fig. 7 ilustra a trajetória a trajetória gerada para um robô modular cartesiano por meio de splines de 3º grau.

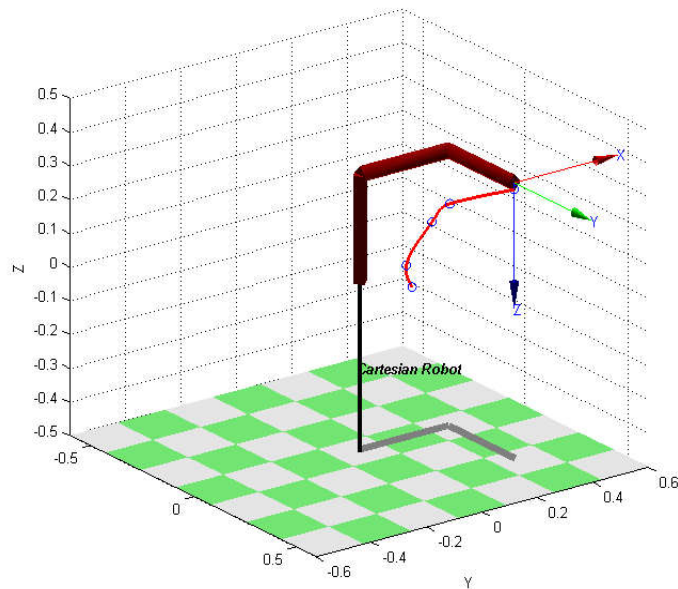


Figura 8. Interpolação por spline 3º ordem para o movimento de um robô modular.

5. CONCLUSÕES

A robótica modular, na perspectiva de sistemas de manufatura flexíveis (SMF), são linhas de pesquisa que estão se tornando cada vez mais promissoras, pois, devido a competitividade do mercado, é necessário que os processos produtivos tenham menor custo, maior flexibilidade, capacidade de reutilização, entre outras.

Os módulos mecatrônicos são, dentre os componentes de um robô modular, os principais elementos no funcionamento deste sistema, visto que estas unidades gerenciam as ações e realizam a tomada de decisões em suas tarefas. Quanto aos aspectos construtivos, apesar do presente trabalho não tratar especificamente sobre o projeto dos sistemas mecânicos e elétricos de uma unidade mecatrônica, é possível observar a viabilidade na montagem de robôs manipuladores por meio de módulos mecatrônicos, já que são sistemas que permitem o intercâmbio de esforços mecânicos, energia pneumática, energia elétrica e dados.

A fim de garantir as funcionalidades dos robôs modulares, um dos aspectos importantes no projeto destes sistemas consiste na definição dos algoritmos de gerenciamento de robôs modulares. Estes algoritmos, também conhecidos como agentes, têm apresentado desempenhos satisfatórios em aplicações de controle distribuído, e, principalmente, na interação de unidades mecatrônicas autônomas que interagem dentro de um sistema de maior complexidade, como, por exemplo, os sistemas de manufaturas flexíveis e os robôs modulares.

Considerando-se as diferentes características que apresentam estes dispositivos na formação de novas estruturas robóticas, conclui-se que é possível desenvolver novos estudos em áreas como otimização do movimento, controle distribuído, identificação de sistemas, cálculo de cinemática e dinâmica, entre outros. Ainda, em relação ao projeto de robô modular, é relevante mencionar a necessidade de um projeto detalhado da estrutura mecânica e elétrica, visando a formulação de normas para utilização nesta área de conhecimento. No que se refere ao Sistema MultiAgente, o qual, nesta abordagem, é desenvolvido para robôs modulares, destaca-se que sua arquitetura organizacional e funcional é similar às apresentadas nos agentes mecatrônicos utilizados nos sistemas de manufatura, mostrando-se viável no contexto da presente pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Atta-Konadu, R.K.C., 2006, "Design and implementation of a modular controller for robotic machines" (Phd Thesis), Saskatoon, Canada.
- Atta-Konadu, R., Lang, S.Y.T., Zhang, C., Orban, P., 2005, "Design of a robot control architecture", Presented at the Mechatronics and Automation, 2005 IEEE International Conference, pp. 1363–1368 Vol. 3. doi:10.1109/ICMA.2005.1626752.
- Barata, J., Camarinha-Matos, L.M., 2002, "Implementing a contract-based multi-agent approach for shop floor agility", Presented at the 13th International Workshop on Database and Expert Systems Applications, 2002, Proceedings, pp. 639–645. doi:10.1109/DEXA.2002.1045970.
- Cavalcante, A.L.D., 2012, "Arquitetura baseada em agentes e auto-organizável para a manufatura" (Phd Thesis), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brazil.
- Chapra, S.C., Canale, R.P., 2008, "Métodos Numéricos para Engenharia", McGraw-Hill.
- Farid, A.M., Ribeiro, L., 2015, "An Axiomatic Design of a Multiagent Reconfigurable Mechatronic System Architecture", IEEE Trans. Ind. Inform. 11, 1142–1155. doi:10.1109/TII.2015.2470528.
- Ferreira, J., Ribeiro, L., Neves, P., Akillioglu, H., Onori, M., Barata, J., 2012, "Visualization tool to support multi-agent mechatronic based systems", Presented at the IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 4372–4377. doi:10.1109/IECON.2012.6389185.
- Gotz, M., 2007, "Run-time reconfigurable RTOS for reconfigurable Systems-on-Chip" (Phd Thesis), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brazil.
- Guttman, E., 2001, "Autoconfiguration for IP networking: enabling local communication", IEEE Internet Comput. 5, 81–86. doi:10.1109/4236.935181.
- Koren, Y., Heisel, U., Jovane, F., Moriwaki, T., Ulsoy, G., Van Brussel, H., 2003, "Reconfigurable Manufacturing Systems", in: Manufacturing Technologies for Machines of the Future, Springer Berlin Heidelberg, pp. 627–665.
- Larizza, P., Murciano, G., Pappagallo, L., Triggiani, G., 2006, "A new generation of modular robots", Presented at the 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 3367–3371. doi:10.1109/ISIE.2006.296006.
- Perondi, E.A., 2002, "Controle não-linear em cascata de um servoposicionador pneumático com compensação do atrito" (Phd Thesis), Universidade Federal de Santa Catarina, Brazil.
- Ribeiro, L., Barata, J., 2011, "Prospecting tools for mechatronic multiagent-based systems", Presented at the 2011 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), pp. 369–374. doi:10.1109/INDIN.2011.6034904.
- Ribeiro, L., Barata, J., Onori, M., Hanisch, C., Hoos, J., Rosa, R., 2011, "Self-organization in automation - the IDEAS pre-demonstrator", Presented at the IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 2752–2757. doi:10.1109/IECON.2011.6119747.
- Rocha, A., di Orio, G., Barata, J., Antzoulatos, N., Castro, E., Scrimieri, D., Ratchev, S., Ribeiro, L., 2014, "An agent based framework to support plug and produce", Presented at the 2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), pp. 504–510. doi:10.1109/INDIN.2014.6945565.
- Rocha, A.D., Peres, R., Barata, J., 2015, "An agent based monitoring architecture for plug and produce based manufacturing systems", Presented at the 2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), pp. 1318–1323. doi:10.1109/INDIN.2015.7281926.
- Ruggiero, M.A.G., Lopes, V.L. da R., 1996, "Cálculo numérico: aspectos teóricos e computacionais", Makron Books do Brasil.
- Sarmanho, C.A.C., 2014, "Desenvolvimento de um robô pneumático de 5 graus de liberdade com controlador não linear com compensação de atrito" (Phd Thesis), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brazil.
- Sobczyk, R.M.S., 2009, "Controle em cascata e a estrutura variável com adaptação de parâmetros e compensação de atrito de um servoposicionador pneumático" (Phd Thesis), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brazil.
- Wooldridge, M., 2009, "An Introduction to MultiAgent Systems", John Wiley & Sons.
- World Robotics, 2016, "Home - World Robotics 2016", [WWW Document], URL <http://www.worldrobotics.org/> (accessed 2.19.16).

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

AN APROACH FOR THE DEVELOP OF MODULAR ROBOTS

Anselmo Rafael Cukla, cukla.anselmo@gmail.com¹

Rafael Crespo Izquierdo, rcrespo9@hotmail.com¹

Eduardo André Perondi, perondi@ufrgs.br¹

Flavio José Lorini, lorini@ufrgs.br¹

José Barata, jab@uninova.pt²

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rua Sarmento Leite, 425, CEP: 90050-170, Porto Alegre - RS, Brasil

²UNINOVA, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Quinta da Torre, CP: 2829-516, Caparica, Portugal

Abstract. *A flexible manufacturing system is defined as a system that has the ability to respond to expected or unexpected changes in a process of manufacturing. Currently, one of the options to implement a flexible manufacturing system is the use of advanced technologies that provide greater flexibility, lower cost and reusability. In this context, the modular robots (that utilize mechatronic modules) can be an alternative to conventional manipulators, because they have a variable kinematic structure that enables them to adapt to the changes of different production lines, which is more economical for industrial implementations. In this paper, considering the flexible characteristics of modular robots, a proposal for the design and development of mechatronic modules in the assembly of different robotic architectures is presented. Thus, considering modular systems that are pneumatically operated, it is proposed the use of flexible mechatronic modules and quick setup in the formation of modular systems. The methodology is described in the following steps: 1) describe the mechatronic modules in the mounting of modular robots; 2) specify the mechanical and electrical characteristics of a mechatronic module; 3) determine the operation of the Multi-agent system in managing a modular robot; and finally, 4) detail the necessary tasks (control algorithms and path planning) for moving modular robots. The results show that the modular robots based on mechatronics agents are viable systems to be used in factory floor or dynamic production lines.*

Keywords: *modular robots, mechatronic modules, pneumatic actuator systems, multi-agent systems*