

MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PLANTA DIDÁTICA DE MANUFATURA ROBÓTICA INSPIRADA EM PLANEJAMENTO AUTOMÁTICO

Wesley da Silva Alves, wesleyalves@discente.ufg.br¹

João Paulo da Silva Fonseca, jpsfonseca@ufg.br¹

¹Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás (PPGMEC/UFG), Av. Ingá, Prédio B5, Campus Samambaia, Goiânia, Goiás, CEP: 74.690-900.

Resumo: O planejamento automático é uma subárea da inteligência artificial que estuda o processo de escolha e organização de ações através da antecipação de seus efeitos. Esse processo possibilita a um agente autônomo a tomada de decisão sobre um conjunto de ações que, executadas em uma determinada sequência tem o objetivo de satisfazer metas previamente estabelecidas, dentro um ambiente computacional. A partir da década de 90, pesquisadores desta área passaram a demonstrar maior interesse em aplicar técnicas de planejamento automático a problemas reais de engenharia nos quais a complexidade e dificuldade se torna um grande empecilho. O uso do planejamento automático aplicado a processos de manufatura ganha mais destaque no meio acadêmico devido à possibilidade de contribuir com novos métodos e abordagens para o enfrentamento de aplicações reais na indústria moderna. O objetivo é analisar os dados da integração de soluções de planejamento automático e sistemas reais e descrever um exemplo prático baseado em uma planta didática. A metodologia usada é um estudo descritivo, caráter quantitativo, em que será apresentada uma proposta de ambiente integrado de modelagem aplicado a uma planta didática de manufatura. Essa planta simula uma linha de produção em uma fábrica que pode ser constituída por células de produção individuais. Os planejadores automáticos trabalham de forma que, dado um cenário inicial e um cenário final que se deseja atingir, um algoritmo varre uma árvore de busca de maneira a encontrar um plano solução, formado por uma sequência de ações que mais se adequem aos requisitos do projeto, que podem ser tempo de processamento, tempo de uma operação, custo de uma operação, dentre outros. Espera-se com este trabalho apresentar um método de modelagem do domínio de manufatura, proposta por planejadores automáticos e sua implementação prática que resultem em melhoria dos indicadores mencionados quando comparados a sistemas reais, que fazem uso de técnicas tradicionais de automação, como a aplicação de controladores lógicos programáveis para execução das tarefas programadas. Por fim, espera-se também que este trabalho contribua servindo como referência na literatura nacional para utilização do planejamento em aplicações de manufatura.

Palavras-chave: Planejamento automático, manufatura, robótica.

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia nos últimos anos e o desenvolvimento de diversos produtos para o mercado, foi necessária a melhoria dos processos produtivos. Conforme a indústria busca produzir lotes de produtos menores e mais personalizados, as linhas de produção dependem cada vez mais de células de trabalho inteligentes e flexíveis. O uso da tecnologia da informação e da inteligência artificial no domínio da automação de máquinas e instalações pode ser visto como principal propulsor tecnológico da quarta revolução industrial, também conhecida como Indústria 4.0 (Drath and Horsch, 2014). Indústria 4.0 é um modelo de produção caracterizado por uma intensa digitalização e interconexão de produtos, serviços e sistemas de manufatura inteligentes, em cadeias de valor e modelos de negócios baseados na Internet das Coisas (IoT), Serviços e Pessoas (Camarinha-Matos *et al.*, 2017). A automação se tornou imprescindível para manter a competitividade dos processos produtivos, a necessidade de rapidez na produção surge não só de uma demanda de mercado em rápida mudança, mas também de conceitos inovadores de manufatura que exploram uma parte maior do espaço de trabalho.

Wally *et al.* (2019), destacam que os sistemas de manufatura do futuro devem ser cada vez mais flexíveis, tanto em relação aos produtos que são fabricados quanto aos próprios sistemas de produção. De acordo com os princípios da fabricação inteligente, os produtos e suas receitas não precisam ser conhecidos no momento do projeto, as variantes do produto podem ser editadas na hora da execução e o planejamento e programação da produção devem ser aplicados em tempo real, quando surgir uma nova ordem de produção. Como tal, o uso de sistemas de planejamento automatizados parece muito natural, entretanto, os atuais sistemas de planejamento industrial existentes não são suficientes.

Um dos principais dispositivos utilizados no processo de automação são os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), que surgiram com o objetivo de substituir os painéis de controle com relés, diminuindo assim o alto consumo de energia, a difícil manutenção e modificação de comandos. Um CLP consiste basicamente em uma unidade central de processamento (CPU), que controla toda sua atividade, e uma interface de entradas e saídas, onde são conectados fisicamente os dispositivos de campo (sensores e atuadores). A grande vantagem dos controladores programáveis é a possibilidade de reprogramação, permitindo transferir as modificações de hardware em modificações de software. Devido a essa característica, um mesmo CLP pode ser utilizado no controle de diversos sistemas automáticos, modificando sua programação de um sistema para outro (Stefani, 2012).

Com a introdução de modelos industriais trazidos dos conceitos da indústria 4.0 e o surgimento de aplicações de inteligência artificial no cotidiano, há uma reflexão de como essas tecnologias poderiam ser utilizadas na indústria. Em contraste aos métodos já consolidados na utilização dos CLPs, o presente artigo apresenta um estudo descritivo da integração de soluções de planejamento automático em sistemas reais com uso de controladores lógicos programáveis. O artigo está estruturado da seguinte forma: A seção 2 apresenta uma breve revisão da literatura sobre planejamento automático. A proposta de integração da ferramenta de modelagem de domínio de planejamento com o CLPs é descrita na seção 3. Nesta seção, também, está exposto um exemplo prático baseado em uma planta didática de manufatura robótica inspirada em planejamento automático. Na seção 4 é apresentado as discussões e conclusões.

2. PLANEJAMENTO AUTOMÁTICO

O planejamento é o processo de escolha e organização de ações através da previsão ou antecipação de seus efeitos. Esse processo de raciocínio tem o objetivo de satisfazer (através da execução de ações) metas previamente estabelecidas. O planejamento é o lado racional da ação. É um processo de decisão abstrato e explícito que escolhe e organiza ações antecipando seus resultados esperados (Ghallab *et al.*, 2004). Dessa forma o planejamento automático é uma área da inteligência artificial que estuda esse processo de deliberação dentro um ambiente computacional. A aplicação de técnicas de planejamento automático proporciona a oportunidade de alcançar níveis mais elevados de autonomia e fornece fundamentos técnicos para sistemas inteligentes, como exigido no contexto da Indústria 4.0 (Brachman, 2002; Biundo *et al.*, 2003; Beetz *et al.*, 2007; Russel and Norvig, 2009).

A “Figura 1” mostra um modelo conceitual de um planejador automático.

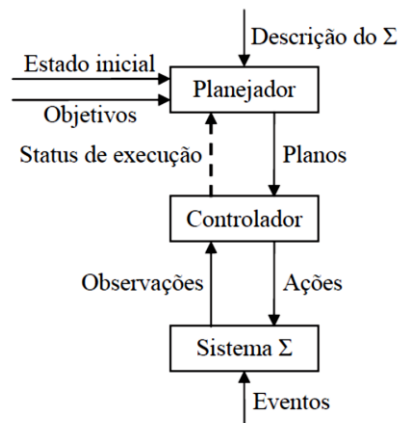


Figura 1. Modelo conceitual para o planejamento clássico (traduzido de Ghallab, *et al.* (2004)).

No modelo conceitual é possível observar os três principais elementos que, normalmente, compõem um sistema de planejamento: o Planejador que recebe a descrição do sistema Σ , bem como o estado inicial e os objetivos para esboçar um plano e fornecê-lo ao controlador. O controlador recebe o estado atual do sistema Σ , e com base em observações realiza a ação de acordo com o plano definido pelo Planejador.

Modelar o domínio de um problema é um trabalho complexo que vai depender do conhecimento que se tem sobre o problema e da representação desse conhecimento. Considere um robô que tem o objetivo de sair de uma sala e chegar em outra, usando chaves para abrir as portas das salas. Esta tarefa pode ser modelada como um domínio de planejamento denominado *Domínio das Chaves* (Göbelbecker *et al.*, 2010). A modelagem do domínio torna-se mais complexa à proporção que o número de variáveis de um problema aumenta. Um domínio de planejamento é constituído pelo ambiente em que o agente, nesse caso o robô, se encontra para executar uma tarefa e pelas ações que o agente pode executar dentro desse ambiente. No exemplo do *Domínio das Chaves*, demonstrado na “Fig. 2”, o ambiente é formado por salas, portas e chaves, e as ações que o agente pode realizar são: pegar uma chave, abrir uma porta e entrar em uma sala.

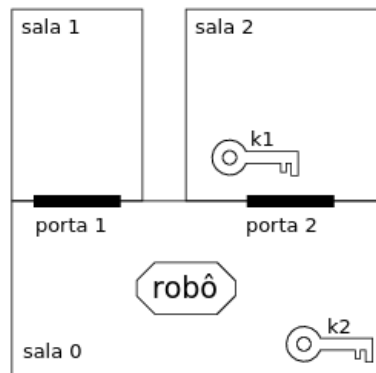


Figura 2. Estado inicial de um problema de planejamento (adaptado de Göbelbecker *et al.*, (2010)).

Uma das formas de se determinar uma sequência de ações é usar as linguagens e algoritmos de planejamento oriundos da inteligência artificial. Dado um estado inicial s_0 , um conjunto de operadores que são ações que transformam o domínio, e um estado final, o objetivo de um planejador é encontrar um plano de ações que leve o agente do estado inicial ao estado final (Cantoni, 2010). As ações de um domínio de planejamento são fornecidas por precondições e efeitos, essas precondições são proposições que precisam ter um valor verdadeiro para que a ação possa ser realizada. No exemplo citado anteriormente, para o robô realizar a ação de pegar uma chave em uma sala é necessário que exista essa chave nessa sala e que o robô nela esteja. Já os efeitos alteram os valores das proposições. No exemplo, quando o robô realiza a ação de abrir uma porta, a proposição que indica a condição daquela porta aberta passa de falso para verdadeiro.

Para que o planejador possa compreender o domínio e encontrar um plano de ação, a descrição do problema de planejamento automático deve ser feita através de uma linguagem. Normalmente a modelagem do domínio é feita através de representação clássica, teoria de conjunto e variáveis de estado, sendo a primeira a mais utilizada (Ghallab *et al.*, 2004).

2.1. Planning Domain Definition Language

A linguagem mais conhecida e utilizada na representação clássica é a linguagem de definição de domínios e problemas de planejamento, do inglês *planning domain definition language* (PDDL) (Mcdermont, 1998). Trata-se de uma linguagem formal desenvolvida pela comunidade de pesquisa da área de planejamento automático (Ghallab *et al.*, 2004). Essa linguagem destina-se a especificar o domínio, ou seja, os tipos de objetos, predicados existentes, quais possíveis ações e funções, além da instância do problema a ser resolvido, formado pela descrição dos estados inicial e final. Para a representação do problema de planejamento automático de forma computacional a informação é dividida em dois arquivos diferentes: o domínio e o problema. Os dois arquivos são inseridos como parâmetros de entrada para um planejador, o qual pode encontrar ou não uma solução ou sequência de ações que pode ser executada pelo agente.

A PDDL é o resultado da junção de diversas linguagens da área de planejamento, especialmente o STRIPS e ADL (Vaquero, 2009). Por se tratar de uma linguagem padronizada, a representação de um domínio em PDDL possibilita que planejadores diferentes possam tratar o mesmo problema de planejamento. Uma das vantagens dessa linguagem é o fato dela ser independente de domínio, podendo, então, ser aplicada a uma gama de problemas de naturezas distintas, desde problemas simples como o domínio das chaves, exemplificado anteriormente, a problemas mais complexos que envolvam as dimensões tempo e recursos.

2.2. Plantas Didáticas

No estudo de controle e supervisão de processos, tem-se como aliado o uso de plantas didáticas que possibilitam aos estudantes a familiarização com protocolos de redes industriais, sistemas eletropneumáticos, servomecanismos além da detecção e análise de falhas. A planta didática não tem como objetivo a criação de um produto final, mas sim a compreensão e análise de um sistema completo (Siotto and Schiavento, 2018).

Plantas didáticas ou plantas piloto são plataformas tecnológicas utilizadas para o aprendizado prático de controle de processos. Diversos trabalhos científicos fazem uso de plantas piloto ou didáticas. Os trabalhos de Ji *et al.* (2021), Malhan *et al.* (2021), Siotto and Schiavento (2018), Fonseca *et al.* (2016), Michniewicz and Reinhart (2016) por exemplo, fazem sua utilização no estudo de controle de processos.

A utilização dessas plataformas integradas ao ensino dos fundamentos teóricos no aprendizado, permite a análise de situações reais encontradas no setor industrial (Fonseca, 2012).

3. EXEMPLO PRÁTICO

Foi utilizada uma bancada didática de manufatura robótica que simula uma linha de produção composta por células individuais utilizando atuadores e válvulas pneumáticas controladas por CLP e um manipulador robótico que possui cinco graus de liberdade, responsável por movimentar peças cilíndricas entre a célula Processamento e a célula Espera.

A “Figura 3” apresenta o esquema do sistema proposto.

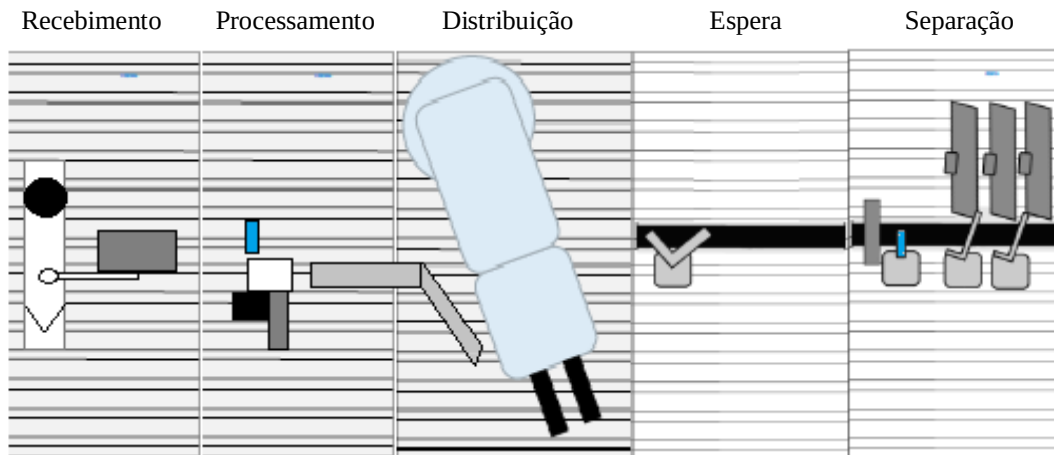


Figura 3. Esquema do sistema proposto

Essa bancada possui cinco estações. A estação Recebimento é responsável por fornecer peças de trabalho ao sistema e é composta por dois módulos: o módulo magazine e o módulo de transferência de peças. O Módulo magazine é responsável por disponibilizar as peças de trabalho, podem ser armazenadas até nove peças no magazine, um cilindro pneumático de dupla ação é responsável por disponibilizar novas peças de trabalho para o sistema. De uma forma geral, a estação magazine possui:

- Um cilindro de dupla ação instalado na parte inferior, responsável por empurrar as peças para que sejam distribuídas;
- Dois sensores magnéticos que detectam o fim de curso de atuação do cilindro;
- Um sensor de barreira para detecção de presença de peças;
- Duas válvulas reguladora de fluxo para o controle de velocidade de atuação;

O módulo de transferência de peças é composto por um atuador giratório, responsável pelo transporte de peças de trabalho para a estação seguinte. As peças são apanhadas por meio de sistema a vácuo e transferidas por meio de um atuador rotativo pneumático:

- Possui um atuador semi-rotativo pneumático de duplo efeito, com angulação de giro variando de 0° a 180° , limitado por um fim de curso mecânico;
- Possui duas chaves eletromecânicas de fim de curso para a detecção das posições extremas de atuação;
- Possui sistema de sucção por meio de ventosa.

Além dos módulos a estação é composta pelos seguintes componentes:

- Vacuostato, sensor responsável pela detecção de peças por meio da sucção gerada pelo sistema de vácuo;
- Terminal de válvulas compacto (CPV), composto de: Uma válvula direcional 3/2 vias simples solenoide, serve para acionar o módulo atuador giratório; uma válvula direcional 5/2 vias simples solenoide, serve para acionar o cilindro do magazine; uma válvula direcional (gerador de vácuo) - 2/2 vias, utilizada para alimentação da ventosa;

A “Figura 4” apresenta uma fotografia da estação Recebimento.

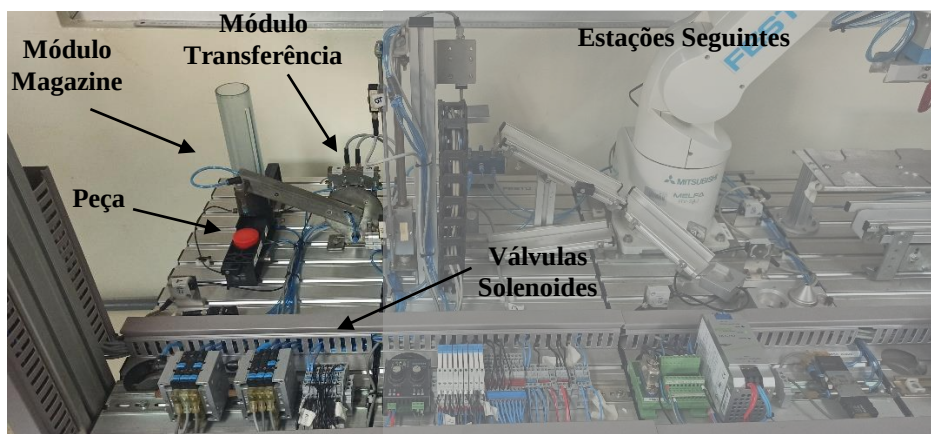


Figura 4. Fotografia da Estação Recebimento.

A estação Processamento recebe peças providas da estação Recebimento, e realiza a verificação da peça e determina se a peça será aprovada ou rejeitada de acordo com os critérios estabelecidos. Por meio de sensores, é possível realizar a classificação da peça (verificação de cor), em sequência a verificação da altura da peça. A estação é composta por módulos. O módulo elevador é utilizado para movimentar a peça até o módulo de medição e direcionar a peça na rampa adequada, ou seja, peça aprovada ou rejeitada. Possui alguns componentes como:

- Um cilindro pneumático para deslocamento do eixo vertical;
- Um atuador linear pneumático de dupla ação;
- Quatro sensores de fim de curso para detecção dos limites de curso dos atuadores;
- Duas válvulas reguladoras de fluxo.

O módulo de verificação identifica presença de material e a cor da peça baseado na reflexão do sinal óptico. É composto por dois diferentes sensores:

- Sensor óptico por reflexão difusa;
- Sensor capacitivo.

Além dos módulos, a estação Processamento é composta pelos seguintes componentes:

- Sensor de deslocamento linear, utilizado para realizar a medição da altura das peças;
- Rampa de deslize das peças por meio de um “colchão de ar”, utilizada para diminuir o atrito.
- Terminal de válvulas compacto (CPV), composto por: Duas válvulas direcionais 5/2 vias simples solenoide utilizado para o acionamento do cilindro de expulsão de peças, e outra para acionamento da rampa de deslize das peças; uma válvula direcional 3/2 vias simples solenoide utilizado para o acionamento do módulo elevador;

Na estação Distribuição, a peça recebida é manipulada pelo braço robótico que a distribui para a próxima estação. O braço robótico Mitsubishi RV-2AJ é responsável por realizar os movimentos necessários para a distribuição das peças. Trata-se de um robô manipulador de cinco graus de liberdade, com estrutura do tipo angular e oferece capacidade de carga máxima de 2kg. Os componentes que compõem a estação Distribuição, são:

- Braço robótico RV-2AJ;
- Controlador CR1-571, responsável pelo sistema de controle do robô;
- Teach Pendant, caixa de controle disponível ao operador, ligada diretamente por um cabo ao controlador do braço robótico.
- Terminal de I/O digital, utilizado como interface entre o controlador e a estação para conexão dos sinais de entradas e saídas digitais.

Na estação Espera pode-se armazenar até cinco peças, as quais são liberadas pelo atuador de parada na medida em que a estação subsequente estiver livre. A estação é composta pelos seguintes componentes:

- Atuador linear pneumático duplo efeito, utilizado para realizar a parada e a liberação de peças na esteira;
- Sensores magnéticos para detecção das posições limite do atuador;
- Válvulas reguladoras de fluxo para controle de velocidade de atuação do cilindro;
- Esteira transportadora, utilizada para movimentar peças;
- Válvula direcional 5/2 vias simples solenoide, utilizada para o comandar o atuador linear.

E, por último, a estação Separação que realiza a classificação das peças, e as separa por tipo ou por cor. As peças são detectadas no início da esteira e levadas até o módulo de parada, pelo qual é classificada pelos sensores ópticos e indutivo.

Após a classificação, as peças são separadas nas três rampas, de acordo com os critérios estabelecidos na programação do usuário. A estação é composta pelos seguintes componentes:

- Sensor retro reflexivo, utilizado para detecção de presença de peça quando o feixe de luz é interrompido;
- Sensor indutivo, utilizado para detectar presença de peças metálicas;
- Sensor óptico difuso, utilizado para detecção de peças baseado na reflexão do feixe de luz emitido;
- Dois atuadores lineares pneumáticos de duplo efeito acoplados a um sistema de engrenagens internas com giro de até 90°. Utilizado para realizar o desvio de peças para as rampas.
- Sensores magnéticos para detecção das posições finais dos atuadores.
- Esteira transportadora, utilizada para movimentar peças;
- Terminal de válvulas compacto (CPV) com 2 válvulas direcionais 5/2 vias simples solenoide, utilizadas para o acionamento dos dois desviadores.

A bancada está equipada com dois CLPs Siemens S7- 1200 (CPU 1214C DC/DC/DC) com 14 entradas/10 saídas digitais e 2 entradas analógicas cada, e uma Human Machine Interface (HMI) Siemens modelo KTP600 Basic Color. Os CLPs e a HMI estão conectados entre si via rede industrial *Profinet* e protocolo TCP/IP. A configuração dos dispositivos e programação das operações são executadas com o software *Totally Integrated Automation* (TIA Portal V13). A “Figura 5” apresenta uma fotografia da bancada construída.

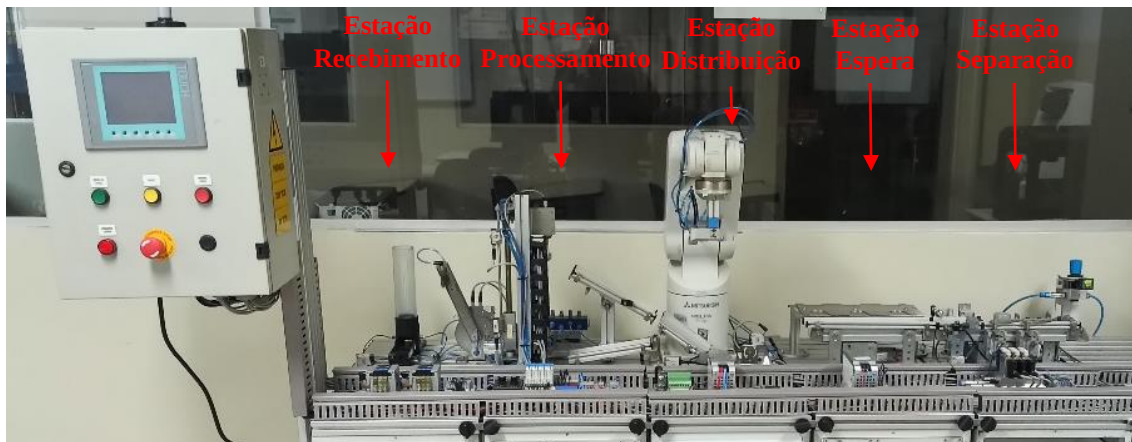


Figura 5. Fotografia da bancada didática de manufatura robótica.

3.1. Modelagem do Domínio

A linguagem PDDL possui um formalismo para definições do domínio e do problema de planejamento. O arquivo de domínio tem a finalidade de expressar a física de um domínio, sendo necessário especificar quais predicados existem, as ações possíveis, a estrutura das funções, e quais os efeitos das ações. Já no arquivo de problema, é descrita uma instância de um problema a ser resolvido, qual é composta pelos estados inicial e objetivo para aquele domínio.

Neste trabalho a modelagem do domínio foi separada por estações, como evidenciado na “Fig. 3”, para facilitar a solução do problema proposto para cada estação, sendo detalhada neste artigo somente a estação Recebimento. Foi utilizado como ferramenta de edição dos arquivos o “PDDL Editor” - software online gratuito que apresenta ampla variedade de ferramentas e recursos para escrever e testar domínios de planejamento e arquivos de problemas.

Antes da modelagem do domínio da estação Recebimento, elaborou-se um fluxograma do processo de manipulação das peças de trabalho. Referido fluxograma descreve o funcionamento, de maneira facilitada, a realização das sequências e transições dessa estação. Na “Figura 6” é apresentado o fluxograma da estação Recebimento.

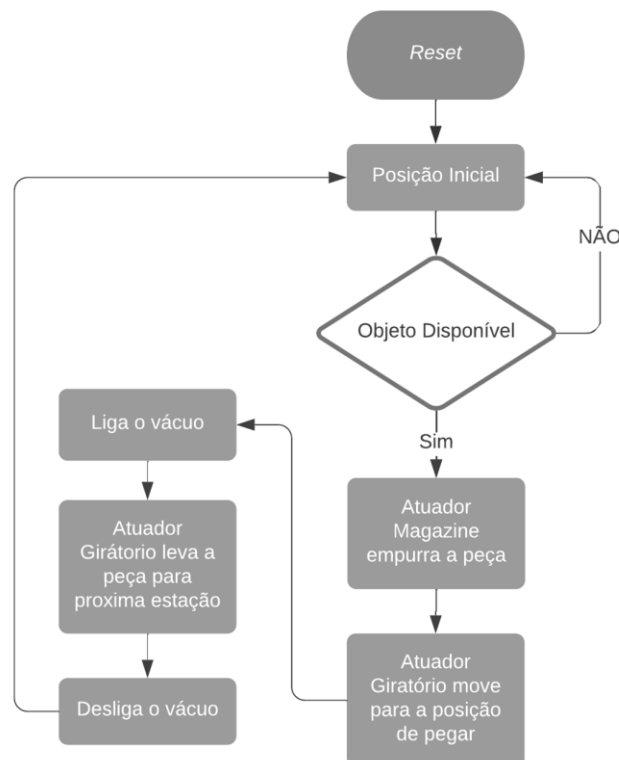


Figura 6. Fluxograma da estação Recebimento.

Com base no fluxograma exposto, elaborou-se o domínio da Estação Recebimento. A linguagem PDDL, para o correto funcionamento dos algoritmos de planejamento, aplica o conceito de requerimentos ou *requirements*. Os requerimentos traduzem os requisitos que são necessários para avaliação do domínio de planejamento. O PDDL utiliza uma notação baseada em lógica de predicados com variáveis que em seguida serão instanciadas com objetos do problema. A “Figura 7” mostra a descrição em PDDL do domínio Estação Recebimento dado pelo conjunto de predicados e pelo conjunto de ações.

```

1 (define (domain changeover)
2   (:requirements :strips :typing :negative-preconditions)
3
4   (:types
5     location atua_gir part - object
6     storage input output - location
7   )
8
9   (:predicates
10    (in ?p - part ?l - location)
11    (at ?a - atua_gir ?l - location)
12    (landing ?a - atua_gir ?p - part)
13  )
14
15  (:action push
16    :parameters (?p - part ?e - estorage ?i - input)
17    :precondition (and
18      (at ?p ?e)
19    )
20    :effect (and
21      (not (at ?p ?e))
22      (at ?p ?i)
23    )
24  )
25
26  (:action move
27    :parameters (?a - atua_gir ?from ?to - location)
28    :precondition (and
29      (at ?a ?from)
30    )
31    :effect (and
32      (not (at ?a ?from))
33      (at ?a ?to)
34    )
35  )
36
37  (:action catch
38    :parameters (?a - atua_gir ?p - part ?i - input)
39    :precondition (and
40      (at ?a ?i)
41      (in ?p ?i)
42    )
43    :effect (and
44      (not (in ?p ?i))
45      (landing ?a ?p)
46    )
47  )
48
49  (:action release
50    :parameters (?a - atua_gir ?p - part ?o - output)
51    :precondition (and
52      (landing ?a ?p)
53      (at ?a ?o)
54    )
55    :effect (and
56      (not (landing ?a ?p))
57      (in ?p ?o)
58    )
59  )

```

Figura 7. Descrição do domínio da estação Recebimento.

Os predicados que detalham as características do ambiente são especificados em (:predicates), que são:

- (location ?l), predicado que indica que o objeto ?l é um local o qual ainda pode ser instanciado via herança como um local de input ou de output;
- (atuadorgir ?a), predicado que indica que o objeto ?a é um atuador giratório;
- (part ?p), predicado que indica que o objeto ?p é uma peça.

Cada ação do domínio é dada por meio de parâmetros, condições e efeitos. No domínio da estação Recebimento observam-se as ações:

- Move: por meio da qual o atuador giratório movimenta a peça quando esta estiver disponível;
- Catch: mediante a qual o atuador giratório pega a peça no magazine;
- Release: na qual o o atuador giratório deixa a peça na estação seguinte;

Após o detalhamento das ações, são descritos os seus respectivos efeitos, ou proposições que serão modificadas após a aplicação da ação. Esses efeitos podem ser positivos, quando a proposição terá um valor verdadeiro no estado anterior à aplicação da ação, ou negativos, quando a proposição terá um valor falso no estado anterior à aplicação da ação.

Elaborado o modelo do domínio, é feita a descrição do problema de planejamento. Este é definido como uma instância a ser resolvida por dois estados, o estado inicial do problema e o estado final ou objetivo. A “Figura 8” descreve o problema de planejamento do Domínio da estação Recebimento em PDDL.

```

1 (define (problem problem_recebimento)
2   (:domain recebimento)
3   (:requirements :strips :typing)
4
5   (:objects
6     magazine - input
7     next_station - output
8     Ag1 - atua_gir
9     pack1 - part
10  )
11
12  (:init
13    (at Ag1 next_station)
14    (in pack1 magazine)
15  )
16
17  (:goal (and
18    (in pack1 next_station)
19    (at Ag1 magazine)
20  ))
21 )

```

Figura 8. Descrição do problema no Domínio da estação Recebimento.

Foi utilizado o termo (:objects) para identificar os objetos que são instanciados no problema, o termo (:init) são proposições verdadeiras e os tipos de objetos no estado inicial, e o termo (:goal) são proposições para definir a meta do planejamento. É possível observar o estado inicial, onde:

- (at Ag1 next_station), indica que o atuador giratório deve estar na posição próxima estação;
- (in pack1 magazine), indica que o pacote deve estar no magazine;

A meta do planejamento é:

- (in pack1 next_station), indica que o pacote estará na próxima estação;
- (at ag1 magazine), indica que o atuador giratório estará na posição magazine.

Segundo Ghallab *et al.* (2004), um plano é uma sequência de ações $\pi = (a_1, \dots, a_j)$, onde $j \geq 0$. No problema de planejamento do Domínio da estação Recebimento, após inserir os dois arquivos, o arquivo domínio e o problema, o editor online encontrou um plano solução, que é a sequência de ações apresentada na “Fig. 9”.

```

1 (move ag1 next_station magazine)
2 (:action move
3   :parameters (ag1 next_station magazine)
4   :precondition
5     (and
6       (at ag1 next_station)
7     )
8   :effect
9     (and
10      (not
11        (at ag1 next_station)
12      )
13      (at ag1 magazine)
14    )
15 (catch ag1 pack1 magazine)
16 (:action catch
17   :parameters (ag1 pack1 magazine)
18   :precondition
19     (and
20       (at ag1 magazine)
21       (in pack1 magazine)
22     )
23   :effect
24     (and
25       (not
26         (in pack1 magazine)
27       )
28       (landing ag1 pack1)
29     )
30 (move ag1 magazine next_station)
31 (:action move
32   :parameters (ag1 magazine next_station)
33   :precondition
34     (and
35       (at ag1 magazine)
36     )
37   :effect
38     (and
39       (not
40         (at ag1 magazine)
41       )
42       (at ag1 next_station)
43     )
44 (release ag1 pack1 next_station)
45 (:action release
46   :parameters (ag1 pack1 next_station)
47   :precondition
48     (and
49       (landing ag1 pack1)
50       (at ag1 next_station)
51     )
52   :effect
53     (and
54       (not
55         (landing ag1 pack1)
56       )
57       (in pack1 next_station)
58     )
59 (move ag1 next_station magazine)
60 (:action move
61   :parameters (ag1 next_station magazine)
62   :precondition
63     (and
64       (at ag1 next_station)
65     )
66   :effect
67     (and
68       (not
69         (at ag1 next_station)
70       )
71       (at ag1 magazine)

```

Figura 9. Plano solução do Domínio da estação Recebimento.

O planejador que encontrou um plano solução é o Solver. O componente Solver do PDDL Editor é um planejador e validador automatizado na nuvem. Nele é possível invocar o software enviando links para os arquivos PDDL ou enviando conteúdo PDDL bruto no formato JSON diretamente para recuperar ou validar um plano. Atualmente o planejador está limitado a aproximadamente 500Mb de RAM e tem um limite de tempo de 10 segundos.

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo descritivo da integração de soluções de planejamento automático com uma aplicação real. Uma bancada didática de manufatura robótica foi utilizada na qual a mesma foi programada a partir de um modelo clássico com uso de CLPs e depois modelada uma das suas estações utilizando uma linguagem clássica de planejamento automático, PDDL.

Foi apresentada uma possibilidade de aplicação da linguagem de planejamento automático PDDL no auxílio ao problema de planejamento de manipulação. A linguagem e os algoritmos que atuam sobre o modelo serão utilizados posteriormente para gerar sequências de ações que os atuadores pneumáticos e o manipulador robótico deverão seguir para cumprir determinada missão.

O exemplo prático neste trabalho mostra o potencial da linguagem, e principalmente do ambiente, no processo de modelagem e análise dos modelos de domínios de planejamento. Dessa maneira o uso do PDDL dentro do planejamento de manipulação se mostrou satisfatório pois um mesmo problema pode ser resolvido de diferentes formas dependendo da técnica de planejamento (planejador) utilizada durante os testes. Assim é recomendado que o projetista utilize diferentes técnicas de planejamento para testar, refinar e posteriormente verificar novamente seu modelo.

A fim de trazer o conceito proposto para aplicações industriais reais, é necessário mais estudo sobre a aplicação de sistemas de planejamento automático. Esse é um trabalho inicial, focado na descrição do domínio de uma única estação da célula de manufatura. Posteriormente deseja-se expandir a representação do domínio para todo sistema de manufatura robótica e bancadas didáticas semelhantes.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFG (PPGMEC – UFG), a faculdade SENAI IB e ao Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Goiás (CREA-GO).

6. REFERÊNCIAS

- Beetz M., Buss M., Wollherr D., 2007. “Cognitive Technical Systems — What Is the Role of Artificial Intelligence?”. In *Advances in Artificial Intelligence*, Vol. 4667, pp. 19-42.
- Biundo, S., Aylett, R., Beetz, M., Borrajo, D., Cesta, A., Grant, T., Mccluskey, L., Milani, A., Verfaillie, G., 2003. “PLANET technological roadmap”. In *AI planning and scheduling*, Vol. 12, pp. 30-32.
- Brachman, R. J., 2002, “Systems that know what they're doing”. In *IEEE Intelligent systems*, Vol. 17, pp. 67-71, doi: 10.1109/MIS.2002.1134363.
- Camarinha-Matos, L.M., Fornasiero, R., Afsarmanesh, H., 2017. “Collaborative Networks as a Core Enabler of Industry 4.0”. In *Anais 18th Working Conference on Virtual Enterprises*, Springer, p. 3-17.
- Cantoni, L. F. A., 2010. “Avaliação do uso da linguagem PDDL no planejamento de missões para robôs aéreos.” *Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Brazil*, 154p.
- Drath, R. and Horch A., 2014 “Industrie 4.0: Hit or Hype? [Industry Forum]”. In *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Vol. 8, no. 2, pp. 56-58, doi: 10.1109/MIE.2014.2312079.
- Fonseca, D. G. V., 2012. “Modelagem e controle adaptativo de uma planta didática de nível com instrumentação industrial”. Defesa de Mestrado apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação *PPgEEC da Universidade Federal do Rio Grande do Norte*, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.
- Fonseca, J. P., de Sousa, A. R., Ferreira, M. V. M., de Souza Tavares, J. J. P. Z. (2016). “Planpas: Plc and automated planning integration”. In *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 29, n.11, pp. 1200-1217, doi: 10.1080/0951192X.2015.1067909.
- Ghallab, M., Nau, D. S., Traverso, P., 2004, *Automated Planning—Theory and Practice*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 635 p.
- Göbelbecker, M., Keller, T., Eyerich, P., Brenner, M., Nebel, B., 2010. “Coming up with good excuses: What to do when no plan can be found”. In *Twentieth International Conference on Automated Planning and Scheduling*, Toronto, Canada, AAAI Press.
- Ji, S., Lee, S., Yoo, S., Suh, I., Kwon, I., Park, F. C., Lee, S., Kim, H., 2021. “Learning-Based Automation of Robotic Assembly for Smart Manufacturing”. In *IEEE*, Vol. 109, pp. 423-440, doi: 10.1109 / JPROC.2021.3063154.
- McDermott, D., 1998. “The PDDL Planning Domain Definition Language”. In *AIPS-98 Planning Competition Committee*, Pittsburgh Pennsylvania, USA.
- Michniewicz, J. and Reinhart, G., 2016. “Cyber-Physical-Robotics—Modelling of modular robot cells for automated planning and execution of assembly tasks”. In *Mechatronics*, Vol. 34, pp.170-180.

- Russell, S., and Norvig, P., 2009. *Artificial Intelligence: A Modern Approach (3rd edition ed.)*. Ed. Pearson Education Limited, New Jersey, EUA.
- Sioto, F., Schiaveto, V., 2018. “Automação e supervisão de planta didática virtual”. In *Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Controle e Automação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná*. Curitiba, Brasil, 99 f.
- Stefani, I. M., 2012. “Uma Solução de Projeto de Automação da Montanha-Russa ZYKLON 40”. In *Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Departamento de Engenharia Elétrica*, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.
- Vaquero, T. S., Silva, J. R., Ferreira, M., Tonidandel, F., Beck, J. C., 2009. “From Requirements and Analysis to PDDL in itSIMPLE3.0. In Proceedings”. In *3rd International Competition on Knowledge Engineering for Planning and Scheduling*, Thessaloniki, Greece.
- Wally, B., Vyskočil, J., Novák, P., Huemer, C., Šindelar, R., Kadera, P., Mazak, A., Wimmer, M., 2019. “Flexible Production Systems: Automated Generation of Operations Plans Based on ISA-95 and PDDL”. In *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 4, pp. 4062-4069, doi: 10.1109/LRA.2019.2929991.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MODELING AND IMPLEMENTATION OF A ROBOTIC MANUFACTURING TEACHING PLANT INSPIRED BY AUTOMATED PLANNING

Wesley da Silva Alves, wesleyalves@discente.ufg.br¹
João Paulo da Silva Fonseca, jpsfonseca@ufg.br¹

¹School of Electrical, Mechanical and Computer Engineering at the Federal University of Goiás (PPGMEC/UFG), Av. Ingá, building B5, Campus Samambaia, Goiânia, Goiás, Brazil. Zip Code: 74.690-900.

Abstract: Automated planning is a subarea of artificial intelligence that studies the process of choosing and organizing actions through the anticipation of its effects. This process enables an autonomous agent to make decisions about a set of actions that, performed in a given sequence, have the objective of satisfying previously established goals within a computational environment. Since the 1990s, researchers in this area have shown greater interest in applying automated planning techniques to real engineering problems in which complexity and difficulty become a major obstacle. The use of automated planning applied to manufacturing processes gains more prominence in the academic environment due to the possibility of contributing with new methods and approaches to coping with real applications in the modern industry. The goal is to analyze the integration data of automated planning solutions and real systems and describe a practical example based on a didactic plant. The methodology used is a descriptive study, quantitative character, in which will be presented a proposal of integrated modeling environment applied to a manufacturing didactic plant. This plant simulates a production line in a factory that can consist of individual production cells. Automated planners work in such a way that, given an initial scenario and a final scenario that is to be achieved, an algorithm scans a search tree in order to find a solution plan, formed by a sequence of actions that best fit the requirements of the project, which can be processing time, time of an operation, cost of an operation, among others. It is expected with this work to present a method of modeling the manufacturing domain, proposed by automated planners and its practical implementation that result in improvement of the indicators mentioned when compared to real systems, which make use of traditional automation techniques, such as the application of programmable logic controllers for the execution of programmed tasks. Finally, it is also expected that this work will contribute by serving as a reference in the national literature for the use of planning in manufacturing applications.

Keywords: Automated planning, manufacturing, robotics.