



FEUP **FACULDADE DE ENGENHARIA**
UNIVERSIDADE DO PORTO

Departamento de Engenharia
Electrotecnica e de Computadores

Linha de Produção Flexível

1 Introdução

Este documento descreve o simulador de uma linha de produção flexível, inspirado no kit que existe no laboratório de automação do DEEC.

2 Simulador da Linha de Produção Flexível

O simulador consiste num programa em Java, o qual pode ser executado em qualquer plataforma que disponha de uma máquina virtual Java (ex. Windows, Linux, OSX). O simulador tenta seguir de forma mais precisa possível o kit mencionado acima.

Ao contrário da linha de produção que se encontra montada com uma disposição fixa, o simulador permite construir linhas de produção com as disposições mais diversas, e com qualquer número de sub-componentes (i.e. máquinas ferramenta, tapetes simples, tapetes rotativos). Ou seja, a planta da linha de fabrico é configurável, tanto na quantidade de equipamento de cada tipo, bem como na sua distribuição pela planta da fábrica. Assim, o mesmo programa de simulação pode simular as mais diversas distribuições de equipamentos pela fábrica. A configuração é contida num ficheiro, o qual pode ser editado manualmente. No entanto, para o trabalho que lhe é proposto, vai ser-lhe entregue um ficheiro com uma distribuição de equipamento que segue a distribuição da linha de produção previamente descrita. Por este motivo, o formato do ficheiro de configuração não será descrito neste documento¹.

A planta da linha de fabrico sobre a qual irá realizar o seu trabalho é provavelmente bastante diferente daquela da figura seguinte que representa uma simulação do kit física que se encontra no laboratório de automação. Servirá no entanto para descrever o funcionamento de cada tipo de equipamento.

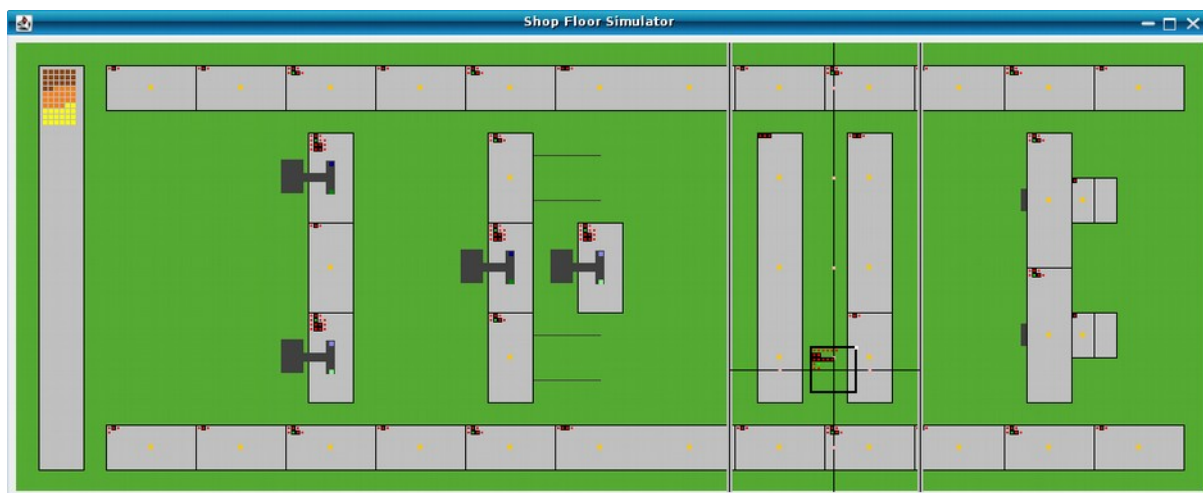


Figura 1: Aspeto do simulador

Cada equipamento (tapete, máquina ferramenta, etc.) simulado pelo simulador será controlado através de entradas e saídas (na sua maioria binárias). O controlo destes equipamentos será efetuado através do protocolo de comunicações Modbus/TCP. Para todos os efeitos, o simulador comporta-se como um único escravo Modbus/TCP que poderá ser controlado por qualquer PLC que suporte este protocolo.

O formato do ficheiro de configuração é bastante intuitivo e auto explicativo, pelo que está livre de efetuar as experiências que achar interessantes. Chama-se a atenção no entanto que o trabalho que será avaliado presume que a planta a ser controlada não sofre alterações.

Como é habitual nos escravos Modbus, as entradas e saídas são referenciadas pelo seu endereço de memória (começando por 0), e ocupam lugares distintos de memória. Ou seja, a entrada binária com endereço 6 é distinta da saída binária com o mesmo endereço 6.

Cada equipamento usa um determinado número de entradas e de saídas. O número exato depende do tipo de equipamento. Por exemplo, um tapete simples ocupa 2 saídas (para comandar o movimento do tapete) e uma entrada (para ler o sensor a meio do tapete). O endereço exato destas entradas e saídas depende da posição na qual o sub-componente é definido no ficheiro de configuração.

Os endereços são ocupados/utilizados de forma sequencial (i.e. com endereços a crescer a partir do 0) pela ordem pela qual os equipamentos são definidos no ficheiro de configuração. Para obter uma listagem completa dos endereços de todos os equipamentos na fábrica, execute na linha de comando:

```
$ java -jar sfs.jar --csv enderecos.csv
```

ou

```
$ java -jar sfs.jar --map enderecos.txt
```

Com a opção 'csv' irá ser criado um ficheiro com a informação em tabela, separada por vírgulas, de forma a que seja de facilmente utilizável por um programa de edição de folha de cálculo. Com a opção 'map', o ficheiro criado terá mais texto por forma a facilitar a leitura por humanos.

Por exemplo, uma planta com apenas dois tapetes, teria os dois comandos de atuação do primeiro tapete alocados aos endereços 0 e 1, enquanto os comandos do segundo tapete seriam alocados aos endereços seguintes, ou seja 2 e 3. Já os sensores destes tapetes (um para cada tapete) ocupam um segundo espaço de endereços dedicado aos sensores binários, pelo que o sensor do tapete 1 seria alocado ao endereço 0, enquanto o sensor do segundo tapete ocuparia o endereço 1.

Quando estiver a controlar o simulador, pode gravar a sequência de comandos que este recebeu (i.e., gravar a simulação) desde que o execute com o comando

```
$ java -jar sfs.jar --record testel
```

Para visualizar novamente a simulação que acabou de gravar, execute o comando

```
$ java -jar sfs.jar --playback testel
```

3 Representação dos equipamentos e das peças

No simulador cada equipamento (tapete, máquina) aparece sob a forma de uns pontos coloridos no canto superior esquerdo da sua representação. Os pontos com fundo cinzento indicam o estado dos comandos que o equipamento está a receber, e os pontos com fundo preto o estado dos respectivos sensores. Como seria de esperar, o **vermelho** indica desactivado (FALSE), e o **verde** activo (TRUE).

3.1 Tapetes Lineares

Um tapete linear pode movimentar uma peça em em dois sentidos opostos (eixos **XX** ou **YY**, conforme a posição do tapete). O movimento efetua-se sempre à mesma velocidade, pelo que o controlo do motor do tapete pode ser realizado utilizando um sinal binário para cada sentido. Em princípio não deveria ser permitido comandar o movimento nos dois sentidos em simultâneo (com o risco de danificar o equipamento), no entanto a linha de produção encontra-se protegida (eletricamente) contra esta eventualidade, resultando na paragem de ambos os motores, pelo que o simulador tem o mesmo comportamento.

Todos os tapetes dispõem de um ou mais sensores os quais permitem detetar a presença de uma peça em cima do tapete (função do tamanho do tapete). Nos tapetes mais curtos o sensor está colocado no centro do tapete. Nos tapetes mais longos existem dois sensores por tapete, colocados aproximadamente em cada extremidade do mesmo. A cada um destes sensores corresponde uma saída binária.

O tapete linear possui os seguintes sinais de entrada e saída (Tabela 1).

Tipo	Sigla	Nome
Comando Binário	mp	movimento no sentido positivo (XX ou YY)
Comando Binário	mm	movimento no sentido negativo (XX ou YY)
Sensor Binário 1	p1	Presença de peça
Sensor Binário 2	p2	Presença de peça
Sensor Binário 3		...

Tabela 1: Comandos e sensores do tapete linear

Nos tapetes com posição horizontal (eixo **XX**) utiliza-se a nomenclatura **me** / **md** (movimento para a esquerda / direita), enquanto que os tapetes com posição vertical (eixo **YY**) utiliza-se **mc** / **mb** (movimento para cima / para baixo).

Os tapetes lineares com um sensor no meio têm três quadrados (Figura 10) que indicam respetivamente:

- quadrado (fundo cinzento) da esquerda:
ordem de deslocamento para esquerda/cima;
- quadrado (fundo preto) do meio:
sensor de presença de peça;
- quadrado (fundo cinzento) da direita:
ordem de deslocamento para direita/baixo.



Figura 2: Imagem de um tapete linear no simulador

Alguns tapetes mais longos dispõem de dois sensores, pelo que a sua representação inclui quatro quadrados no canto superior esquerdo, dois para os comandos, e outros dois (ao centro) para os sensores.

3.2 Tapetes Rotativos

O tapete rotativo comporta-se de forma idêntica a um tapete linear, sendo no entanto possível controlar a sua rotação sobre o eixo dos **ZZ**.

Para controlar esta rotação extra, o tapete dispõe de mais dois sinais binários, um para cada cada sentido de rotação. Em princípio não deveria ser permitido comandar o movimento nos dois sentidos de rotação em simultâneo (com o risco de danificar o equipamento), no entanto a linha de produção encontra-se protegida (eletricamente) contra esta eventualidade, resultando na paragem de ambos os motores, pelo que o simulador tem o mesmo comportamento.

Só é permitido rodar o tapete no máximo 90°. Os dois extremos destes 90° são sinalizados por dois sensores de fim-de-curso. Caso a rotação do tapete continuar para além destes limites, o equipamento pode ser danificado.

Na tabela seguinte estão descritos os respetivos sinais de entrada e saída.

Tipo	Sigla	Nome
Comando Binário	mp	movimento no sentido positivo (XX ou YY)
Comando Binário	mm	movimento no sentido negativo (XX ou YY)
Comando Binário	rd	rotação no sentido directo
Comando Binário	ri	rotação no sentido inverso
Sensor Binário	p	presença de peça
Sensor Binário	d	fim de rotação no sentido directo
Sensor Binário	i	fim de rotação no sentido inverso

Tabela 2: Comandos e sensores do tapete rotativo

A sequência de comandos, movimentos e posições possíveis está representada na seguinte figura.

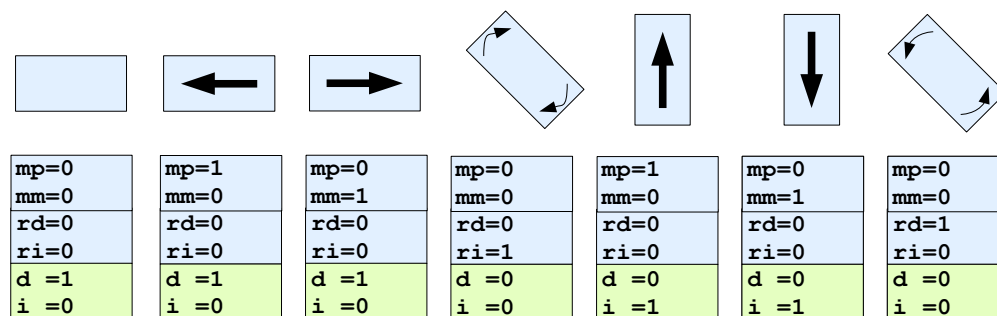


Figura 3: Movimentos do tapete rotativo

Os tapetes rotativos, para além de uma linha superior com o mesmo significado dos tapetes lineares, dispõem de uma segunda linha com o seguinte significado (Figura 11):

- quadrado (fundo cinzento) da esquerda:
ordem de rotação no sentido direto;
- quadrado (fundo preto) da esquerda:
tapete na posição extrema de rotação no sentido direto;
- quadrado (fundo preto) da direita:
tapete na posição extrema de rotação no sentido inverso;
- quadrado (fundo cinzento) da direita:
ordem de rotação no sentido inverso.



Figura 4: Imagem de um tapete rotativo no simulador

3.3 Tapetes Deslizantes

O tapete deslizante comporta-se de forma muito semelhante a um tapete rotativo, com a única diferença de que o movimento de rotação é substituído por um de translação linear (eixo **XX**). Assim, os comandos e sensores são os mesmos que o tapete rotativo, apenas com nomes diferentes:

- quadrado (fundo cinzento) da esquerda:
ordem de translação para a esquerda;
- quadrado (fundo preto) da esquerda:
tapete na posição extrema de translação para a esquerda;
- quadrado (fundo preto) da direita:
tapete na posição extrema de translação para a direita ;
- quadrado (fundo cinzento) da direita:
ordem de translação para a direita.

Os comandos e sensores são os mesmos que o tapete rotativo, apenas com nomes diferentes.

Tipo	Sigla	Nome
Comando Binário	mp	movimento no sentido positivo (YY)
Comando Binário	mm	movimento no sentido negativo (YY)
Comando Binário	tp	translação no sentido positivo (XX)
Comando Binário	tm	translação no sentido negativo (XX)
Sensor Binário	p	presença de peça
Sensor Binário	fp	Fim translação no sentido positivo (XX)
Sensor Binário	fm	Fim translação no sentido negativo (XX)

Tabela 3: Comandos e sensores do tapete deslizante

3.4 Pusher

Um *pusher* permite empurrar uma peça para fora de um tapete. É essencialmente utilizado na escolha e seriação de peças. O tapete é considerado parte integrante do *pusher*, e é comandado por comandos em tudo idênticos aos dos comandos de um tapete linear.

O *pusher* utiliza dois comandos, um para se movimentar para a direita (sentido de remoção de peça), e outro para se movimentar para a esquerda (sentido de retorno à posição de repouso). Existem dois sensores fim-de-curso que indicam o limite de cada um destes movimentos. Para prevenir a ocorrência de danos físicos ao equipamento, nunca deve permitir que este movimento se faça para além dos limites.

Deve ainda tomar cuidado no sentido de apenas movimentar o tapete quando o *pusher* se encontra na posição de repouso.

Tipo	Sigla	Nome
Comando Binário	mp	movimento no sentido positivo (XX ou YY)
Comando Binário	mm	movimento no sentido negativo (XX ou YY)
Comando Binário	pr	recolhe o pusher
Comando Binário	pe	extende o pusher
Sensor Binário	p	presença de peça
Sensor Binário	fr	fim de recolha do pusher
Sensor Binário	fe	fim de extensão do pusher

Tabela 4: Comandos e sensores do pusher

3.5 Mesa de Trabalho

Uma mesa de trabalho serve apenas para pousar as peças de forma temporária. São utilizadas dentro da área de alcance do robot tipo gantry, para que este possa pousar peças nestas mesas, e assim empilhar peças umas nas outras.

Do ponto de vista de controlo comporta-se como um tapete que nunca se move. Tem apenas um sensor de presença, e não tem qualquer comando.

Tipo	Sigla	Nome
Sensor Binário	p	presença de peça

Tabela 5: Comandos e sensores da mesa de trabalho

A mesa de trabalho dispõe de um único sensor (quadrado com fundo preto) que representa o sensor de presença de peça (Figura 12).

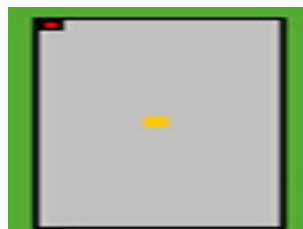


Figura 5: Imagem de uma mesa de trabalho no simulador

3.6 Armazém

Por forma a simplificar o trabalho exigido aos alunos, bem como a complexidade do próprio simulador, a simulação do armazém assume que este se encontra já automatizado por um programa já existente. Assim, a interação com o armazém fica limitada ao pedido de armazenagem de uma peça, ou a retirada de uma peça de um determinado tipo.

Como a interface física da célula do armazém com as restantes células se faz através de dois tapetes, o armazém é representado por dois tipos de tapetes. Um tipo de tapete permite retirar peças do armazém, enquanto o outro tipo de tapete permite armazenar peças no armazém.

Cada tapete é controlado de forma idêntica a um tapete linear descrito previamente, pelo que dispõe de duas saídas digitais para os comandos de movimento do tapete, bem como uma entrada digital para indicar a presença de uma peça sobre o tapete.

Para armazenar uma peça, esta deve ser primeiro colocada sobre o tapete apropriado, na posição do meio. O pedido de armazenagem é indicado através de uma transição de 0 para 1 de uma sinal digital específico (in). Considera-se que a operação de armazenagem termina logo que a peça 'desapareça' do tapete.

Para a remoção de uma peça do armazém, o tapete deverá estar inicialmente livre. De seguida, deve ser indicado (através de uma saída de 8 bits) o número de que identifica o tipo de peça que se pretende retirar do armazém. Note que para que seja considerado o pedido de remoção, este registo deverá estar inicialmente com o valor 0. Considera-se que a operação de remoção da peça terminou logo que o tapete aparece ocupado pela mesma.

Os sinais de comando de cada um dos tapetes de interface com o armazém encontram-se a seguir resumidos.

Tipo	Sigla	Nome
Comando Binário	mp	movimento no sentido positivo (XX ou YY)
Comando Binário	mm	movimento no sentido negativo (XX ou YY)
Comando Binário	in	inserir peça no armazém
Sensor Binário	p	presença de peça

Tabela 6: Comandos e sensores da interface de entrada do armazém

Tipo	Sigla	Nome
Comando Binário	mp	movimento no sentido positivo (XX ou YY)
Comando Binário	mm	movimento no sentido negativo (XX ou YY)
Comando Word	tp	tipo de peça a remover
Sensor Binário	p	presença de peça

Tabela 7: Comandos e sensores da interface de saída do armazém

3.7 Máquina Ferramenta

Uma máquina ferramenta efetua operações sobre a peça que se encontra sobre o tapete anexo à máquina. Este tapete é considerado parte integrante da máquina ferramenta, e é comandado por comandos em tudo idênticos aos comandos de um tapete linear.

As máquinas dispõem de 3 ferramentas montadas numa torre. A troca de ferramentas efetua-se ordenando a rotação da torre (em um de dois sentidos) até que a ferramenta desejada se encontre na posição de maquinação. Um sensor é ativado sempre que uma ferramenta (qualquer delas) se encontra na posição de maquinação. Uma vez que este sensor não indica qual a ferramenta, mas apenas a presença de uma qualquer ferramenta, é da responsabilidade do programa de controlo da máquina manter em memória o número de rotações efetuadas e assim determinar qual a ferramenta que se encontra na posição de maquinação. Sempre que a máquina é iniciada considera-se que a ferramenta na posição de maquinação é a ferramenta T1. As ferramentas encontram-se montadas pela ordem T1, T2 T3.

A torre na qual se encontra montada a ferramenta pode ser deslocada em dois eixos independentes – eixo **ZZ** (cima-baixo), e no eixo dos **YY** (esquerda-direita). Para o controlo de posição em cada um destes eixos dispõe-se de 2 comandos binários, e dois sensores que indicam a chegada a uma das posições extremas. Repare no entanto que a operação de transformação pode ser efetuada com a ferramenta em qualquer posição.

A operação a velocidade fixa da ferramenta na posição de maquinação é indicada através de um simples comando binário.

De forma a prevenir danos físicos ao equipamento, nunca deverá permitir que os movimentos nos eixos **ZZ** e **YY** ultrapassem os limites.

Tipo	Sigla	Nome
Comando Binário	mp	movimento no sentido positivo (XX ou YY)
Comando Binário	mm	movimento no sentido negativo (XX ou YY)
Comando Binário	tc	troca de ferramenta (tool change)
Comando Binário	--	troca de ferramenta (outro sentido)
Comando Binário	tr	rotação de ferramenta (tool rotate)
Comando Binário	yp	movimento torre eixo y (sentido positivo)
Comando Binário	ym	movimento torre eixo y (sentido negativo)
Comando Binário	zp	movimento torre eixo z (sentido positivo)
Comando Binário	zm	movimento torre eixo z (sentido negativo)
Sensor Binário	p	presença de peça
Sensor Binário	pt	presença de ferramenta
Sensor Binário	yp	Fim movimento eixo y (sentido positivo)
Sensor Binário	ym	Fim movimento eixo y (sentido negativo)
Sensor Binário	zp	Fim movimento eixo z (sentido positivo)
Sensor Binário	zm	Fim movimento eixo z (sentido negativo)

Tabela 8: Comandos e sensores da máquina ferramenta

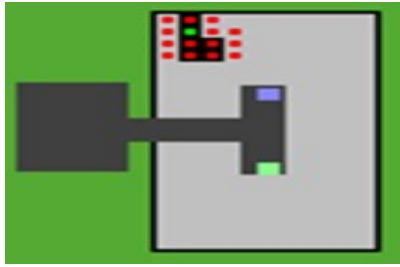


Figura 6: Imagem de uma máquina ferramenta no simulador

Os tapetes associados às máquinas ferramenta, para além de uma linha superior com o mesmo significado dos tapetes lineares, dispõem de uma segunda linha com o estado da máquina associada (Figura 13). Nesta segunda linha:

- quadrado (fundo cinzento) da esquerda:
ordem de acionamento da ferramenta da máquina;
- quadrado (fundo preto) do meio:
ferramenta alinhada e pronta para ser acionada;
- quadrado (fundo cinzento) do meio:
ordem de troca de ferramenta;
- quadrado (fundo cinzento) da direita:
ordem de troca de ferramenta (sentido inverso);

As duas linhas seguintes dizem respeito à deslocação da máquina nos eixos YY e ZZ respetivamente (no simulador a deslocação no eixo dos ZZ é representada por uma deslocação no eixo XX). Cada uma das linhas dispõe de:

- quadrado (fundo cinzento) da esquerda:
ordem de translação para a esquerda/cima;
- quadrado (fundo preto) da esquerda:
tapete na posição extrema de translação para a esquerda/cima;
- quadrado (fundo preto) da direita:
tapete na posição extrema de translação para a direita/baixo;
- quadrado (fundo cinzento) da direita:
ordem de translação para a direita/baixo.

3.8 Robot 3D

O robot 3D efetua movimentos nos 3 eixos (**XX**, **YY**, **ZZ**), sendo que para cada eixo existem dois comandos de movimento (um para cada direção).

Para o eixo **ZZ** existem dois sensores que indicam as duas posições extremas (em cima e em baixo). Para o eixo dos **XX** também existem dois sensores que incidam as duas posições extremas, as quais coincidem com o alinhamento correto com os tapetes/mesas que se encontram por baixo do robot. Já para o eixo dos **YY** existem 5 sensores, os quais indicam que o robot se encontra alinhado com um dos cinco tapetes/mesas deste eixo.

Um único comando binário é suficiente para controlar a garra (0 → abre a garra; 1 → fecha a garra). Por motivos mecânico, após o comando de fecho da garra deverá esperar-se cerca de 1 segundo para dar tempo a que a peça seja presa corretamente. Na garra encontra-se montado um sensor o qual indica a presença (ou não) de uma peça.

Para prevenir contra a ocorrência de colisões, todos os movimentos da garra ao longo dos eixos **XX** e **YY** só poderão ser efetuados quando a garra se encontra na posição superior do eixo **ZZ**. Para além disso, não deverá permitir que o movimento ao longo dos eixos **XX**, **YY**, e **ZZ** nunca ultrapasse os limites da zona de operação.

Quando o sistema arranca, a posição do robot é desconhecida. É assim necessário ter um procedimento de inicialização do mesmo que o coloque numa posição conhecida.

Tipo	Sigla	Nome
Comando Binário	xp	movimento no sentido positivo (XX)
Comando Binário	xm	movimento no sentido negativo (XX)
Comando Binário	yp	movimento no sentido positivo (YY)
Comando Binário	ym	movimento no sentido negativo (YY)
Comando Binário	zp	movimento no sentido positivo (ZZ)
Comando Binário	zm	movimento no sentido negativo (ZZ)
Comando Binário	g	Comando da garra
Sensor Binário	xp	Fim movimento no sentido positivo (XX)
Sensor Binário	xm	Fim movimento no sentido negativo (XX)
Sensor Binário	zp	Fim movimento no sentido positivo (ZZ)
Sensor Binário	zm	Fim movimento no sentido negativo (ZZ)
Sensor Binário	y1	Posição 1 do eixo YY
Sensor Binário	y2	Posição 2 do eixo YY
Sensor Binário	y3	Posição 3 do eixo YY
Sensor Binário	y4	Posição 4 do eixo YY
Sensor Binário	y5	Posição 5 do eixo YY
Sensor Binário	p	Presença de peça

Tabela 9: Comandos e sensores do robot

O robot 3D é representado por um quadrado que se movimenta nos eixos XX e YY de acordo com os comandos recebidos. A sua posição no eixo dos ZZ é representada por

um ponto branco que se desloca ao longo da linha negra do extremo direito da caixa (Figura 14).

Na primeira linha dos sensores/comandos, aparecem seis quadrados de fundo cinzento, que representam os comandos de movimentar nos eixos XX (sentidos +, e -), YY (sentidos +, e -) e ZZ (sentidos +, e -) respetivamente.

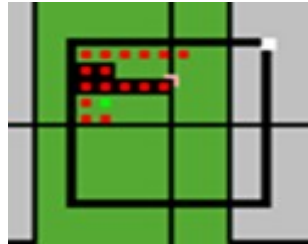


Figura 7: Imagem do robot no simulador

Na segunda e terceira linhas estão representados os estados dos sensores que indicam o alinhamento correto do robot com os tapetes por baixo do mesmo. A segunda linha representa o alinhamento quando o robot se desloca no eixo dos XX, enquanto a terceira linha o alinhamento quando o robot se desloca no eixo dos YY.

Na quarta linha estão representados os sensores que indicam a chegada do robot às posições extremas do eixo dos ZZ.

Na quinta linha estão representados, à esquerda o comando de acionamento de fecho da garra, e à direita o sensor de presença de peça localizada na garra do robot.

4 Comandos dos Equipamentos

Se clicar com o botão direito do rato em cima de um dos recursos do simulador (por exemplo, num tapete linear), poderá alterar o estado dos atuadores desse recurso, bem como inserir ou remover uma peça. Repare no entanto, que a mudança de estado do atuador do recurso é feita de forma momentânea, pelo que só permanecerá no novo estado caso não haja mais nenhum comando a fazer novas mudanças. Caso o autómato esteja a comandar o simulador, este está continuamente a atualizar o estado das suas saídas, pelo que rapidamente o estado do atuador voltará para estado indicado pelo autómato. No entanto, se o autómato não estiver ligado, o atuador permanecerá com o novo valor até ser novamente alterado.