

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**Implementação de rotinas básicas de controlo do  
movimento de um robô submarino**

Sandro Augusto Costa Magalhães  
Tiago José Ferreira Mendonça

VERSÃO FINAL

Trabalho realizada no âmbito da unidade curricular de  
Sistemas Robóticos Autónomos

Docentes: Vitor Pinto e António Moreira

16 de dezembro de 2017

# 1 Introdução

O controlo de trajetórias de robôs subaquáticos traduz-se num problema complexo introduzido pelas variáveis do meio. Nestes ambientes, os robôs estão sujeitos a forças de atrito inferiores e, como tal, o robô tem uma maior inércia que o impede de anular a sua velocidade a partir do momento em que as suas hélices deixam de ter movimento. Conclui-se, portanto, que nestes meios, a eliminação de movimento é obtida pela inversão da velocidade produzida pelas hélices.

Por conseguinte, com este trabalho prático, pretende-se desenvolver um sistema de controlo que seja capaz de movimentar o submarino ao longo de uma trajetória pré-definida. Para este efeito, recorrer-se-á ao software de simulação SimTwo, utilizando um meio subaquático e um modelo do robô MARES.

## 2 Implementação da máquina de estados GoToXYZTheta

Observando atentamente o problema exposto, verifica-se que a máquina de estados capaz de resolver o problema apresentado no trabalho laboratorial 2, também é suscetível de constituir uma solução parcial do presente caso. Para que este seja totalmente satisfeito, é suficiente acrescentar dois estados adicionais que são responsáveis por fazer o submarino atingir a altura desejada.

Pela figura 2.1, verifica-se que a máquina de estados para o controlo de trajetórias está subdividida em quatro etapas principais: rotação para a posição final  $x$   $y$ , deslocação para a posição final, rotação para o ângulo desejado e deslocação para a altura desejada. Neste caso, optou-se por mover o MARES segundo a componente  $z$  apenas no final do ciclo de controlo, no entanto, esta etapa poderia ser feita no início do ciclo de controlo ou até mesmo paralelamente ao ciclo de controlo, utilizando uma segunda máquina de estados.

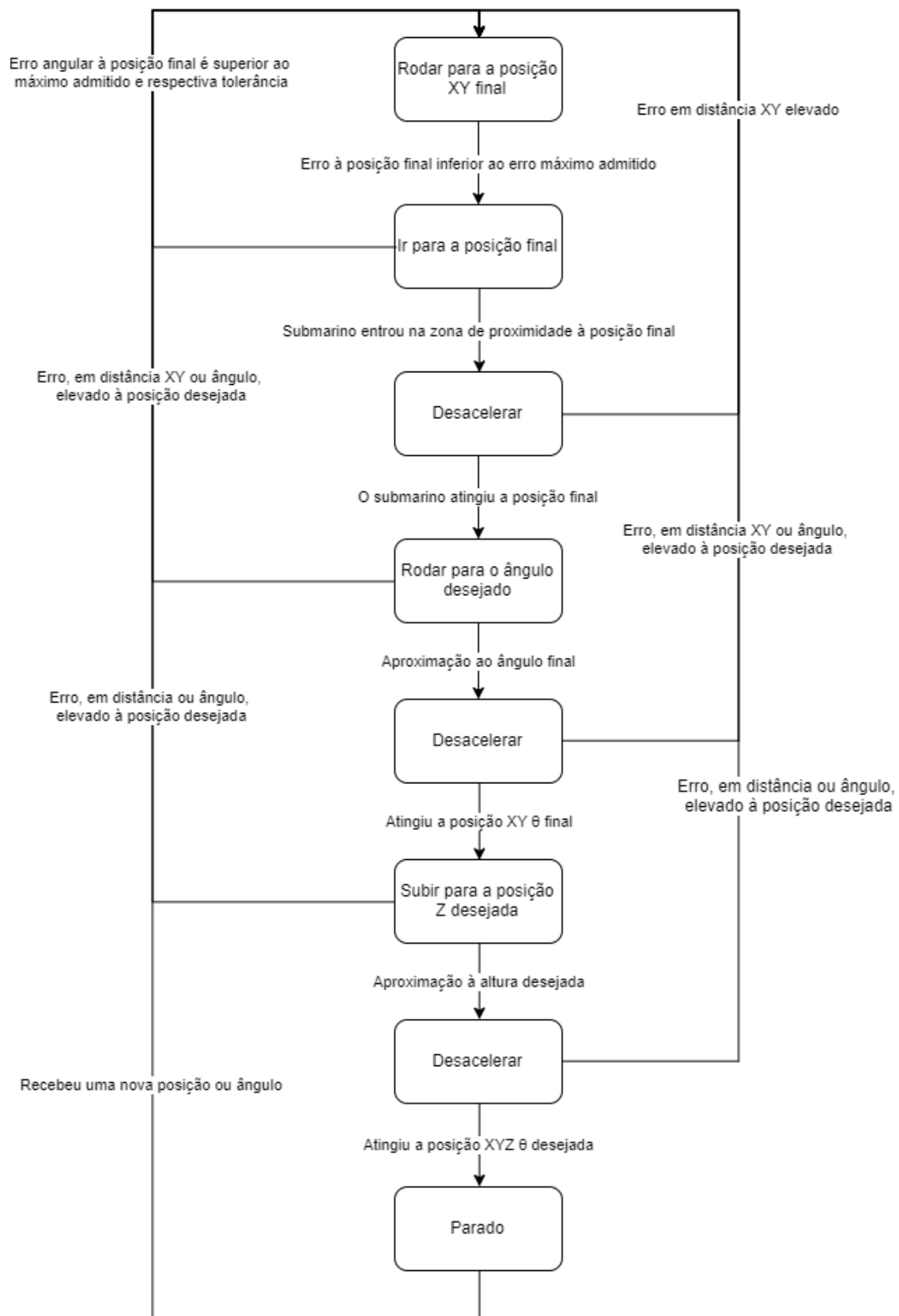


Figura 2.1 Máquina de estados de uma trajetória do tipo GoToXYZTheta do submarino

### 3 Controlo da velocidade do robô

Tal como referido na secção 1, devido ao baixo atrito existente nos meios subaquáticos, o submarino tende a ter uma inércia elevada e como tal, quando deixa de produzir movimento, este continua a deslocar-se. Para corrigir esta particularidade, sente-se a necessidade de implementar um sistema de controlo, baseado num controlador proporcional, que tenda a corrigir o erro da posição do robô.

Este controlador possui a vantagem de permitir que haja uma saída variável, conforme o erro à posição final desejada. No entanto, oferece um erro de posição do tipo *offset* que não é relevante para a situação considerada, uma vez que o submarino tende a nunca ter uma posição constante, devido às flutuações existentes no meio.

Para calcular o ganho do controlador, procedemos a um método iterativo e baseado no comportamento do robô, até atingir um valor que satisfizesse minimamente o resultado esperado. Concluiu-se, assim, que os ganhos que satisfaziam as nossas necessidades eram de  $k_p = 4$  no momento da deslocação ao objectivo e de  $k_p = -3$  no momento de desaceleração.

### 4 Percurso da Trajetória

Uma vez sintonizado o controlador do movimento do veículo e após validação do mesmo com alguns ensaios de carácter experimental, pretendia-se, então, que o mesmo fosse capaz de descrever uma trajetória previamente definida, iniciando o seu movimento numa determinada localização e cessando o mesmo imediatamente após atingir a coordenada final estabelecida.

No presente caso, procedeu-se à decomposição do percurso em segmentos de reta, de forma a que fossem facultadas sucessivas coordenadas de alvos parciais até se atingir o ponto final. Sendo assim, analogamente ao procedimento concebido em trabalhos laboratoriais anteriores, desenvolveu-se uma rotina *FollowPath*, cujo algoritmo está suportado numa máquina de estados na qual, em cada um, é definida a posição alvo para a qual o robô deve convergir, descrita pelas coordenadas  $(x, y, z, \theta)$ , sendo que, quando este está suficientemente próximo desta tolerância em torno da meia unidade, transita-se para um novo estado do percurso, atualizando-se a posição alvo. Desta forma, estas coordenadas constituem a nova referência da rotina de controlo.

Posto isto, partindo do estado inicial  $(x, y, z, \theta) = (-3, -2, 0, 0)$ , definiram-se os seguintes pontos no ambiente de simulação:

$$(x_1, y_1, z_1, \theta_1) = (0, -2, 0, 0)$$

$$(x_2, y_2, z_2, \theta_2) = (0, 4, 0, \frac{\pi}{2})$$

$$(x_3, y_3, z_3, \theta_3) = (3, 4, 0, -\frac{\pi}{2})$$

$$(x_4, y_4, z_4, \theta_4) = (3, -1, 0, -\pi)$$

$$(x_5, y_5, z_5, \theta_5) = (-3, -1, 0, -\pi)$$

Com base nestas localizações, considera-se que é possível reproduzir fidedignamente o trajeto sugerido, intersetando os pontos assinalados. Visto que este se encontra representado num plano a duas dimensões e nada é referido quanto ao descolamento ao longo do eixo z, assumiu-se uma cota constante de valor nulo.

## 5 Resultados

Com o intuito de averiguar o correto funcionamento de todos os procedimentos implementados, avançou-se para a fase de simulação. Neste momento, forçou-se o submarino a descrever a trajetória pretendida, registando o trajeto efetivo e contrapondo-o com o que seria expectável.

Posto isto, com recurso ao ambiente de simulação do SimTwo, obtiveram-se os seguintes resultados:

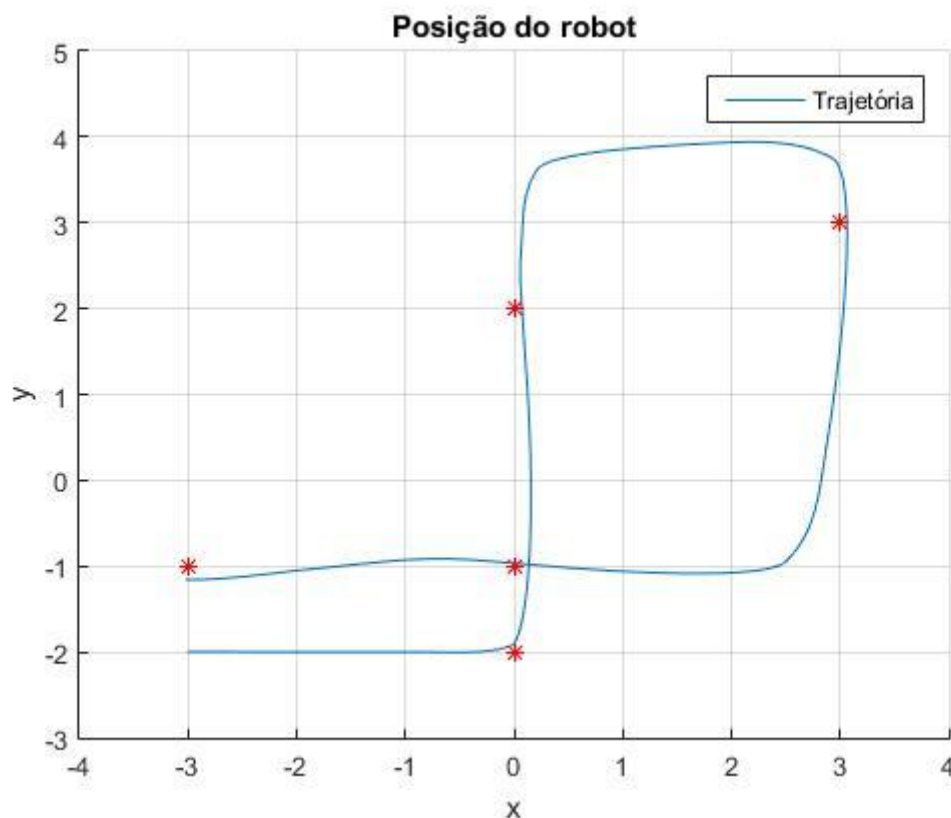
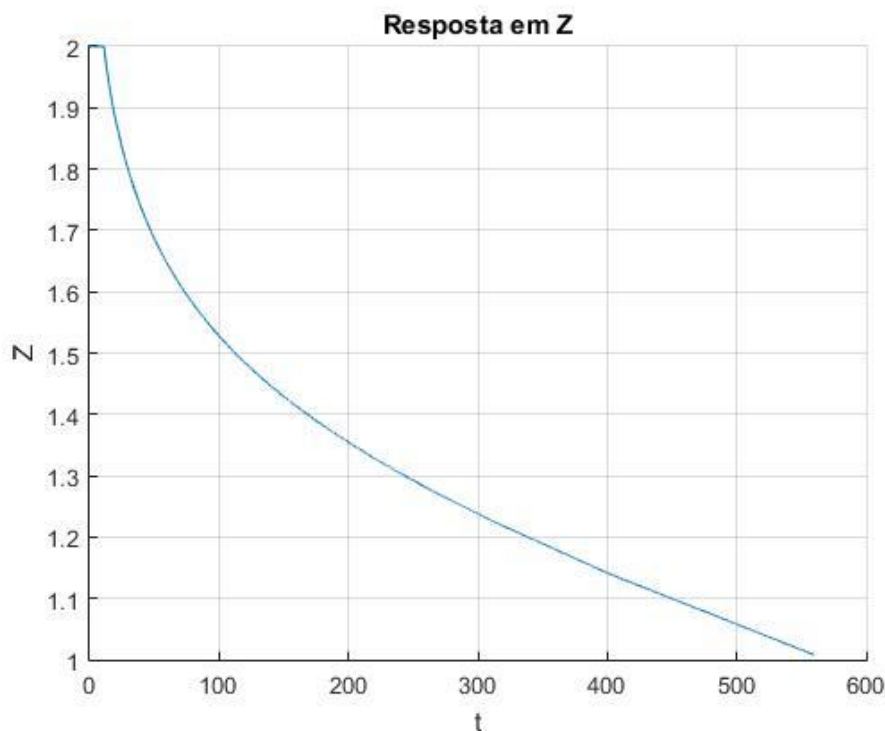


Figura 2 - Trajetória descrita pelo submarino

Por inspeção visual, imediatamente se constata a existência de discrepâncias entre ambos os trajetos. Apesar de corretamente dimensionada, uma topologia de controlo proporcional não permite anular na íntegra o erro de seguimento, efeito este amplificado pelas características do veículo e meio de simulação, isto é, tal como já supramencionado, a dinâmica inerente a veículos em ambiente aquático revela-se mais complexa, em virtude das diferenças assinaláveis no que respeita a condições de atrito quando comparada com ambientes terrestres, o que, inevitavelmente se reflete numa maior dificuldade da ação de controlo. Contudo, apesar destas limitações, os resultados revelam-se satisfatórios na medida em que se alcançam todos os estipulados na definição do problema, culminando na convergência para a posição final do trajeto.

Adicionalmente, em virtude da não consideração de deslocamentos ao longo do eixo cartesiano  $z$ , considerou-se pertinente também avaliar o desempenho e robustez do procedimento de controlo ao longo desta direção. Nesse sentido, estando a cota do veículo previamente estabilizada numa amplitude 2, promoveu-se a aplicação de um degrau na referência desta coordenada, de forma isolada das restantes, e observou-se a resposta do sistema. Uma vez que na ausência de qualquer ação de controlo o veículo tende a ascender em virtude da força de impulsão gerada pela água, aplicou-se uma referência de valor unitário de forma a forçar o robô a descer.



**Figura 3 - Resposta em Z à variação da referência**

Observando-se o gráfico, constata-se que, à medida que a sua localização em profundidade aumenta e como consequência da maior pressão, a resposta torna-se gradualmente mais lenta, pelo que a estabilização se assume como um processo demorado. Todavia, é notório que tende a convergir para a referência, pelo que ao fim de um elevado intervalo de tempo esta será de facto atingida, sendo que, nesse instante, a ação de controlo a aplicar deve ser de magnitude equivalente à impulsão a que o submarino está sujeito, no sentido de estagnar nesta posição.