

# CAMPOS POTENCIAIS ARTIFICIAIS APLICADO AO PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIAS DO BRAÇO ROBÓTICO JACO

UBIRATAN DE M. PINTO JR.\*, MARIA P. CARVALHO\*, ANDRÉ G. S. CONCEIÇÃO\*

*\*Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal da Bahia - UFBA  
Salvador, Bahia, Brasil*

Emails: ubiratan\_melo@outlook.com, mariapaulabdecarvalho@gmail.com,  
andre.gustavo@ufba.br

**Abstract**— The path planning with obstacles avoidance by the method of artificial potential fields is widely used in robotic applications. This is due to its robustness for planning in unknown workspaces and intuitive concept. This work aims to the application of this technique in the robotic arm JACO through the framework ROS (Robot Operating System). Tests are performed with obstacles and without obstacles, in the latter, showing cases in which there is and there is no occurrence of de local minima problem. The experimental results are presented and discussed, demonstrating the advantages and disadvantages of the method.

**Keywords**— Artificial Potential Field, JACO, Obstacles Avoidance, Robotic Manipulators, ROS.

**Resumo**— O planejamento de trajetórias com desvio de obstáculos pelo método dos campos potenciais artificiais é amplamente utilizado em aplicações de robótica. Isso por conta de sua robustez para planejamento em espaços de trabalho desconhecidos e conceito intuitivo. Este trabalho tem como objetivo a aplicação desta técnica no braço robótico JACO através do framework ROS (Robot Operating System). São feitos testes com trajetórias com obstáculos e sem obstáculos, no último, mostrando casos em que há e não há ocorrência do problema dos mínimos locais. Os resultados experimentais são apresentados e discutidos, demonstrando as vantagens e desvantagens do método.

**Palavras-chave**— Campos Potenciais Artificiais, JACO, Desvio de Obstáculos, Manipuladores Robóticos, ROS.

## 1 Introdução

O estudo da robótica envolve múltiplas áreas como eletrônica, elétrica, mecânica, matemática, economia, dentre outras. Atualmente a maior aplicação da robótica é no ambiente industrial através de braços manipuladores (Spong et al., 2006). O uso desses equipamentos de forma colaborativa com seres humanos representa uma vantagem muito grande em produtividade e segurança. Neste sentido, é essencial que o robô seja capaz de explorar seu ambiente de trabalho e planejar sua trajetória de forma a evitar colisões, com outros equipamentos, seres humanos etc, e execute sua tarefa de forma eficiente e segura.

O método de planejamento de trajetória por campos potenciais artificiais, ou APF (*Artificial Potential Fields*), originalmente proposto por (Khatib, 1986), propõe uma solução para este problema. A simplicidade de implementação e planejamento otimizado, bem como a capacidade de se trabalhar em ambientes desconhecidos e dinâmicos faz do método APF bastante utilizado e útil para o desvio de obstáculos como pode ser observado em diversos trabalhos como Cerqueira et al. (2016), Pereira et al. (2016), Sossai and Jesus (2016), Silva et al. (2016), Bounini et al. (2017) e Viturino (2017).

Este trabalho traz uma aplicação para o método o APF para planejamento de trajetória com desvio de obstáculo através do manipulador robótico JACO (Kinova, 2017). O objetivo de trabalho

é implementar e testar o algoritmo proposto no *framework* ROS (ROS.ORG, 2017). Os resultados experimentais, em ambientes sem e com obstáculos, apresentados neste documento mostram o desempenho da técnica. Nas seções seguintes são expostas a descrição do robô, o método de planejamento utilizado, os resultados obtidos nos testes com o manipulador real e, por fim, as conclusões do trabalho.

## 2 Descrição do robô



Figura 1: Manipulador JACO adaptado a uma cadeira de rodas

O JACO possui seis juntas no total. Três juntas rotativas para o braço e três juntas rotativas para o pulso não esférico. Sendo um manipulador

Tabela 1: Parâmetros DH do manipulador JACO

Elo	$\theta_i$ (limites)	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$q_1$	0,2755	0,0000	90°
2.1	$q_2$ (47° - 313°)	0,0000	0,0000	90°
2.2	0°	0,4100	0,0000	90°
3.1	$q_3$ (19° - 341°)	0,0098	0,0000	90°
3.2	0°	0,2073	0,0000	0°
4.1	$q_4$	0,0658	0,0000	-90°
4.2	0°	0,0342	0,0000	35°
5.1	$q_5$	0,0000	0,0000	-35°
5.2	0°	0,0737	0,0000	90°
5.3	0°	0,0098	0,0000	-110°

antropomórfico. Seu elemento final é uma garra de três dedos com um atuador para cada dedo.

Uma abordagem possível para o controle de um manipulador robótico é feita através do desenvolvimento de um modelo matemático para ele. Isso é feito através da representação de movimentos relativos entre sistemas de coordenadas convenientemente escolhidos de forma a representarem os movimentos de um manipulador em relação a um sistema de coordenadas de referência, ou sistema inercial. Para tanto, a noção de movimentos rígidos e transformações homogêneas é essencial para a compreensão e obtenção de modelos deste tipo.

Uma forma simples de representação matemática para manipuladores robóticos é a convenção Denavit-Hartenberg (DH) (Spong et al., 2006). Que representa transformações homogêneas com apenas quatro variáveis. A tabela 1 exhibe os parâmetros DH para o JACO.

### 3 Planejamento de trajetória

Para que manipuladores robóticos executem tarefas determinadas de modo a evitar colisões com obstáculos no ambiente de trabalho, existem pesquisas que visam o desenvolvimento de algoritmos de planejamento de trajetórias livres de colisões.

Um método que se destaca neste campo é o algoritmo de campos potenciais artificiais ou, do inglês, APF. Este método possibilita a utilização de robôs que planejem trajetórias e evitem colisões em espaços de trabalho desconhecidos. Através da utilização de visão computacional, os agentes têm capacidade de explorar o ambiente e definir seus objetivos e obstáculos e, dessa forma, planjejar sua trajetória pelo algoritmo APF.

#### 3.1 Campos potenciais artificiais

A filosofia deste método pode ser descrita da seguinte forma.

“O manipulador se move num campo de forças. A posição a ser alcançada é um polo atrativo para o efetuador e os obstáculos são superfícies re-

pulsivas para as partes do manipulador”(Khatib, 1986).

O campo de forças é composto pela sobreposição de um campo atrativo,  $U_{att}(q)$ , e um campo repulsivo,  $U_{rep}(q)$ .

$$U(q) = U_{att}(q) + U_{rep}(q)$$

A partir disto, o planejamento de trajetória pode ser resolvido de várias maneiras. Um algoritmo simples para isto é o planejamento a partir do gradiente mínimo que define a força que age sobre a ferramenta como sendo.

$$F(q) = -\nabla U(q) = -\nabla U_{att}(q) - \nabla U_{rep}(q)$$

E é definido da seguinte forma.

i.  $q_{init} = q[0]$ ,  $i = 0$

ii. **SE**  $|q[i] - q_{final}| > \delta$   
 $q[i+1] = q[i] + \alpha \frac{F(q[i])}{|F(q[i])|}$   
 $i = i + 1$

iii. **SENÃO** retorne  $\langle q[0], q[1], \dots, q[i] \rangle$

iv. **IR PARA 2**

O valor  $q[i]$  é a posição do efetuador na iteração  $i$ . O valor  $\alpha$  é o tamanho do passo que será dado a cada iteração. Como na prática é bastante improvável que  $q[i] = q_{final}$  é necessário que se admita uma tolerância  $\delta$  para a distância do efetuador ao ponto final para a qual seja considerado que o objetivo foi alcançado. Os valores de retorno  $\langle q[0], q[1], \dots, q[i] \rangle$  são a trajetória a ser seguida pelo manipulador.

O campo atrativo pode ser definido da seguinte forma.

$$U_{att}(q) = \frac{1}{2} \zeta \rho_f^2(q)$$

Sendo  $\rho_f^2(q)$  a distância euclidiana entre a posição atual do efetuador,  $q$ , e a posição objetivo,  $q_{final}$ .

O campo possui característica quadrática, pois para distâncias muito pequenas a força atrativa tende a zero com derivada contínua. Porém, para distâncias muito grandes, essa força pode assumir valores excessivamente altos. Por isso é interessante que a partir de determinada distância  $d$  o campo assuma um comportamento cônico e aumente linearmente com a distância. Assim, uma forma mais conveniente é.

$$U_{att}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} \zeta \rho_f^2(q) & , \quad se \rho_f(q) \leq d \\ d \zeta \rho_f(q) - \frac{1}{2} \zeta d^2 & , \quad se \rho_f(q) > d \end{cases}$$

A força atrativa a cada ponto terá o módulo, sentido e direção definidos pelo gradiente mínimo, como a seguir.

$$-\nabla U_{att}(q) = \begin{cases} -\zeta(q - q_{final}), & \text{se } \rho_f(q) \leq d \\ -\frac{d\zeta(q - q_{final})}{\rho_f(q)}, & \text{se } \rho(q) > d \end{cases}$$

Características interessantes para o campo repulsivo são: crescer até o infinito quando a medida que o efetuador se aproxima do obstáculo e diminuir com o aumento da distância,  $\rho(q)$ , entre eles. Além disso, para o caso de existirem diversos obstáculos, é interessante que cada campo repulsivo tenha uma distância de influência,  $\rho_0$ , a partir da qual o campo se torna nulo e não influencie na trajetória do efetuador. Dessa maneira o campo repulsivo pode ser definido da seguinte maneira.

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta\left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2, & \text{se } \rho(q) \leq \rho_0 \\ 0, & \text{se } \rho(q) > \rho_0 \end{cases}$$

A força repulsiva em cada ponto terá o módulo, sentido e direção definidos pelo gradiente mínimo do campo como segue.

$$-\nabla U_{rep}(q) = \begin{cases} 0, & \text{se } \rho(q) > \rho_0 \\ \eta\left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0}\right)\frac{1}{\rho^2(q)} \nabla \rho(q), & \text{resto} \end{cases}$$

A força resultante sobre a ferramenta a cada ponto é a resultante das duas forças.

$$F(q) = F_{att}(q) + F_{rep}(q) = -\nabla U_{att}(q) - \nabla U_{rep}(q)$$

## 4 Resultados

A abordagem utilizada neste trabalho foi baseada no exposto por (Spong et al., 2006).

A aplicação do método dos campos potenciais artificiais para planejamento de trajetória com desvio de obstáculos foi aplicada ao manipulador JACO através do ROS utilizando o pacote *Kinova-ROS*. A partir da função de cinemática inversa desse pacote *pose\_action\_client.py* foram feitas modificações para a definição dos pontos inicial,  $q_{init}$ , final,  $q_{final}$ , e obstáculo,  $q_{obstaculo}$ , através das coordenadas cartesianas e orientação; e, através deles, ser calculada a trajetória, iteração a iteração, de  $q_{init}$  até  $q_{final}$  de forma que o efetuador não colida com  $q_{obstaculo}$ .

Como foi descrito nas seções anteriores, fatores importantes para o algoritmo de cálculo dos campos potenciais artificiais são o tamanho do passo que será dado a cada iteração,  $\alpha$ , as constantes de intensidade dos campos atrativo e repulsivo,  $\zeta$  e  $\eta$ , respectivamente, a distância de influência do obstáculo,  $\rho_0$ , e a tolerância da distância do efetuador para  $q_{final}$ ,  $\delta$ . Por conta do

espaço de trabalho da ordem de grandeza de dezenas de centímetros, foram definidos experimentalmente  $\rho_0 = 0,5$  m e  $\delta = 0,05$  m.

De acordo com o algoritmo de planejamento de trajetória por mínimo gradiente apresentado na seção anterior, a relação entre  $\zeta$  e  $\eta$  determina qual força terá maior influência na resultante sobre o efetuador. O campo atrativo tem característica de reduzir quadraticamente à medida que se aproxima de  $q_{final}$ . O campo repulsivo tem característica de aumentar quadraticamente à medida que se aproxima de  $q_{obstaculo}$ . Como  $q_{obstaculo}$  está tipicamente localizado entre  $q_{init}$  e  $q_{final}$  a tendência é que se  $\zeta$  e  $\eta$  forem muito próximos, o caminho de gradiente mínimo não tenda a contornar  $q_{obstaculo}$ , mas ao invés disso, se afastar dele, uma vez que  $F_{rep}$  será muito maior que  $F_{att}$ . Isso faz com que a trajetória planejada não leve efetivamente a ferramenta ao ponto objetivo. Por isso é interessante que  $\zeta$  seja muito maior que  $\eta$  de forma que a força do campo atrativo nas primeiras iterações tenha uma intensidade suficiente para que o efetuador seja levado a  $q_{final}$ . A seguir são mostrados alguns resultados de experimentos feitos com a variação das constantes de ganho das forças e a inclusão ou não de obstáculos no espaço de trabalho e as suas influências no resultado do algoritmo de planejamento de trajetória.

Os valores de  $q_{init}$  e  $q_{final}$ , em metros, e a orientação do efetuador durante a trajetória, em quaternions, para os testes a seguir foram definidos como:

$$q_{init} = [0.212, -0.257, 0.510]$$

$$q_{final} = [0.24, -0.19, 0.96]$$

$$orientacao = [0.608, 0.349, 0.355, 0.618]$$

### 4.1 Planejamento de trajetória sem obstáculos

Para este experimento foram usados  $\zeta = 100$ ,  $\eta = 0,1$  e  $\alpha = 0,001$ . O algoritmo encontra uma solução em 22 iterações chegando ao ponto objetivo previamente definido. Cada patamar estável é o tempo de uma iteração.

A trajetória no espaço cartesiano é mostrada no gráfico abaixo.

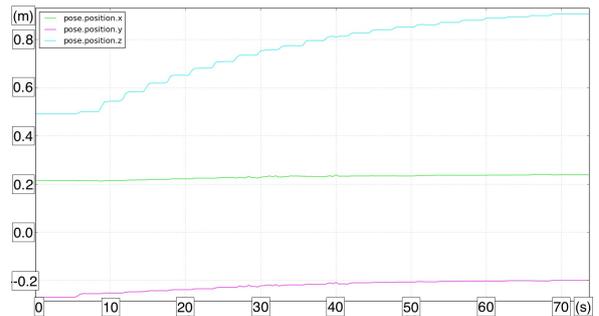


Figura 2: Coordenadas do efetuador

A orientação que permanece constante, como esperado, é mostrada na figura abaixo.

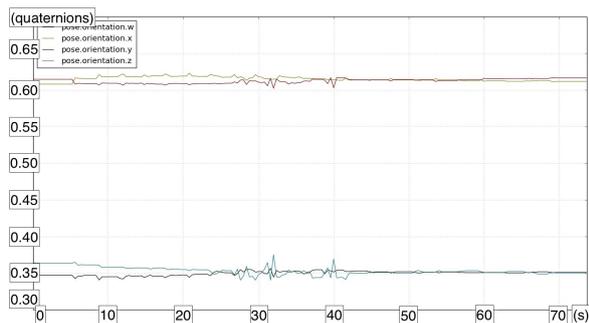


Figura 3: Orientação do efetuador

As variações dos módulos das forças atrativa e repulsiva são mostradas no gráfico que segue.

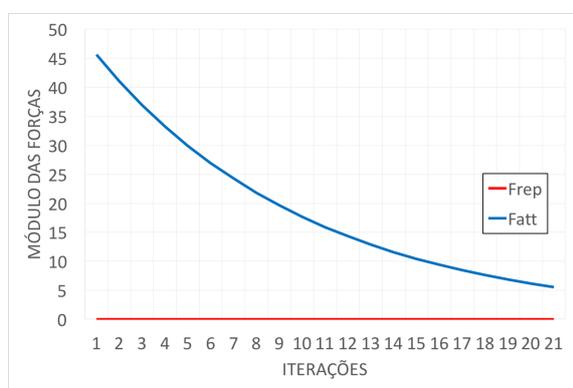


Figura 4: Módulos das forças atrativa e repulsiva (caso sem obstáculos)

Como não há obstáculos, a força repulsiva é constante e nula durante todo o trajeto. A força atrativa diminui quadraticamente com a aproximação de  $q_{final}$ , que é o comportamento esperado.

#### 4.2 Planejamento de trajetória com obstáculos

Nos exemplos que seguem, serão expostos dois casos de planejamento com obstáculos. No primeiro, acontece um problema comum em algoritmos APF, a ocorrência de um mínimo local. No segundo, pode-se observar o efetivo desvio do obstáculo e chegada no efetuador no ponto objetivo.

##### Caso com mínimo local

A trajetória anterior, uma vez que não existiam obstáculos, é uma linha reta. Dessa forma, foi inserido um primeiro obstáculo  $q_{o1}$  num ponto pertencente à trajetória.

$$q_{o1} = [0.230, -0.213, 0.803]$$

Neste caso, o método de planejamento não encontrará uma solução que leve o efetuador para  $q_{final}$ . Ao invés disso, já na iteração

de número 7 o efetuador chega à posição  $q = [0.222, -0.233, 0.669]$  e não consegue sair dela. As figuras 5 e 6 mostram essa trajetória no espaço cartesiano.

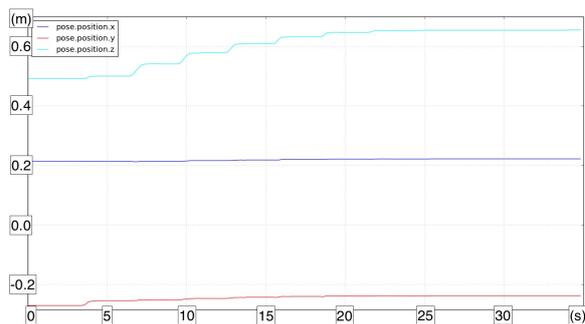


Figura 5: Coordenadas do efetuador

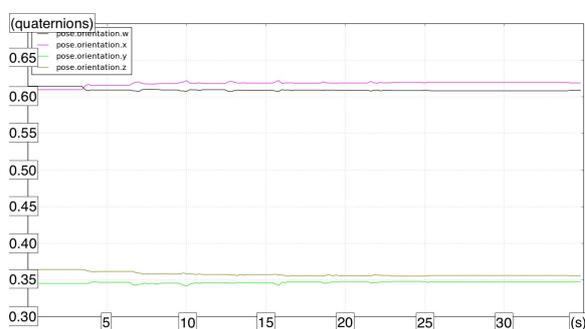


Figura 6: Orientação do efetuador

É possível ver que o efetuador não chega em  $q_{final}$  não importa quanto tempo se passe. Este é um problema de mínimo local, comum no método de planejamento de trajetória por campos potenciais artificiais. Ele se dá quando o gradiente do campo resultante formado por obstáculos e ponto objetivo apresenta, além do valor mínimo global em  $q_{final}$ , valores mínimos locais em ponto intermediários da trajetória. Nesses pontos, a resultante das forças que atuam sobre o efetuador é nula e mesmo que a condição de parada do algoritmo não seja atendida, ele não sairá deste ponto. A figura 7 mostra a variação do módulo das forças no decorrer da trajetória.

O problema dos mínimos locais pode ser resolvido de diversas maneiras, como, por exemplo, a aplicação de campo rotacionais nos obstáculos ao invés de lineares ou, uma vez preso num mínimo local, o manipulador executar uma série de movimentos aleatórios, controlados para tentar se afastar o suficiente deste ponto e conseguir chegar ao ponto objetivo, ou ainda a determinação de pontos obstáculos auxiliares para que este mínimo deixe de existir. Contudo, este trabalho não visa propor uma solução para o problema dos mínimos locais e este experimento foi feito com o intuito de mostrar oportunidades de melhorias para a aplicação.

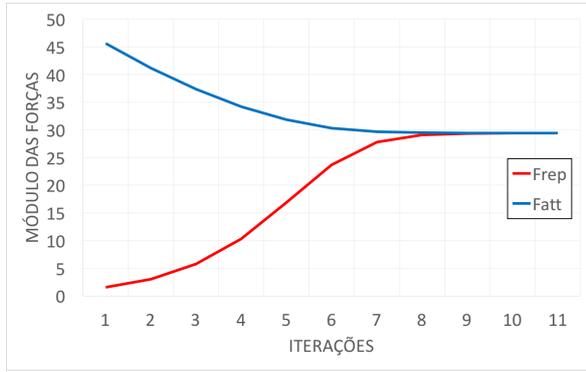


Figura 7: Módulos das forças atrativa e repulsiva (caso mínimo local)

### Caso sem mínimo local

Para evitar o mínimo local é possível deslocar o obstáculo de forma que não fique sobre uma linha reta entre  $q_{init}$  e  $q_{final}$ . Assim,  $q_{o2} = [0.26, -0.25, 0.77]$  e o algoritmo não é alterado.

Uma trajetória é encontrada pelo algoritmo em 38 pontos. O manipulador desvia do obstáculo e chega ao ponto final como pode ser visto na figura 8, no espaço cartesiano. Comparando essa trajetória com a trajetória sem obstáculos é perceptível que não são iguais apesar de chegarem ao mesmo ponto final.

Pode ser percebido que a modificação do percurso ocorre logo nas primeiras iterações, pois é na sétima iteração que a força repulsiva assume seu valor máximo, logo, é neste instante que o efetuador está mais próximo de  $q_{o2}$  e sofre maior influência do campo repulsivo alterando mais acentuadamente seu trajeto. Após isso, a campo repulsivo influencia cada vez menos o manipulador.

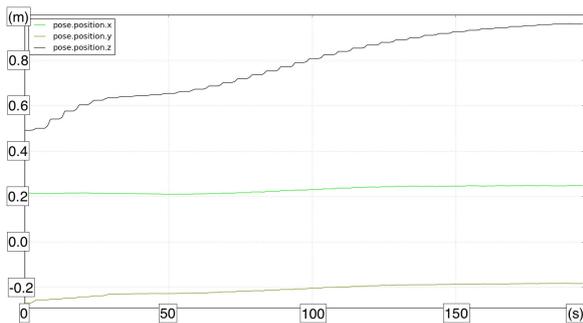


Figura 8: Coordenadas do efetuador

A figura 9 mostra que a orientação permaneceu constante durante toda a trajetória.

Avaliando a figura 10 pode-se ver o comportamento do módulo das forças atrativa e repulsiva a cada iteração.

O pico da força repulsiva ocorre na sétima iteração. O que altera o valor da força atrativa, pois o percurso do efetuador deixa de ser uma linha reta. Ao se alcançar  $q_{final}$  pode-se perceber

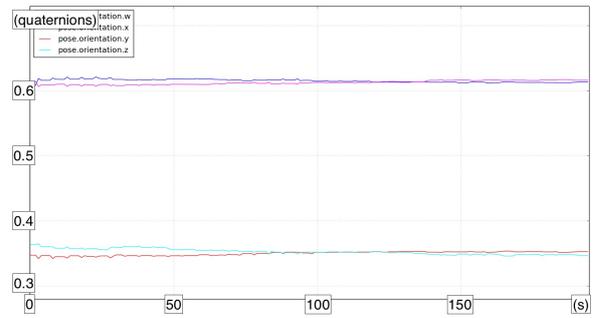


Figura 9: Orientação do efetuador

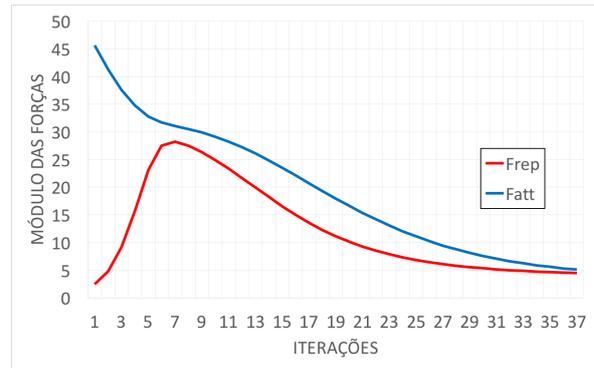


Figura 10: Módulos das forças atrativa e repulsiva (caso com desvio de obstáculo)

que esse comportamento das forças e das variáveis das juntas do manipulador mostra a eficácia do método de planejamento de trajetórias por campos potenciais artificiais para aplicações em tempo real e com desvio de obstáculos.

### 4.3 Comparativa

A seguir são mostrados gráficos comparativos das trajetórias sem obstáculo e com desvio de obstáculos, no espaço cartesiano. Dessa forma é possível observar as diferenças de tempo e caminho para o caso sem obstáculos e com obstáculos. O tempo do eixo das abscissas é de aproximadamente 200 segundos.

Pelas análise da comparação, pode-se ver que a trajetória sem obstáculos dura menos tempo que a trajetória com desvio. Isso porque a primeira descreve o caminho mais curto entre  $q_{init}$  e  $q_{final}$ , pois o caminho entre os dois pontos é livre. Na última, o obstáculo faz com que o manipulador percorra um caminho mais longo para desviar de  $q_{o2}$  e então o algoritmo passa por mais iterações, levando mais tempo para chegar ao ponto objetivo.

## 5 Conclusões

Com os resultados expostos anteriormente é possível comprovar o funcionamento do planejamento de trajetórias, por campos potenciais artificiais,

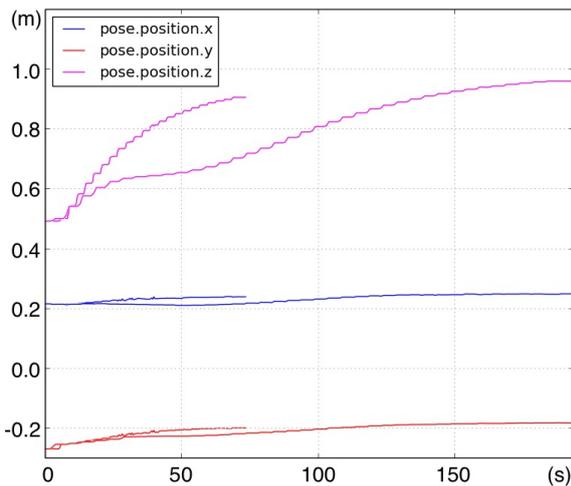


Figura 11: Coordenadas do efetuador para os casos sem obstáculos e com desvio de obstáculo

em aplicações com espaço de trabalho conhecido e com desvio de obstáculos no manipulador robótico JACO aplicado através do *framework* ROS. Este trabalho pode servir como ponto de partida para o desenvolvimento de aplicações mais complexas em desvio de obstáculos através de utilização de visão computacional e percepção de ambientes dinâmicos como em (Dorian et al., 2017).

Alguns pontos de melhoria podem ser observados, como a susceptibilidade a falhas em encontrar uma solução por conta de mínimos locais, visto no caso com mínimo local. Além disso, os campos potenciais aplicados neste trabalho apenas induzem forças na ferramenta do manipulador. Isso faz com que a ferramenta não colida com obstáculos no caminho até o objetivo, mas nada se pode garantir dos outros elos e juntas do manipulador. Uma alternativa a esse problema é fazer com que os campos também exerçam forças sobre outros pontos do manipulador, normalmente as juntas. É usual se adicionar tantos pontos quanto grau de liberdade tenha o manipulador. No caso do JACO, haveriam seis forças atrativas e seis forças repulsivas. Neste caso, cada força possui sua constante, e é recomendado que a maior delas seja a do efetuador, pois isto fará com que seja ele quem chegue primeiro ao ponto objetivo (Spong et al., 2006). Isso garante que todo o manipulador desvie dos obstáculos.

Com isso, a utilização deste algoritmo em aplicações mais complexas pode ser desenvolvida pela sua melhoria através das técnicas citadas acima e amplamente utilizadas nesta área. Dessa forma a solução de problemas de planejamento de trajetória pode se tornar muito mais robusta para ambientes dinâmicos e espaços de trabalho desconhecidos.

## 6 Agradecimentos

Este trabalho recebeu financiamento do programa de investigação e inovação Horizonte 2020 da União Europeia, contrato 777096 e da SEPIN/MCTI 4<sup>a</sup> chamada coordenada BR-UE no CIT.

## Referências

- Bounini, F., Gingras, D., Pollart, H. and Gruyer, D. (2017). Modified artificial potential field method for online path planning applications, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium IV*.
- Cerqueira, T. A., Santos, T. L. M. and Conceição, A. G. S. (2016). Uma nova abordagem baseada em campos potenciais para desvio de obstáculos com robôs móveis, *XXI Congresso Brasileiro de Automática*.
- Dorian, T., Dansereau, D. G., Peynot, T. and Corke, P. (2017). Image-based visual servoing with light field cameras, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 2, No. 2.
- Khatib, O. (1986). Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots, *The International Journal of Robotics Research*.
- Kinova (2017). <http://www.kinovarobotics.com>, *Kinova Website*.
- Pereira, G. A. S., Choudhury, S. and Scherer, S. (2016). Nonholonomic motion planning in partially unknown environments using vector fields and optimal planners, *XXI Congresso Brasileiro de Automática*.
- ROS.ORG (2017). <http://www.ros.org>, *ROS Website*.
- Silva, F. L. S., Barbosa, J. P. d. A. and Bastos, G. S. (2016). 2d behavior based soccer team - a neural network approach, *XXI Congresso Brasileiro de Automática*.
- Sossai, L. D. and Jesus, T. A. (2016). Implementação de estratégias de controle e planejamento de trajetória em robôs móveis terrestres baseadas em campos vetoriais artificiais, *XXI Congresso Brasileiro de Automática*.
- Spong, M. W., Hutchinson, S. and Vidyasagar, M. (2006). *Robot modeling and control*, Vol. 3, Wiley New York.
- Viturino, C. C. B. (2017). Sistema anticisão baseado em campos potenciais artificiais adaptativos aplicado ao robô kinova jaco v1, *Qualificação de mestrado, UFBA*.