

UMA NOVA ABORDAGEM BASEADA EM CAMPOS POTENCIAIS PARA DESVIO DE OBSTÁCULOS COM ROBÔS MÓVEIS

TADEU ABREU CERQUEIRA*, TITO L. M. SANTOS*, ANDRÉ G. S. CONCEIÇÃO*

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

Emails: tcerqueiraufba@gmail.com, tlsantos@ufba.br, andre.gustavo@ufba.br

Abstract— This article proposes a new approach for the method of path planning with obstacles avoidance based on potential fields, also known as APF method. This new approach consists on a way to overcome the problem of local minima, present in the APF method, assuring a more effective path planning. It is used a mobile robot with differential drive as a base for testing, which is applied a kinematic control, allowing the robot drives a previously planned path to reach the goal point and avoid automatically the obstacles arranged on the environment.

Keywords— Path Planning, Potential Fields, Obstacles Avoidance, Mobile Robots, Kinematic Control.

Resumo— Este artigo apresenta uma abordagem para o método de planejamento de trajetórias com desvio de obstáculos baseado em campos potenciais, conhecido também como Método APF (*Artificial Potencial Fields*). Essa nova abordagem consiste em uma forma de superar o problema dos mínimos locais, inerente ao Método APF, de modo a garantir maior eficácia no planejamento da trajetória. Usa-se como base de testes um robô móvel com tração diferencial, em que é aplicado um controle cinemático para permitir que o robô percorra um caminho previamente planejado, visando atingir o ponto de referência e desviar automaticamente dos obstáculos dispostos no ambiente.

Palavras-chave— Planejamento de Trajetórias, Campos Potenciais, Desvio de Obstáculos, Robôs Móveis, Controle Cinemático.

1 Introdução

O ramo da robótica móvel vem realizando uma série de melhorias em sistemas e métodos, fazendo com que robôs móveis executem tarefas cada vez mais complexas e que exigem maior habilidade de se adaptar a situações inesperadas do ambiente (Siegwart and Nourbakhsh, 2011). Pode-se listar basicamente três etapas necessárias para que o robô execute uma tarefa com eficácia:

- Etapa de mapeamento, através da coleta de dados do ambiente pelos sensores do robô;
- Etapa do planejamento de trajetória, considerando o ponto final desejado e os obstáculos presentes no meio; e
- Etapa do controle, com acionamento dos atuadores de forma que o robô percorra com precisão o caminho planejado.

Trabalhos foram desenvolvidos para o mapeamento do ambiente, através do uso de técnicas para reconstrução tridimensional do meio, como visto em (Pinto et al., 2014). No controle, foi observado em (Spong et al., 2008; Borges et al., 2003; Vieira, 2006) o uso de técnicas consagradas, como o controle não linear invariante no tempo e a linearização por realimentação dinâmica. Com relação à etapa de planejamento, a literatura indica o uso de um método para evitar colisões com obstáculos, baseado em campos potenciais, conhecido também como Método APF (*Artificial Potencial Fields*),

visto em (Mezencio, 2002; Santos et al., 2006; Ribeiro, 2015). De acordo com (Koren and Borinstein, 1991), o APF é um método de simples implementação e que planeja trajetórias mais otimizadas que as de outros métodos, como o Mapa de Estradas (*Road Map*) e a Decomposição por Células (*Cell Decomposition*), observado em (Latombe, 2012; Choset et al., 2005).

Neste trabalho, propõe-se uma nova abordagem relativa à etapa do planejamento da trajetória, através de alterações no algoritmo do método de campos potenciais. Essa nova abordagem visa, principalmente, superar a principal limitação do método, conhecida como problema dos mínimos locais, melhorando a etapa de planejamento.

Para a realização de testes, usa-se o modelo de um robô móvel com tração diferencial. Nele é aplicado o controle cinemático, através de um controlador não linear invariante no tempo, de modo a percorrer as trajetórias planejadas previamente pelos métodos.

Este artigo está estruturado da seguinte maneira: Na Seção 2 encontra-se o modelo do robô móvel usado como base de testes. Na Seção 3 discute-se como é realizado o controle cinemático do robô. Na Seção 4 explica-se o planejamento da trajetória usando o Método APF e na Seção 5 é apresentada a nova abordagem proposta. Na Seção 6 é realizado um estudo de caso em que são observados os resultados dos dois métodos de planejamento, bem como os resultados para o controle cinemático. Por fim, na Seção 7 são apresentadas as conclusões do trabalho.

2 Modelo do Robô

O robô utilizado como base de testes, mostrado na Figura 1, é um robô móvel com acionamento diferencial, construído a partir do *Kit* didático *Lego* EV3, cujo raio r das rodas é igual a $2.8cm$ e a distância L entre as rodas é $12cm$.



Figura 1: Robô diferencial com o *Kit* *Lego* EV3.

O período de amostragem t_s adotado é de $100ms$. Nos ensaios em laboratório verificou-se que a motorização do robô apresentou uma dinâmica de primeira ordem que foi usada posteriormente nas simulações deste trabalho. Nessa dinâmica, obteve-se velocidade linear máxima igual a $0.5m/s$ e aceleração máxima de $3.0m/s^2$.

A seguir apresenta-se o modelo cinemático para o movimento do robô no ambiente. A partir das velocidades angulares medidas nas rodas direita e esquerda, pode-se determinar a velocidade linear v e a velocidade angular w do robô, através da seguinte equação (Corke, 2011):

$$\begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r/2 & r/2 \\ r/L & -r/L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{rD} \\ \omega_{rE} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sendo ω_{rD} e ω_{rE} as velocidades angulares nas rodas direita e esquerda, respectivamente.

Supõe-se que em um dado instante k de tempo discreto o robô encontra-se na posição $(x(k), y(k))$, com ângulo de rotação $\theta(k)$, em relação ao sistema de coordenadas global, como evidenciado na Figura 2.

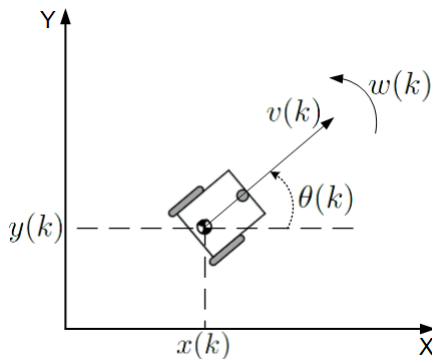


Figura 2: O robô no sistema de coordenadas global.

Após serem aplicados os sinais de controle nos motores das rodas, o robô passa para o próximo es-

tado, de acordo com a seguinte equação (Siegwart and Nourbakhsh, 2011; Corke, 2011):

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ y(k+1) \\ \theta(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \\ \theta(k) \end{bmatrix} + R \cdot \begin{bmatrix} v(k) \\ w(k) \end{bmatrix} \cdot t_s \quad (2)$$

Sendo R a matriz de rotação, dada por:

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta(k)) & 0 \\ \sin(\theta(k)) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

A partir desse modelo para o movimento do robô, pode-se implementar o controle cinemático para percorrer uma dada trajetória, como será discutido a seguir.

3 Controle Cinemático

Na literatura são encontradas algumas técnicas já consagradas que realizam o controle cinemático para percorrer uma dada trajetória, verificado em (Spong et al., 2008; Vieira, 2006; Borges et al., 2003).

O objetivo é fazer com que o robô passe nas posições (x_d, y_d) relativas a uma trajetória planejada. No entanto, as variáveis de controle são as velocidades linear v_s e angular w_s aplicadas na dinâmica do robô. Portanto, controla-se a posição através das velocidades, de modo que para o robô percorrer todo o caminho, as velocidades linear v_d e angular w_d de referência ao longo da trajetória devem ser (Spong et al., 2008):

$$\begin{aligned} v_d &= \sqrt{(\Delta x_d)^2 + (\Delta y_d)^2} \\ w_d &= \frac{\Delta^2 y_d \cdot \Delta x_d - \Delta^2 x_d \cdot \Delta y_d}{(\Delta x_d)^2 + (\Delta y_d)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

Sendo os operadores Δ e Δ^2 definidos por:

$$\begin{aligned} \Delta \xi(k) &= \frac{\xi(k) - \xi(k-1)}{t_s} \\ \Delta^2 \xi(k) &= \frac{\Delta \xi(k) - \Delta \xi(k-1)}{t_s} \\ \xi &= \{x_d, y_d\} \end{aligned} \quad (5)$$

Neste trabalho, será utilizado o controle não linear invariante no tempo, também conhecido como NTI (*nonlinear time-invariant control*). A lei de controle definida para o NTI é dada pelas seguintes equações (Vieira, 2006):

$$\begin{cases} v_s = v_d \cdot \cos(\theta_d - \theta) + k_1 \cdot M_1 \\ w_s = w_d - k_2 \cdot v_d \cdot S_\theta \cdot M_2 + k_3 \cdot (\theta_d - \theta) \end{cases} \quad (6)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} \theta_d &= \tan^{-1}(\Delta y_d / \Delta x_d) \\ \theta &= \tan^{-1}(\Delta y / \Delta x) \\ M_1 &= (x_d - x) \cdot \cos(\theta) + (y_d - y) \cdot \sin(\theta) \\ M_2 &= (y_d - y) \cdot \cos(\theta) - (x_d - x) \cdot \sin(\theta) \\ S_\theta &= \frac{\sin(\theta_d - \theta)}{\theta_d - \theta} \end{aligned} \quad (7)$$

A partir da simulação para o movimento do robô ao longo da trajetória, são escolhidos os parâmetros de controle k_1 , k_2 e k_3 sendo:

$$\begin{aligned} k_1 &= k_3 = 2 \cdot \sqrt{\omega_d^2 + k_2 \cdot v_d^2} \\ k_2 &= 40 \end{aligned} \quad (8)$$

Portanto, os sinais de controle da Equação (6) são aplicados para que o robô percorra a trajetória definida pelos pontos (x_d, y_d) . Esta trajetória deverá ser planejada de modo que o robô desvie dos obstáculos dispostos no ambiente, como será discutido a seguir.

4 Planejamento com o Método APF

Na etapa de planejamento são determinados os pontos (x_d, y_d) para que o robô atinja uma dada referência e desvie dos obstáculos. Para isso, utiliza-se o Método APF, que entende o robô, analogamente, como uma partícula de carga positiva que se desloca para o ponto de referência, representado como uma partícula fixa com carga negativa, mas se afasta dos obstáculos que têm carga positiva (Siegwart and Nourbakhsh, 2011), seguindo um princípio básico da eletricidade: cargas iguais se repelem e as opostas se atraem. A Figura 3 ilustra o planejamento pelo Método APF seguindo essa analogia física.

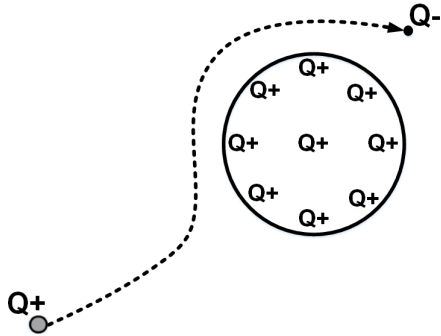


Figura 3: Trajetória obtida através do método de campos potenciais.

Fonte: Adaptado de (Ribeiro, 2015).

De acordo com (Siegwart and Nourbakhsh, 2011; Latombe, 2012), o APF é um método de simples implementação, cuja modelagem matemática consiste em um campo potencial, descrito como sendo uma função real e diferenciável $U(x_d, y_d)$, em que:

$$\left(\frac{\Delta x_d}{t_s}, \frac{\Delta y_d}{t_s} \right) = -\vec{\nabla} U(x_d, y_d) \quad (9)$$

O potencial $U(x_d, y_d)$ é a soma do potencial $U_{att}(x_d, y_d)$ de atração para o ponto de referência com o potencial $U_{rep}(x_d, y_d)$ de repulsão, referente aos obstáculos do meio. Logo:

$$U(x_d, y_d) = U_{att}(x_d, y_d) + U_{rep}(x_d, y_d) \quad (10)$$

Não existe uma única escolha para as funções potenciais, no entanto é necessário que o potencial $U_{att}(x_d, y_d)$ seja uma função que garanta mínimo global no ponto de referência (x_{ref}, y_{ref}) e que $U_{rep}(x_d, y_d)$ seja monotonicamente crescente em relação ao inverso da distância entre robô e obstáculo. Além disso, o potencial repulsivo não tem alcance infinito, ou seja, para distâncias maiores que $3 \cdot L$ o valor $U_{rep}(x_d, y_d)$ é considerado nulo. Com essas condições pode-se escolher as seguintes funções potenciais de atração e repulsão (Siegwart and Nourbakhsh, 2011; Ribeiro, 2015):

$$U_{att}(x_d, y_d) = \frac{\beta}{2} \cdot ((x_{ref} - x_d)^2 + (y_{ref} - y_d)^2) \quad (11)$$

$$U_{rep_i}(x_d, y_d) = \begin{cases} \frac{\eta}{2} \left(\frac{1}{d_{b_i}} - \frac{1}{3 \cdot L} \right)^2, & d_{b_i} < 3L \\ 0, & d_{b_i} \geq 3L \end{cases} \quad (12)$$

$$U_{rep}(x_d, y_d) = \sum_{i=1}^j U_{rep_i}(x_d, y_d) \quad (13)$$

Sendo β e η as escalas de gradiente atrativo e repulsivo, respectivamente, j o número total de objetos detectados no meio e (x_{b_i}, y_{b_i}) o ponto do obstáculo i com a menor distância d_{b_i} para o robô, portanto:

$$d_{b_i} = \sqrt{(x_d - x_{b_i})^2 + (y_d - y_{b_i})^2} \quad (14)$$

Desse modo, pode-se encontrar os pontos (x_d, y_d) a cada nova iteração e assim planejar a trajetória que levará o robô ao mínimo local da função potencial, visando atingir a referência e desviar dos obstáculos (Siegwart and Nourbakhsh, 2011).

Adicionalmente, utiliza-se um método de interpolação cúbica, denominado *spline*, para adaptar melhor o caminho, gerando uma trajetória mais suave, como visto em (Pedrosa et al., 2003).

5 Nova Abordagem para o Método APF

Como visto na Seção 4, a trajetória planejada pelo método baseado em campos potenciais sempre levará o robô para um mínimo local da função potencial, mas não necessariamente ao mínimo global. Desta forma, tem-se uma limitação inerente ao Método APF: o problema dos mínimos locais, que consiste basicamente no fato de que, dependendo das configurações iniciais do robô e da disposição de obstáculos no meio, a trajetória planejada pode não conseguir chegar à referência, mesmo que exista algum caminho factível (Latombe, 2012; Choset et al., 2005). A nova abordagem proposta visa, então, superar esse problema, garantindo que o planejamento leve o robô até a referência, se houver trajetória factível.

A partir dos dados obtidos na detecção dos obstáculos, são calculados todos os n pontos (x_c, y_c) pertencentes a uma circunferência C_k de raio d_r , cujo centro está na posição atual da trajetória. O próximo ponto da trajetória planejada será um desses pontos calculados pertencentes à C_k , portanto o planejamento sempre projeta o próximo passo a uma distância equivalente ao raio d_r .

Usa-se como base os campos potenciais, sendo calculadas as contribuições associadas à atração e repulsão em cada ponto p pertencente a C_k :

$$C_{at_p} = \frac{q_{ref}}{(x_{c_p} - x_{ref})^2 + (y_{c_p} - y_{ref})^2} \quad (15)$$

$$C_{rep_p} = \sum_{i=1}^j \left(\frac{q_{b_i}}{(x_{c_p} - x_{b_i})^2 + (y_{b_i} - y_{b_i})^2} \right) \quad (16)$$

Essas contribuições C_{at_p} e C_{rep_p} são análogas às forças elétricas que a carga do robô estaria submetida se estivesse no ponto $p \in C_k$. Vê-se, então, que q_{ref} seria a carga do ponto de referência e q_{b_i} a carga associada ao obstáculo i .

Assim, o próximo ponto da trajetória deverá ser aquele em que o custo ψ_p que relaciona a contribuição de repulsão com a de atração seja o menor entre todos os pontos de C_k , sendo:

$$\psi_p = C_{rep_p} - C_{at_p} \quad (17)$$

Atribui-se valores de q_b e q_{ref} iguais a 1, para ser realizada uma primeira tentativa de encontrar a trajetória que consiga convergir para o ponto de referência. A cada novo ponto da trajetória calculado dentro da mesma tentativa, ocorre uma variação no valor q_{b_i} da carga de cada objeto i , que aumenta na medida em que o robô se aproxima do ponto de referência, para que as contribuições de repulsão tenham valores na mesma grandeza que as de atração, visto que a atração aumenta muito com a aproximação do robô para o ponto de referência.

Após obter uma primeira trajetória, e caso esta não leve o robô ao ponto de referência, significa que a atração não foi suficiente. Portanto, aumenta-se o valor de q_{ref} para ser realizada uma nova tentativa de obtenção da trajetória que consiga chegar até o ponto de referência. Assim, nessa nova abordagem para o Método APF as cargas q_{ref} e q_b se ajustam no decorrer da execução do algoritmo, de modo a encontrar uma trajetória factível que atinja o ponto de referência. A Figura 4 ilustra o fluxograma simplificado para o algoritmo proposto relativo à nova abordagem de planejamento baseada em campos potenciais.

O algoritmo proposto garante que a trajetória planejada sempre atinja o ponto de referência. No entanto, quando não há trajetórias factíveis, a atração fica muito forte, a ponto do método planejar trajetórias que atravessem os obstáculos para

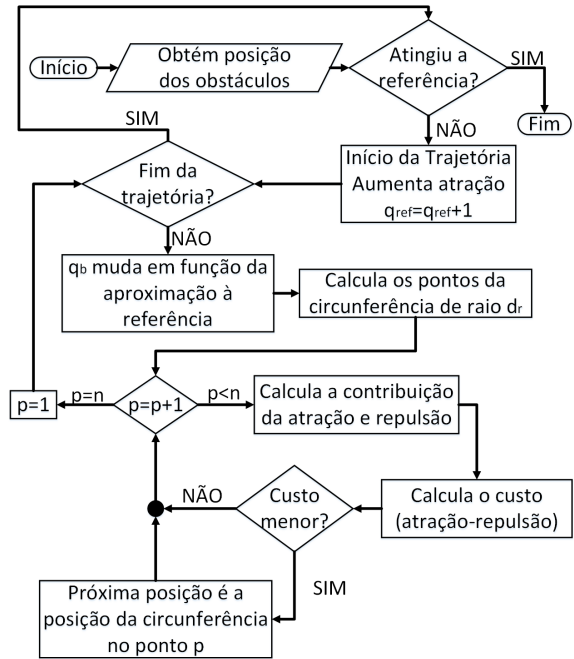


Figura 4: Fluxograma simplificado da nova abordagem baseada em campos potenciais.

chegar no ponto de referência. Neste caso, usa-se um algoritmo auxiliar para verificar se a trajetória planejada atravessa ou colide com algum obstáculo, e caso isso ocorra o algoritmo não gera nenhuma trajetória como saída.

Da mesma forma como foi feito no Método APF, utilizou-se a interpolação cúbica do tipo *spline*, gerando trajetórias suavizadas para o robô percorrer.

Destacam-se também outros métodos heurísticos de planejamento, que não apresentam o problema dos mínimos locais, como observado em (Latombe, 2012; Choset et al., 2005; Siegwart and Nourbakhsh, 2011). No entanto o Método APF é o que possui a característica de planejar trajetórias que mais se aproximam do caminho ótimo que leva o robô até a referência com o desvio de obstáculos (Koren and Borenstein, 1991). Levando-se em conta essa vantagem do APF, a abordagem proposta, além de contornar o problema dos mínimos locais, visa planejar trajetórias similares ao APF quando não ocorre o problema dos mínimos locais, como será observado no estudo de caso a seguir.

6 Estudo de Caso

Nesta Seção é realizado um estudo de caso em que são apresentados os resultados para o sistema de planejamento usando o Método APF e a nova abordagem proposta, bem como os resultados relativos ao controle cinemático para percorrer os caminhos planejados.

Para os resultados relativos à etapa de pla-

nejamento, compararam-se as trajetórias planejadas pelos dois métodos. O ambiente usado para realizar os testes possui dimensões $2,5m \times 2,5m$, dispondo de cinco obstáculos. Considera-se o ponto de referência em $(1.5, 1.5)$, sendo planejadas as trajetórias para três configurações iniciais distintas, como evidenciado na Figura 5, sendo que as denominações "APF 1" e "APF 2" correspondem, respectivamente, aos planejamentos com o Método APF e com a nova abordagem proposta.

Com relação ao controle para percorrer a trajetória planejada, aplica-se o controlador NTI nos modelos dinâmico e cinemático do robô, para obter os resultados de simulação e em seguida realizam-se testes reais em laboratório. Na Figura 6 pode-se observar a trajetória percorrida pelo robô na simulação e no teste em laboratório. Na Figura 7 é observado o comportamento das velocidades v e w ao longo do percurso da Figura 6, tanto em simulação quanto no experimento.

A partir da análise dos resultados, verifica-se que a nova abordagem proposta para o Método APF obteve êxito ao superar o problema dos mínimos locais, vide Figura 5-c. Já para situações em que não ocorre o problema de mínimos locais, os resultados de planejamento com ambos os métodos mostraram-se similares, vide Figuras 5-a e 5-b. Por esse motivo, como discutido na Seção 5, o método proposto consegue planejar trajetórias próximas à ótima, diferente de outros métodos heurísticos já existentes. No entanto, observou-se que foi exigido maior esforço computacional na execução do novo algoritmo, consistindo em uma desvantagem associada ao método proposto.

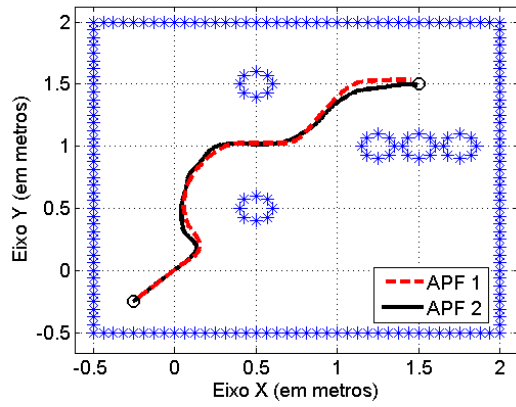
Com relação ao resultado para o controle cinemático, visto na Figura 6, nota-se que tanto na simulação quanto no experimento o robô conseguiu percorrer a trajetória planejada. Analisando as velocidades linear e angular do robô, vide Figura 7, verifica-se que para percorrer a trajetória planejada não foi exigido muito esforço por parte dos atuadores. Dessa forma, o uso do controle NTI mostrou-se eficaz nesse tipo de sistema.

7 Conclusões

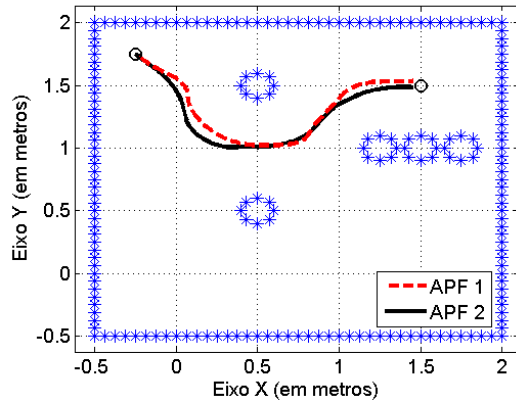
Neste artigo foi proposta uma nova abordagem baseada em campos potenciais artificiais para o desvio de obstáculos com robôs móveis. A técnica apresentada permite superar o problema dos mínimos locais a partir de um procedimento que realiza a variação incremental dos campos atrativo e repulsivo. A nova abordagem é simples e permite se aproximar do comportamento original dos campos potenciais, pois são feitas variações incrementais nos parâmetros de configuração inicial do Método APF. Um estudo de caso com resultados de simulação e validação experimental foi apresentado na Seção 6 com vistas a ilustrar o bom desempenho da abordagem proposta.

Referências

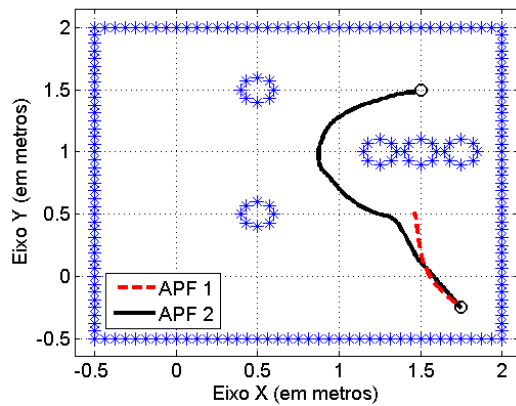
- Borges, G. A., Deep, G. S. and Lima, A. M. N. (2003). Controladores cinemáticos de trajetória para robôs móveis com tração diferencial, *VI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*.
- Choset, H., Lynch, K., Hutchinson, S., Kantor, G., Burgard, W., Kavraki, L. and Thrun, S. (2005). *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementation*, MIT press.
- Corke, P. (2011). *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB*, Springer.
- Koren, Y. and Borenstein, J. (1991). Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation, *International Conference on Robotics and Automation*.
- Latombe, J.-C. (2012). *Robot Motion Planning*, Springer Science & Business Media.
- Mezencio, R. (2002). Implementação do método de campos potenciais para navegação de robôs móveis baseada em computação reconfigurável. Tese de Doutorado, USP.
- Pedrosa, D. P. F., Alsina, P. J. and Medeiros, A. A. D. (2003). Um método de geração de trajetória para robôs não-holonômicos com acionamento diferencial, *VI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*.
- Pinto, R. F., Conceição, A. G. S., Farias, P. C. M. A. and Santos, E. T. F. (2014). A cost effective open-source three-dimensional reconstruction system and trajectory analysis for mobile robots, *5th ISSNIP-IEEE Biosignals and Biorobotics Conference*.
- Ribeiro, R. C. (2015). Estratégia de desvio de obstáculos e planejamento de trajetória para uma cadeira de rodas autônoma. Projeto de Graduação, UFRJ.
- Santos, R. R. D., de Fátima Pereira Saramango, S. and Jr., V. S. (2006). Planejamento de trajetória de robô autônomo através do conceito de campo potencial, *16º Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*.
- Siegwart, R. and Nourbakhsh, I. R. (2011). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, MIT press.
- Spong, M. W., Hutchinson, S. and Vidyasagar, M. (2008). *Robot Dynamics and Control*, John Wiley & Sons.
- Vieira, F. C. (2006). Controle dinâmico de robôs móveis com acionamento diferencial. Dissertação de Mestrado, UFRN.



(a) ponto inicial em $(-0.25, -0.25)$.



(b) ponto inicial em $(-0.25, 1.75)$.



(c) ponto inicial em $(1.75, -0.25)$.

Figura 5: Planejamento para configurações iniciais distintas.

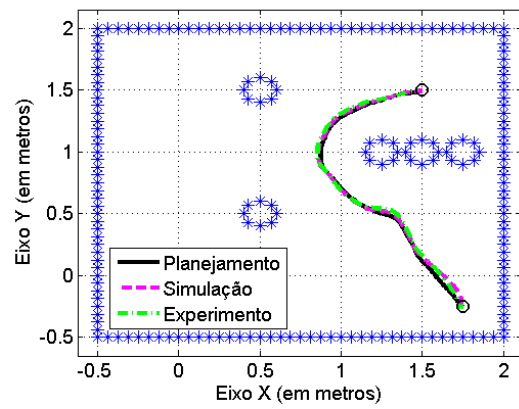


Figura 6: Trajetória percorrida pelo robô.

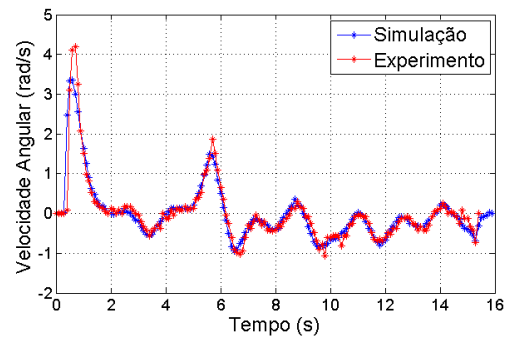
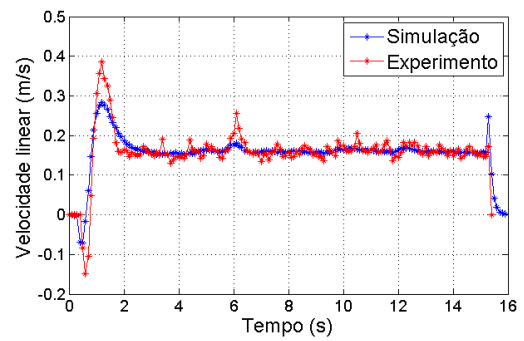


Figura 7: Velocidades linear e angular do robô.