

Planejamento de Trajetórias com Desvio de Obstáculos utilizando APF e COLREGS para USVs

Kelvin K. C. F. Nunes* Tiago T. Ribeiro** Andre G. S. Conceicao**

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, (e-mail: kelvinkefren@gmail.com).

** Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, (e-mail: tiagoctr@ufba.br, andre.gustavo@ufba.br).

Abstract: This paper presents a trajectory planning and obstacle avoidance system for Unmanned Surface Vehicles (USV) in complex and dynamic navigation environments. The developed system employs a modified Artificial Potential Field (APF) algorithm combined with the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGS) to ensure safe and efficient navigation. The validation of the proposed system was conducted in the Gazebo simulation environment, within a dynamic scenario featuring both static and moving obstacles..

Resumo: O artigo apresenta um sistema de planejamento de trajetórias e desvio de obstáculos para Veículos de Superfície Não Tripulados (USV) em ambientes de navegação complexos e dinâmicos. O sistema desenvolvido utiliza um algoritmo de Campo Potencial Artificial (APF) modificado em conjunto com as Regulamentações Internacionais para Prevenção de Colisões no Mar (COLREGS). A validação do sistema proposto foi feita no ambiente de simulação Gazebo, em um cenário dinâmico com obstáculos estáticos e móveis.

Keywords: Unmanned Surface Vehicles (USV); Trajectory Planning; Collision Avoidance; Artificial Potential Field (APF); COLREGS.

Palavras-chaves: Veículos de Superfície Não Tripulados (USV); Planejamento de Trajetória; Campo Potencial Artificial (APF); Prevenção de Colisões; COLREGS.

1. INTRODUÇÃO

A robótica móvel, que se refere à capacidade de robôs se moverem autonomamente em um ambiente físico, tem testemunhado notáveis avanços tecnológicos. Junto a ela, a navegação autônoma, a habilidade de um robô se deslocar sem intervenção humana, tem experimentado avanços tecnológicos significativos nos últimos anos, com crescente interesse na aplicação dessas tecnologias em várias áreas, incluindo a navegação marítima, conforme observado por Vagale et al. (2021). A utilização de veículos autônomos está em crescente destaque, especialmente considerando que, entre 2014 e 2021, 59,6% dos acidentes marítimos foram causados por ação humana e 68,3% dos fatores contribuintes estavam ligados ao comportamento humano, conforme dados da EMSA (2022).

Os veículos de Superfície não tripulados (USVs) são um exemplo prático dessas tecnologias. Operando na superfície da água sem tripulação humana, apresentam vantagens significativas com menor custo operacional, mais flexibilidade e a capacidade de operar por longos períodos remotamente ou autonomamente, conforme Liu et al. (2016). Os USVs têm sido cada vez mais aplicados em diversas tarefas, como mapeamento do fundo do mar, monitoramento ambiental, inspeção de infraestrutura offshore e patrulha de fronteiras (Vagale et al. (2021); Liu et al. (2016)).

No entanto, o desenvolvimento de USVs autônomos em ambientes altamente dinâmicos ainda enfrenta desafios consideráveis. O planejamento de trajetórias e desvio de obstáculos são aspectos cruciais na navegação autônoma de navios, envolvendo a determinação da melhor rota para um navio seguir, levando em consideração as condições ambientais, localização de outros navios e obstáculos, bem como as restrições operacionais, Huang et al. (2020). Esses desafios são particularmente complexos em ambientes marítimos, onde as condições podem mudar rapidamente e os navios precisam lidar com uma ampla variedade de obstáculos.

Nesse contexto, várias técnicas avançadas de planejamento de caminho e desvio de obstáculos vêm apresentando resultados promissores. O campo potencial artificial (APF) modificado de Xue et al. (2011) leva em conta as restrições ambientais, enquanto o APF modificado de Lyu and Yin (2019) considera as regras do COLREGs para evitar acidentes marítimos e em Cerqueira et al. (2016) é abordado um APF que supera o problema dos mínimos locais, garantindo um planejamento de caminho mais efetivo. Além disso, o método de controle preditivo de colisão em tempo real de Xie et al. (2019) oferece uma abordagem inovadora para lidar com situações complexas envolvendo múltiplos navios e o sistema de evasão de colisão (COLAV) em loop fechado de Eriksen et al. (2018) utiliza o algoritmo

Dynamic Window para planejar manobras evasivas eficientes. Técnicas como as mencionadas são fundamentais para superar os desafios enfrentados na navegação autônoma e melhorar a segurança e eficiência dos USVs em ambientes marítimos complexos e dinâmicos.

Neste artigo, propõe-se uma nova abordagem do algoritmo de campo potencial artificial modificado proposto por Lyu and Yin (2019) para desvio de obstáculos estáticos e dinâmicos em navios. Modificações foram implementadas no algoritmo para lidar com obstáculos que se aproximam do veículo autônomo, incluindo a adição de vetores para determinar a direção de desvio com base no produto vetorial. Adicionalmente, uma nova função foi incorporada para situações onde o veículo e os obstáculos estão em rota de colisão. A validação do sistema proposto foi feita no ambiente de simulação Gazebo, em um cenário dinâmico com obstáculos estáticos e móveis.

O presente artigo está estruturado da seguinte forma: na Seção 2 será apresentada uma breve revisão bibliográfica. Em seguida, na Seção 3, é descrita a avaliação dos riscos de colisão. Na Seção 4, o algoritmo de campo potencial artificial modificado. Na Seção 5, os resultados de simulações. Por fim, na Seção 6, as considerações finais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A navegação segura e eficiente de veículos de superfície não tripulados (USVs) é uma área de pesquisa em rápido desenvolvimento. No coração desta questão está o planejamento de trajetórias e o desvio de obstáculos. Várias terminologias relacionadas a este tópico são empregadas na literatura, incluindo planejamento de caminho, seguimento de caminho, geração de trajetória, rastreamento de trajetória e suavização de caminho Vagale et al. (2021).

Enquanto técnicas de planejamento de caminho são geralmente aplicadas para contornar obstáculos estáticos, a presença de obstáculos dinâmicos torna essencial a utilização de técnicas de *Avoidance collision* (CA) reativas. A literatura destaca uma variedade de técnicas de CA, desde abordagens simplificadas até modelos mais sofisticados.

De acordo com Huang et al. (2020), o processo de desvio de obstáculos abrange três sub-módulos: predição de movimento, detecção e resolução de conflitos. A predição de movimento envolve a previsão de trajetórias da própria embarcação (*Own Ship* - OS) e dos obstáculos (*Target Ship* - TS), utilizando modelos cinemáticos simples como em Lazarowska (2017) ou buscando modelos mais realistas como em Fossen (2018), para aprimorar a precisão das predições. A detecção de colisão visa identificar a probabilidade de colisão e determinar o instante propício para intervir. Para tal, são empregados índices como o DCPA (*Distance of Closest Point of Approach*), que indica a mínima distância na qual um navio se aproximará de outro, mantendo suas trajetórias e velocidades atuais, e o TCPA (*Time of Closest Point of Approach*), relacionado ao tempo necessário até que ambos os navios alcancem o DCPA. Em conjunto com outras variáveis, esses índices compõem o Índice de Risco de Colisão (CRI), conforme demonstrado em Lee and Rhee (2001).

Existem múltiplos métodos para resolver conflitos e evitar colisões, como abordagens baseadas em regras Praczyk

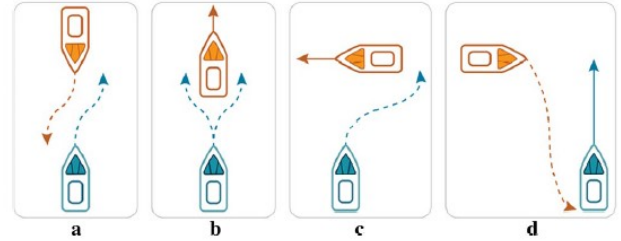


Figura 1. Representações das situações de encontro conforme COLREGs.

(2015), Campo Potencial Artificial (APF) em Hongguang and Yong (2017) e algoritmo *Velocity Obstacle* (VO) em Alsaab and Bicker (2014). Algumas soluções híbridas combinam diferentes métodos para aprimorar a eficácia do desvio de obstáculos.

O algoritmo de APF é uma abordagem amplamente empregada no planejamento de trajetórias para robôs móveis autônomos, graças à sua simplicidade e eficiência computacional. O APF original, proposto por Khatib (1985), é baseado em dois campos de potencial: um atrativo e um repulsivo. O campo potencial atrativo guia o robô em direção ao objetivo desejado, enquanto o campo potencial repulsivo evita colisões com obstáculos próximos. A força resultante no robô é calculada como a soma vetorial das forças atrativas e repulsivas, direcionando-o ao destino desejado enquanto evita colisões.

Apesar de algumas limitações do APF, como a dificuldade em lidar com situações complexas envolvendo múltiplos obstáculos ou ambientes dinâmicos, essa abordagem ainda é amplamente utilizada em robótica devido à sua simplicidade e eficácia em ambientes estáticos. Além disso, o APF pode ser facilmente combinado com outras técnicas de planejamento de trajetórias para aprimorar sua eficácia. A navegação marítima exige a prevenção de colisões com obstáculos estáticos e dinâmicos, como outras embarcações. Para buscar maior segurança, é crucial seguir regulamentações como o COLREGs.

O COLREGs é um conjunto de regras internacionais para evitar colisões entre embarcações marítimas, composto por 38 regras divididas em 5 partes. As regras relacionadas à prevenção de colisões estão na parte B e englobam 16 diretrizes. A Figura 1 ilustra quatro situações distintas de encontro entre embarcações, demonstrando que alterar a direção é preferível a mudar a velocidade para evitar colisões. A combinação de técnicas de planejamento de trajetórias, desvio de obstáculos e conformidade com regulamentações internacionais, como o COLREGs, contribui para a criação de veículos de superfície não tripulados eficientes e seguros, capazes de enfrentar os desafios da navegação marítima moderna.

3. RISCO DE COLISÃO

A avaliação do risco de colisão é realizada em duas etapas principais. Primeiramente, analisa-se o critério de checagem de colisão (CC) para detectar a possibilidade de colisão, caso o veículo mantenha sua trajetória atual. Se for detectada uma possível colisão, avalia-se a distância ao obstáculo para decidir sobre a execução de uma manobra

de desvio. Para avaliar o risco de colisão, é essencial conhecer as posições e velocidades da embarcação controlada (OS) e do obstáculo alvo (TS), denotadas por p_{os}, p_{ts}, v_{os} e v_{ts} , no qual p indica posição e v velocidade. Supondo que ambas as embarcações e os obstáculos sejam circulares e tenham raios R_{os} e R_{ts} , respectivamente, a menor distância segura para que OS passe pelo obstáculo (d_m) é a soma dos raios das circunferências que representam os limites de segurança de OS e TS, acrescido de uma distância de segurança (d_{safe}) devido a erros de sensoriamento e velocidade relativa entre OS e TS. Para melhor visualização, ver Figura 2.

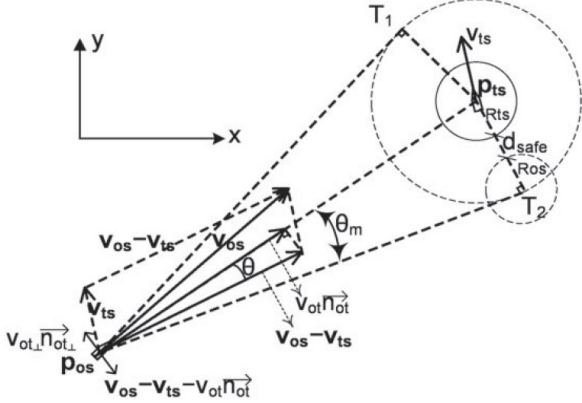


Figura 2. Vetores utilizados na estratégia de Controle Autônomo (CA) para evitar obstáculos.

Para assegurar o desvio de qualquer obstáculo, seja ele estático ou dinâmico, é crucial verificar o risco de colisão a distâncias maiores que a distância de segurança, permitindo ações antecipadas. Dessa forma, a distância de emergência (d_m) é adicionada a uma distância ρ , definida pelo operador, conforme representado em (2), formando um raio de verificação de possíveis riscos colisões (CR). Valores maiores de ρ_0 resultam em ações de CA mais precoces por OS.

$$d_m = R_{os} + d_{safe} + R_{ts} \quad (1)$$

$$CR = d_m + \rho_0 \quad (2)$$

Quando a velocidade relativa $v_{to} = (v_{os} - v_{ts})$ entre OS e TS forma com o vetor direcionado ao obstáculo $p_{ot} = (p_{ts} - p_{os})$ um ângulo θ menor que o ângulo de segurança (θ_m). O cálculo de θ_m é descrito na Equação (3).

$$\theta_m = \arctan \left(\frac{d_m}{\sqrt{|p_{ot}|^2 - d_m^2}} \right) \quad (3)$$

Portanto, o critério de checagem de colisão (CC) pode ser expresso como:

$$\theta < \theta_m \quad (4)$$

Dentro desse contexto, avalia-se o risco de colisão usando critérios relacionados à posição e velocidade das embarcações, permitindo identificar quando são necessárias manobras de desvio.

Ao levar em conta os ângulos de segurança e as distâncias envolvidas, o sistema pode agir de forma proativa, garantindo uma navegação mais segura.

4. ALGORITMO DE CAMPO POTENCIAL ARTIFICIAL MODIFICADO

O algoritmo se baseia em forças atrativas e repulsivas para guiar o navio em direção ao objetivo. Ele emprega critérios de risco de colisão para identificar e evitar colisões com obstáculos móveis. Além disso, adota uma abordagem baseada em regras para prevenir colisões, seguindo as diretrizes do COLREGs. As equações que governam o cálculo das forças atrativas e repulsivas são expressas nessa Seção e como elas são combinadas para obter a força total resultante que orienta o veículo em sua trajetória.

O campo potencial atrativo $U_{att}(p)$, descrito em (5), é definido pela distância relativa entre o OS e o objetivo. Aqui, ε é um fator escalar positivo, e $|p_{gos}|$ representa a distância entre o OS e o objetivo.

$$U_{att}(p) = \frac{1}{2} \varepsilon |p_{gos}|^2 \quad (5)$$

A força atrativa virtual, descrita em (6), é o gradiente negativo do campo potencial atrativo em relação à posição. Na ausência de obstáculos com risco de colisão, o OS é guiado ao objetivo pela força atrativa, sendo n_{og} o vetor normal direcionado ao objetivo.

$$F_{att}(p) = -\nabla[U_{att}(p)] = \varepsilon |p_{gos}| n_{og} \quad (6)$$

As forças repulsivas F_{rep} foram estabelecidas referindo-se ao trabalho de Lyu and Yin (2019) e demonstradas em (7) até (17), nas quais d indica a distância entre OS e TS, n_{ot} o vetor normal apontando para o obstáculo, $n_{ot\perp}$ o vetor normal perpendicular à direção do obstáculo, v_{to} a velocidade relativa entre OS e TS, τ é o raio mínimo representando o tamanho do OS, para que não ocorra a colisão, η_d e η_s são fatores escalares positivos para a dinâmica de TS e para obstáculos estáticos, respectivamente, η_e é o fator escalar para emergência, ou seja, obstáculos próximos, com distância menor que d_m e, consequentemente, em uma região crítica de colisão para o navio.

$$\begin{cases} F_{rd1} + F_{rd2} + F_{rd3}, & \text{se } v_{ts} \neq 0, d_m \leq CR \text{ e } \theta < \theta_m \\ F_{rs1} + F_{rs3}, & \text{se } v_{ts} = 0, d_m \leq CR \text{ e } \theta < \theta_m \\ F_{re1} + F_{re2} + F_{re3}, & \text{se } d \leq d_m \\ \text{não definido}, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (7)$$

$$F_{rd1} = -\eta_d R_{ts} d_g^2 \left[\left(\frac{1}{d - d_m} - \frac{1}{\rho_0} \right) e^{\theta_m - \theta} * \left(\frac{d_m}{d \sqrt{d^2 - d_m^2}} + \frac{\sin \theta}{\|v_{to}\|} \right) + F_{to} \right] n_{ot} \quad (8)$$

$$F_{to} = \frac{e^{\theta_m - \theta} - 1}{(d - d_m)^2} - \left(\frac{1}{d - d_m} - \frac{1}{\rho_0} \right) * \left(\frac{d_m}{d\sqrt{d^2 - d_m^2}} + \frac{\sin \theta}{\|v_{to}\|} \right) \quad (9)$$

$$F_{rd2} = \pm \eta_d R_{ts} d_g^2 \left[\left(\frac{1}{d - d_m} - \frac{1}{\rho_0} \right) e^{\theta_m - \theta} * \left(\frac{1}{\|p_{ot}\|} + \frac{\cos \theta}{\|v_{to}\|} \right) + F_{to\perp} \right] \mathbf{n}_{ot\perp} \quad (10)$$

$$F_{to\perp} = \frac{\|v_{to\perp}\| (e^{\theta_m - \theta} - 1)}{d(d - d_m)^2} - \left(\frac{1}{d - d_m} - \frac{1}{\rho_0} \right) * \left(\frac{1}{\|p_{ot}\|} + \frac{\cos \theta}{\|v_{to}\|} \right) \quad (11)$$

$$F_{rd3} = \eta_d R_{ts} d_g \left[\left(\frac{1}{d - d_m} - \frac{1}{\rho_0} \right) (e^{\theta_m - \theta} - 1) \right] \mathbf{n}_{og} \quad (12)$$

$$F_{rs1} = -\eta_s R_{ts} \left(\frac{1}{d - \tau} - \frac{1}{\rho_0} \right) \left(\frac{d_g^2}{d^2} \right) \mathbf{n}_{ot} \quad (13)$$

$$F_{rs3} = \eta_s R_{ts} d_g \left(\frac{1}{d - \tau} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \mathbf{n}_{og} \quad (14)$$

$$F_{re1} = -2\eta_e R_{ts} \left(\frac{1}{d - \tau} - \frac{1}{d_m} \right) \frac{d_g^2}{(d - \tau^2)} \mathbf{n}_{ot} \quad (15)$$

$$F_{re2} = 2\eta_e R_{ts} \frac{d_g}{d} \|V_{to}\|^2 (\cos \theta \sin \theta) \mathbf{n}_{ot\perp} \quad (16)$$

$$F_{re3} = 2\eta_e R_{ts} d_g \left[\left(\frac{1}{d - \tau} - \frac{1}{d_m} \right)^2 + \|V_{to}\|^2 \cos^2 \theta \right] \mathbf{n}_{og} \quad (17)$$

A força de repulsão F_{rd} é induzida por obstáculos dinâmicos. A componente F_{rd1} é um componente vetorial de F_{rd} que possui a mesma direção do obstáculo, mas com sentido oposto, levando o navio a se mover na direção contrária ao obstáculo. A componente F_{rd2} tem direção perpendicular à direção do obstáculo e impulsiona o navio para a direita (estibordo) do navio, conforme as práticas marítimas estabelecidas pelos COLREGs. Já a componente F_{rd3} possui direção e sentido apontados para o objetivo.

No caso de obstáculos estáticos, a força de repulsão é representada por F_{rs} . A componente F_{rs1} rerepresenta forças no navio na direção contrária ao obstáculo, enquanto F_{rs3} o direciona para o objetivo.

Se um obstáculo estiver a uma distância inferior ao limite de segurança ($d < d_m$), aplica-se a força de emergência F_{re} . A componente F_{re1} tem direção e sentido opostos ao obstáculo, conduzindo o navio para longe do obstáculo. A componente F_{re2} desloca o navio para a direita ou esquerda, dependendo da posição do vetor \mathbf{p}_{ot} .

Se existirem múltiplos obstáculos, a força total repulsiva é obtida somando as forças repulsivas geradas por cada

um deles. No fim, a força total resultante é calculada pela soma da força de atração e de repulsão, descrita em (18).

$$F_{total} = F_{att} + F_{rep} \quad (18)$$

4.1 Modificações na implementação do algoritmo

Ao analisar a Figura 1, nota-se que as manobras são focadas na rotação do veículo no sentido horário, com o propósito de desviar de obstáculos dinâmicos que se aproximam pela direita. No entanto, caso o obstáculo surja pela esquerda, como ilustrado no caso d da figura, OS não realiza manobras evasivas. Em situações como essa, se o veículo representando o obstáculo não alterar sua trajetória, uma colisão pode ocorrer. Neste cenário, cabe ao operador intervir e realizar manobras evasivas ao identificar o risco de colisão. O algoritmo proposto por Lyu and Yin (2019) atua somente quando o obstáculo entra na zona de emergência, o que, em ambientes marítimos, acontece a grandes distâncias e fornece tempo suficiente para realizar a manobra. Entretanto, em áreas menores, mais estreitas ou de alto tráfego, seria necessário diminuir a área de emergência, para poder passar em áreas menores, aumentando o risco de colisão devido à falta de espaço para efetuar a manobra de desvio, tornando a ação antecipatória essencial.

Realizou-se simulações em escalas bem menores que as observadas em ambientes marítimos. Isso tornou crucial o início antecipado de manobras evasivas para prevenir colisões. Considerando esse cenário, incorporou-se uma função ao algoritmo. Essa função avalia os vetores v_{os} e v_{ts} , identifica a direção do movimento do obstáculo e estabelece a direção que o OS deve adotar para desviar o obstáculo. Essa determinação é baseada no produto vetorial, que auxilia na identificação da direção de rotação ideal para um robô desviar de um obstáculo em movimento. A comparação das velocidades do robô e do obstáculo leva em conta a direção e magnitude desses vetores, permitindo decidir se o robô deve girar no sentido horário ou anti-horário ao alterar o sinal de $\mathbf{n}_{ot\perp}$. Simplificando a componente z do produto vetorial, é possível determinar a direção da rotação. Essa abordagem é eficiente e adaptável, desde que as velocidades do robô e do obstáculo se mantenham constantes durante a manobra.

No entanto, essa alteração pode induzir oscilações em certas situações, como quando há um confronto direto com um obstáculo em movimento. Para mitigar esse problema, o ângulo entre os vetores de velocidade é calculado e, se estiver próximo de 180 graus, uma rotação fixa é mantida. Essa alteração é aplicada em encontros frontais com ângulos de inclinação de até 15 graus e foi implementada na função criada.

5. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Para avaliar o desempenho do APF modificado em um veículo autônomo, foram conduzidas diversas simulações em um ambiente de 10x10 metros. Foi utilizado o Gazebo em combinação com o ROS para essas simulações. Diferentes cenários foram considerados, englobando obstáculos estáticos, móveis e situações com múltiplos obstáculos.

No ambiente virtual das simulações, o terreno é totalmente plano e contém obstáculos circulares. Durante a simulação

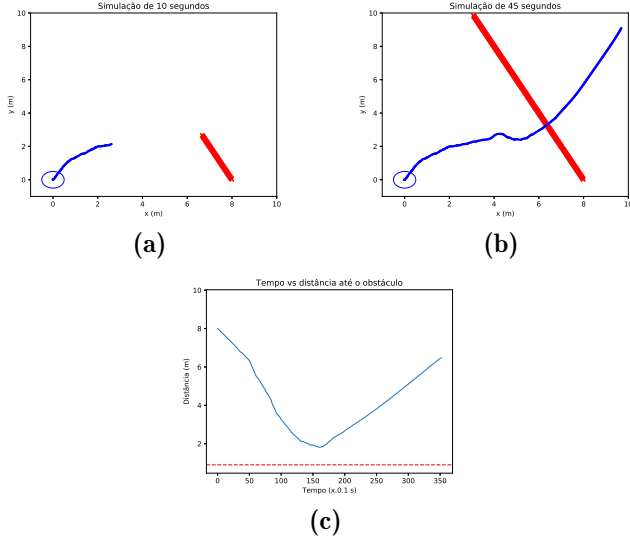


Figura 3. Cenário 1. (a) Simulação no instante 10s; (b) Instante final da simulação; (c) Variação da distância entre a embarcação controlada (OS) e o obstáculo alvo (TS).

no Gazebo, os seguintes parâmetros foram aplicados: $\varepsilon = 600$, $\eta_d = 2.000$, $\eta_s = 30.000$, $\eta_e = 4.000$, $\tau = 0,3$ m, $R_{OS} = 0,5$ m, $d_{safe} = 1$ m e $\rho_0 = 5$ m. O veículo autônomo, denominado OS, iniciou sua trajetória no ponto (0,0) com uma inclinação de 45 graus, tendo como objetivo atingir o ponto (10,10).

No Gazebo, o OS é representado em azul, com uma circunferência da mesma cor indicando a posição inicial da trajetória. De forma similar, os obstáculos são representados em vermelho.

Foram realizadas simulações em três cenários distintos. O primeiro cenário serve para verificar o comportamento do OS quando encontra um obstáculo dinâmico. O segundo cenário aborda o problema oscilatório que leva à colisão, quando obstáculo está na mesma direção, em relação a OS, do ponto objetivo. Já o terceiro cenário demonstra o resultado de um ambiente com multi obstáculos. As posições e velocidades dos obstáculos foram descritas na Tabela 1.

No primeiro cenário, a simulação no Gazebo é ilustrada na Figura 3. Pode-se observar que o obstáculo ou TS, de raio 0.4m, faz um cruzamento pela direita do OS.

Durante a simulação, o OS manobrou para a direita, em sentido horário, de acordo com as regras do COLREGS, para desviar de um obstáculo móvel. A manobra foi concluída com sucesso, conforme demonstrado na parte c da Figura 1. Na Figura 3b, o obstáculo TS acaba invadindo a região de emergência de OS e, como consequência, provocou uma ação de maior repulsão de OS, ocasionando um desvio mais brusco. Mesmo entrando na região de emergência, é observável na Figura 3c que o obstáculo apresentou uma distância maior que 1 metro. A linha tracejada vermelha representa o limite de colisão entre OS e TS.

Após incorporar a função que compara os vetores de velocidade v_{os} e v_{ts} , utilizou-se o cenário 2 para ilustrar o

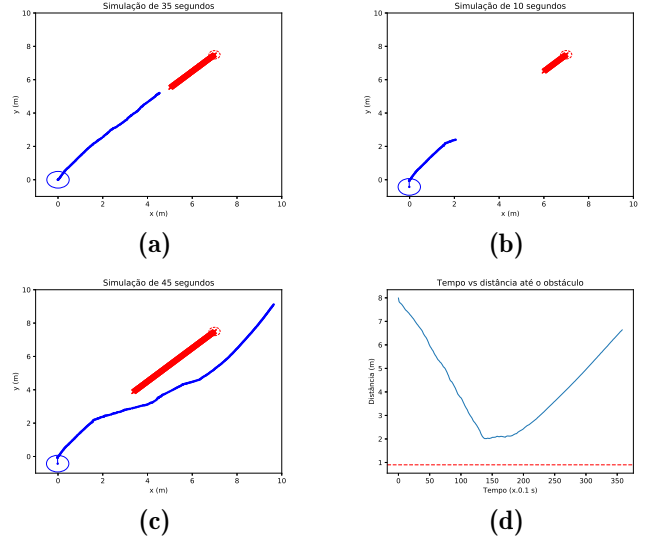


Figura 4. Cenário 2: (a) Ponto de colisão na simulação; (b) Simulação no instante 10s sem colisão; (c) Conclusão da simulação sem colisões; (d) Evolução da distância entre a embarcação controlada (OS) e o obstáculo (TS) na simulação sem colisão.

problema da colisão, conforme evidenciado na Figura 4a. Observa-se que OS não consegue desviar o obstáculo, simplesmente fica oscilando entre desviar no sentido horário e no anti-horário, mas no fim, se movimenta em linha reta. Para mitigar o problema, foi mantida uma rotação só durante o desvio para o caso de um encontro frontal com o obstáculo.

Com essa implementação, OS conseguiu desviar do obstáculo como é mostrado nas Figuras 4b e 4c de forma segura e com uma distância aceitável demonstrado na Figura 4d.

No terceiro cenário, o algoritmo foi avaliado com a presença de seis obstáculos, sendo alguns estáticos e outros dinâmicos. O cenário simulado pode ser visualizado na Figura 5 com diferentes tempos de simulação.

As simulações realizadas foram satisfatórias, com o OS desviando de todos os obstáculos sem incidentes de colisão. O desvio inicial foi no sentido horário, seguindo as regras do COLREGS e desviando tanto dos obstáculos dinâmicos quanto dos obstáculos estáticos.

Tabela 1. Cenários.

Cenário	No	p_{ts}	v_{ts} [m/s]	R_{TS}
1	T1	(8,0)	(-0.1, 0.25)	0.4
2	T1	(7,7.5)	(-0.1, -0.1)	0.25
3	T1	(8, 2)	(0, 0)	0.4
	T2	(6.8, 4.9)	(0, 0)	0.4
	T3	(4, 8)	(-0.25, 0.25)	0.25
	T4	(6, 8)	(0, 0)	0.25
	T5	(7.5, 7)	(-0.18, -0.18)	0.25
	T6	(7.0, 0)	(-0.25, 0.25)	0.4

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou um sistema de planejamento de trajetórias para USVs com desvio de obstáculos. O método

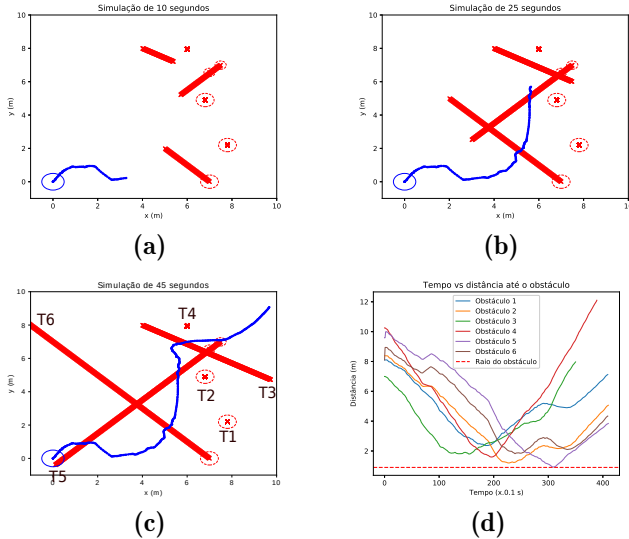


Figura 5. Cenário 3: (a) Simulação no instante 10s; (b) Simulação no instante 25s; (c) Simulação no instante 45s; (d) Evolução da distância da embarcação controlada (OS) aos seis obstáculos durante a simulação.

se baseia em um algoritmo de campo potencial artificial modificado, aplicado em conjunto com as Regulamentações Internacionais para Prevenção de Colisões no Mar (COLREGS).

A validação foi realizada no Gazebo em três cenários distintos. No primeiro cenário, o desvio foi executado conforme as regras do COLREGS, atingindo o objetivo estabelecido. No segundo cenário, foram identificadas dificuldades relacionadas à implementação da nova função de comparação de vetores. Isso justificou a inclusão de uma condicional específica no algoritmo, o que levou a resultados mais adequados. No terceiro cenário, o algoritmo exibiu resultados notavelmente satisfatórios, evitando obstáculos dinâmicos e estáticos e atingindo o destino final sem colisões, conforme representado na Figura 5d.

Em suma, a navegação autônoma para veículos de superfície não tripulados representa um campo em contínua evolução. Diversas técnicas avançadas de planejamento de trajetórias e desvio de obstáculos estão sendo constantemente desenvolvidas e avaliadas. As simulações realizadas neste estudo demonstraram que o algoritmo APF modificado é eficaz na navegação autônoma em ambientes com obstáculos estáticos e dinâmicos. Antecipa-se que essas tecnologias encontram aplicação em variados setores, como exploração submarina, monitoramento ambiental e transporte marítimo, trazendo benefícios como aumento de segurança, eficiência e diminuição de custos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro (termos de outorga 311029/2020-5 e 407163/2022-0) e à CAPES (Codigo de Financiamento 001).

REFERÊNCIAS

Alsaab, A. and Bicker, R. (2014). Improving velocity obstacle approach for obstacle avoidance in indoor en-

vironments. In *2014 UKACC International Conference on Control (CONTROL)*, 325–330.

Cerqueira, T.A., Santos, T.L., and Conceição, A.G. (2016). A new approach based in potential fields with obstacles avoidance for mobile robots. In *2016 XIII Latin American Robotics Symposium and IV Brazilian Robotics Symposium (LARS/SBR)*, 229–233.

EMSA (2022). *ANNUAL OVERVIEW OF MARINE CASUALTIES AND INCIDENTS 2022*. European Maritime Safety Agency, Lisboa.

Eriksen, B.H., Wilthil, E.F., Flåten, A., Brekke, E., and Breivik, M. (2018). Radar-based maritime collision avoidance using dynamic window. In *2018 IEEE Aerospace Conference*, 1–9.

Fossen, S. (2018). *Visualization of Ships in a Mixed-Reality Environment and Automated Situational Awareness using Live AIS Data*. Master of science, Norwegian University of Science and Technology.

Hongguang, L. and Yong, Y. (2017). Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on modified artificial potential field. In *2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE)*, 351–357.

Huang, Y., Chen, L., Chen, P., Negenborn, R.R., and van Gelder, P. (2020). Ship collision avoidance methods: State-of-the-art. *Safety Science*, 121, 451–473.

Khatib, O. (1985). Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. In *Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, 500–505.

Lazarowska, A. (2017). A new deterministic approach in a decision support system for ship's trajectory planning. *Expert Systems with Applications*, 71, 469–478.

Lee, H. and Rhee, K. (2001). Development of collision avoidance system by using ship expert system and search algorithm. *International shipbuilding progress*, 48, 197–212.

Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., and Yuan, C. (2016). Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, 41, 71–93.

Lyu, H. and Yin, Y. (2019). Colregs-constrained real-time path planning for autonomous ships using modified artificial potential fields. *Journal of Navigation*, 72(3), 588–608.

Praczyk, T. (2015). Neural anti-collision system for autonomous surface vehicle. *Neurocomputing*, 149, 559–572.

Vagale, A., teste R.A. Tagg, and teste M. Rush (2021). Path planning and collision avoidance for autonomous surface vehicles i: a review. *Journal of Marine Science and Technology*, 26, 1292–1306.

Xie, S., Garofano, V., Chu, X., and Negenborn, R.R. (2019). Model predictive ship collision avoidance based on q-learning beetle swarm antenna search and neural networks. *Ocean Engineering*, 193, 106609.

Xue, Y., Clelland, D., Lee, B., and Han, D. (2011). Automatic simulation of ship navigation. *Ocean Engineering*, 38(17), 2290–2305.