



ESCOLA NAVAL

talant de biefaire



Daniel Filipe Lopes Balsinha

Navegação autónoma segura em ambientes marítimos densos

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais,
na especialidade de Marinha



Alfeite
2023



ESCOLA NAVAL



talant de bi-faire

Daniel Filipe Lopes Balsinha

“Navegação autónoma segura em ambientes marítimos densos”

***Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na
especialidade de Marinha***

Orientação de: Bruno Duarte Damas

O Aluno Mestrando

O Orientador

Bruno Duarte Damas

Daniel Filipe Lopes Balsinha

Bruno Duarte Damas

**Alfeite
2023**

“Simplicity is the ultimate sophistication”

Leonardo da Vinci

Agradecimentos

Antes de dar início à exposição do presente trabalho de investigação, gostaria de expressar a minha sincera gratidão a todos aqueles que me apoiaram durante a esta jornada de cinco anos na Escola Naval.

Começo por agradecer ao meu orientador, Senhor Professor Doutor Bruno Duarte Damas, pela sua disponibilidade, apoio e orientação, desde o início até ao fim do desenvolvimento da dissertação. Sem dúvida que toda a sua ajuda, conselhos e vontade em procurar fornecer toda as respostas às questões que ocorreram ao longo do caminho, contribuíram para a escolha do melhor rumo a adotar, e assim atingir o melhor estado final do trabalho.

Quero agradecer à minha família, que sempre me apoiaram incondicionalmente em todos os momentos. As suas palavras de coragem e motivação constante, foram um incentivo fundamental para alcançar este marco.

Quero agradecer à Joana, por ter estado ao meu lado durante todo este percurso. O seu apoio constante, compreensão, paciência e incentivo foram sem dúvida fundamentais para o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus camaradas do curso CALM Manuel Armando Ferraz, que me acompanharam nesta jornada, muito obrigado por todo o apoio, todos os momentos vividos e por todas as histórias que nunca esquecerei.

Por fim, agradeço a todos os professores, funcionários e instituições que contribuíram para a minha formação académica.

Resumo

Os *Unmanned Surface Vehicles* (USV) são veículos autónomos que operam na superfície da água sem guarnição. O avanço futuro dos USVs depende do desenvolvimento de uma autonomia total sendo que, para este fim é indispensável a criação de algoritmos, capazes de atender aos critérios essenciais para uma utilização capaz de evitar obstáculos, eficiente, eficaz e segura no ambiente marítimo.

A presente dissertação propõe um algoritmo baseado no método que recorre ao uso do *Velocity Obstacles* (VO), isto é, cria cones, no espaço de velocidade, que representam as velocidades proibidas para o USV. A região de velocidades proibidas foi criada com recurso a uma figura com seis pontos sendo que, esta pode variar através da alteração de parâmetros como a distância de segurança e t_{max} , para criar trajetórias mais suaves e seguras.

O algoritmo desenvolvido cumpre com as regras do RIEAM através da introdução de restrições no espaço de velocidades. Este considera ainda as limitações dinâmicas do navio, como por exemplo, a velocidade máxima, a taxa de guinada e a aceleração máxima. Em situações de emergência, em que outros navios não cumprem com o Regulamento Internacional para Evitar Abalroamentos no Mar (RIEAM) o algoritmo é capaz de encontrar soluções para evitar os obstáculos.

Os resultados destacaram a capacidade do algoritmo em tomar decisões instantâneas e ajustar as trajetórias, enquanto mantém uma distância de segurança, mesmo em situações de emergência. No entanto, apesar da satisfação geral com os resultados, o algoritmo não é perfeito, sendo que por vezes apresenta manobras menos eficientes do que aquelas que seriam de esperar de uma intervenção humana.

Palavras-chave: USV; Regras RIEAM; *Velocity obstacles*; Evitar Obstáculos

Abstract

Unmanned Surface Vehicles (USVs) are autonomous waterborne vehicles that operate without human crew on the water's surface. The future progression of USVs depends on the development of total autonomy. To achieve this objective, it is imperative to create algorithms capable of avoiding obstacles and satisfying the critical criteria for their efficient, effective, and safe deployment within the maritime domain.

This dissertation presents an algorithm based on the Velocity Obstacles (VO) method. This technique generate cone-shaped obstacles in the velocity space, that represents the USV's prohibited velocities. The region of forbidden velocities is established using a figure featuring six points. This configuration is subject to variation through the adjustment of parameters, such as safety distance and t_{max} , with the aim of creating smoother and more secure trajectories.

The algorithm in question complies with the COLREGS rules by introducing restrictions in the velocity space. Moreover, it takes into account the dynamic constraints of the vessel, including maximum velocity, yaw rate, and maximum acceleration. In case of emergencies, wherein other vessels fail to adhere to RIEAM regulations, the algorithm exhibits the capacity to maneuver tactically in order to avoid obstacles.

The results highlighted the algorithm's remarkable ability to make instantaneous decisions and adapt trajectories while maintaining a safe distance, even in emergency situations. However, despite the general satisfaction with the results, it is important to note that the algorithm is not perfect and sometimes manoeuvres less efficiently than would be expected from human intervention.

Keywords: USV; COLREGS rules; Velocity Obstacles; Avoid obstacles

Índice Geral

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO	5
2.1 RIEAM.....	5
2.2 USVs.....	9
2.2.1 Alguns exemplos de USVs.....	11
2.3 CONSTITUIÇÃO DE UM USV	14
2.3.1 Sensores e Atuadores	17
2.4 SISTEMA GNC.....	18
2.4.1 Governo	19
2.4.2 Navegação	22
2.4.3 Controlo.....	25
3. ESTADO DA ARTE.....	29
3.1 <i>OBSTACLE AVOIDANCE</i> PARA USVs.....	29
3.2 RIEAM	37
4. METODOLOGIA	43
4.1. ALGORITMO <i>VELOCITY OBSTACLES</i>	43
4.1.1 Velocidade desejada	50
4.1.2 Eliminação de velocidades que conduzem a colisões num horizonte temporal demasiado longo.....	50
4.1.3 Incerteza na posição e na velocidade	51
4.1.4 Distância de segurança.....	52
4.1.5 Velocidades viáveis do USV	53
4.1.6 Múltiplos Obstáculos	54
4.1.7 Implementação prática.....	55
4.2. ALGORITMO <i>VELOCITY OBSTACLES</i> COM RIEAM.....	56
4.2.1 Regra 13- Navio que alcança	56
4.2.2 Regra 14 – Navios que se aproximam de roda a roda.....	58
4.2.3 Regra 15 – Navios em rumos cruzados.....	60

4.3. SITUAÇÕES DE EMERGÊNCIA	62
5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	65
5.1 MODELO DINÂMICO DO USV	65
5.2 DESVIO DE OBSTÁCULOS (SEM RIEAM).....	68
5.2.1 Caso 1 - Navio que cruza o caminho.....	68
5.2.2 Caso 2 - USV ultrapassa outro navio.....	71
5.2.3 Caso 3 - Roda a roda.....	74
5.2.4 Caso 4 - Múltiplos obstáculos.....	77
5.3 EVITAR OBSTÁCULOS (COM RIEAM).....	80
5.3.1 Regra 13.....	81
5.3.2 -Regra 14.....	84
5.3.3 Regra 15.....	86
6. CONCLUSÃO	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

Índice de Figuras

Figura 1 - Regra 13 do RIEAM (Wang et al., 2018)	7
Figura 2 - Regra 14 do RIEAM (Wang et al., 2018)	7
Figura 3 - Regra 15 do RIEAM (Wang et al., 2018)	8
Figura 4 - Regra 16 e 17 do RIEAM (Wang et al., 2018)	8
Figura 5 - USV ROAZ (Martins et al., 2006).....	12
Figura 6 - USV Springer (Sonnenburg & Woolsey, 2013)	13
Figura 7- USV Owl MK II (Bertram, 2008)	13
Figura 8 - USV DELFIM (Alves et al., 2006).....	14
Figura 9 - Componentes essenciais ao USV (Z. Liu et al., 2016)	16
Figura 10 - Estrutura geral do USV quanto à orientação, navegação e controlo (Z. Liu et al., 2016).....	19
Figura 11 - Classificação do sistema de navegação de um USV com as respetivas funções e métodos(Z. Liu et al., 2016)	25
Figura 12 – Algoritmo genético melhorado (Cao, 2015)	30
Figura 13 – Mapa de grelha e mapa de custos (Kim et al., 2013).....	31
Figura 14 - Line of Sight (LOS) (Campbell et al., 2012).....	32
Figura 15 – Comparação gráfica Simulação vs. Provas de mar dos algoritmos de governo LOS (Desa et al., 2007)	32
Figura 16 - Conceito básico do algoritmo de campos potenciais (Huang et al., 2020)	33
Figura 17 – Trajetória definida pelo USV com obstáculos dinâmicos (Soltan et al., 2009)	34
Figura 18 – Algoritmo TD-NLVO entre dois navios (P. Chen et al., 2018)	36
Figura 19 - Situação de Colisão Relativa em Navegação Oceânica (Perera et al., 2010)	38
Figura 20 - O conceito do método proposto para evitar colisões (Lee et al., 2004).	39
Figura 21 - Estrutura de controlo baseada no comportamento(Benjamin et al., 2006)	39
Figura 22 - Cenário de "Roda a Roda" (Colito, 2007)	40

Figura 23 - Diagrama de forças virtuais para um contato dinâmico(Lyu & Yin, 2019)	41
Figura 24- Simulação de prevenção de colisões com base no COLREGs para um único obstáculo dinâmico utilizando a orientação LOS com polarização manual (Campbell et al., 2012).....	41
Figura 25 - Constrangimentos no espaço de velocidade impostos pelas regras do RIEAM (Kuwata et al., 2014)	42
Figura 26 - Somatório de Minkowski (Kuwata et al., 2014)	44
Figura 27 - Representação do USV e do Obstáculo em movimento	44
Figura 28 -Velocidade relativa $V_{usv,obs}$ e cone de colisão $CONE_{usv,obs}$	45
Figura 29 - Representação do VO	46
Figura 30 - Representação do VO sem risco de colisão.....	47
Figura 31 - Obstáculo estático: posições e velocidades (esquerda) e cone de velocidade correspondente (direita)	48
Figura 32 - Obstáculo em movimento: posições e velocidades (esquerda) e cone de velocidade correspondente (direita)	48
Figura 33 -Representação do VO com limite de tempo t_{max}	51
Figura 34 - Representação da incerteza v_{obs} em forma circular (esquerda) e representação do VO correspondente com o acréscimo da incerteza ($vinc$) da velocidade v_{obs} (direita).....	52
Figura 35 - Representação gráfica do Obs com raio aumentado para criar distancia de segurança (esquerda) e representação gráfica do VO com a restrição da distância de segurança (direita).....	53
Figura 36 - Representação gráfica do USV e um obstáculo com as respectivas velocidades (esquerda) e representação gráfica do VO de um obstáculo e da restrição de velocidade máxima (direita)	53
Figura 37 - Representação gráfica de dois obstáculos e do USV com respectivas velocidades (esquerda) e representação do VO de dois obstáculos no espaço de velocidades (direita).....	54
Figura 38 - Representação gráfica de um USV e Obs com as respectivas velocidades (esquerda) e representação gráfica do VO limitado por 6 pontos (direita)	55

Figura 39 - Representação gráfica do VO limitado por 6 pontos com a restrição de velocidade máxima representada através de 20 pontos	56
Figura 40 – Regra 13 do RIEAM - Situação em que o USV é o navio que alcança	56
Figura 41 - Manobras possível para se afasta do caminho de outro navio quando se encontra na situação de navio que alcança (Instituto Hidrográfico, 2007).....	57
Figura 42 – Representação da região de aplicação da Regra 13 do RIEAM (esquerda) e representação do VO de acordo com a Regra 13 do RIEAM (direita)	58
Figura 43 - Regra 14 do RIEAM.....	58
Figura 44- Situação em que é utilizada a regra 14.....	59
Figura 45 - Representação VO com restrição da Regra 14 do RIEAM.....	59
Figura 46 - Regra 15 do RIEAM.....	60
Figura 47 - Regra 15 do RIEAM - Navios de propulsão mecânica a navegar em que o navio A não tem prioridade e deve afastar-se do caminho do navio B (Instituto Hidrográfico, 2007).....	60
Figura 48 - Situação onde se aplica a Regra 15 do RIEAM.....	62
Figura 49 - Representação VO com restrição da Regra 15 do RIEAM.....	62
Figura 50 - Situação em que o USV tem prioridade perante o Obs1, mas não tem prioridade perante o Obs2	64
Figura 51 - Diferentes VO para diferentes situações. VO Obs1 quando USV tem prioridade e VO Obs 2 quando o USV não tem prioridade.....	64
Figura 52 - Trajetória do USV num ambiente sem obstáculos.....	67
Figura 53 – Velocidade desejada e a velocidade do USV nos instantes iniciais.....	67
Figura 54 – Valores da velocidade e do rumo ao longo do tempo	68
Figura 55 - Caso 1 - Trajetória do USV e do Obs numa situação de rumos cruzados	69
Figura 56 - Caso 1 - Representação do VO	70
Figura 57 - Caso 1 - Valores da velocidade e do rumo ao longo do tempo	70
Figura 58 - Caso 1 - Valores da distância entre navios ao longo do tempo	70
Figura 59 - Caso 1 - Trajetória de dois USVs com parâmetros do algoritmo diferentes para o mesmo caso	71
Figura 60 - Caso 2 - Trajetória do USV e do Obs numa situação em que o USV ultrapassa o Obs	72

Figura 61 - Caso 2 - Valores da velocidade e do rumo ao longo do tempo	73
Figura 62 - Caso 2 - Valores da distância entre navios ao longo do tempo	73
Figura 63 - Caso 2 - Trajetória do USV e do Obs em que ocorrem oscilações no rumo e na velocidade	74
Figura 64 - Caso 3 - Trajetória do USV e do Obs numa situação de roda a roda	76
Figura 65 - Caso 3 - Representação do VO	76
Figura 66 - Caso 3 - Valores da velocidade e do rumo ao longo do tempo	77
Figura 67 - Caso 3 - Valores da distância entre navios ao longo do tempo	77
Figura 68 - Caso 4 - Representação da trajetória do USV e dos obstáculos num ambiente denso	79
Figura 69 - Caso 4 - Representação do VO	79
Figura 70 - Caso 4 - Valores da velocidade e do rumo ao longo do tempo	80
Figura 71 - Caso 4 - Valores da distância entre navios ao longo do tempo	80
Figura 72 - Regra 13 - Trajetória do USV e do Obs	82
Figura 73 - Regra 13 - Representação do VO no instante em que o USV guina	83
Figura 74 - Regra 13 - Valores da velocidade e do rumo ao longo do tempo	83
Figura 75 - Regra 13 - Valores da distância entre navios ao longo do tempo	83
Figura 76 - Regra 14 - Trajetória do USV e do Obs	85
Figura 77 - Regra 14 - Representação do VO no instante em que o USV guina (esquerda) e VO completo (direita).....	85
Figura 78 - Regra 14 - Valores da velocidade e do rumo ao longo do tempo	86
Figura 79 - Regra 14 - Valores da distância entre navios ao longo do tempo	86
Figura 80 - Regra 15 - Trajetória do USV e do Obs	88
Figura 81 - Regra 15 - Representação do VO no instante em que o USV guina	88
Figura 82 - Regra 15 - Valores da velocidade e do rumo ao longo do tempo	89
Figura 83 - Regra 15 - Valores da distância entre navios ao longo do tempo	89
Figura 84 - Representação da trajetória do USV e do obstáculo numa situação em que o USV não tem prioridade de acordo com a regra 15 do RIEAM para um t_{max} de 60	90
Figura 85 - Representação da trajetória do USV e do obstáculo numa situação em que o USV não tem prioridade de acordo com a regra 15 do RIEAM para um t_{max} de 180.....	91

Figura 86 - Representação da trajetória do USV e do obstáculo numa situação em que o USV tem prioridade de acordo com a regra 15 do RIEAM.....92

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros do algoritmo no caso sem obstáculos.....	66
Tabela 2 - Parâmetros de simulação no caso sem obstáculos.....	66
Tabela 3 - Caso 1 - Parâmetros do algoritmo.....	69
Tabela 4 - Caso 1 - Parâmetros de simulação	69
Tabela 5 - Caso 2 - Parâmetros do algoritmo.....	72
Tabela 6 - Caso 2 - Parâmetros de simulação	72
Tabela 7 - Caso 3 - Parâmetros do algoritmo.....	74
Tabela 8 - Caso 3 - Parâmetros de simulação	75
Tabela 9 - Caso 4 - Parâmetros do algoritmo.....	77
Tabela 10 - Caso 4 - Parâmetros de simulação.....	78
Tabela 11 - Regra 13 - Parâmetros do algoritmo	81
Tabela 12 - Regra 13 - Parâmetros de simulação.....	81
Tabela 13 - Regra 14 - Parâmetros do algoritmo	84
Tabela 14 - Regra 14 - Parâmetros de simulação.....	85
Tabela 15 - Regra 15 - Parâmetros do algoritmo	86
Tabela 16 - Regra 15 - Parâmetros de simulação.....	87
Tabela 17 - Regra 15 em situação de emergência - Parâmetros do algoritmo	92
Tabela 18 - Regra 15 em situação de emergência - Parâmetros de simulação.....	92

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

AC - *Adaptive Control*

AIS - *Automatic Identification System*

ARPA - *Automatic Radar Plotting Aid*

AUVs - *Autonomous underwater vehicles* - Veículos Autónomos Subaquáticos

BB - Bombordo

BC - *Behavior-based Control*

COLREGs - *Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea*

CPA - *Closest Point of Approach*

CTDs - *Conductivity Temperature and Depth*

DGPS - *Differential Global Positioning System*

DPSS - *Direction Priority Sequential Selection*

DSC - *Dynamic Surface Control*

EAs - *Evolutionary Algorithms*

EB - Estibordo

EDOs - Equações Diferenciais Ordinárias

ETA - *Estimated Time of Arrival*

FLC - *Fuzzy Logic Control*

GNC - *Guidance Navigation and Control*

GPS - *Global Positioning System*

IC - *Intelligent Control*

IMO - *International Maritime Organization*

IMUs - *Inertial Measurement Units*

INS - *Inertial Navigation System*

ISR - *Intelligence Surveillance and Reconnaissance* - Intel, Vigilância e Reconhecimento

IST - Instituto Superior Técnico

Lidar - *Light Detection and Ranging*

LVO - *Linear Velocity Obstacle*

MVFF - *Modified Virtual Force Field*

NLVO - *Non-Linear Velocity Obstacle*

OC - *Optimal Control*

OMI - Organização Marítima Internacional

PID - *Proportional Integral Derivative*

PSO - *Particle Swarm Optimisation*

PVO - *Probabilistic Velocity Obstacle*

RC - *Robust Control*

RIEAM - Regulamento Internacional Para Evitar Abalroamentos no Mar

RVO - *Reciprocal Velocity Obstacle*

TD-NLVO - *Time Discrete Non-linear Velocity Obstacle*

USVs - *Unmanned Surface Vehicles*

VO - Velocity Obstacles

1. Introdução

O oceano cobre cerca de dois terços da Terra tendo um grande efeito na existência futura dos seres vivos. Uma vez que a nossa atenção tem sido focada principalmente em questões terrestres e atmosféricas, não temos sido capazes de explorar todo o oceano e os seus recursos (Yuh et al., 2011). No entanto, o interesse mundial tem vindo a aumentar no que diz respeito a assuntos comerciais, científicos e militares relacionados com os oceanos e as águas pouco profundas. A procura pelo desenvolvimento de veículos de superfície não tripulados com capacidades avançadas de governo, navegação e controlo (*Guidance, Navigation, and Control - GNC*) tem vindo sofrer um enorme crescimento (Z. Liu et al., 2016).

Os *Unmanned Surface Vehicles* (USVs) são veículos que operam na superfície da água, autonomamente, sem qualquer tipo de tripulação. Estes podem ser veículos pequenos que permitem ocultar facilmente a sua silhueta, possuem alta mobilidade, têm um baixo custo, comparativamente aos gastos na compra e manutenção de um navio e da sua guarnição, e podem ser controlados remotamente por um operador localizado em terra ou a bordo de outra embarcação (Wang et al., 2018).

Estas embarcações podem ser utilizadas em muitas aplicações marinhas, incluindo oceanografia, deteção remota, monitorização ambiental, topografia, entrega de armas, operações de *Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance* (ISR), cartografia e navegação, juntamente com o fornecimento de apoio de comunicação para veículos subaquáticos não tripulados e investigação robótica em geral (Naeem et al., 2012; Tang et al., 2015).

O progresso futuro dos USVs depende do desenvolvimento de uma autonomia total, uma vez que o ser humano é o principal fator para a causa de acidentes marítimos. Assim, de modo a diminuir e/ou eliminar esse fator, tem-se vindo a desenvolver veículos autónomos que encontram soluções para evitar as colisões e substituem o ser humano na prevenção das mesmas (Huang et al., 2020). Estas soluções permitirão aos USVs trabalhar em qualquer ambiente não estruturado ou imprevisível, sem intervenção humana. Para este fim torna-se indispensável a criação de algoritmos, capazes de satisfazer todos os critérios

necessários para que a utilização dos USVs seja eficiente, eficaz e segura para todos aqueles que utilizam o mar.

Nos últimos anos, os avanços tecnológicos têm vindo a aumentar significativamente as capacidades destas embarcações, de modo que os cenários em que operam já incluem ambientes de tráfico marítimo denso. Assim sendo, uma vez que os veículos autónomos operam lado a lado com os veículos tripulados e não tripulados, estes devem ser capazes de evitar as outras embarcações em segurança (Kuwata et al., 2014). Na navegação marítima os navios devem obedecer ao Regulamento Internacional Para Evitar Abalroamentos no Mar (RIEAM) definido pela Organização Marítima Internacional (OMI) em 1972. Na presente dissertação propõe-se o desenvolvimento de um algoritmo pronto a ser implementado num USV, capaz de evitar colisões autonomamente e respeitando a regras do RIEAM, numa variedade de ambientes marítimos desordenados, sem supervisão humana e em qualquer tipo de situação.

Na verdade, já existem alguns algoritmos capazes de evitar obstáculos e de cumprir com o RIEAM. No artigo escrito por Kuwata et al. (2014), é proposto e testado, envolvendo até quatro embarcações, um algoritmo que cumpre com os requisitos anteriormente referidos. Este algoritmo baseia-se no método que recorre ao uso do *Velocity Obstacles* (VO), isto é, cria obstáculos em forma de cones no espaço de velocidade que, de acordo com o RIEAM indicam o bordo pelo qual o veículo deve passar durante as manobras para se desviar. Este artigo serve como base para o desenvolvimento da presente dissertação, uma vez que é um algoritmo simples e com resultados bastante satisfatórios. A adição de algumas regras do RIEAM, a criação de uma área proibida baseada em seis pontos, a consideração das limitações dinâmicas do navio, como por exemplo a velocidade máxima, a taxa de guinada e a aceleração máxima, o desenvolvimento de algoritmo, para que em situações de emergência seja capaz de evitar tudo o que são obstáculos, são alguns dos aspetos abordados na presente dissertação.

A presente tese está dividida em 6 capítulos, sendo que no primeiro é feita uma introdução sobre o trabalho e os objetivos do mesmo. No segundo capítulo é

apresentado uma contextualização teórica sobre o que é o RIEAM e o porquê de ser implementado nos veículos autônomos, é abordado também o que são os USVs, a sua constituição, quais as suas missões e aplicabilidade. Nesse mesmo capítulo é ainda feita uma descrição mais detalhada sobre o sistema GNC. No terceiro capítulo, intitulado como estado da arte, são reunidos e analisados os principais algoritmos para evitar obstáculos, fazendo uma distinção daqueles que cumprem com o RIEAM. No quarto capítulo é explicado pormenorizadamente o algoritmo desenvolvido, baseado no VO, e descrito para cada situação específica do RIEAM, com recurso a gráficos. No quinto capítulo são apresentados e descritos os resultados obtidos através das simulações realizadas pelo algoritmo. Por fim, no sexto capítulo são apresentadas as conclusões finais relativas ao algoritmo desenvolvido.

2. Enquadramento teórico

Neste capítulo, é feita uma contextualização das principais regras do RIEAM onde são abordadas as situações em que cada uma das presentes regras deve ser aplicada, visando garantir a segurança da navegação marítima. Além disso, é discutido ainda o conceito de USV, onde são mostrados alguns exemplos com o intuito de ilustrar melhor este tipo de embarcação. A sua constituição, as diferentes missões que podem ser desempenhadas por estas embarcações autónomas, os sensores utilizados para recolha de dados, tanto a nível das missões realizadas como, no auxílio da navegação, a dinâmica do seu funcionamento, o sistema GNC são alguns dos aspetos também abordados neste capítulo. Assim, é apresentado um panorama que abrange tanto as suas características como o seu funcionamento, ressaltando a sua importância nas mais diversas aplicações marítimas.

2.1 RIEAM

O Regulamento Internacional Para Evitar Abalroamentos no Mar, em inglês, *Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, (COLREGs)* definido pela *International Maritime Organization (IMO)* em 1972, foi criado a fim de manter um nível elevado de segurança no mar, sendo que o cumprimento das regras presentes no regulamento supramencionado abrange todos os navios que naveguem em alto mar e em todas as águas que com ele tenham comunicação e sejam praticáveis pela navegação marítima (International Maritime Organization, 2019).

Segundo Campbell et al. (2014), recentes estatísticas mostram que 60% dos incidentes no mar são causados por colisões e 56% dessas colisões são causadas por

violações do RIEAM. Assim, tendo em conta a definição de navio¹ presente no RIEAM pode-se concluir que também os USV são considerados navios. Apesar de não existir nenhuma lei ou regulamento que seja referente aos USVs estes devem cumprir com o regulamento anteriormente referido, uma vez que, se este não for cumprido corretamente, as manobras executadas podem gerar confusão ou até mesmo consequências catastróficas (Wang et al., 2018). Deste modo, torna-se imprescindível que, tanto os USVs como os navios tripulados, cumpram com as regras estabelecidas.

Um dos principais desafios a ser desenvolvido nos USVs consiste no aumento da sua autonomia, quer a nível da deteção de obstáculos, quer a nível da realização de manobras com o mínimo ou nenhum controlo humano (Wang et al., 2018, p. 2) dado que, segundo Zhang (2015) 75-96% dos acidentes marítimos são causados por falhas humanas. Assim, um dos métodos para aumentar a segurança marítima consiste no aumento e desenvolvimento da inteligência da navegação e da autonomia do USV.

Para integrar o RIEAM nos algoritmos de navegação e controlo dos USVs é necessário dividir as situações de colisão mais comuns em três comportamentos diferentes: ultrapassagem, situação de roda a roda e rumos cruzados, respetivamente, regras 13, 14 e 15. Para cada uma das situações anteriormente mencionadas o RIEAM sugere as manobras específicas para cada caso. Pretende-se assim, que os USVs cumpram com as manobras de prevenção dos obstáculos durante toda a sua operação, de modo a não interferir, nem impedir a navegação de outras embarcações.

¹ Navio - designa todo o veículo aquático de qualquer natureza, incluindo os veículos sem imersão e os hidroaviões, utilizado ou suscetível de ser utilizado como meio de transporte sobre a água (Instituto Hidrográfico, 2007)

Em particular, de acordo com o subparágrafo (a) (ii) da regra 17² do RIEAM, os USVs devem tomar medidas para evitar a colisão autonomamente, assim que ficar claro para este, que a embarcação obrigada a se desviar do caminho do outro navio não está a manobrar nem a tomar as medidas adequadas. Segundo Wang et al.(2018) as principais regras de prevenção de colisão baseadas no RIEAM que devem ser aplicadas aos USVs são das seguintes :

- Regra 13 (Navio que alcança): Qualquer navio que alcance outro deve afastar-se do caminho deste último realizando uma manobra apropriada, seja para bombordo ou para estibordo, de modo que não obrigue o navio alcançado a manobrar (Instituto Hidrográfico, 2007).



Figura 1 - Regra 13 do RIEAM (Wang et al., 2018)

- Regra 14 (Navios que se aproximam de roda a roda): “Quando dois navios de propulsão mecânica se aproximam um do outro de roda a roda, ou quase de roda a roda, de modo a haver risco de abalroamento, deverão guinar ambos para estibordo por forma a passarem por bombordo um do outro”(Instituto Hidrográfico, 2007).

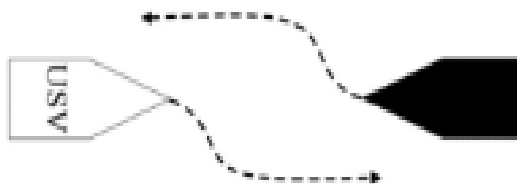


Figura 2 - Regra 14 do RIEAM (Wang et al., 2018)

² Manobra do navio com prioridade – “contudo, este último pode manobrar a fim de evitar o abalroamento unicamente com a sua manobra, logo que lhe pareça evidente que o navio que tem obrigação de se afastar do seu caminho não efetua a manobra apropriada prescrita nestas Regras” (Instituto Hidrográfico, 2007).

- Regra 15 (Navios em rumo cruzado): “Quando dois navios de propulsão mecânica navegam em rumos que se cruzam, de tal forma que exista risco de abalroamento, o navio que vê o outro por estibordo deve afastar-se do caminho deste e, se as circunstâncias o permitirem, evitar cortar-lhe a proa”(Instituto Hidrográfico, 2007).

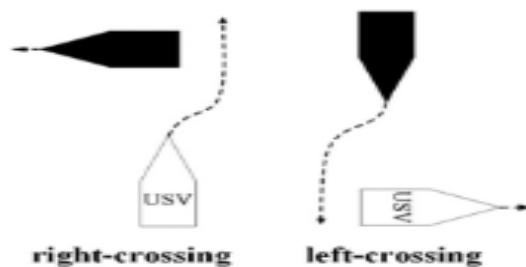


Figura 3 - Regra 15 do RIEAM (Wang et al., 2018)

- Regra 16 (Manobra do navio sem prioridade): “Todo o navio obrigado a deixar livre o caminho doutro deverá, tanto quanto possível, manobrar com a antecedência necessária e francamente, de modo a manter-se suficientemente afastado” (Instituto Hidrográfico, 2007).

- Regra 17 (Manobra do navio com prioridade): “Quando um navio, de acordo com qualquer das presentes regras, deva desviar-se do caminho de outro, este último deve manter o rumo e a velocidade” (Instituto Hidrográfico, 2007).

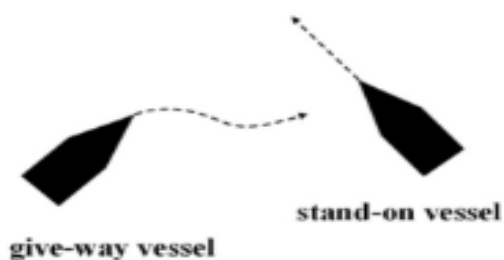


Figura 4 - Regra 16 e 17 do RIEAM (Wang et al., 2018)

- Regra 18 (responsabilidades recíprocas dos navios): é estabelecido que os navios de propulsão mecânica³ devem afastar-se do caminho de navios

³ Navio de propulsão mecânica - designa todo o navio movido por máquina (Instituto Hidrográfico, 2007).

desgovernados⁴, navios com capacidade de manobra reduzida⁵, navio em faina de pesca⁶ e à vela⁷, enquanto os navios à vela devem afastar-se do caminho de navios desgovernados, com capacidade de manobra reduzida e em faina de pesca. Além disso, os navios em faina de pesca, quando em movimento, devem, na medida do possível, afastar-se do caminho de navios desgovernados e com capacidade de manobra reduzida (Instituto Hidrográfico, 2007).

2.2 USVs

Os veículos de superfície autónomos são embarcações marítimas que podem executar múltiplas tarefas numa variedade de ambientes marinhos sem supervisão humana.

Liu et al. (2016) demonstraram que os USVs possuem um amplo espectro de possíveis aplicações desde:

- Pesquisa científica, onde podem ser utilizados para levantamentos batimétricos, investigação de atividades oceânicas, trabalhos cooperativos entre veículos aéreos, terrestres, de superfície ou subaquáticos, ou até mesmo como plataformas experimentais para testar o design do casco a ser aplicado num navio, equipamentos de comunicação e sensores, sistemas de propulsão e exploração, bem como sistemas de controlo. Desta forma oferecem um ambiente controlado para avaliar e aprimorar diversos aspetos tecnológicos, visando o desenvolvimento de soluções mais eficientes e avançadas.

⁴ Navio desgovernado - designa todo o navio que, por circunstâncias excecionais, não está em condições de poder manobrar de acordo com as presentes Regras e não pode, portanto, afastar-se do caminho doutro navio (Instituto Hidrográfico, 2007).

⁵ Navio com capacidade de manobra reduzida - designa todo o navio cuja capacidade de manobrar em conformidade com as presentes Regras está limitada pela natureza dos seus trabalhos e que não pode, por conseguinte, afastar-se do caminho doutro navio (Instituto Hidrográfico, 2007).

⁶ Navio em faina de pesca - designa todo o navio que esteja a pescar com redes, linhas, arrasto ou outras artes de pesca que reduzam a sua capacidade de manobra. Esta expressão não inclui os navios pescando com linhas a reboque (corripo) ou outras artes de pesca, que não lhe reduzam a sua capacidade de manobra (Instituto Hidrográfico, 2007).

⁷ Navio à vela - designa todo o navio navegando à vela, desde que a máquina propulsora, se existir, não esteja a ser utilizada (Instituto Hidrográfico, 2007).

- Missões ambientais, onde possuem um impacto significativo na monitorização ambiental, gestão de desastres como tsunamis, furacões e erupções de vulcões submarinos e combate à poluição marinha capazes de monitorizar áreas contaminadas e recolher dados sobre a qualidade da água. São ferramentas valiosas para preservar os ecossistemas marinhos e garantir a sustentabilidade dos recursos oceânicos.

- Exploração de recursos dos oceanos, no qual existe uma ampla gama de aplicações na indústria de exploração de petróleo, gás e minas, desde a identificação e avaliação de reservas até a construção e manutenção de infraestruturas offshore.

- Aplicações militares, onde desempenham um papel fundamental na vigilância, reconhecimento de portos e zonas costeiras, busca e salvamento, recolha de informação, contramedidas de minas, antiterrorismo e *force-protection*, plataformas de armamento remoto e como embarcações alvo. As suas capacidades de operar autonomamente em ambientes marítimos desafiadores e complexos torna os USVs instrumentos bastante importantes em diversas aplicações de defesa e segurança.

Para além das utilizações supramencionadas, ainda existe uma vasta área onde estes podem ser aplicados seja em transporte, retransmissores de comunicações ou até mesmo como plataformas de reabastecimento, tanto para veículos não tripulados como para veículos tripulados.

Na verdade, é importante destacar que os USVs possuem um conjunto de vantagens que vão para além das suas aplicações. Essas vantagens são fundamentais para compreender a importância e o valor das embarcações não tripuladas. Deste modo é importante salientá-las comparativamente a outras embarcações tripuladas (Z. Liu et al., 2016). Estas incluem:

- A realização de missões mais prolongadas e enfrentar ambientes com um grau de risco mais elevado e com maior autonomia.

- Custos de manutenção mais baixos e uma maior segurança a nível de pessoal. Uma vez que estes não possuem uma guarnição/tripulação a bordo, não são necessários alojamentos, nem as medidas de segurança necessárias para os tripulantes, fazendo com que os custos sejam mais reduzidos e a segurança operacional seja maior.

- A elevada manobrabilidade em águas pouco profundas devido ao seu peso mais reduzido e às suas dimensões mais compactas. Assim, em áreas com águas rasas, zonas costeiras ou ribeirinhas, em zonas onde embarcações maiores têm algumas dificuldades em passar devido ao seu calado⁸, os USV são uma mais-valia.

- Possuem uma maior capacidade de transportar carga útil e são capazes de efetuar uma monitorização e recolher amostras em águas mais profundas.

Deste modo, devido à sua capacidade de realizar missões mais longas, em ambientes perigosos, com baixos custos de manutenção, uma segurança operacional elevada, excelente manobrabilidade e somente com uma carga útil necessária faz com que os USVs sejam a escolha mais eficiente e eficaz dentro da vasta gama de aplicações anteriormente referida.

O desenvolvimento tecnológico está a conduzir os USVs para uma presença cada vez maior no meio naval. O progresso futuro destes depende do desenvolvimento de uma autonomia total, que permitirá aos USVs trabalhar em qualquer ambiente não estruturado ou imprevisível sem qualquer tipo de intervenção humana (Liu et al., 2016).

2.2.1 Alguns exemplos de USVs

Um exemplo da evolução neste âmbito é a conceção do ROAZ (Figura 5), um USV desenvolvido pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto (Martins et al., 2006). O ROAZ, um veículo autónomo de superfície criado para operar em rios,

⁸ Calado (*draught, draft*) é a altura da linha de água sobre a face inferior da quilha (Marinha Portuguesa, 1998).

estuários, bacias ou portos, ou seja, em zonas com as condições da água bastante calmas. Este veículo é capaz de transportar diversos sensores como sondas batimétricas, sonares de varrimento lateral, aparelhos *Conductivity, Temperature, and Depth* (CTDs), amostradores de água, entre outros, possibilitando assim uma realização eficiente em missões de monitorização ambiental. Por outro lado, também foi projetado com o objetivo de oferecer suporte às operações de um ou mais *Autonomous underwater vehicles* (AUVs) no auxílio para o seu lançamento e recuperação ou até atuando como elo de comunicação acústica entre os AUVs e uma base em terra.

Com o propósito de cumprir com os seus requisitos logísticos operacionais foram definidas limitações nas suas dimensões. Assim, o ROAZ apresenta-se como um USV pequeno, de modo a facilitar o seu transporte e a eliminar a possível utilização de um guincho, com um casco duplo, a fim de garantir uma acoplagem conveniente do AUV, caso necessário, e reduzir o seu volume, com uma estrutura em fibra de vidro, contribuindo para uma redução do seu peso.



Figura 5 - USV ROAZ (Martins et al., 2006)

O USV Springer (Figura 6) foi desenvolvido a fim de localizar poluentes e realizar pesquisas ambientais e hidrográficas em locais como rios, reservatórios, cursos de águas interiores e costeiras, preferencialmente em zonas onde existem águas rasas. A embarcação tem um formato de catamarã com 4 metros de comprimento e 2.3 metros de largura (Sonnenburg & Woolsey, 2013).



Figura 6 - USV Springer (Sonnenburg & Woolsey, 2013)

O Owl MK II (Figura 7) é um USV projetado para missões de reconhecimento, vigilância e transporte de carga. Este possui características que permitem com que seja mais rápido, furtivo e que não seja facilmente identificado, uma dessas particularidades é o seu casco idêntico a um jet-ski, no entanto este está modificado de forma a ter um perfil mais baixo e diminuir a sua silhueta. O Owl pode ser equipado com diferentes tipos de sensores, como sonares de varredura lateral e câmaras de vídeo, permitindo a realização de missões de monitorização e mapeamento subaquático. Foi desenvolvida ainda uma versão avançada destinada à segurança portuária, aumentando assim a sua aplicabilidade (Bertram, 2008).



Figura 7- USV Owl MK II (Bertram, 2008)

O DELFIM (Figura 8) é um pequeno catamarã de 3.5 metros desenvolvido no Instituto Superior Técnico (IST) como relé acústico entre embarcações submersas e embarcações de suporte, ou para a aquisição automática de dados marinhos. Este possui um sistema GNC que o permite navegar autonomamente num caminho, enquanto realiza a aquisição automática de dados. Existe ainda uma versão, denominada DELFIM ASC, que permite a transmissão sonar e de imagens de vídeo através de um canal de comunicações acústicas (Alves et al., 2006).



Figura 8 - USV DELFIM (Alves et al., 2006)

2.3 Constituição de um USV

Tal como foi exemplificado anteriormente, os USVs podem ter uma variedade de aspetos e funcionalidades bastante diversificadas consoante as missões e objetivos a que estes se destinam. No entanto, segundo Liu et al. (2016) existem elementos fundamentais que devem ser incumbidos a cada USV e que serão enumerados de seguida (Figura 9).

- O casco e os elementos estruturais auxiliares são componentes presentes em todas as embarcações autónomas. Estes podem ter diversos formatos desde: cascos insufláveis rígidos, *kayaks*, catamarãs, ou seja, casco duplo e trimarãs, casco triplo. Os diferentes modelos de design de casco são derivados das diferentes aplicações a que estes se destinam. Assim, é possível afirmar que os cascos insufláveis rígidos são adequados para aplicações militares, principalmente devido à sua maior resistência e capacidade de carga útil, os modelos de kayak e catamarã

são populares devido à sua montagem e carregamento bastante acessível fazendo com que o seu fabrico ou modificação seja fácil, a partir de veículos de superfície tripulados, o que as torna uma opção viável para diferentes aplicações. As embarcações do tipo catamarã e trimarã são as mais escolhidas, uma vez que estas oferecem uma maior estabilidade garantindo assim uma maior segurança durante as operações em condições adversas. Oferecem ainda uma capacidade de carga útil maior em comparação com os restantes designs de casco, isto é, podem transportar uma quantidade maior de equipamentos, sensores e cargas adicionais necessárias para as missões específicas.

- Os sistemas de comunicação desempenham um papel fundamental na operação com USVs. Este permite a comunicação sem fios entre estações em terra ou com outros veículos permitindo uma cooperação entre todos. Apesar da comunicação com o exterior ser extremamente importante, estes sistemas também permitem uma comunicação a bordo com ou sem fios entre uma variedade de sensores, atuadores e muitos outros equipamentos.

- Os sistemas de governo, navegação e controlo (GNC) são essenciais num USV, sendo responsáveis por processar as informações recebidas pelos sensores, tomar decisões e executar comandos para garantir um funcionamento eficiente e completamente seguro durante todas as suas missões. Este sistema é composto por computadores de bordo e softwares que efetuam a gestão de todo o sistema do USV, garantindo o governo, a navegação e o controlo adequado da embarcação. Com a contínua evolução tecnológica, os módulos GNC estão cada vez mais avançados, proporcionando uma maior precisão, autonomia e capacidade de adaptação em diversas condições e cenários operacionais.

- Os sistemas de propulsão e energia asseguram o controlo da velocidade e orientação do USV, através do leme e hélice ou jato de água, na maioria dos casos. No entanto, alguns catamarãs são controlados através de forças diferenciais, proveniente de dois motores independentes. Por outro lado, os USVs normalmente não possuem impulsores laterais, o que resulta num número de controladores

disponíveis inferior aos graus de liberdade de movimento do navio, representando um desafio para o controlo seguro e preciso.

- Equipamentos de recolha de dados são bastante relevantes para o desempenho dos USVs. As *Inertial measurement unit (IMUs)* e GPS são sensores geralmente usados em combinação com o sistema para garantir que o USV permaneça em boas condições de operação e que o seu desempenho seja melhorado. Outros equipamentos como câmaras, radares, sonares e outros tipos de sensores podem ser opcionalmente adotados, dependendo das missões.

- As estações de apoio desempenham um papel importante no GNC do USV, podendo estar localizadas numa instalação em terra, num veículo móvel ou num navio em alto mar. As missões são atribuídas por meio de sistemas de comunicação sem fios. Estas monitorizam em tempo real o estado do USV e dos seus equipamentos, enquanto para os USVs operados remotamente, envia comandos de controlo.

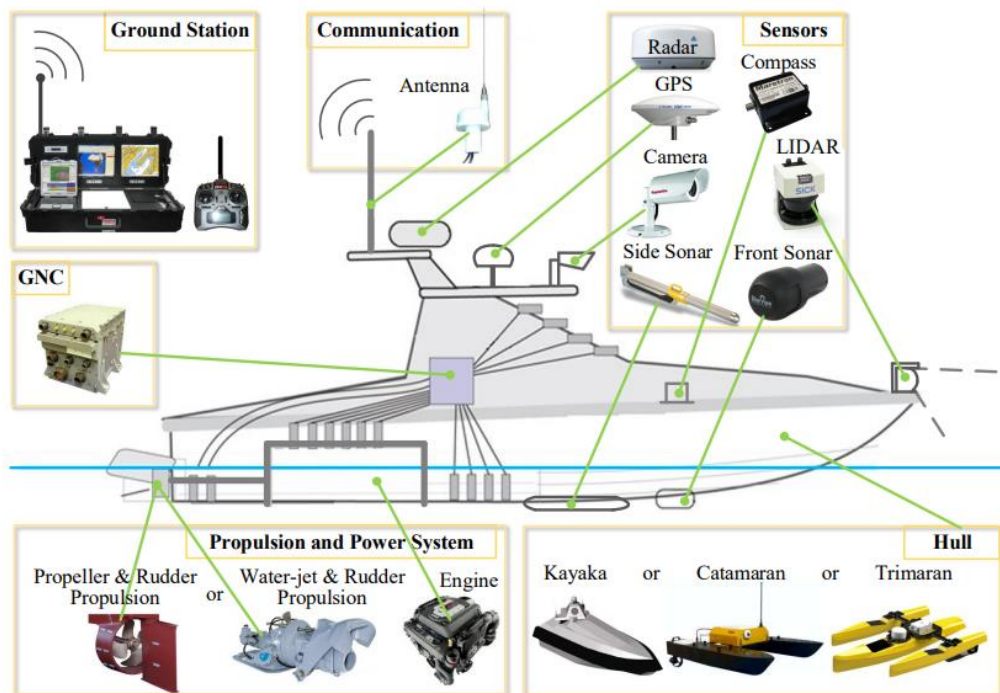


Figura 9 - Componentes essenciais ao USV (Z. Liu et al., 2016)

2.3.1 Sensores e Atuadores

Os sensores desempenham um papel fundamental no bom desempenho de um USV, uma vez que para que seja possível realizar missões em ambientes reais, principalmente com condições adversas, é necessário que estes possuam uma boa capacidade de detetar obstáculos, reconhecer e seguir alvos e mapear ambientes, tudo em tempo real. No entanto, nem todos os sensores são capazes de ser eficazes no meio em que atuam, visto que existem condições que afetam os ambientes marinhos tais como, perturbações ambientais (ventos, ondas e correntes), nevoeiro e o reflexo da água, que podem também afetar o desempenho da percepção do ambiente. Os sensores de percepção do ambiente podem ser geralmente agrupados em duas categorias: percepção passiva e de percepção ativa.

De uma forma geral, apenas a posição e a orientação dos USVs são fornecidas pelos sensores que estes dispõem. Assim, outras variáveis importantes como a velocidade e a aceleração são determinadas através da informação medida por esses mesmos sensores.

Dentro da vasta gama de sensores é possível resumi-los quanto às suas funções, vantagens e desvantagem no que diz respeito à sua aplicabilidade num USV.

- O *Global Positioning System* (GPS) é um aparelho que fornece a posição ao USV. Este possui vantagens relativamente ao seu tamanho reduzido, ao seu baixo custo e consumo de energia, contudo pode ser afetado por infraestruturas.

- IMU fornece informações relativamente a taxas angulares, velocidade linear, posição relativa e orientação. Deste modo, é possível detetar alterações relativas ao balanço, cabeceio e guinada do USV. Este apresenta as mesmas vantagens que o GPS, no entanto está sujeito à influência do magnetismo e a uma maior acumulação de erros.

- Os sensores de infravermelhos pode ser aplicado durante a noite ou em situações de nevoeiro e consome pouca energia. Quanto às suas desvantagens este

só pode ser utilizado em situações de má visibilidade ou durante a noite e é afetado pela distância e a interferência.

- Os sensores visuais para além da sua simplicidade e peso bastante reduzido têm uma grande resolução lateral e temporal. Contudo, a baixa resolução e precisão em profundidade, a difícil implementação em tempo real e a sua suscetibilidade às condições climatéricas representam desvantagens significativas.

- O sonar não apresenta restrições visuais e possui uma grande resolução e precisão a grandes profundidades. No entanto, o seu alcance é limitado em cada varrimento e é suscetível de ser influenciado pelo ruído da superfície.

- O *Light Detection and Ranging* (LIDAR) é um bom sensor para detetar obstáculos a curta distância e possui uma grande resolução e precisão a grandes profundidades. Contudo, pode possuir ruído no sensor e erros de calibração sendo que é bastante sensível ao ambiente e ao movimento do USV

- O Radar tem um grande alcance de deteção, é resistente às condições meteorológicas, uma vez que consegue fornecer imagem em diversas condições e em áreas amplas, e possui uma grande resolução e precisão a grandes profundidades. No que diz respeito as suas desvantagens este pode apresentar dados distorcidos devido a manobras bruscas, a sua capacidade de deteção de alvos pequenos e rápidos é limitada e é influenciado pelas ondas maiores e pela refletividade da água.

2.4 Sistema GNC

Quando se fala em dinâmica do USV refere-se ao comportamento e movimento do veículo no meio em que opera. O governo, a navegação e o controlo são elementos fundamentais para a sua operação. Estes subsistemas funcionam em

interação uns com os outros de modo que, a degradação de um deles pode influenciar o desempenho de todo o sistema (Figura 10).

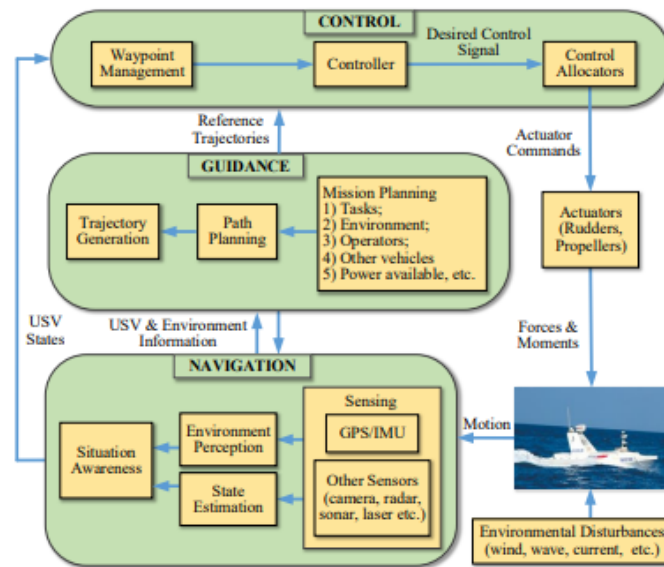


Figura 10 - Estrutura geral do USV quanto à orientação, navegação e controlo (Z. Liu et al., 2016)

2.4.1 Governo

De acordo com Huang et al. (2020) o sistema de governo é aplicado na deteção e resolução do conflito existente, sendo que simultaneamente, decide “quando” e “como” tomar as ações para o evitar.

Assim, o subsistema de governo é responsável por atualizar sistematicamente comandos de trajetória possíveis, capazes e ótimos, para o sistema de controlo, através de informações fornecidas pelo sistema de navegação, missões atribuídas, capacidades e condições ambientais. Deste modo, a partir do estado do USV, do panorama situacional e dos objetivos definidos, este calcula os *waypoints* ou trajetórias, favoráveis à navegação, que irão fornecer informação ao controlo. Este pode consistir em métodos globais, com eventual replaneamento periódico, e/ou métodos locais. A presente dissertação insere-se neste último método referido (Z. Liu et al., 2016).

Tal como foi referido anteriormente, o sistema de governo atualiza as trajetórias viáveis, sendo uma componente essencial para aumentar a autonomia do veículo. A necessidade que os USVs têm de realizar tarefas complexas em ambientes adversos, por vezes mal cartografados faz com que seja necessário que as capacidades de governo sejam avançadas e estejam em constante evolução. Planear a trajetória é um aspeto fundamental no sistema de governo, este apresenta uma variedade de técnicas eficientes e pode ser distinguido entre abordagens globais, locais e híbridas (Z. Liu et al., 2016).

Dentro das abordagens globais existem métodos de otimização e métodos de pesquisa heurística. Dos métodos de otimização fazem parte o método de otimização avançada que cria trajetórias ótimas considerando critérios como o nível de perigo, poupança de combustível, condições meteorológicas e controlo de missões; o método de um algoritmo evolutivo que utiliza inteligência artificial; o método do algoritmo genético, o mais utilizado para a criação de *waypoints*; e ainda o método baseado em programação genética, que protege o USV de embarcações perigosas. Contudo, a implementação destes métodos é limitada devido aos seus elevados custos computacionais, limites dinâmicos e missões. No que diz respeito aos métodos de pesquisa heurística, como o algoritmo A* que tem sido bastante utilizado para o planeamento de trajetórias. Este algoritmo baseado numa grelha é bastante eficiente na procura rápida de caminhos ótimos com uma velocidade reduzida. No entanto, possui algumas desvantagens relativamente à elevada necessidade de memória computacional e a realização de curvas fechadas, o que cria algumas dificuldades na sua implementação (Z. Liu et al., 2016).

Desde que este algoritmo foi criado tem sofrido bastantes alterações e evoluções por forma a combater as suas limitações, como encontrar caminhos ótimos num tempo limitado e procurar trajetórias seguras com recurso a cartas de navegação eletrónica. Outros métodos, como o algoritmo de *Dijkstra* e o *Direction Priority Sequential Selection*(DPSS), têm sido propostos para melhorar o desempenho e considerar fatores ambientais, como terreno e obstáculos (Z. Liu et al., 2016).

Quanto às abordagens locais existem três métodos principais o *Line-of-sight (LOS)*, campos potenciais e *velocity obstacle (VO)*. O método LOS, também utilizado na orientação de mísseis, pode ser aplicado a USVs. Embora existam versões modificadas para implementação em tempo real, como o *biased-LOS*, ainda existem desvantagens associadas a este método, como o potencial de ultrapassagem e a rigidez entre pontos de passagem (Campbell et al., 2014; Z. Liu et al., 2016; Naeem, Irwin, et al., 2012; Xia et al., 2020). No método de campos potenciais, são atribuídos objetivos a campos atraentes e obstáculos a campos repulsivos, fazendo com que os USVs se movam em direção aos campos para os quais são atraídos. Embora seja eficiente e tenha um baixo consumo computacional em tempo real, este método geralmente é utilizado apenas para planejamento de trajetórias locais, devido à possibilidade de guiar os USVs para locais em vez de objetivos (Z. Liu et al., 2016). Relativamente ao método *velocity obstacle (VO)*, foi a abordagem escolhida para aplicação no presente estudo devido à sua simplicidade e vantagens. Proposto por Fiorini e Shiller (1998) este algoritmo permite solucionar conflitos envolvendo múltiplos obstáculos, estáticos e/ou dinâmicos. O algoritmo recolhe informação sobre todas as velocidades que possam resultar em potenciais colisões, fazendo com que seja utilizado um conjunto de soluções composto por velocidades seguras, sem perigo de colisão (Huang et al., 2019)

Replanear a trajetória pode ser necessário, por forma a evitar as colisões com obstáculos inesperados, cenários que geralmente são ignorados pelos métodos mais básicos. Assim, existem algoritmos de governo, denominados métodos de replaneamento, que aborda a prevenção de colisões como um problema de planejamento de trajetória, procurando uma trajetória ótima, sem colisões num ambiente livre. O replaneamento só é acionado quando os critérios de colisão atingem determinados limites pré-definidos (Huang et al., 2020).

Os algoritmos híbridos consistem numa combinação dos diversos métodos abordados, para a criar uma solução mais completa e robusta (Huang et al., 2020). A ideia por trás dos algoritmos híbridos é aproveitar as vantagens de cada método e superar as suas limitações. Assim, estes podem lidar como uma ampla gama de cenários e fornecer uma resposta mais adequada para evitar colisões.

2.4.2 Navegação

O subsistema de navegação tem como objetivo identificar e/ou calcular o estado atual e futuro do USV relativamente à sua posição, orientação, velocidade, aceleração e o estado do meio circundante (a correntes oceânicas, velocidade do vento e entre outros dados), através de informação fornecida pelos sensores. Para além disso, também faculta outros elementos do panorama situacional, como por exemplo a posição e velocidade de outros navios ou outros obstáculos, a partir da informação fornecida pelos sensores apropriados (Figura 11).

A segurança e eficiência do controlo de USVs dependem significativamente de um sistema de navegação adequado, que inclui capacidades de deteção, estimativa de estado, perceção do ambiente e do panorama a fim de melhorar o desempenho do USV. Assim, são utilizados diversos equipamentos, sistemas e sensores, tais como:

- GPS é a combinação de satélites e comunicação sem fios. Possui diversas características importantes, tais como operar em todas as condições atmosféricas, fácil de operar, alta eficiência, cobertura global até 98%, rápido, entre outros. Este é essencial, pois fornece a própria posição e velocidade do USV (C. H. Chen et al., 2013). O *Differential Global Positioning System* (DGPS) é uma versão cara e melhorada do GPS, uma vez que usa estações de referência conhecidas para aplicar um fator de correção e fornecer precisão posicional dentro de 1–10 m (Campbell et al., 2012).

- Sistema de deteção tem como objetivos detetar obstáculos, embarcações, marcas em terra ou perto de costa. Este sistema é composto por sensores ativos como o Lidar, sonar e radar e/ou por sensores passivos como sensores visuais e infravermelhos. O *Light Detection and Ranging* (Lidar) utiliza pulsos de luz laser para medir distâncias precisas entre o sensor e os objetos no ambiente onde opera. Este é bastante útil devido à sua capacidade de obtenção de dados relativos à topografia do fundo, alturas das ondas, deteção de obstáculos e características da costa em tempo real, facilitando a operação dos USV em meios mais complexos. O sonar é o sensor mais utilizado a fim de obter informações e dados em ambientes subaquáticos. Este é utilizado para mapear o meio subaquático e detetar obstáculos

nele, no entanto quando montado à frente num USV permite localizar e detetar obstáculos à superfície. Contudo os dados fornecidos podem ser facilmente afetados por ruídos, principalmente se forem próximos da superfície e a interpretação das suas imagens é bastante complexa e exigente (Z. Liu et al., 2016). O radar é um sistema de extrema importância visto que permite obter informação atempada sobre a existência de contactos, especialmente em risco de colisão. Os sensores radar são utilizados com o auxílio do *Automatic Radar Plotting Aid* (ARPA) que fornece uma avaliação contínua do obstáculo. Este é capaz de medir e calcular a velocidade relativa e a proximidade de um objeto/navio relativamente ao USV. No entanto, o radar apresenta algumas limitações, uma vez que devido a manobras de viragem rápida, falsos alarmes ou até mesmo não conseguir detetar navios menores pode apresentar dados distorcidos. Deste modo, devido a esse tipo de limitações começou-se a desenvolver pesquisas especializadas em métodos de sensores visuais, como a visão monocular e estereoscópica para esse tipo de aplicação (Campbell et al., 2012). A visão monocular é um método em que é apenas utilizado uma câmara ou sensor para adquirir os dados visuais do ambiente, enquanto a visão estereoscópica utiliza duas câmaras ou sensores em locais diferentes, de modo a adquirir a profundidade e distância dos objetos com base nas diferenças entre as imagens capturadas. Os sensores infravermelhos possuem a vantagem de ser bastante úteis durante noite ou em condições de visibilidade reduzida.

- Por outro lado, existe ainda um sistema de identificação automática - *Automatic Identification System* (AIS), que transmite e recebe informação importante para a segurança marítima, aos navios próximos, caso estes também o possuam. Comparativamente com o radar este tem a vantagem de fornecer dados dinâmicos, ou seja, a posição, exatidão de posicionamento, rumo, proa, velocidade e taxa de guinada, fornece dados estáticos, no que diz respeito ao nome do navio, número internacional, indicativo de chamada, comprimento, boca e tipo de navio, e ainda fornece dados relacionados com a viagem, isto é, calado atual, tipo de carga, porto de destino e *Estimated Time of Arrival* (ETA). No entanto, a informação fornecida pelo AIS não é completamente fiável, uma vez que nada garante que os navios estejam a transmitir os dados corretos ou que os dados não possam estar

corrompidos. Deste modo, o AIS ajuda bastante no processo de identificação de tráfego marítimo com antecedência (Campbell et al., 2012; Instituto Hidrográfico, 2007).

- *Inertial Measurement Unit* (IMU) é um dispositivo que reúne vários sensores inerciais, como acelerômetros e giroscópios, num só. O sistema de navegação inercial (INS- *Inertial Navigation System*) é baseado na medição constante das informações fornecidas pelo IMU ou pelos próprios sensores inerciais tais como: acelerômetros, que medem a aceleração em várias direções, giroscópios, que medem a taxa de guinada, agulhas magnéticas que servem para determinar a orientação do veículo, entre outros. Estes sensores providenciam informações como a velocidade angular, a altitude, aceleração, mudanças de velocidade e rumo relativamente ao norte magnético. Estes tipos de sensores têm a vantagem de fornecer os dados anteriormente referidos sem necessidade de recorrer a informações externas, como por exemplo o GPS. No entanto podem sofrer pequenos erros nas suas medições que se vão acumulando ao longo do tempo, sendo por isso necessários combinar a navegação inercial com outros sistemas, como o GPS, a fim de melhorar a precisão do sistema de navegação do USV (Campbell et al., 2012; Z. Liu et al., 2016).

- Sensores ambientais como anemômetros, barômetros, termômetros que permitem conhecer a direção e intensidade do vento, a pressão atmosférica, a temperatura, a humidade, as correntes, a altura das ondas, são também bastante importantes para a segurança do USV (Campbell et al., 2012).

Deste modo, a combinação de sensores como o Lidar, o sonar, o GPS, o sistema de navegação inercial, sensores visuais e sensores ambientais permitem que o USV realize diversas tarefas e missões com precisão e segurança em ambientes complexos.

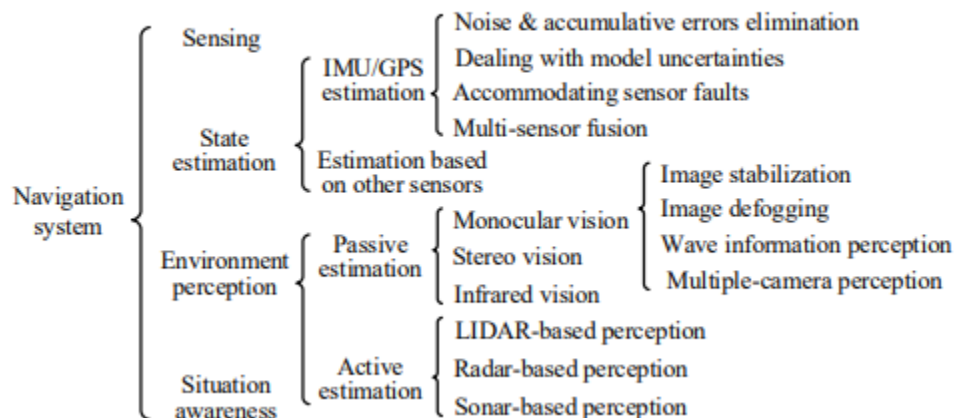


Figura 11 - Classificação do sistema de navegação de um USV com as respectivas funções e métodos(Z. Liu et al., 2016)

2.4.3 Controlo

O subsistema do controlo determina as forças e momentos a serem aplicados, através das informações fornecidas pelos outros subsistemas (Z. Liu et al., 2016), ou seja, recebe coordenadas de referência (*waypoints*) ou trajetórias e calcula os sinais de comando para os atuadores (propulsão, leme, etc), que garantem o seguimento da trajetória desejada. Este tem em conta o controlo da velocidade, posicionamento dinâmico, o controlo do rumo, o controlo da trajetória, o seguimento do alvo ou objetivo, as manobras a executar, a posição, os graus de liberdade do navio, entre outros. O processo de controlo varia ainda consoante o tipo de embarcação, da sua velocidade máxima disponível, a forma como é controlado, por leme ou por propulsores, do tipo de missão a que se destina, etc.

Diversos métodos de controlo têm sido desenvolvidos ao longo do tempo. Métodos como *adaptive control* (AC), *behavior-based control* (BC), *dynamic surface control* (DSC), *fuzzy logic control* (FLC), *robust control* (RC), *inteligente control* (IC), *optimal control* (OC), entre outros, têm contribuído para o desenvolvimento e melhoria no controlo dos USVs. Os métodos de *model-based*, acima apresentados, são simples de implementar e possuem uma baixa carga computacional, no entanto, são apresentados com base em modelos matemáticos, que podem ser difíceis de obter boa precisão na prática. Contudo, quase nenhum dos métodos tem sido capaz de sozinho ser totalmente eficaz e assim, deste modo, muitos dos métodos referidos

anteriormente são combinados entre si para melhorar o desempenho do sistema (Campbell et al., 2012; Z. Liu et al., 2016; Peng et al., 2023).

Embora se tenha investido bastante em metodologias cada vez mais avançadas, vários resultados operacionais têm mostrado que em diversas situações um simples controlador Proporcional Integral e Derivativo (PID) é suficiente para garantir um resultado e um desempenho bastante satisfatório, no que diz respeito ao controlo horizontal de um USV. Este sistema compara um valor medido, por exemplo proveniente de um sensor, com um valor desejado, ou seja, o alvo ou o objetivo a ser atingido. Com base nessa comparação, o PID ajusta o sinal de saída para um atuador, de forma a reduzir a diferença entre eles, o valor medido e o alvo, e assim corrigir o erro. (Caccia et al., 2008; Z. Liu et al., 2016). Contudo, apesar de apresentar um desempenho excepcional em muitas circunstâncias, um controlador PID pode por vezes, quando exposto a ambientes desconhecidos, estar longe de ser ideal (Peng et al., 2023)

De modo a criar um sistema de controlo eficaz é necessário um modelo padrão de USV que tenha em conta a cinemática e/ou cinética. No que diz respeito à cinemática, uma vez que um USV é uma embarcação não tripulada não é necessário ter em consideração o conforto dos passageiros/tripulação ou a estabilidade da carga, mas sim o cumprimento mais preciso possível da trajetória desejada. Deste modo, por forma a possuir uma maior simplicidade não são tidos em conta graus de liberdade como o balanço, o cabeceio nem a arfagem do navio, mas sim o avanço ou seguimento, a deriva e a guinada que são determinantes para o controlo do USV. (Do & Pan, 2009)

Um modelo cinemático empregue num USV sem a presença de perturbações (os graus de liberdade excluídos) pode ser expresso segundo a Equação 7.

$$\dot{\eta} = R(\psi)v \quad (1)$$

Onde, $\eta = [x, y, \psi]^T$ representa o vetor posição e orientação com coordenadas num sistema de referência fixo à Terra, $v = [u, v, r]^T$ representa o vetor de velocidade linear e angular (Z. Liu et al., 2016)

Por outro lado, é de extrema importância e crucial a criação de controladores avançados (Do & Pan, 2009). No que diz respeito à cinética, ou seja, se tivermos em conta as forças externas que influenciam o USV, é essencial criar modelos não só cinemáticos, mas também dinâmicos, uma vez que os modelos cinemáticos, não são suficientes para corrigir e cumprir com o completo movimento do USV, principalmente se existir um abatimento que pode ser significativo em velocidades mais baixas (Gadre et al., 2012). Assim, a seguinte equação representa os graus de liberdade de um USV.

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau + \tau E \quad (2)$$

Onde M representa a matriz inercial do sistema com a massa incluída; $C(v)$ constitui a força de coriolis e a matriz centrípeta, com a massa incluída; $D(v)$ representa a matriz de suavização hidrodinâmica; $g(\eta)$ são forças e momentos relativos à gravidade e impulsão; τE descreve as forças do ambiente e os momentos a atuar no veículo; e τ simboliza as forças de propulsão e momentos (Fossen, 1994).

3. Estado da Arte

3.1 *Obstacle Avoidance* para USVs

Como já referido, o foco do presente estudo insere-se no âmbito do algoritmo de governo do USV. Com base no apresentado no subcapítulo 2.4.1, referente ao Governo, esta secção descreverá os principais métodos e técnicas utilizados para evitar obstáculos. Também será realizada uma revisão dos trabalhos mais relevantes desenvolvidos por diversos investigadores na área, que empregam esses mesmos algoritmos.

Nos métodos globais ou de planeamento inserem-se os algoritmos evolutivos (EAs). Estes baseiam-se no comportamento evolutivo dos sistemas biológicos e utilizam a inteligência artificial para o aplicar. Uma das suas principais desvantagens resulta de ser uma técnica de planificação de trajetória através de *waypoints*, o que culmina numa rota não contínua e com movimentos bruscos, bem como, a possibilidade de ficar estagnado em mínimos locais, encontrando apenas uma solução quase ótima ou mesmo nenhuma solução. De forma geral, estes algoritmos são definidos por uma função de custo ou de aptidão, que deve ser otimizada de acordo com restrições específicas. Os algoritmos genéticos são um exemplo de algoritmos evolutivos, bastante comum (Campbell et al., 2012). Cao (2015) utilizou um algoritmo genético melhorado para planejar de forma rápida a trajetória do USV. Esta abordagem divide-se em cinco fases: codificação da trajetória, criação da população inicial, conceção da função de aptidão, conceção do operador evolutivo e decisão do mecanismo de seleção. Através da utilização paralela de multiprocessadores foram calculados os valores das diversas funções de aptidão, até se atingir o valor ótimo (Figura 12). Se o ambiente mudar, as funções de aptidão podem ser ajustadas por forma a satisfazer as necessidades.

Existem ainda outros métodos que se baseiam em algoritmos evolutivos, tais como, o *Particle Swarm Optimisation* (PSO), abordado por Li et al. (2006) e o *Ant Colony Optimisation*, aplicado por Zeng et al. (2009). Este último, aplica o algoritmo para procurar de forma rápida cada caminho ótimo local.

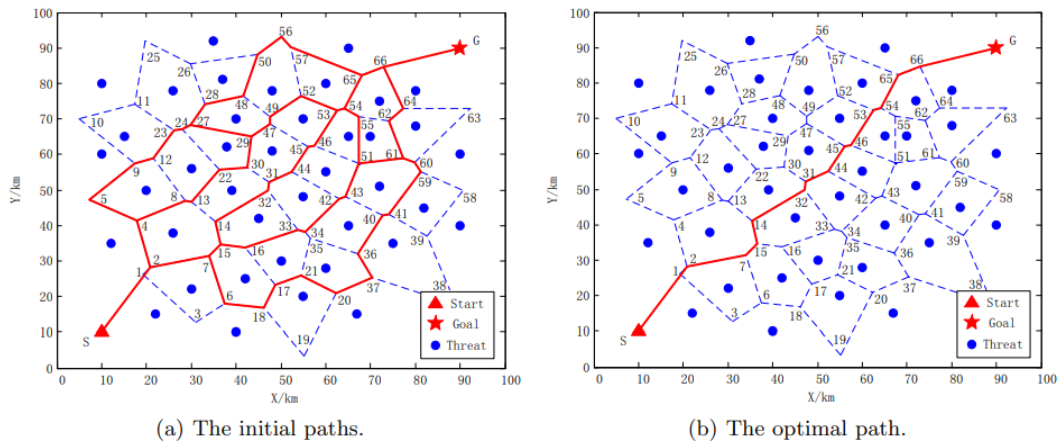


Figura 12 – Algoritmo genético melhorado (Cao, 2015)

Ainda nos métodos globais, encontram-se os métodos de pesquisa heurística. Estes algoritmos baseiam-se em técnicas de pesquisa em grade e funções de custo heurísticas, com recurso a informações conhecidas sobre o domínio ou ambiente do conflito, para a orientar a pesquisa de forma mais eficiente (Campbell et al., 2012). Um dos métodos de pesquisa heurística mais aplicados consiste no método A*. Larson et al. (2006) aplicou este algoritmo na pesquisa de um caminho ótimo, para obstáculos estacionários, num curto espaço de tempo. O algoritmo A* utiliza uma função de custo (Equação 3), que tem em conta o custo do caminho já percorrido, $g(n)$, até ao nó atual e o custo previsto do caminho até ao nó final, $h(n)$. Kim et al. (2013) propôs um planeamento de trajetória com curvatura segundo o método A*, para obter uma trajetória suave e contínua. Tanto o mapa de custos como a função foram adaptados para ambientes oceânicos, simulando a entrada e saída do USV no porto de Busan. O mapa de grade e o mapa de custos aplicados no presente estudo encontram-se na Figura 13.

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (3)$$

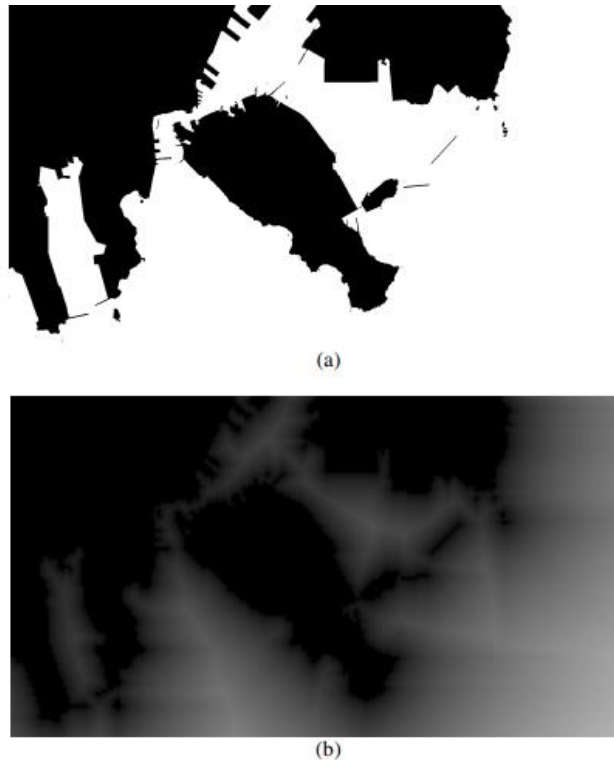


Figura 13 – Mapa de grelha e mapa de custos (Kim et al., 2013)

No campo dos métodos de planeamento de trajetória locais ou reativos, insere-se um dos métodos mais utilizados em USVs, a orientação por linha de vista, em inglês *Line-of-Sight* (LOS). O princípio do algoritmo baseia-se no comportamento de um vigia num navio, que orienta o USV para uma distância à frente do mesmo. Consiste em traçar uma linha reta (LOS) entre o USV e o ponto de referência que se pretende alcançar, representado pelas coordenadas $p(x_{LOS}, y_{LOS})$. À medida que o USV se aproxima do ponto de referência, o desvio do rumo é reduzido, permitindo que a trajetória desejada seja seguida com precisão. Caso exista algum obstáculo que intercete esta linha, significa que o USV não pode alcançar diretamente o destino sem colidir, necessitando de ajustar a sua trajetória (Figura 14) (Rymansaib et al., 2023).

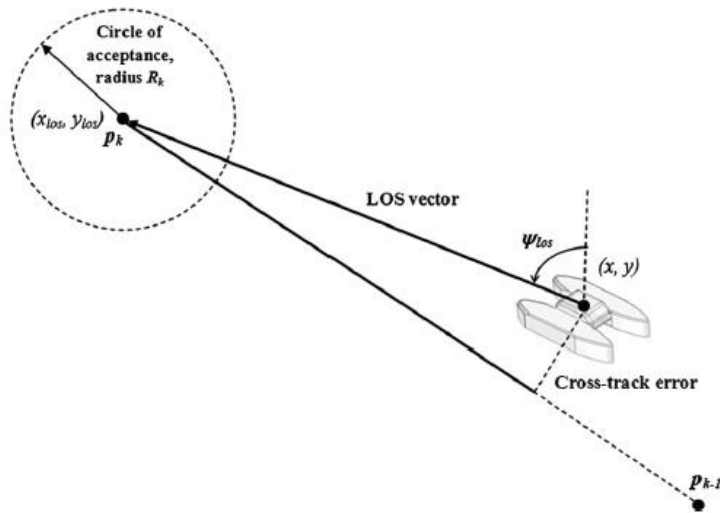


Figura 14 - Line of Sight (LOS) (Campbell et al., 2012)

Desa et al. (2007) aplicou o algoritmo LOS num pequeno veículo autónomo para deteção remota dos oceanos. Durante os testes, os autores denotaram que o algoritmo de governo, apesar de em simulação estabelecer trajetórias retas entre os waypoints, nas provas de mar essas trajetórias poderiam sofrer ligeiras alterações, com desvios de no máximo 5 m (Figura 15). Estes concluíram que são necessários algoritmos de governo mais sofisticados para alcançar um maior grau de precisão na trajetória do USV.

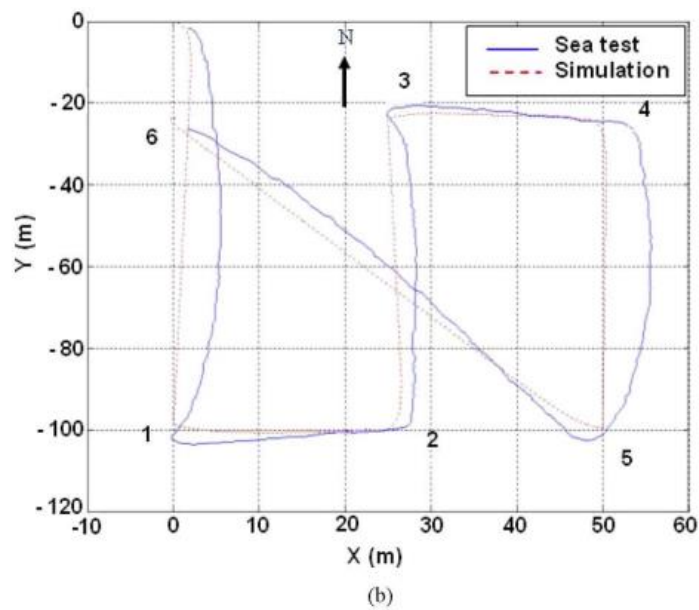


Figura 15 - Comparação gráfica Simulação vs. Provas de mar dos algoritmos de governo LOS (Desa et al., 2007)

Sutton et al. (2012) integraram o algoritmo LOS, num algoritmo de navegação por fusão de dados inovador. Este baseava-se no cálculo do ângulo LOS entre a posição atual do USV, medida com um GPS de bordo, e o próximo *waypoint*.

Os algoritmos de campos potenciais são outro dos métodos locais de governo. Este tem em consideração os obstáculos conhecidos, construindo uma representação do ambiente através de gradientes de potencial (Khatib, 1985). Um campo atrativo é atribuído ao *waypoint*, enquanto os obstáculos estão associados a campos repulsivos. Isto faz com que o USV seja atraído pelo objetivo e repellido pelos obstáculos, evitando a colisão (Figura 16). Uma das desvantagens está associada ao problema dos mínimos locais, sendo necessário aplicar técnicas de pesquisa *Depth-First* e *Best-First*, funções potenciais harmónicas ou estratégias baseadas na frente da onda (Z. Liu et al., 2016).

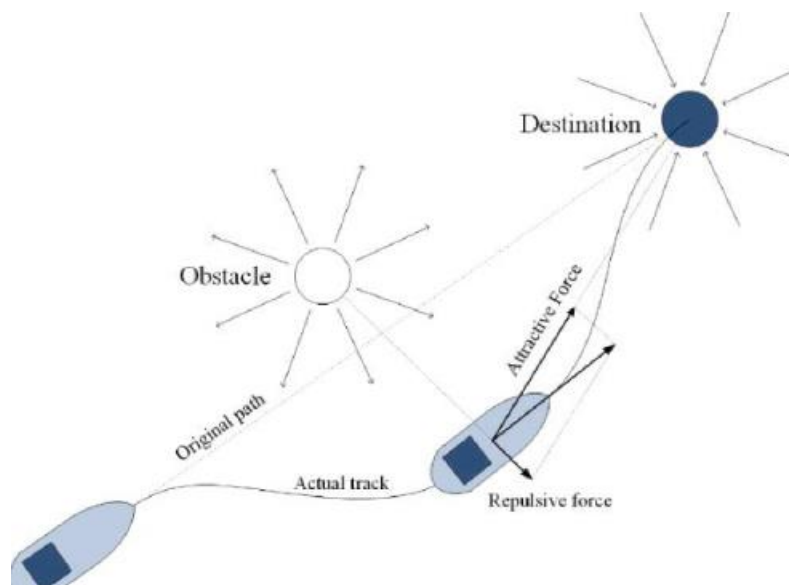


Figura 16 - Conceito básico do algoritmo de campos potenciais (Huang et al., 2020)

Ge & Cui (2002) propuseram um novo método de campo potencial para o planeamento de trajetória num ambiente dinâmico, em que o ponto alvo e os obstáculos estão em movimento. Neste trabalho foi também discutido o problema dos mínimos locais.

Soltan et al. (2009) utilizaram o algoritmo de campos potenciais, onde os obstáculos são delimitados por campos de elipses, correspondentes às soluções de uma classe de equações diferenciais ordinárias (EDOs).

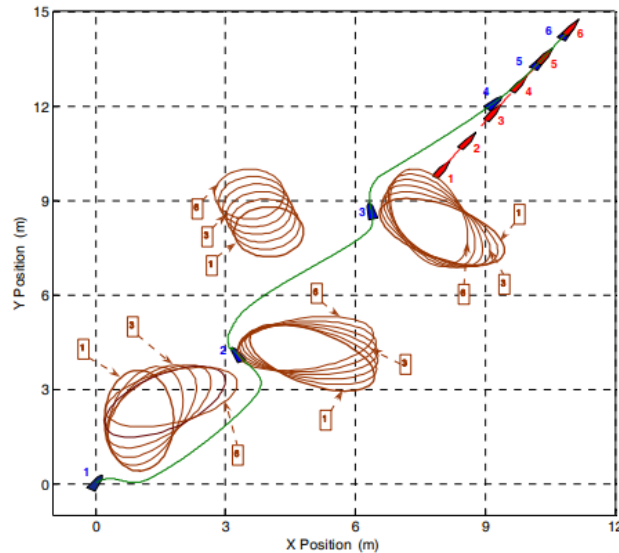


Figura 17 – Trajetória definida pelo USV com obstáculos dinâmicos (Soltan et al., 2009)

Embora tenham sido propostos diversos algoritmos inovadores, ainda existem desvantagens associadas aos métodos de Linha de Vista (LOS) e Campo Potencial, tais como, o efetuar uma ultrapassagem e a dificuldade em considerar as manobras futuras. Além disso, os USVs devem-se comportar de tal forma, que seja claro para outras embarcações próximas que ali navega um veículo, tornando-se necessário que qualquer manobra para se desviar de obstáculos seja conforme as regras de tráfego marítimo. No entanto, apenas alguns estudos conseguiram integrar com sucesso essas regras no processo de desvio de obstáculos, e poucas abordagens são capazes de lidar simultaneamente com obstáculos estáticos e dinâmicos (Wang et al., 2018).

Fazer um planejamento de um movimento de um USV em ambientes com tráfego denso, requer resolver simultaneamente problemas relativamente à trajetória ideal e à velocidade necessária para efetuar essa mesma trajetória evitando os obstáculos. No que diz respeito às dificuldades na obtenção da trajetória adequada, é necessário calcular qual o caminho livre desde o início até ao objetivo final, tornando-se assim, um problema de cinemática. Por outro lado, o cálculo da

velocidade é um problema dinâmico, uma vez que é necessário considerar a dinâmica do USV.

Por forma a ultrapassar os desafios supramencionados e criar um método mais intuitivo foram desenvolvidos diversos métodos, tal como referido anteriormente, o *Velocity Obstacle* (VO). Este consiste numa abordagem bem-sucedida para evitar colisões num ambiente dinâmico, baseado na velocidade. O algoritmo utiliza um círculo para representar um obstáculo. Posteriormente, é definida uma área de colisão, em forma de cone, denominada *velocity obstacle*, no espaço de velocidades, indicativa das velocidades proibidas para evitar colisões futuras. Ao manter o vetor de velocidade do USV fora dessa área, assegura-se que não ocorrerão colisões. As verificações no espaço de velocidade, permitem cálculos mais rápidos do VO e da trajetória, mesmo com velocidades elevadas. Inicialmente foi proposto por Fiorini & Shiller (1998), com o pressuposto de que o obstáculo mantém rumo e velocidade constante, sendo por isso também designado por *Linear Velocity Obstacle* (LVO). Este é dos algoritmos mais aplicados no planeamento de trajetórias, pelo que já sofreu inúmeras reformulações para evitar colisões em diferentes cenários, não só no âmbito naval. Coué et al. (2006) aplicaram o VO probabilístico (PVO), que considera a incerteza do movimento dos obstáculos, num carro experimental para evitar colisões com peões. Já o VO recíproco (RVO), proposto por Berg et al. (2011) elimina o movimento oscilatório dos obstáculos, tendo sido testado numa simulação com 1000 obstáculos, evitando a colisão com todos eles.

No ambiente marítimo também são inúmeras as contribuições deste algoritmo. Este método possui vantagens perante os demais, sendo que apresenta resultados semelhantes ao método tradicional de *Closest Point of Approach* (CPA) (Huang et al., 2019). Muitos métodos apresentados na literatura baseiam-se na mesma ideia do VO, apenas têm nomes diferentes, tais como, Setor de Perigo de Colisão (Pedersen et al., 2003) e CTPA (Lenart, 1983). Diversos autores propuseram novos algoritmos VO considerando diversos fatores, como o domínio do navio (Szlapczynski & Szlapczynska, 2017), isto é, uma representação espacial da área segura de manobra do navio, calculada de acordo com as suas características

operacionais, como, o raio de giração, manobrabilidade e velocidade. Huang et al. (2018) introduziu os algoritmos *Non-Linear VO* (NLVO) e PVO no ambiente marítimo em diversos cenários, comparando-os com os métodos tradicionais para evitar colisões, como o CPA. Chen et al. (2018) propôs um algoritmo *Time Discrete Non-linear Velocity Obstacle* (TD-NLVO) (Figura 18), baseado em dados históricos de AIS e numa análise de risco. Este em vez de determinar um potencial obstáculo em risco de colisão através de uma relação espaço-tempo, o potencial obstáculo é considerado como um par de navios em processo de encontro, onde o VO é violado pelo próprio navio num determinado período.

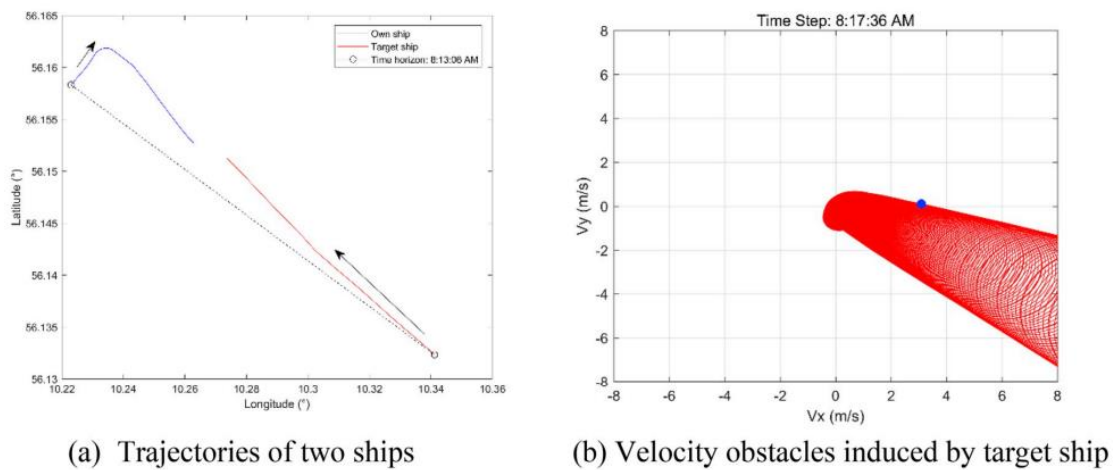


Figura 18 – Algoritmo TD-NLVO entre dois navios (P. Chen et al., 2018)

Outros métodos reativos para além dos já referidos foram propostos por diversos autores. Tang et al. (2012) propuseram um novo método reativo de desvio de obstáculos estáticos num campo próximo do USV. Este utiliza cálculos baseados numa janela dinâmica com as características cinéticas. As janelas do rumo e da velocidade de translação são obtidas através de um método “*divide and conquer*” que restringe os obstáculos estáticos. Permite assim que o USV evite obstáculos de forma eficiente sendo um algoritmo rápido e estável capaz de satisfazer a missão de um USV.

Tang et al. (2015) apresentaram um novo algoritmo reativo de desvio de obstáculos para USVs de alta velocidade, utilizando modelos de estado estacionário e velocidade de translação para o movimento e controlo das embarcações. Durante

a navegação e nas suas simulações reais, o movimento do USV depende do ângulo de orientação e da velocidade translacional. O algoritmo foi testado no mar e comprovou a sua eficácia em permitir uma navegação segura num USV de alta velocidade em ambientes marítimos reais.

Para além dos algoritmos já referidos, podem também ser utilizados algoritmos híbridos, como o proposto por Hwang et al.(2001). Este algoritmo utiliza um sistema híbrido para evitar colisões e manter a trajetória, através da combinação da *fuzzy-logic*, sistemas periciais e espaço de estados H^∞ . O sistema pericial *fuzzy* emprega uma base de conhecimentos de regras e factos para prevenir colisões, com o auxílio e aplicação do motor de inferência. Este motor de inferência simula as decisões tomadas pelo sistema pericial. O controlador de estado H^∞ guia o piloto automático do USV em segurança na trajetória determinada pelo sistema pericial *fuzzy*.

3.2 RIEAM

Por forma a conceber uma abordagem mais prática e completa, alguns dos algoritmos revistos no subcapítulo anterior, foram aprimorados e incluíram o RIEAM na sua abordagem para evitar obstáculos. O presente subcapítulo fornece uma revisão de alguns destes métodos.

Perera et al. (2010) propuseram uma abordagem baseada em *fuzzy-logic* para evitar obstáculos nos USVs, utilizando um processo de tomada de decisão, à luz das regras do RIEAM. Os sistemas baseados em *fuzzy-logic*, têm o objetivo de criar um ambiente favorável ao ser humano durante o processo de tomada de decisão. Neste método, diversos critérios e parâmetros provenientes da deteção de obstáculos e do controlo do USV foram combinados com regras *fuzzy* IF-THEN, num sistema de inferência *fuzzy*, por forma a se obter uma decisão relativa à alteração de velocidade e/ou de rumo do USV, com o objetivo de evitar colisões e garantir uma navegação segura e eficiente (Figura 19).

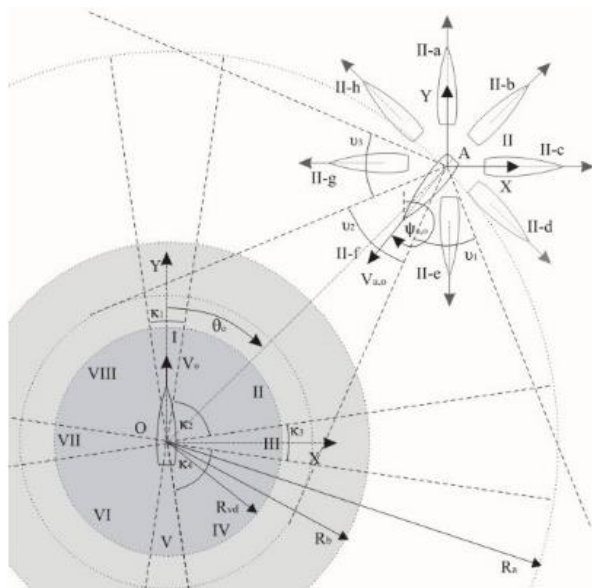


Figura 19 - Situação de Colisão Relativa em Navegação Oceânica (Perera et al., 2010)

Os métodos de planeamento de trajetória locais como os campos potenciais também foram utilizados numa abordagem conjunta com o RIEAM. Um exemplo é o algoritmo desenvolvido por Lee et al. (2004), no qual os autores propuseram um algoritmo de navegação autónoma, também baseado no RIEAM e com a aplicação de *fuzzy-logic* (Figura 20). No entanto, estes adotaram o método *Modified Virtual Force Field (MVFF)*, o qual permite lidar com obstáculos estáticos e/ou móveis. Este algoritmo incorpora dois parâmetros de comportamento, nomeadamente, α e β , onde o primeiro reflete o objetivo e vontade de aproximação do próximo *waypoint* e o segundo, a necessidade de manter uma determinada trajetória pré-determinada. O comportamento típico do navio nas zonas de “segurança” e “perigo” é implementado através da conceção das regras *fuzzy* que determinam α e β . Assim, o algoritmo permite que o USV navegue autonomamente, tomando decisões adaptativas com base nas informações obtidas pelos sensores, decisões essas que são guiadas pelos parâmetros enunciados, os quais são ajustados de acordo com as regras *fuzzy* definidas.

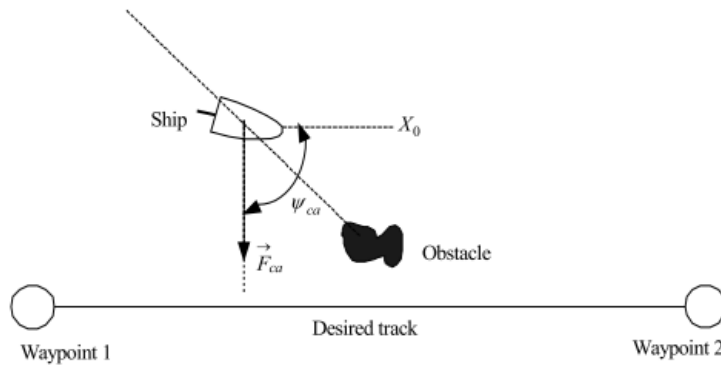


Figura 20 - O conceito do método proposto para evitar colisões (Lee et al., 2004).

No campo dos métodos de planeamento globais, Benjamin et al. (2006) aplicaram um método de otimização multiobjectivo, denominado programação por intervalos, numa estrutura de controlo baseada no comportamento para representar as regras do RIEAM. Estes sistemas controlam o USV através do resultado de um conjunto de módulos independentes e especializados, que trabalham conjuntamente para tomar as decisões adequadas para a embarcação. A Figura 21 ilustra o ciclo de controlo tradicional de deteção-planificação-ação, que é substituído pela nova abordagem.

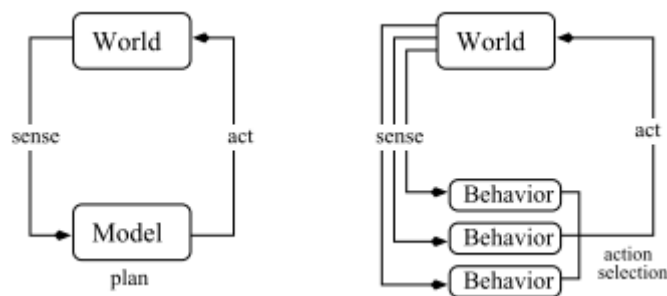


Figura 21 - Estrutura de controlo baseada no comportamento (Benjamin et al., 2006)

Colito (2007) utilizou algoritmos para evitar colisões implementados num sistema de planeamento evolutivo de trajetórias. Neste sistema, o planeador utiliza informações sobre contactos próximos e cartas náuticas digitais para planear trajetórias compatíveis. No caso do estudo em questão foram considerados cenários de “Roda-a-Roda”, como apresentado na Figura 22, e “Rumos Cruzados”. Um aspeto destacável é a capacidade do planeador de replanear dinamicamente as trajetórias, com base em informações ambientais atualizadas.

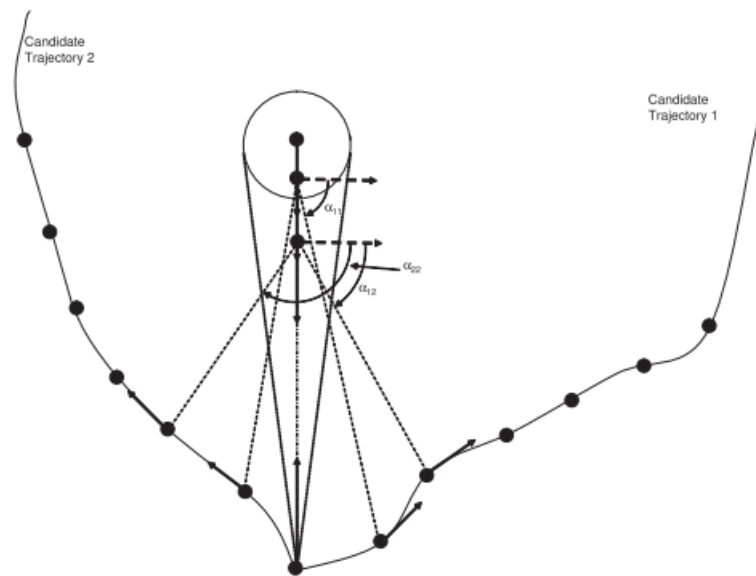


Figura 22 - Cenário de "Roda a Roda" (Colito, 2007)

Alguns autores incorporaram situações de emergência nos seus algoritmos para se adaptar a ambientes de navegação complexos e dinâmicos. O algoritmo desenvolvido por Lyu & Yin (2018) baseou-se num MVFF, visando abordar a questão da anticolisão em USVs com obstáculos estáticos, dinâmicos e também em situações de emergência. Para incorporar as regras do RIEAM no algoritmo desenvolvido, foram adicionados requisitos funcionais e de segurança adequados às forças virtuais correspondentes, de modo a garantir um comportamento em conformidade com as regras estabelecidas (Figura 23). A grande vantagem deste algoritmo reside na capacidade de planejar uma trajetória livre de colisões num tempo muito reduzido, da ordem dos milissegundos, sendo que este período é influenciado pelo número de obstáculos e pelas mudanças aleatórias de trajetória dos contactos envolvidos.

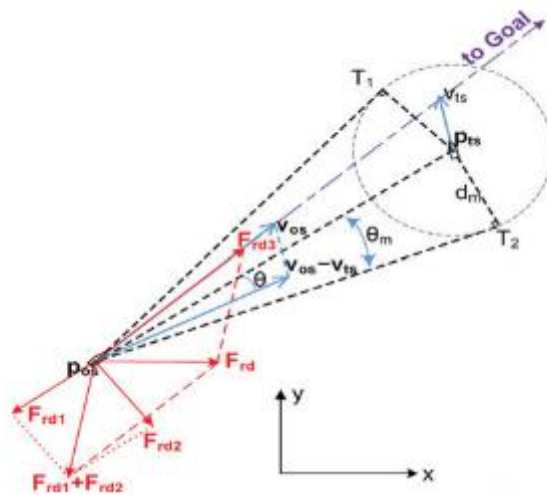


Figura 23 - Diagrama de forças virtuais para um contato dinâmico(Lyu & Yin, 2019)

Ainda no âmbito dos métodos reativos, Naeem et al. (2012) propuseram uma estratégia que combina a orientação por linha de vista, LOS, e um esquema de polarização manual num veículo de superfície não tripulado. Através de simulações, demonstraram que essa abordagem gera trajetórias viáveis, considerando os obstáculos estacionários e dinâmicos, bem como, as regras do RIEAM. Além disso, foi comparada com um algoritmo que executa o planeamento de trajetórias *offline* baseado em grelhas, adaptado para seguir as regras do RIEAM.

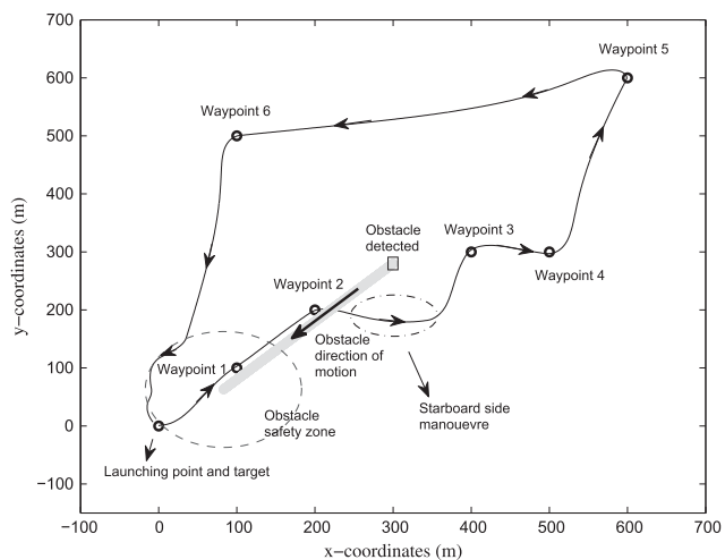


Figura 24 - Simulação de prevenção de colisões com base no COLREGs para um único obstáculo dinâmico utilizando a orientação LOS com polarização manual (Campbell et al., 2012)

Relativamente ao algoritmo *Velocity Obstacle* (VO), também este sofreu adaptações para o contexto marítimo, mais especificamente, a implementação de regras do RIEAM. Como já referido, este algoritmo permite evitar obstáculos móveis e estáticos, através da definição de um conjunto de restrições (VO) no espaço de velocidade do USV. Na presente abordagem, as regras do RIEAM são interpretadas como um conjunto adicional de restrições no espaço de velocidade. A primeira etapa do processo do algoritmo consiste na seleção da regra do RIEAM a aplicar, de acordo com o panorama situacional e com o CPA. Para prevenir que se tome uma nova decisão a cada instante, e, conseqüente, instabilidade no processo de decisão, foi introduzido um histórico na seleção de regras, para ter em conta manobras passadas e não apenas as condições atuais. Assim, aquando do início da manobra, de acordo com o RIEAM, existe um período mínimo a cumprir, por forma a que esta seja evidente para as outras embarcações. Por fim deve ser encontrado o melhor vetor velocidade (Kuwata et al., 2014).

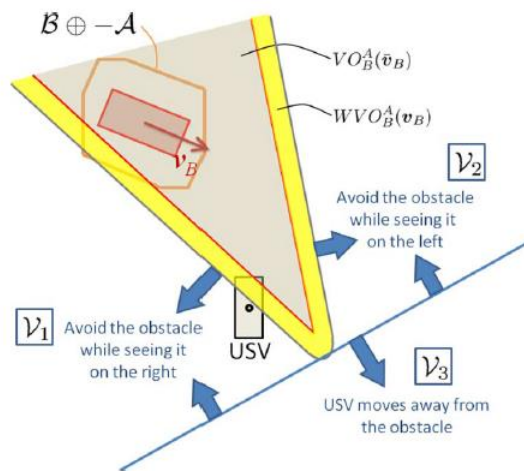


Figura 25 - Constrangimentos no espaço de velocidade impostos pelas regras do RIEAM (Kuwata et al., 2014)

4. Metodologia

Neste capítulo é feita uma descrição detalhada do algoritmo desenvolvido e proposto para a implementação nos USVs. Este descreve, numa primeira instância, um algoritmo baseado no *velocity obstacle* (Kuwata et al., 2014), para evitar os obstáculos, uma segunda parte contendo já as restrições necessárias para a evitar obstáculos segundo o RIEAM e por último em situações de emergência, um método para conseguir evitar todos os obstáculos, quando estes não cumprem com o RIEAM.

4.1. Algoritmo *Velocity Obstacles*

Nesta secção será abordado o conceito de *velocity obstacle* tanto em aplicações com um único obstáculo como com vários obstáculos. De modo a fazer uma representação adequada, realista, segura, e para simplificar a análise do problema na utilização do algoritmo, foi proposto uma conceção de todos os obstáculos e do USV em forma circular, restringindo assim o problema a um plano sem rotações. Esta restrição não afeta os resultados, uma vez que diversos polígonos podem ser aproximados por círculos. Assim, é possível criar um algoritmo mais simples, facilitando nos cálculos a realizar, isto, quando comparado com o somatório de Minkowski, representado na Figura 26. O somatório de Minkowski é uma operação matemática que combina formas geométricas para criar uma nova forma, sendo um método mais eficaz, neste caso, de representar os navios através de formas geométricas. A Figura 27 representa os obstáculos representados por círculos, tal como referido anteriormente. Deste modo, independentemente da forma de cada navio é possível considerar todas as posições admissíveis do objeto. Além disso, assumimos que os obstáculos se movem ao longo de posições arbitrarias em que a sua posição e velocidade são conhecidas e mensuráveis (Kuwata et al., 2014; Sonnenburg & Woolsey, 2013).

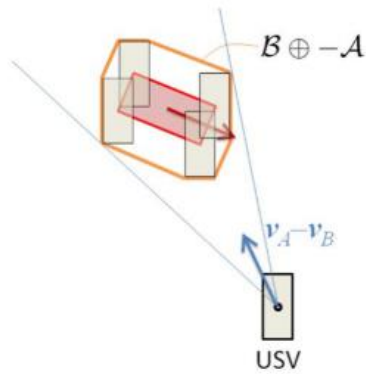


Figura 26 - Somatório de Minkowski (Kuwata et al., 2014)

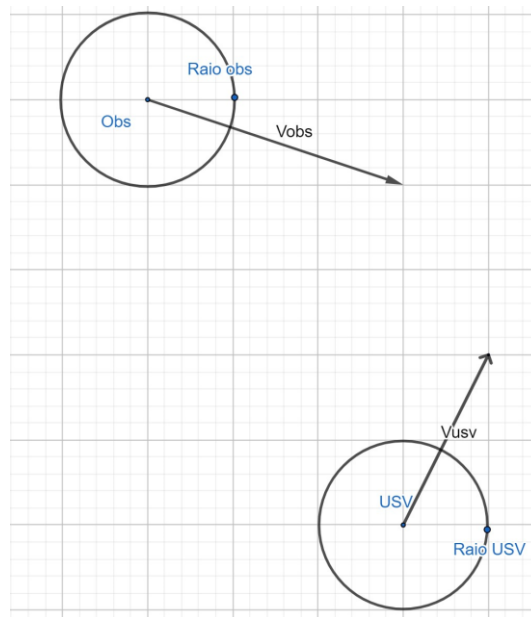


Figura 27 - Representação do USV e do Obstáculo em movimento

Começemos por definir o *USV* e o *Obs*, como representados na Figura 27 no instante $t=0$ com velocidades v_{usv} e v_{obs} e raios *raio usv* e *raio obs*. Para representar no espaço de forma simplificada, é necessário reduzir o círculo do USV a um ponto, também esse denominado *USV*, e aumentar o raio do círculo *Obs*, através da soma do *raio usv*. Por outras palavras, o círculo *Obs* passará a ter um raio resultante da soma do raio dos dois objetos, *USV* e *Obs*, tal como representado na Figura 28. O estado de cada objeto em movimento é representado pelo vetor velocidade unido ao centro de cada um (Fiorini & Shiller, 1998).

Para definir o *velocity obstacle* (VO) é necessário primeiro criar um cone, $CONE_{usv,obs}$ como o conjunto de velocidade relativas que levam à colisão, onde $V_{usv,obs}$ é a velocidade relativa da v_{usv} em relação à v_{obs} , $V_{usv,obs} = v_{usv} - v_{obs}$. Este setor definido, $CONE_{usv,obs}$, tem origem no ponto USV e é limitado pelas duas retas tangentes, *Reta f* e *Reta g*, ao círculo Obs , com a soma dos raios, como ilustrado Figura 28. Deste modo, qualquer velocidade relativa que esteja entre as duas tangentes, anteriormente referidas irá causar uma colisão entre o USV e o Obs . Por outro lado, qualquer velocidade relativa fora de $CONE_{usv,obs}$ garante que não há risco de colisão, desde que Obs mantenha a sua forma e velocidades atuais (Fiorini & Shiller, 1998).

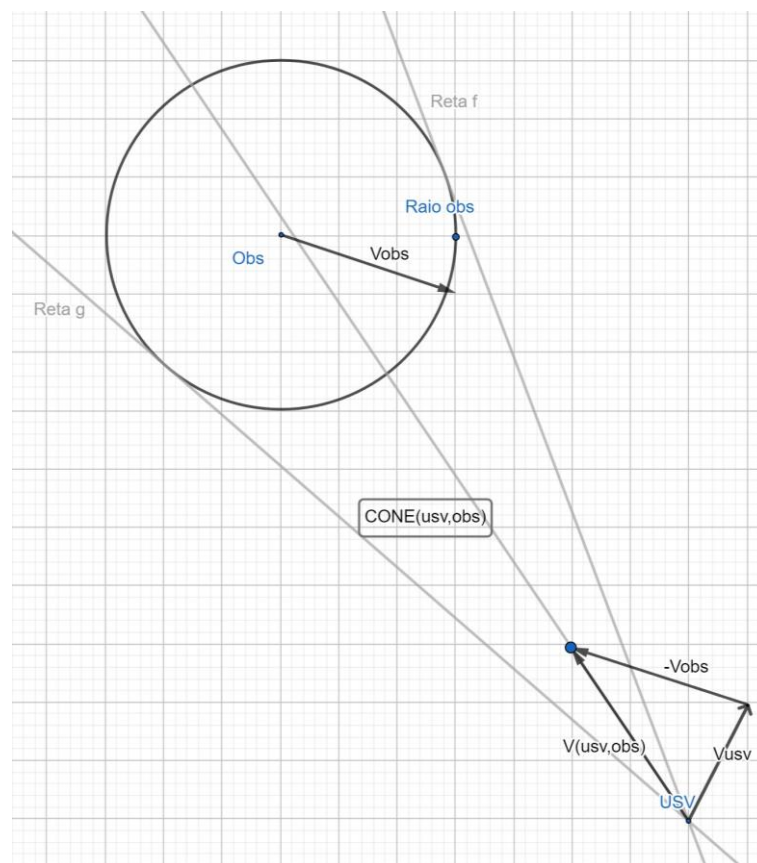


Figura 28 -Velocidade relativa $V_{usv,obs}$ e cone de colisão $CONE_{usv,obs}$

Cada obstáculo tem um cone de colisão específico, que permite que seja possível utilizar este método para evitar diversos obstáculos. Deste modo, para que seja mais fácil e simples de calcular as velocidades proibidas para o *USV*, sem recurso à velocidade relativa entre os diversos obstáculos, é necessário estabelecer uma condição equivalente para a velocidade absoluta do *USV*, v_{usv} . Esta condição é criada ao adicionar a velocidade do Obs, v_{obs} , a cada ponto do $CONE_{usv,obs}$, ou seja, faz-se uma translação do $CONE_{usv,obs}$ por v_{obs} , como mostrado na Figura 29. No entanto, caso o obstáculo seja estacionário, $v_{obs} = 0$, o seu VO será igual ao cone da velocidade relativa (Fiorini & Shiller, 1998). Deste modo podemos definir VO como:

$$VO = CONE_{usv,obs} \oplus v_{obs} \quad (4)$$

onde \oplus é o operador de soma vetorial de Minkowski.

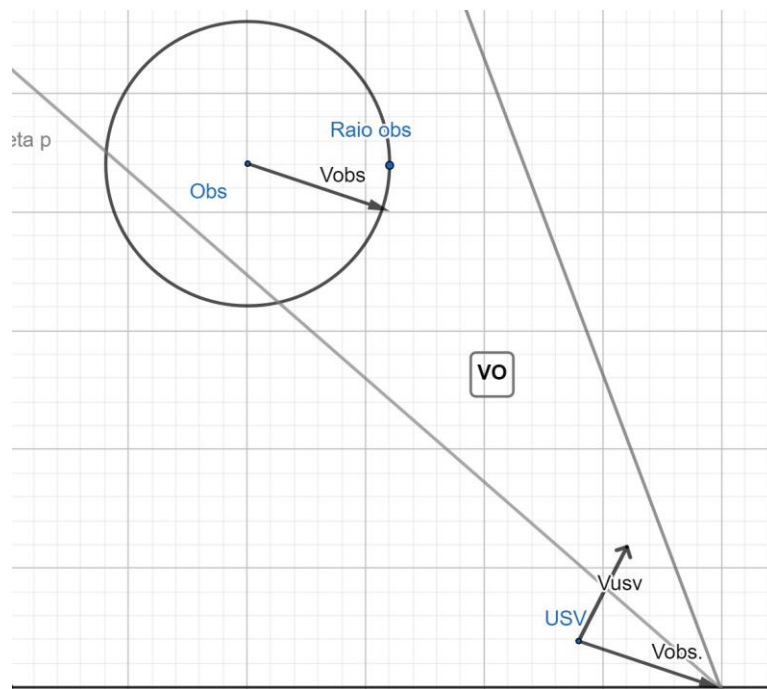


Figura 29 - Representação do VO

O VO é uma área restrita de valores de velocidades absolutas para o USV. Assim, ao selecionar uma v_{usv} fora do VO, evita-se uma colisão com *Obs* tal como representado na Figura 30. Deste modo é possível afirmar que:

$$USV(t) \cap Obs(t) = 0 \text{ se } v_{usv}(t) \notin VO(t). \quad (5)$$

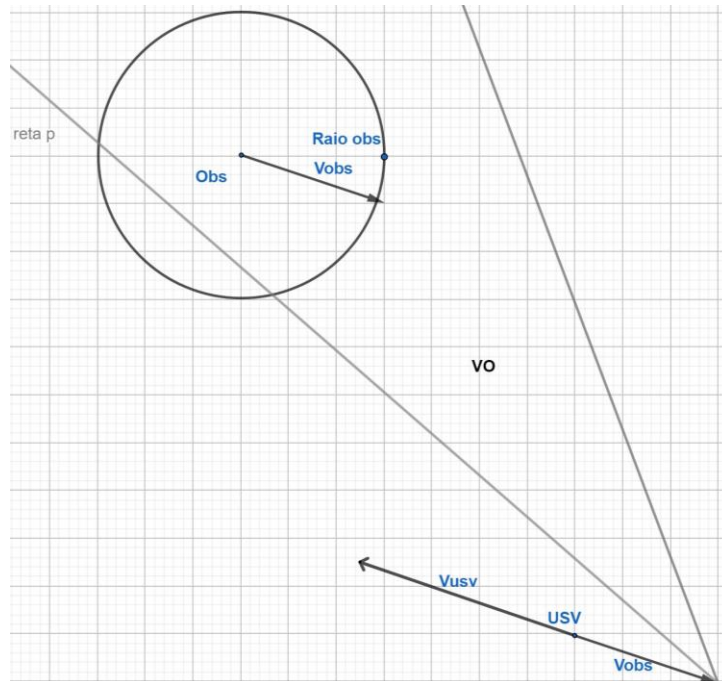


Figura 30 - Representação do VO sem risco de colisão

No entanto, não se deve confundir a representação gráfica dos navios com a representação gráfica do VO, sendo que este pertence ao espaço de velocidades. Deste modo, os cones de velocidade estão definidos num espaço de velocidade absoluta da velocidade do USV, apesar de serem calculados com base em considerações geométricas que têm em conta as posições relativas dos navios e respectivas velocidades. Assim, representar os navios num gráfico separado do espaço de velocidades ajuda a simplificar e a melhorar a visualização do gráfico. (Kuwata et al., 2014).

Para exemplificação são apresentados dois exemplos, um para um obstáculo estático e outro para um obstáculo em movimento. Na Figura 31 está representado

um obstáculo com $V_{obs} = 0$ fazendo com que o vértice do VO esteja situado na origem do referencial. Aí, uma vez que a v_{usv} se encontra dentro do VO existe perigo de colisão. Por outro lado, na Figura 32 o *Obs* já se encontra em movimento o que faz com que o VO se desloque segundo o vetor V_{obs} . Aqui, uma vez que a v_{usv} se encontra fora do VO não existe perigo de colisão.

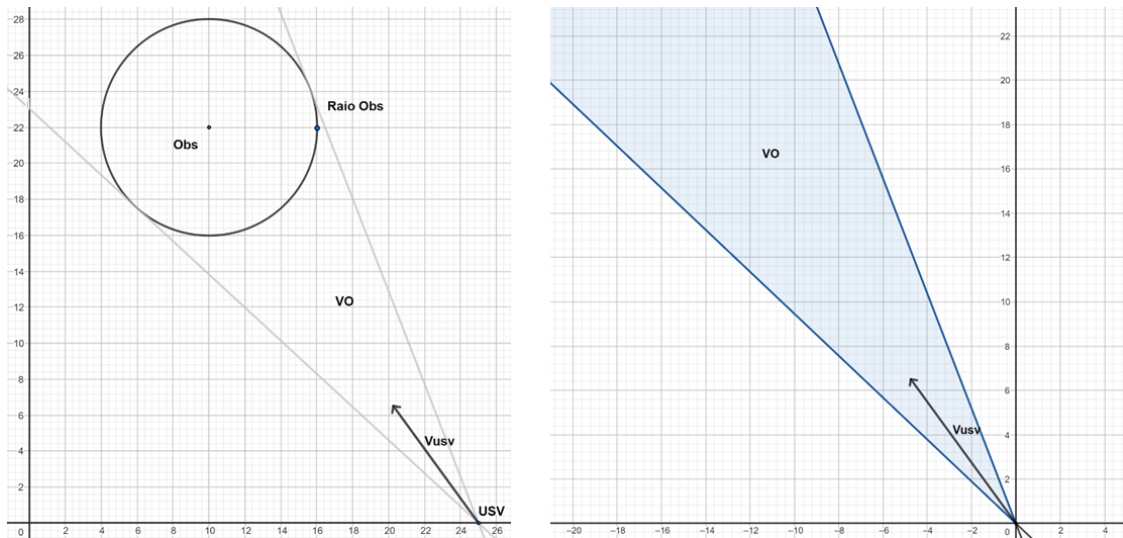


Figura 31 - Obstáculo estático: posições e velocidades (esquerda) e cone de velocidade correspondente (direita)

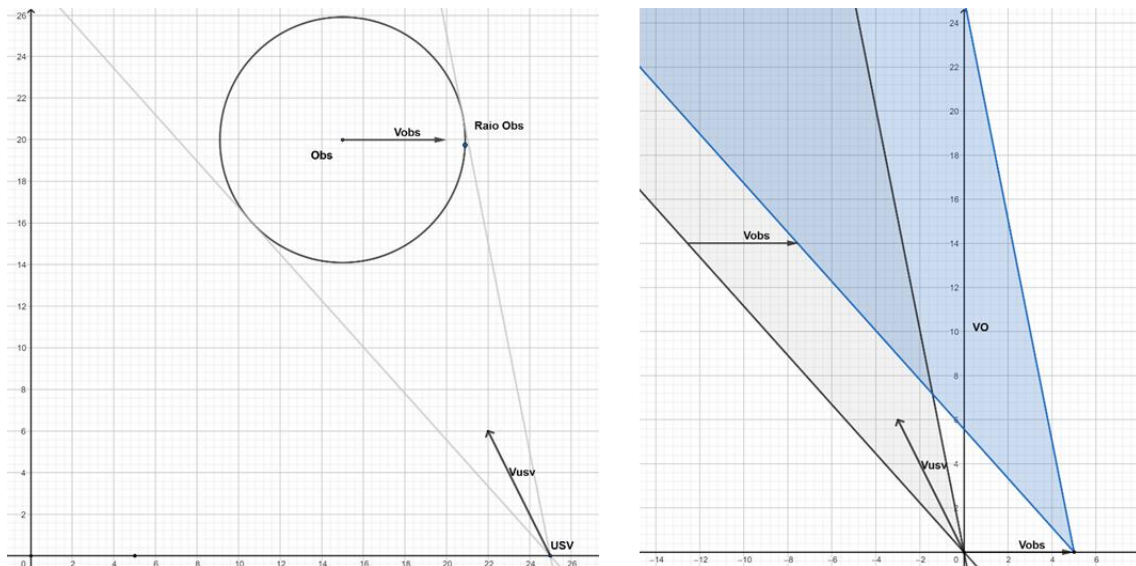


Figura 32 - Obstáculo em movimento: posições e velocidades (esquerda) e cone de velocidade correspondente (direita)

Deste modo, o algoritmo desenvolvido tem por base os principais pontos:

- A. A velocidade desejada é calculada, com base na posição atual do USV e do seu destino. Esta apenas varia a sua direção em função da posição relativa do USV ao destino.
- B. Para cada obstáculo é necessário:
 - i. Cálculo do seu raio total, isto é, a resultante da soma do seu raio, do raio do USV e da distância de segurança;
 - ii. Cálculo do polígono com 6 pontos que representa o VO, com a omissão de velocidades relativas demasiado lentas de acordo com o parâmetro t_{max} ;
 - iii. Expansão do cone de velocidades através do valor de V_{inc} , de modo a ter em conta as possíveis incertezas e mudanças de velocidade dos obstáculos.
- C. O cálculo da região de velocidades proibidas para o USV: a região corresponde à união dos cones de velocidade de todos os obstáculos existentes e da região de velocidades inviáveis, por serem demasiado elevadas;
- D. Correção da velocidade desejada: caso a velocidade calculada, obtida em A, pertencer à região de velocidades não permitidas, então é procurada a velocidade mais próxima da velocidade desejada na fronteira dessa região, de forma a garantir que nenhuma colisão ocorre.

4.1.1 Velocidade desejada

A velocidade desejada corresponde à velocidade que o USV emprega para alcançar o objetivo predeterminado. No entanto, esta velocidade pode variar consoante a posição relativa do USV em relação ao objetivo visado. Em situações desprovidas de obstáculos, essa velocidade tende a manter-se praticamente constante ao longo de toda a trajetória. Contudo, na presença de obstáculos, que obrigam o USV a desviar, a velocidade desejada sofre alterações, uma vez que a posição relativa entre o USV e o objetivo também varia.

Durante a execução do algoritmo, o USV adquire a velocidade desejada para navegar em direção ao objetivo, tal como referido anteriormente. Contudo, quando é necessário realizar manobras evasivas, isto é, quando a velocidade desejada passa a pertencer à região de velocidades proibidas, a velocidade do USV deixa de ser igual à velocidade desejada e passa a ser igual à velocidade necessária para evitar obstáculos. Esta velocidade é a mais próxima da velocidade desejada, mas situada na fronteira dessa região, de forma a garantir que nenhuma colisão ocorre.

4.1.2 Eliminação de velocidades que conduzem a colisões num horizonte temporal demasiado longo

Quando existem obstáculos longínquos, isto é, obstáculos cujo tempo de colisão é bastante longo, não é necessário que o USV realize manobras de evasão. Para impor essa condição, devemos considerar um limite de tempo (t_{max}), para o qual queremos que o USV comece a manobrar e/ou comece a ter em conta o VO. Deste modo, é criado um VO_{t_t} que representa a área de velocidades que levariam à colisão após o t_{max} . Por vezes, apesar de a velocidade relativa entre os dois navios evidenciar que há colisão, o USV só se irá desviar quando a colisão estiver mais próxima. Assim, o VO_{t_t} é ignorado do VO, tal como representado na Figura 33.

As velocidades descartadas são calculadas através:

$$v < d \div t_{max} \quad (6)$$

Onde d é a distância entre o USV e o Obs

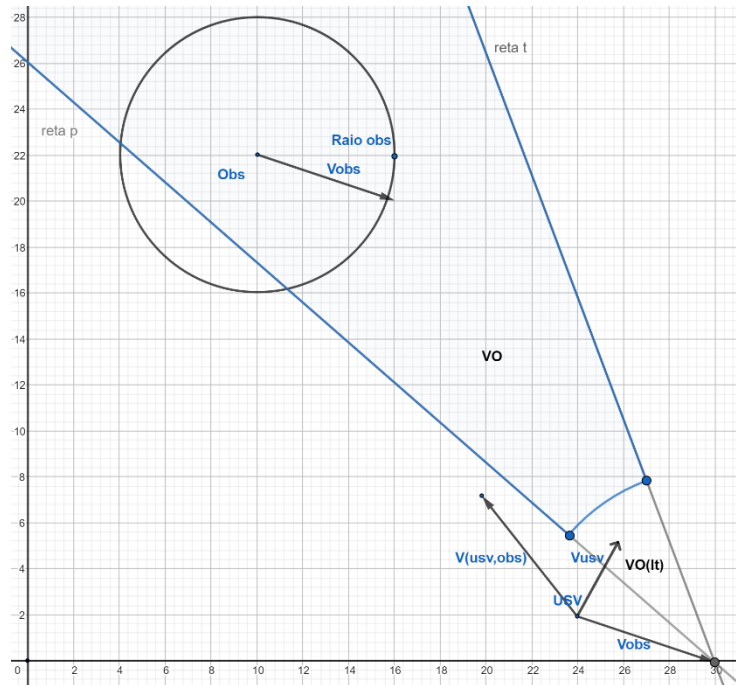


Figura 33 -Representação do VO com limite de tempo t_{max}

4.1.3 Incerteza na posição e na velocidade

Em muitos cenários reais a velocidade exata dos obstáculos pode não ser conhecida com precisão, isto é, não é possível ter uma confirmação completamente correta dos seus valores. Não só o movimento impreciso dos obstáculos contribui para essa imprecisão, como os valores fornecidos pelos sensores de bordo podem apresentar alguns erros, fazendo com que, conseqüentemente, haja variações ou incertezas na estimativa da velocidade dos objetos. Assim, torna-se importante considerar uma incerteza associada à posição e velocidade dos mesmos.

Embora se tenham considerado as velocidades como constantes, a verdade é que as trajetórias dos obstáculos nem sempre se mantêm com velocidade constante. Para contabilizar essas incertezas na dinâmica dos veículos em movimento, considerou-se v_{obs} acrescida das incertezas.

Para lidar com a incerteza na velocidade do obstáculo, é utilizada uma incerteza circular com uma determinada velocidade, V_{inc} que representa o incremento da incerteza. Assim, os cálculos são simplificados, sendo que apenas é necessário alargar o cone de velocidades, em todas as direções, pela V_{inc} , tal como representado na Figura 34. Assim, o VO representa todas as velocidades proibidas, dadas as incertezas nas medições ou nas previsões, permitindo tomar decisões mais seguras e eficazes.

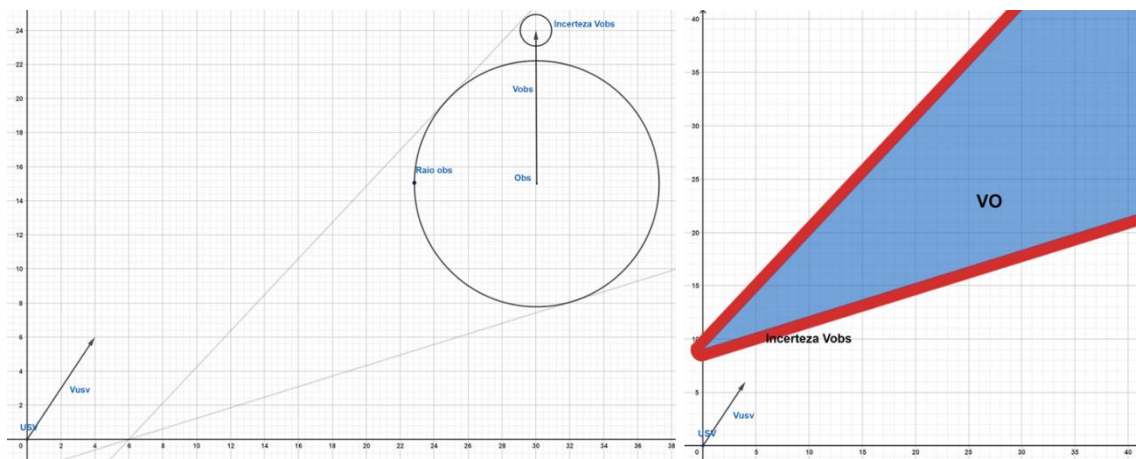


Figura 34 - Representação da incerteza v_{obs} em forma circular (esquerda) e representação do VO correspondente com o acréscimo da incerteza (v_{inc}) da velocidade v_{obs} (direita)

4.1.4 Distância de segurança

Para evitar obstáculos é necessário definir uma distância de segurança que permita passar de forma safe e confortável em relação aos mesmos, quando estamos a evitá-los. Esta distância pode variar conforme o tamanho e a velocidade do USV, bem como as características do obstáculo que se pretende evitar. Assim que a distância de segurança é estabelecida, o algoritmo deve garantir que o USV não se aproxima mais do que essa distância de qualquer obstáculo.

Para implementar essa distância de segurança no algoritmo basta adicioná-la ao *raio obs* fazendo com que o VO expanda e restrinja as velocidades que fariam com que o USV passasse perto do obstáculo. A partir da Figura 35 é possível verificar um aumento do *raio obs* através da soma da *distância de segurança*. Esse aumento faz com que as retas tangentes a esse novo círculo cubram uma área maior.

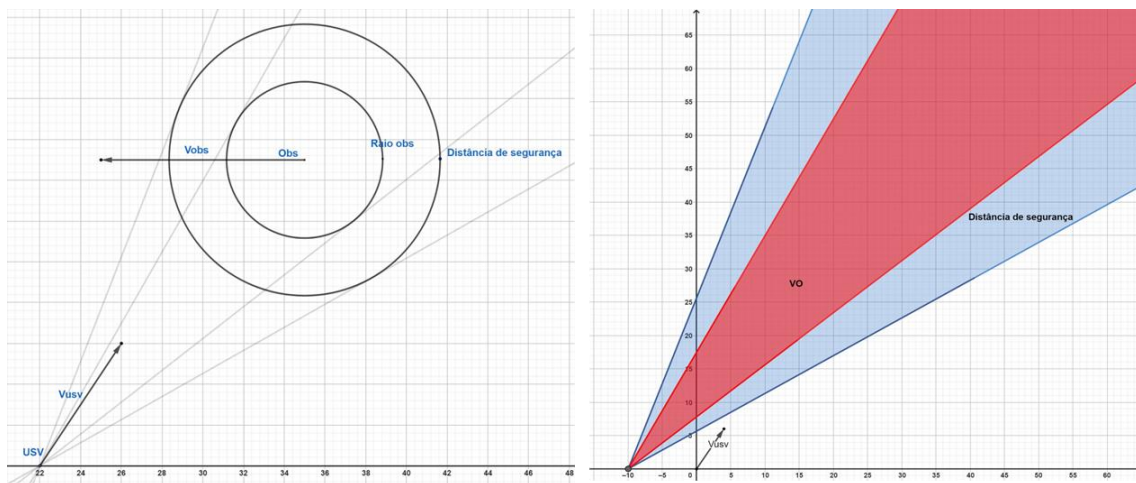


Figura 35 - Representação gráfica do Obs com raio aumentado para criar distancia de segurança (esquerda) e representação gráfica do VO com a restrição da distância de segurança (direita)

4.1.5 Velocidades viáveis do USV

Devemos ter em conta também a velocidade do navio, no que diz respeito à limitação da sua velocidade máxima, uma vez que todas as velocidades acima daquela serão proibidas e devem ser representadas como tal no algoritmo. Assim, podemos verificar, como auxílio da Figura 36 que utilizando como exemplo uma velocidade máxima de 20 nós, através de uma circunferência em torno da origem do referencial, no espaço de velocidades, que a área proibida aumenta significativamente. Deste modo, velocidades descabidas como por exemplo 100 nós são automaticamente excluídas.

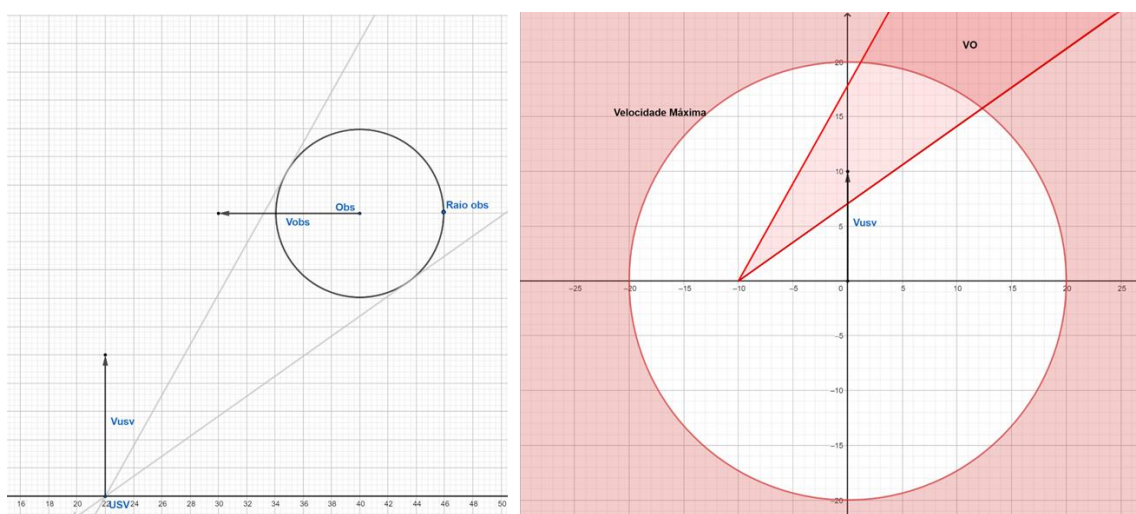


Figura 36 - Representação gráfica do USV e um obstáculo com as respectivas velocidades (esquerda) e representação gráfica do VO de um obstáculo e da restrição de velocidade máxima (direita)

4.1.6 Múltiplos Obstáculos

No entanto, o VO permite não só evitar um obstáculo, mas também lidar com múltiplos obstáculos simultaneamente. Esta capacidade é uma enorme vantagem, pois é necessário garantir que a trajetória descrita pelo USV consiga evitar todas as zonas de perigo, neste caso associadas aos obstáculos presentes no ambiente onde o USV atua.

Como referido anteriormente, existe um VO específico para cada obstáculo, assim, caso haja mais do que um obstáculo a região de velocidades proibidas que conduzem à colisão é a união dos cones de velocidades de todos os obstáculos existentes, tal como representado na Figura 37. Deste modo, é criada uma zona proibida comum, que está em constante atualização à medida que os obstáculos e o USV se movem. A união dos VO para cada obstáculo é dada pela seguinte expressão:

$$VO = \cup_{i=1}^n VO_{obs_i}, \quad (7)$$

Onde n representa o número de obstáculos.

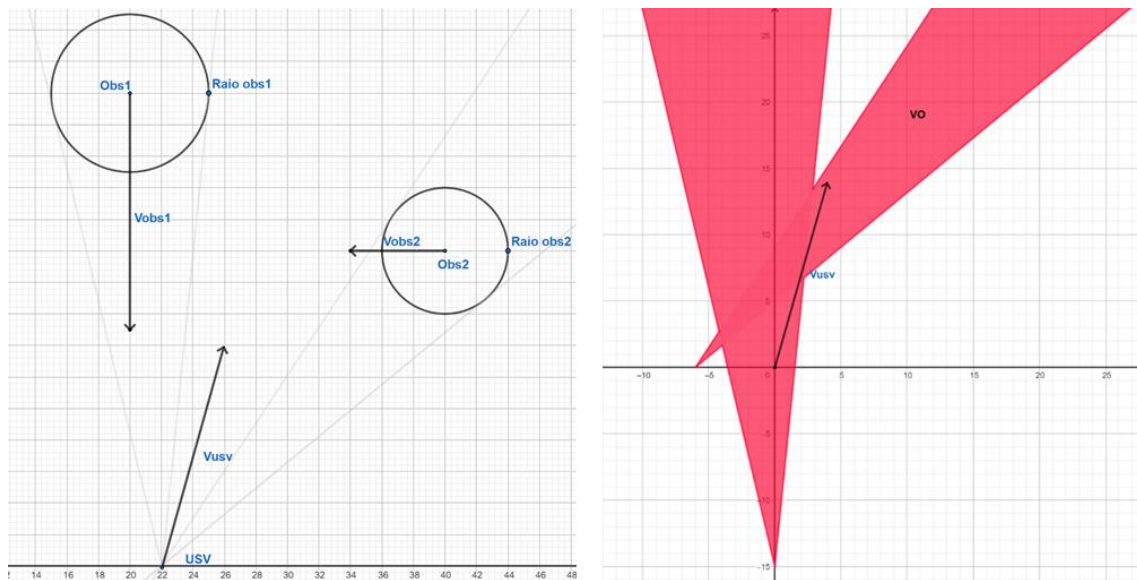


Figura 37 - Representação gráfica de dois obstáculos e do USV com respetivas velocidades (esquerda) e representação do VO de dois obstáculos no espaço de velocidades (direita)

4.1.7 Implementação prática

Quando se passa da teoria para a prática, é comum encontrar desafios de desempenho e processamento que precisam ser abordados para tornar o algoritmo computacionalmente viável em tempo real. Uma das simplificações mais comuns é representar o cone de "comprimento infinito" do VO por um polígono finito com 6 pontos, considerando que são eliminadas as velocidades que conduzem a colisões num horizonte temporal demasiado longo, tal como descrito na secção 4.1.2. Essa abordagem é usada para simplificar os cálculos, tornando-os mais eficientes, embora possa resultar numa imprecisão. No entanto, se os pontos 2, 3 e 4, representados na Figura 38, estiverem a uma distância superior à velocidade máxima do USV os erros de imprecisão passam a ser praticamente nulos.

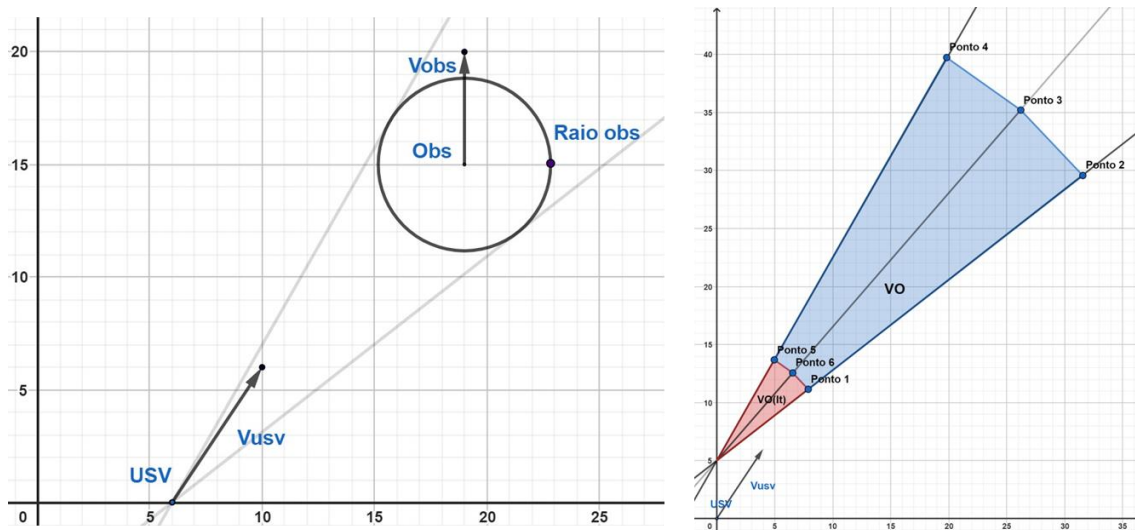


Figura 38 - Representação gráfica de um USV e Obs com as respetivas velocidades (esquerda) e representação gráfica do VO limitado por 6 pontos (direita)

Deste modo, torna-se também necessário representar por meio de uma circunferência a velocidade máxima, à semelhança da supramencionada no capítulo 4.1.5. Para implementar computacionalmente no algoritmo é necessário recorrer à representação por pontos, com o uso de um polígono regular. Esta é uma abordagem eficaz para aproximar a uma circunferência e facilitar os cálculos do algoritmo. Na Figura 39 é representada novamente uma restrição de velocidade máxima de 20 nós, através de um polígono regular com 20 pontos.

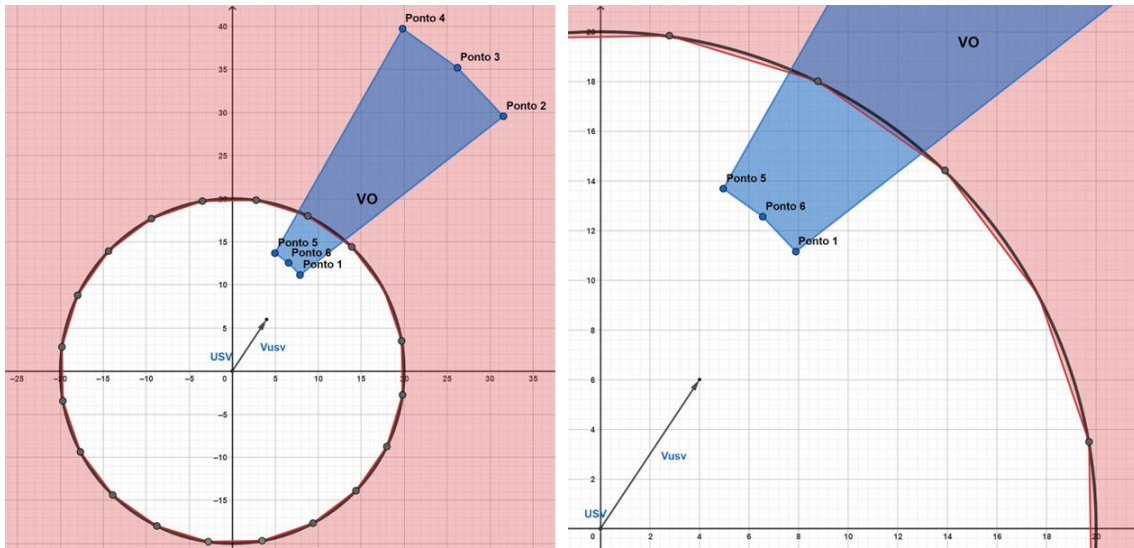


Figura 39 - Representação gráfica do VO limitado por 6 pontos com a restrição de velocidade máxima representada através de 20 pontos

4.2. Algoritmo *Velocity Obstacles* com RIEAM

O VO é um conjunto de restrições no espaço de velocidade do USV necessárias para que seja evitado um abalroamento. No entanto, é fundamental que o RIEAM seja cumprido. Assim, de modo a abordar e cumprir com o regulamento são adicionadas novas restrições ao espaço de velocidade, consoante cada situação entre o USV e os obstáculos. Uma vantagem de usar VO para codificar o RIEAM é que este já tem a informação sobre qual bordo do perigo o USV deve passar (Kuwata et al., 2014). O algoritmo compreende restrições a serem aplicadas para cada uma das regras.

4.2.1 Regra 13- Navio que alcança

Qualquer navio que alcance outro deve afastar-se do caminho deste último. Sendo que o navio que alcança é aquele que se aproxima de um outro vindo de uma direção que fique mais de 22,5 graus para ré do través desse outro tal como é representado na Figura 40 e Figura 41 (Instituto Hidrográfico, 2007).



Figura 40 – Regra 13 do RIEAM - Situação em que o USV é o navio que alcança

Na Figura 41 “o navio A, vem de uma direção que fica mais de $22,5^\circ$ para ré do través do navio B, e por isso deve afastar-se do caminho deste último, não devendo tomar um caminho que obrigue o navio B a manobrar para se afastar dele (caso da rota 2). As manobras mais apropriadas consistem em tomar um rumo paralelo ao do navio B e retomar o rumo primitivo quando todo o risco de colisão estiver afastado (caso da rota 3) ou então guinar para a popa do navio B e retomar o rumo primitivo quando todo o risco de colisão estiver afastado (caso da rota 1)”(Instituto Hidrográfico, 2007).

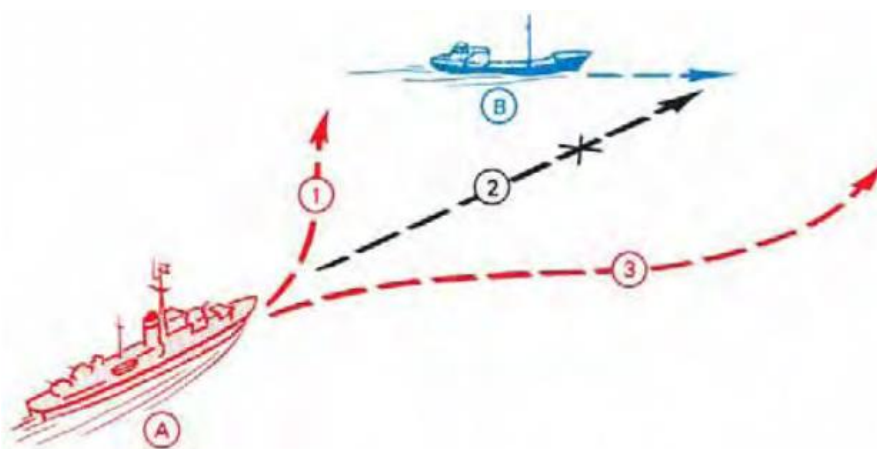


Figura 41 - Manobras possível para se afasta do caminho de outro navio quando se encontra na situação de navio que alcança (Instituto Hidrográfico, 2007)

Deste modo, no algoritmo desenvolvido é proposto a criação de uma zona segura, ou seja, uma margem de segurança, superior à *distancia de segurança* referida anteriormente, para que o USV passe pelo obstáculo sem interferir com a sua manobra. Na Figura 42 é possível verificar que no espaço de velocidades é apresentado o VO original inserido num VO aumentado. Este VO aumentado, representado a vermelho, é criado através da circunferência denominada margem de segurança para evitar o obstáculo.

Este VO aumentado é exclusivamente aplicado quando o navio se encontra numa situação de navio que alcança permitido assim que este passe safo do obstáculo. Por outro lado, caso o USV seja o navio alcançado, esta regra não se aplica, sendo que deve manter o rumo e velocidade, não sendo necessário manobrar para evitar o outro navio.

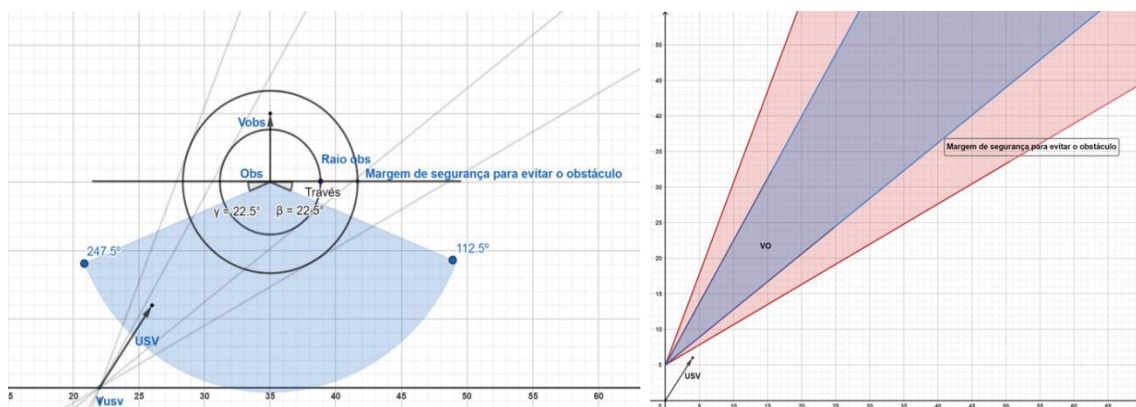


Figura 42 – Representação da região de aplicação da Regra 13 do RIEAM (esquerda) e representação do VO de acordo com a Regra 13 do RIEAM (direita)

4.2.2 Regra 14 – Navios que se aproximam de roda a roda

A presente regra aplica-se “quando dois navios de propulsão mecânica se aproximam um do outro de roda a roda, ou quase de roda a roda, de modo a haver risco de abalroamento, deverão guinar ambos para estibordo de forma a passarem por bombordo um do outro”. Deve-se considerar que existe uma situação de roda a roda quando um navio vê outro na sua proa, ou praticamente na sua proa (Instituto Hidrográfico, 2007).

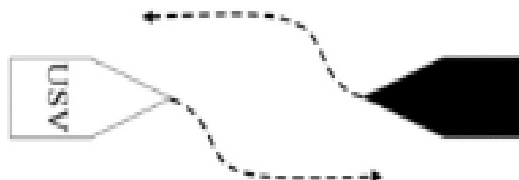


Figura 43 - Regra 14 do RIEAM

Deste modo, no algoritmo desenvolvido foi definido que se for avistado na proa do USV, até por exemplo 5º para cada bordo, um navio que possua um vetor velocidade contrário ao seu, ou seja que navega na sua direção, então existe situação de roda a roda. Tal facto é possível observar na Figura 44.

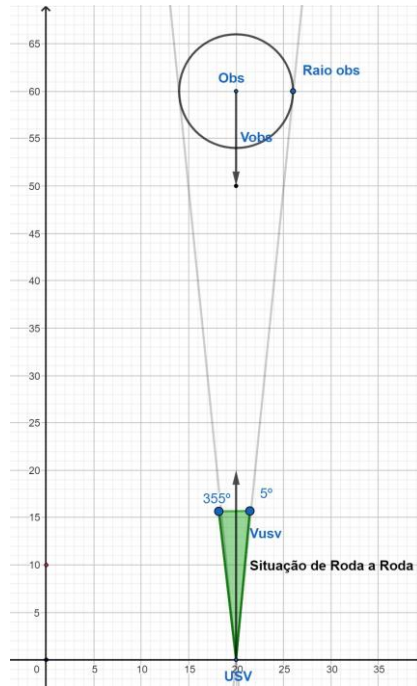


Figura 44 - Situação em que é utilizada a regra 14

Assim, a partir do momento em que o algoritmo deteta uma situação de roda a roda, este tem de proibir todas as velocidades que façam com que o USV guine para bombordo. Deste modo, é possível observar na Figura 45 que, através de uma reta perpendicular ao VO, no ponto H, são selecionadas todas as velocidades do lado esquerdo, isto é, bombordo, é possível criar uma restrição que impossibilita o USV de guinar para esse bordo. Assim que passar o obstáculo o USV pode retomar o seu rumo.



Figura 45 - Representação VO com restrição da Regra 14 do RIEAM

4.2.3 Regra 15 – Navios em rumos cruzados

A regra 15 do RIEAM aplica-se “quando dois navios de propulsão mecânica navegam em rumos que se cruzam, de tal forma que exista risco de abalroamento. O navio que vê o outro por estibordo deve afastar-se do caminho deste e, se as circunstâncias o permitirem, evitar cortar-lhe a proa” (Instituto Hidrográfico, 2007).

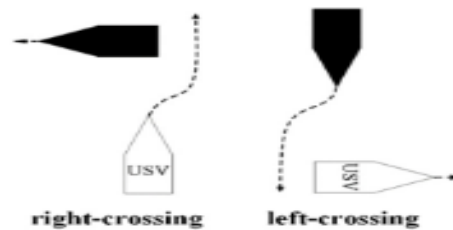


Figura 46 - Regra 15 do RIEAM

No caso da Figura 47 em que os navios se encontram numa situação de rumos cruzados, existe um navio com prioridade e outro sem prioridade o que não acontece na regra 14, em que ambos têm de manobrar. Assim, de acordo com a regra 17.a.(i) o navio com prioridade, neste caso o navio B tem a obrigação de manter o seu rumo e velocidade, enquanto o navio sem prioridade, navio A, tem a responsabilidade de se afastar de acordo com a regra em questão. No entanto, segundo o RIEAM, a regra apenas refere que o navio sem prioridade se deve afastar do caminho do outro, não proibindo uma guinada para bombordo, sendo que o importante é evitar cortar a proa do outro navio. Contudo, na maioria dos casos, a manobra mais aconselhável para o navio sem prioridade é realizar uma guinada para estibordo e/ou reduzir a velocidade (Instituto Hidrográfico, 2007).

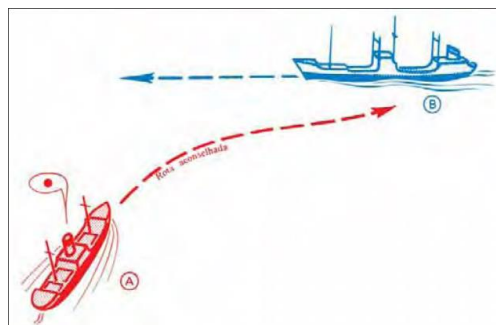


Figura 47 - Regra 15 do RIEAM - Navios de propulsão mecânica a navegar em que o navio A não tem prioridade e deve afastar-se do caminho do navio B (Instituto Hidrográfico, 2007)

Por outro lado, de acordo com a regra 17.a.(II) e a regra 17.b. do RIEAM, caso o navio B se aperceba que o navio A não está a manobrar ou que a manobra deste não é suficiente para que seja evitado um abalroamento, então o navio B pode manobrar a fim de o evitar unicamente com a sua manobra, evitando sempre guinar para bombordo, regra 17.c⁹ do RIEAM.

Por outro lado, é necessário implementar, uma regra no algoritmo para que este consiga identificar quando se encontra neste tipo de situação. Neste caso, para que o USV detete que está numa situação de rumos cruzados e que precisa de manobrar é necessário criar uma área em torno do mesmo, em que se qualquer embarcação se situar nessa área, este saiba que tem de manobrar. Assim, de acordo com a Figura 48 é possível verificar que se algum navio estiver dentro dos setores representados a verde o USV irá manter o seu rumo e velocidade, uma vez que este tem prioridade, ou seja o USV deverá neste caso ignorar o VO mantendo o vetor velocidade, por outro lado se alguma embarcação entrar no setor representados a amarelo, com uma velocidade perpendicular à sua, ou na sua direção, então o USV não tem prioridade, e terá que manobrar para estibordo a fim de evitar um abalroamento.

Assim sendo, o algoritmo desenvolvido para o cumprimento da presente regra inclui restrições que obrigam o USV, caso este seja o navio sem prioridade, a manobrar de acordo com a regra supramencionada. Deste modo, de acordo com a Figura 49, foi adicionado ao algoritmo uma reta perpendicular ao VO, que permite eliminar toda a área possível de velocidades, que fariam com que o USV manobrasse para BB. A área roxa denominada como, restrição de guinada para BB, proíbe qualquer intenção de guinada para esse bordo fazendo com que a regra 15 seja cumprida.

⁹ Regra 17.c - Um navio de propulsão mecânica que manobre para evitar um abalroamento com outro navio de propulsão mecânica, cujo caminho cruza o seu, nas condições previstas na alínea a. (ii) desta Regra, não deve, se as circunstâncias o permitirem, guinar para bombordo enquanto o outro navio lhe estiver por bombordo (Instituto Hidrográfico, 2007).

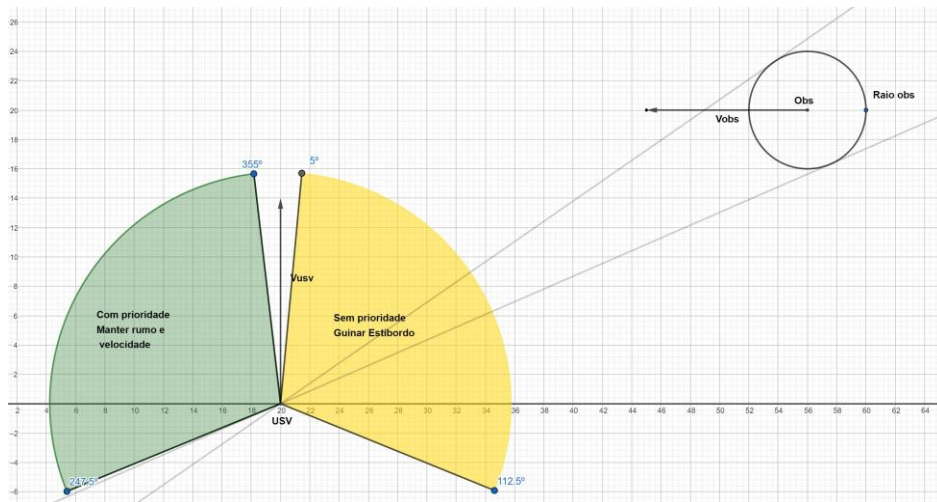


Figura 48 - Situação onde se aplica a Regra 15 do RIEAM



Figura 49 - Representação VO com restrição da Regra 15 do RIEAM

4.3. Situações de Emergência

Como referido no capítulo 1.1 de acordo com Campbell et al. (2014), recentes estatísticas mostram que 60% dos incidentes no mar são causados por colisões e 56% dessas colisões são causadas por violações do RIEAM. Assim, não basta criar um algoritmo capaz de cumprir com o RIEAM, mas também um algoritmo que consiga manobrar, por forma a evitar colisões, quando os outros navios não o cumprem, ou não seguem à risca com o regulamento.

De acordo com a regra 2.a. do RIEAM, dada a complexidade e a infinidade de situações possíveis de manobras, é praticamente inviável prever exaustivamente todas elas. Portanto, torna-se necessário, aplicar a “experiência normal de marinheiro”, considerando as “ circunstâncias especiais de cada caso”. No entanto, sendo o USV um veículo autónomo, sem qualquer influência humana, este não possui a experiência normal de um marinheiro necessária para evitar casos em que os outros navios, os obstáculos, são imprevisíveis(Instituto Hidrográfico, 2007). Assim sendo, é essencial criar um algoritmo para situações complexas e imprevisíveis por parte dos obstáculos.

Neste sentido, é possível recorrer aos dois parâmetros que têm mais influência na suavidade da trajetória, o t_{max} e a *distância de segurança*. Assim, um valor de t_{max} mais pequeno faz com que os obstáculos só sejam considerados quando o tempo de colisão for menor, o que pode levar a manobras mais bruscas para os evitar. Por outro lado, uma distância de segurança mais pequena faz com que o USV passe mais perto dos obstáculos.

Assim, quando o USV necessita de manobrar de acordo com o RIEAM, são atribuídos parâmetros como uma *distância de segurança* maior e um t_{max} elevado, para começar a manobra antecipadamente. Quando o USV tem de fazer uma manobra de emergência para evitar um navio que não cumpre o RIEAM, nesse caso o são atribuídos valores mais baixos os estes parâmetros, para só começar as manobras se for mesmo necessário.

Note-se que de acordo com a Figura 51 o VO do segundo obstáculo é bem maior comparado com o VO do primeiro obstáculo, restringindo um maior número de velocidades, uma vez que o USV é o navio sem prioridade em relação ao segundo navio. Os valores de t_{max} e da *distância de segurança* são maiores, fazendo com que o VO seja maior. No exemplo apresentado a V_{usv} encontra-se apenas dentro do segundo VO. Note-se que apesar de, neste exemplo, não ter sido aplicada a restrição do RIEAM, isto é, proibir os valores de velocidade que fariam com que o USV guinasse para BB, o USV irá cumprir com a regra e desviar-se do segundo obstáculo. No entanto, caso o *Obs1* não manobre, de modo a cumprir com o RIEAM, e a

distância de segurança estiver em risco de não ser cumprida o USV irá manobrar também para o evitar.

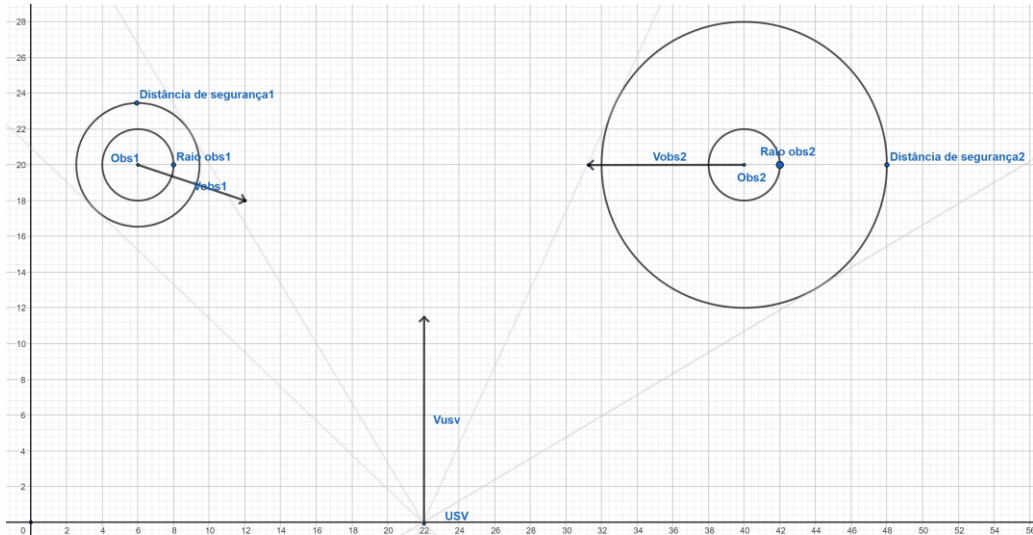


Figura 50 - Situação em que o USV tem prioridade perante o Obs1, mas não tem prioridade perante o Obs2

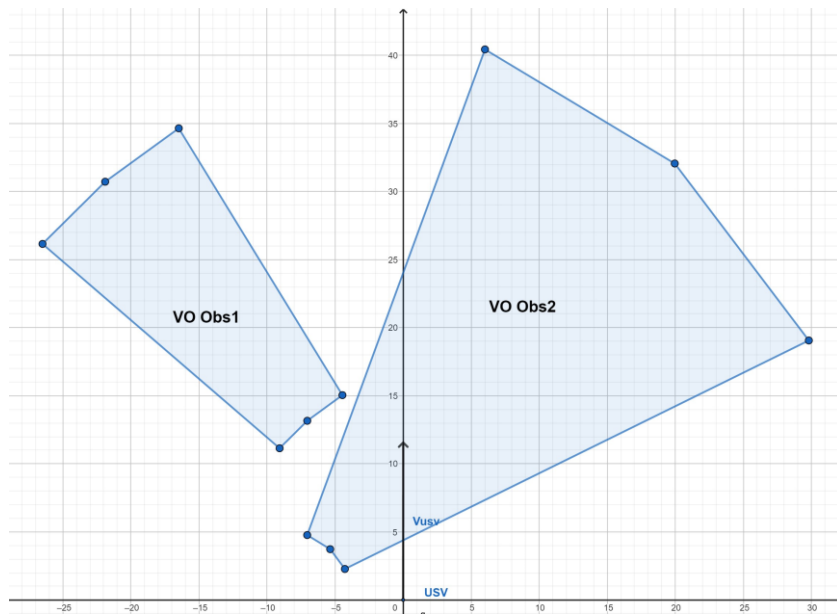


Figura 51 - Diferentes VO para diferentes situações. VO Obs1 quando USV tem prioridade e VO Obs 2 quando o USV não tem prioridade

5. Resultados experimentais

O algoritmo desenvolvido permite que o USV evite obstáculos utilizando o conceito de VO, tal como referido no capítulo anterior. Este tem em consideração parâmetros dinâmicos que podem ser ajustados ou alterados consoante o tipo de USV a que seja aplicado. Em aplicações reais, os operadores podem ajustar estes parâmetros de acordo com as situações e com base na sua experiência.

Os resultados obtidos são apresentados em unidades de medida, como metros em vez de milhas náuticas e metros por segundo em vez de nós. Embora estas unidades utilizadas não sejam as mais comuns em ambientes marítimos, foram as escolhidas a fim de simplificar os cálculos, proporcionando uma maior precisão e facilitando a interpretação e representação gráfica dos obstáculos, do USV e do VO, bem como outros parâmetros relevantes. No entanto, é importante destacar que os valores atribuídos a cada parâmetro são os mais realistas, visando fornecer resultados plausíveis. Para fins de conversão, foi considerado que $1 \text{ milha náutica} = 1852 \text{ metros}$ e que $1 \text{ nó} = 0.51 \text{ metros por segundo}$. Em cada exemplo foram utilizados os parâmetros apresentados em duas tabelas: os parâmetros de simulação e os parâmetros do algoritmo, que se podem ajustar para alterar o comportamento do USV.

5.1 Modelo dinâmico do USV

Neste subcapítulo, pretende-se demonstrar o algoritmo desenvolvido num ambiente sem obstáculos. No entanto, é importante ilustrar que o USV apresenta velocidades realistas e não segue um caminho em linha reta durante a sua navegação até ao objetivo. Assim, ao contrário de trajetórias perfeitamente retilíneas, este apresenta um comportamento mais natural e fluído. Assim, assume-se que existe um controlador que procura levar a velocidade do USV para a velocidade desejada, no entanto o desenvolvimento desse controlador não faz parte do âmbito da dissertação. Para simplificar, é assumido um modelo dinâmico simples para o USV, com limitações das acelerações e taxas de guinada admissíveis para o mesmo.

Além disso, no algoritmo foi aplicada uma taxa de guinada semelhante à de um USV real. Esta evidencia-se quando o USV manobra ou guina, uma vez que este não se desvia instantaneamente.

Assim, para obter os resultados pretendidos foram utilizados os parâmetros da Tabela 1 e da Tabela 2.

Tabela 1 – Parâmetros do algoritmo no caso sem obstáculos

Parâmetros do algoritmo	
<i>Taxa de guinada máx. do USV [rad/s]</i>	$\pi/9 = 20^\circ$
<i>Aceleração máx. do USV [m/s²]</i>	3
<i>Desaceleração máx. do USV [m/s²]</i>	1
<i>Velocidade máx. do USV [m/s]</i>	15
<i>Incerteza na posição e velocidade do USV por segundo</i>	0.5

Tabela 2 - Parâmetros de simulação no caso sem obstáculos

Parâmetros de simulação	
<i>Objetivo</i>	[1000; 1000]
<i>Posição USV</i>	[0; 0]
<i>Velocidade USV inicial</i>	[-1; -1]
<i>Velocidade cruzeiro</i>	12

Deste modo, foi possível obter os resultados apresentados na Figura 52, referentes à trajetória do USV até ao seu objetivo. Assim, é possível verificar que o USV não se encontra permanentemente centrado em cima da linha verde (trajetória direta até ao objetivo). Quando não existem obstáculos, é especialmente visível quando é atribuída uma velocidade inicial contrária à do objetivo., tal como representado na Figura 52. Assim é possível verificar que o USV não realiza uma manobra instantânea e brusca. Em vez disso, segue uma trajetória mais suave e curvilínea, assemelhando-se ao comportamento de um navio no meio marítimo.

Denote-se que na Figura 53 a velocidade inicial é contrária à velocidade desejada para atingir o objetivo. A Figura 54 mostra a variação da velocidade e do

rumo, respetivamente, ao longo do tempo. Assim, tal como referido anteriormente é possível verificar que não apresenta uma velocidade constante, isto é, valores irrealistas ao longo do tempo.

Denote-se ainda que o valor da velocidade apresentado nos primeiros segundos na Figura 54 corresponde ao valor da normal da *velocidade USV inicial* sendo que, o valor da *velocidade cruzeiro* é a velocidade com que se pretende que o USV navegue e para a qual a velocidade deve tender se não existirem obstáculos.

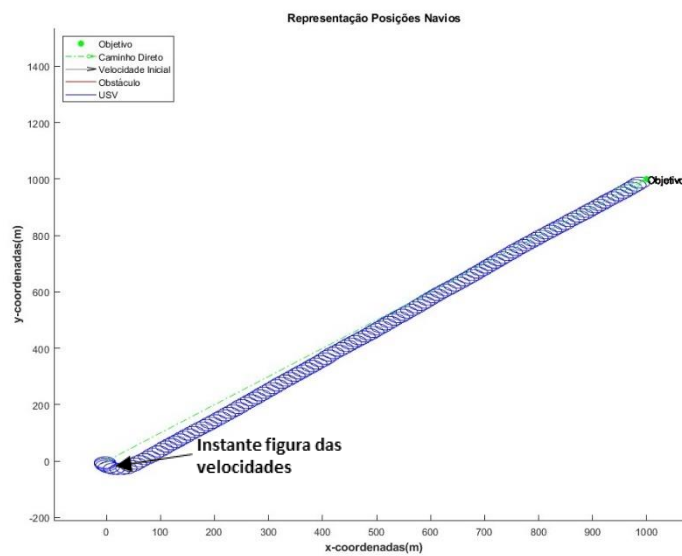


Figura 52 - Trajetória do USV num ambiente sem obstáculos

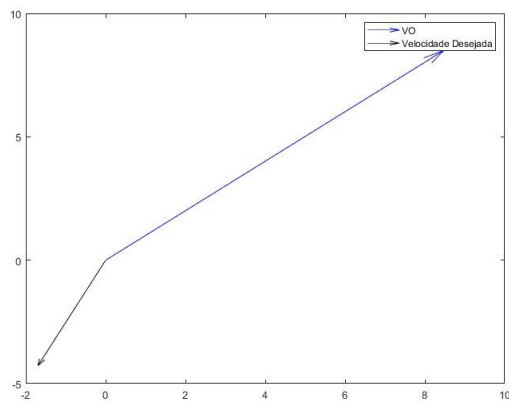


Figura 53 – Velocidade desejada e a velocidade do USV nos instantes iniciais

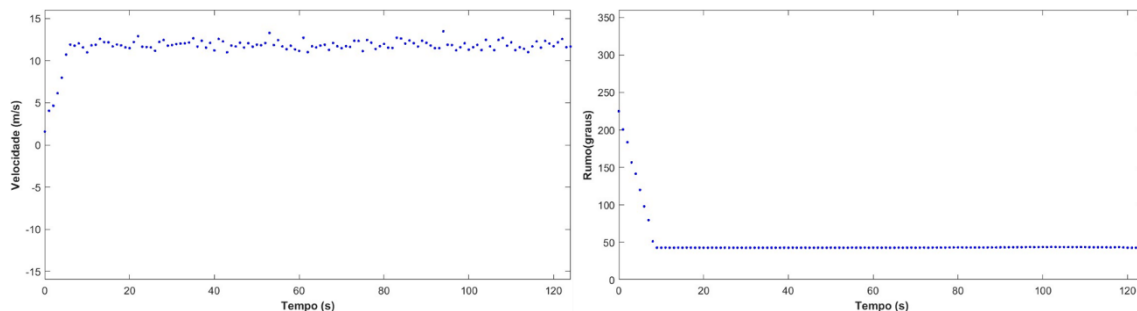


Figura 54 – Valores da velocidade e do rumo ao longo do tempo

A demonstração destas características realistas, tanto na velocidade como no comportamento da guinada do USV, é importante para validar a eficácia do algoritmo para evitar obstáculos.

5.2 Desvio de obstáculos (sem RIEAM)

Neste capítulo pretende-se ilustrar alguns casos em que o USV se desvia dos obstáculos. No entanto, não serão contempladas as restrições que impõem as regras do RIEAM, sendo que o USV desviar-se-á de acordo com o algoritmo, apenas recorrendo ao VO, mantendo sempre a distância de segurança.

Aqui, será tido em conta um novo parâmetro t_{max} que ignora as velocidades que conduzem a colisões num horizonte temporal superior ao t_{max} .

5.2.1 Caso 1 – Navio que cruza o caminho

Neste cenário são considerados os parâmetros expostos na Tabela 3 e na Tabela 4. Pretende-se que o USV se desvie do obstáculo que vem de estibordo e tenta cortar a proa. Para um t_{max} de 40 segundos, o USV apresenta uma trajetória bastante suave e eficiente (Figura 55), mantendo sempre a distância superior à distância de segurança (Figura 58) No que diz respeito à velocidade e ao rumo, os valores foram bastante constantes, uma vez que o USV não executou nenhuma manobra brusca (Figura 57)

Na Figura 56 é apresentado o VO relativo ao momento em que o USV começa a manobrar para evitar o obstáculo, apresentado na Figura 55. Denote-se que a velocidade do USV se encontra dentro do VO. Assim, no instante seguinte será utilizada a velocidade representada a vermelho para evitar o obstáculo.

Tabela 3 - Caso 1 - Parâmetros do algoritmo

Parâmetros do algoritmo

Incerteza na velocidade do Obstáculo para representação do VO [m/s]	2
Incerteza nas posições e velocidades dos obstáculos e USV por segundo	0.2
Distancia de segurança [m]	60
Velocidade cruzeiro	9
t_max(s)	40

Tabela 4 - Caso 1 - Parâmetros de simulação

Parâmetros de simulação

Objetivo	[600; 1200]
Posição USV	[400; 0]
Velocidade USV inicial	[0; 8]
Raio USV [m]	20
Posição Obstáculo	[1400; 700]
Velocidade Obstáculo	[-10;0]
Raio Obstáculo [m]	50

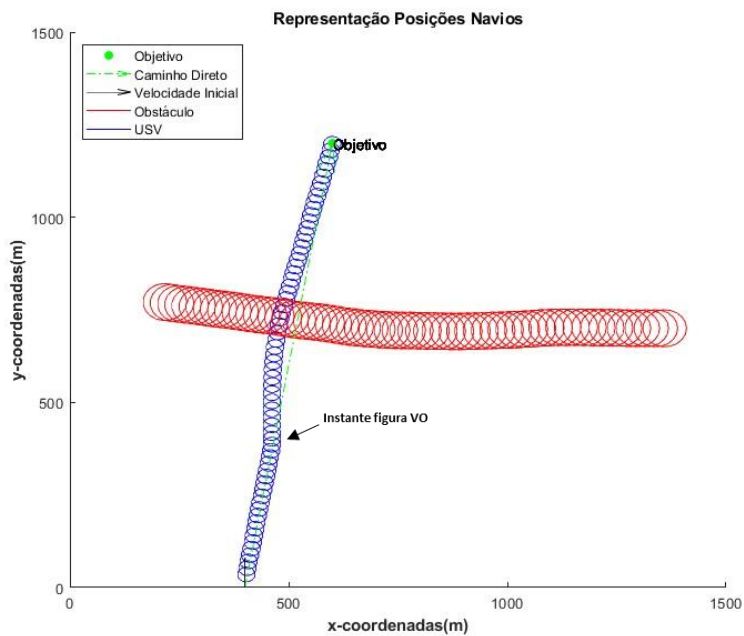


Figura 55 - Caso 1 - Trajetória do USV e do Obs numa situação de rumos cruzados

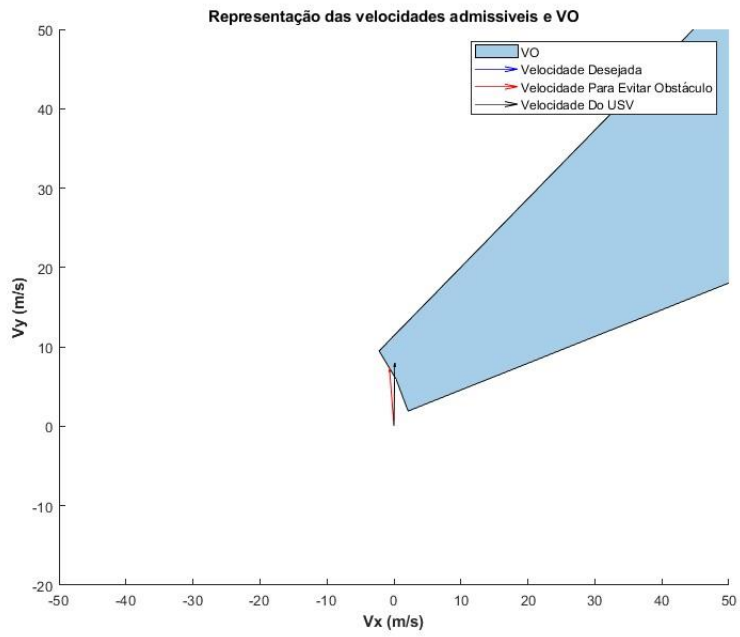


Figura 56 - Caso 1 - Representação do VO

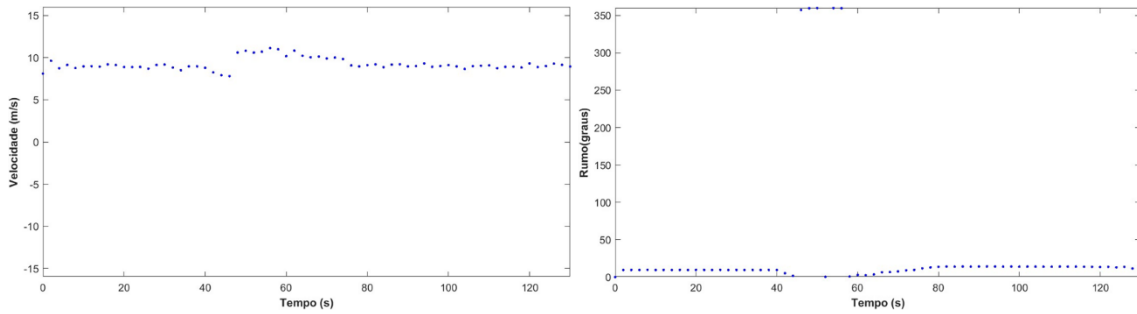


Figura 57 - Caso 1 - Valores da velocidade e do rumo ao longo do tempo

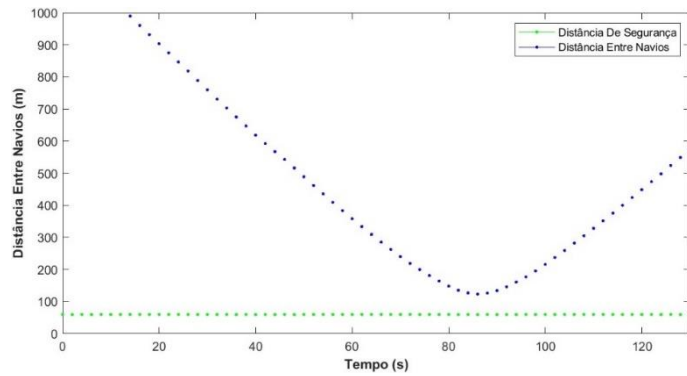


Figura 58 - Caso 1 - Valores da distância entre navios ao longo do tempo

Na Figura 59 é possível observar duas trajetórias distintas. Representado a verde, onde é utilizado um valor de $t_{max} = 120$ e uma *distância de segurança* = 250, é possível observar uma trajetória mais larga e realizada antecipadamente para evitar o obstáculo. Já na trajetória a azul, onde foram utilizados os parâmetros de t_{max} e de *distância de segurança* do exemplo anterior, a reação do USV foi mais tardia resultando numa guinada maior para BB.

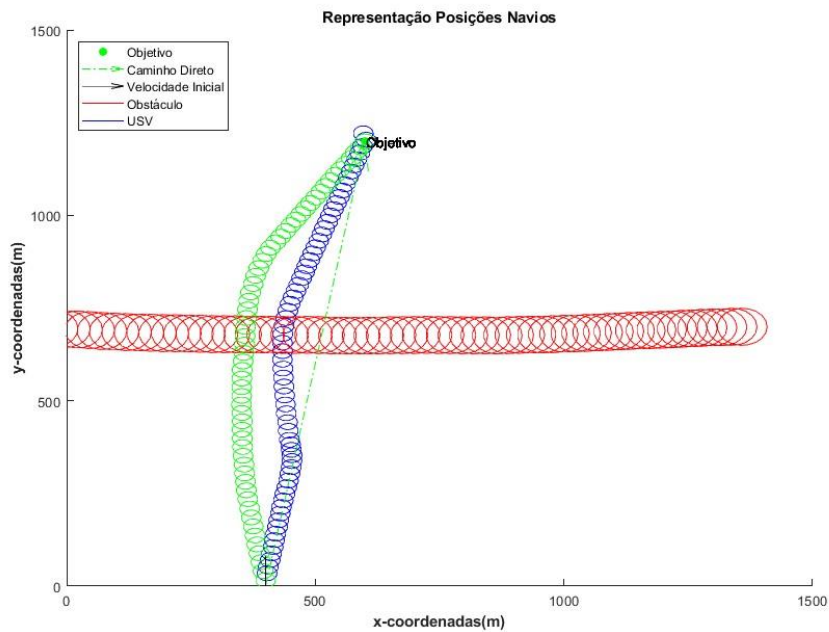


Figura 59 - Caso 1 - Trajetória de dois USVs com parâmetros do algoritmo diferentes para o mesmo caso

5.2.2 Caso 2 – USV ultrapassa outro navio

Neste caso pretende-se ilustrar um exemplo em que o USV ultrapassa outro navio. Aqui é possível verificar que o USV apresentou uma trajetória bastante fluida (Figura 60). No que diz respeito à velocidade e ao rumo não ocorreram alterações bruscas.

Tabela 5 - Caso 2 - Parâmetros do algoritmo

Parâmetros do algoritmo

Incerteza na velocidade do Obstáculo para representação do VO [m/s]	2
Incerteza nas posições e velocidades dos obstáculos e USV por segundo	0.2
Distancia de segurança [m]	60
Velocidade cruzeiro	12
t_max(s)	40

Tabela 6 - Caso 2 - Parâmetros de simulação

Parâmetros de simulação

Objetivo	[400; 2800]
Posição USV	[400; 0]
Velocidade USV inicial	[0; 8]
Raio USV [m]	20
Posição Obstáculo	[400; 1000]
Velocidade Obstáculo	[0;3]
Raio Obstáculo [m]	50

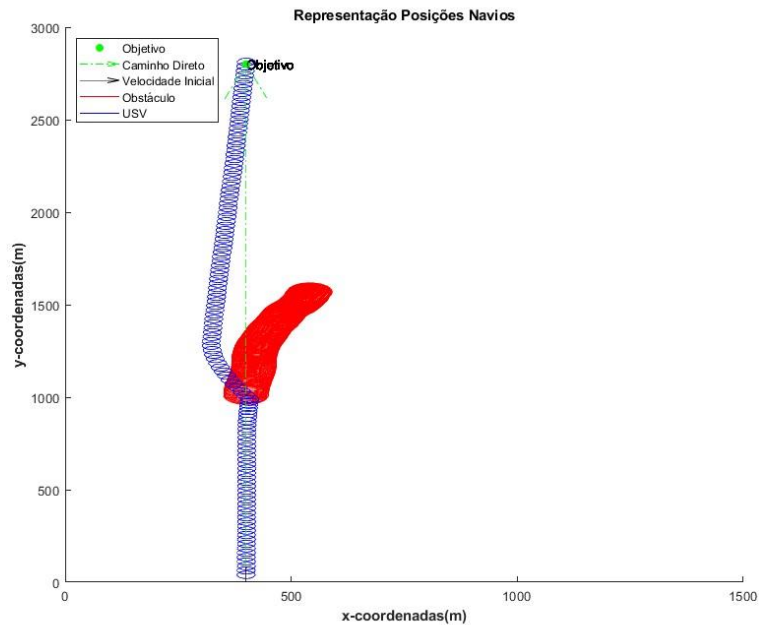


Figura 60 - Caso 2 - Trajetória do USV e do Obs numa situação em que o USV ultrapassa o Obs

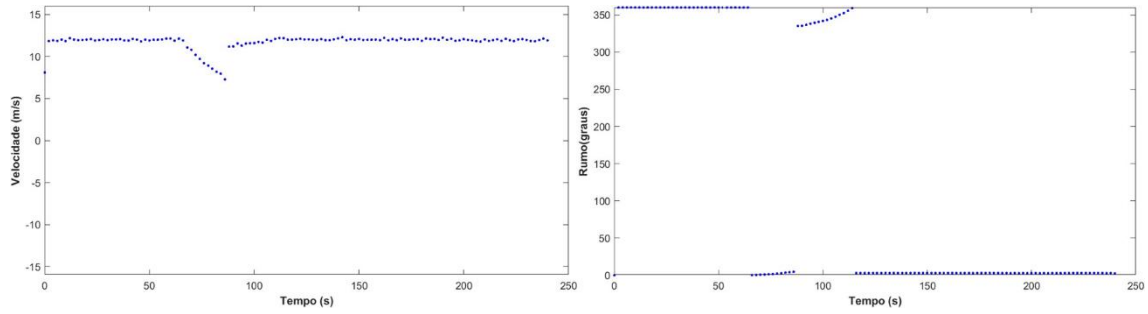


Figura 61 - Caso 2 - Valores da velocidade e do rumo ao longo do tempo

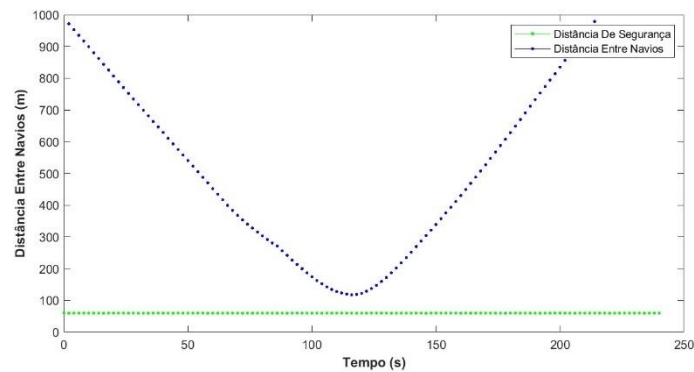


Figura 62 - Caso 2 - Valores da distância entre navios ao longo do tempo

Na Figura 63, utilizando os mesmos parâmetros de simulação, mas com um resultado diferente devido à incerteza associada à posição e velocidades dos navios, o USV apresentou diversas oscilações, tanto na velocidade como no rumo. Esta oscilação está relacionada com o facto de, no período em que o USV ultrapassa, este assume que o outro navio já não representa uma ameaça e tenta retomar o rumo em direção ao objetivo. No entanto, o outro veículo ainda impede que este retome o seu rumo inicial. Assim, o USV recorre à utilização de diversas velocidades para ultrapassar o obstáculo. Contudo, se considerarmos um t_{max} mais elevado é possível apresentar uma manobra mais fluida e sem oscilações, uma vez que o USV reage antecipadamente, tal como acontece quando são impostas as regras do RIEAM, apresentadas no capítulo seguinte.

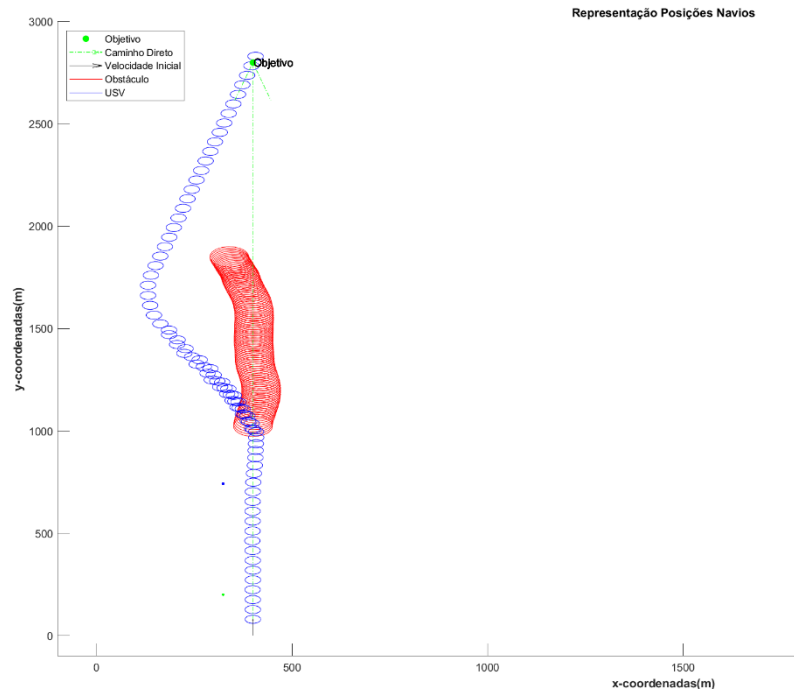


Figura 63 – Caso 2 - Trajetória do USV e do Obs em que ocorrem oscilações no rumo e na velocidade

5.2.3 Caso 3 – Roda a roda

No presente cenário de teste é simulado uma situação de um potencial choque frontal, em que é demonstrada a eficácia do algoritmo no desvio dos obstáculos neste tipo de situação. Os parâmetros utilizados encontram-se definidos nas Tabela 7e Tabela 8.

Tabela 7 - Caso 3 - Parâmetros do algoritmo

Parâmetros do algoritmo

<i>Incerteza na velocidade do Obstáculo para representação do VO [m/s]</i>	2
<i>Incerteza nas posições e velocidades dos obstáculos e USV por segundo</i>	0.2
<i>Distancia de segurança [m]</i>	60
<i>Velocidade cruzeiro</i>	12
<i>t_max(s)</i>	40

Tabela 8 - Caso 3 - Parâmetros de simulação

Parâmetros de simulação

<i>Objetivo</i>	[2500; 2500]
<i>Posição USV</i>	[0; 0]
<i>Velocidade USV inicial</i>	[8; 8]
<i>Raio USV [m]</i>	20
<i>Posição Obstáculo</i>	[1800; 1800]
<i>Velocidade Obstáculo</i>	[-6;-6]
<i>Raio Obstáculo [m]</i>	50

Neste cenário, o USV encontra-se a navegar em direção ao objetivo e assim que deteta o obstáculo, ou seja, a partir do momento em que a sua velocidade entra dentro do VO, tal como representado na Figura 65, este utiliza a velocidade para evitar o obstáculo, representada a vermelho, permitindo que se desvie do obstáculo. Denote-se que a trajetória definida pelo USV é bastante suave e precisa (Figura 64). Enquanto o USV se desvia do obstáculo, a distância de segurança nunca é violada ao longo do percurso, evitando assim qualquer possibilidade de colisão (Figura 67). A partir do momento em que o obstáculo é superado, o USV utiliza o rumo pretendido a fim de navegar em direção ao ponto de interesse. A execução do algoritmo resultou numa trajetória fluida, segura e sem oscilações significativas quer na velocidade, quer no rumo (Figura 66).

No presente caso, é importante referir que, o USV se desviou para BB resultando no incumprimento do RIEAM. No entanto, esta mudança de direção não ocorreu de forma intencional ou negligente, mas sim como resultado do funcionamento do algoritmo sem a implementação das regras do RIEAM. As condições específicas do cenário também influenciaram a escolha do bordo de guinada, uma vez que, caso os parâmetros fossem diferentes, os resultados seriam também, podendo resultar numa guinada para EB. Nesta situação o algoritmo fez uma análise das trajetórias e das velocidades, do USV e do obstáculo, e manobrou para BB, por forma a minimizar e a evitar o risco de colisão realizando a manobra mais segura no cenário em questão.

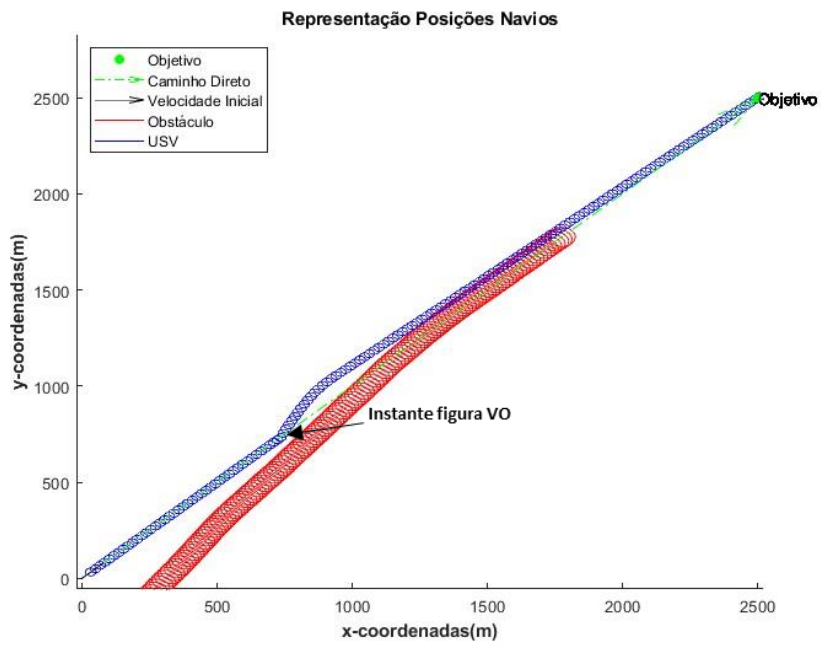


Figura 64 - Caso 3 - Trajetória do USV e do Obs numa situação de roda a roda

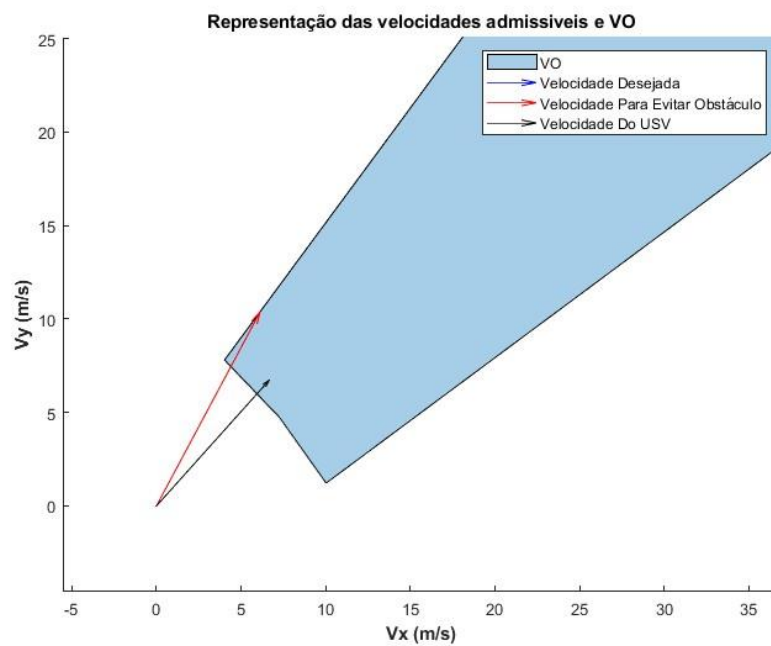


Figura 65 - Caso 3 - Representação do VO

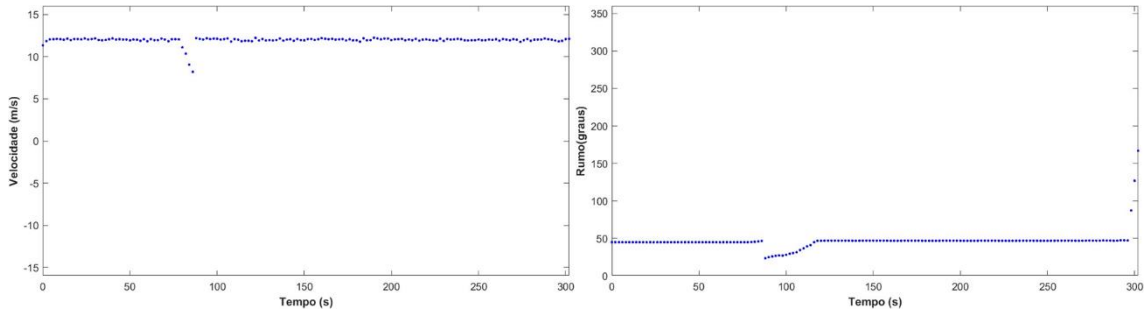


Figura 66 - Caso 3 - Valores da velocidade e do rumo ao longo do tempo

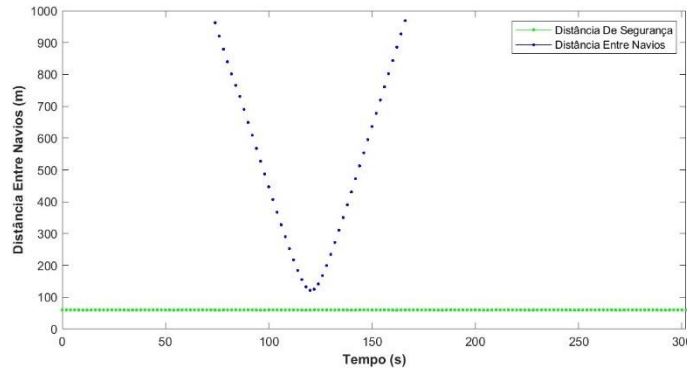


Figura 67 - Caso 3 - Valores da distância entre navios ao longo do tempo

5.2.4 Caso 4¹⁰ - Múltiplos obstáculos

No caso 4, um cenário complexo, foi desenvolvido um ambiente com três obstáculos distintos, cada um com posições e velocidades únicas. A principal finalidade desta simulação é destacar a capacidade de o algoritmo desenvolvido permitir que o USV manobre com segurança em ambientes densos e desafiadores. Durante a simulação, o algoritmo demonstra sua eficácia em lidar com situações complexas e evitar colisões num cenário de tráfego intenso. Assim para a execução do cenário foram utilizados os parâmetros apresentados nas Tabela 9 e Tabela 10.

Tabela 9 - Caso 4 - Parâmetros do algoritmo

Parâmetros do algoritmo

<i>Incerteza na velocidade do Obstáculo para representação do VO [m/s]</i>	2
<i>Incerteza nas posições e velocidades dos obstáculos e USV por segundo</i>	0.2
<i>Distancia de segurança [m]</i>	60

¹⁰ Link para visualização do algoritmo no caso 4: <https://www.youtube.com/watch?v=bsbRIGxJORK>

<i>Velocidade cruzeiro</i>	12
<i>t_max(s)</i>	40

Tabela 10 - Caso 4 - Parâmetros de simulação

Parâmetros de simulação

<i>Objetivo</i>	[2000; 2000]
<i>Posição USV</i>	[0; 0]
<i>Velocidade USV inicial</i>	[8; 8]
<i>Raio USV [m]</i>	20
<i>Posição Obstáculo 1</i>	[600; 300]
<i>Posição Obstáculo 2</i>	[1000; 1100]
<i>Posição Obstáculo 3</i>	[1000; 2000]
<i>Velocidade Obstáculo 1</i>	[-5;0]
<i>Velocidade Obstáculo 2</i>	[-10; -8]
<i>Velocidade Obstáculo 3</i>	[0; -9]
<i>Raio Obstáculos [m]</i>	50

Um aspecto notável da simulação é a trajetória bastante fluida que o USV segue, mostrando a capacidade do algoritmo de calcular manobras suaves e contínuas. Além disso, o algoritmo assegura que o USV mantenha constantemente a distância de segurança definida de todos os navios presentes (Figura 71). O VO, apresentado na Figura 69, representa as limitações de velocidade, sendo que na figura em questão formam uma figura única. Assim, é evidenciado, através da representação aproximada do VO, o momento em que o USV se desvia do primeiro obstáculo.

Em relação à velocidade e rumo (Figura 70) os valores observados são bastante plausíveis. A simulação demonstra que o USV é capaz de manter uma velocidade adequada e realizar ajustes de velocidade de maneira suave, sem variações bruscas ou inexplicáveis. Desta forma reforça a robustez do algoritmo em ajustar a velocidade de acordo com as condições do ambiente e a proximidade dos obstáculos.

A simulação destaca a adaptabilidade e a confiabilidade do algoritmo, demonstrando sua utilidade em situações marítimas complexas e desafiadoras.

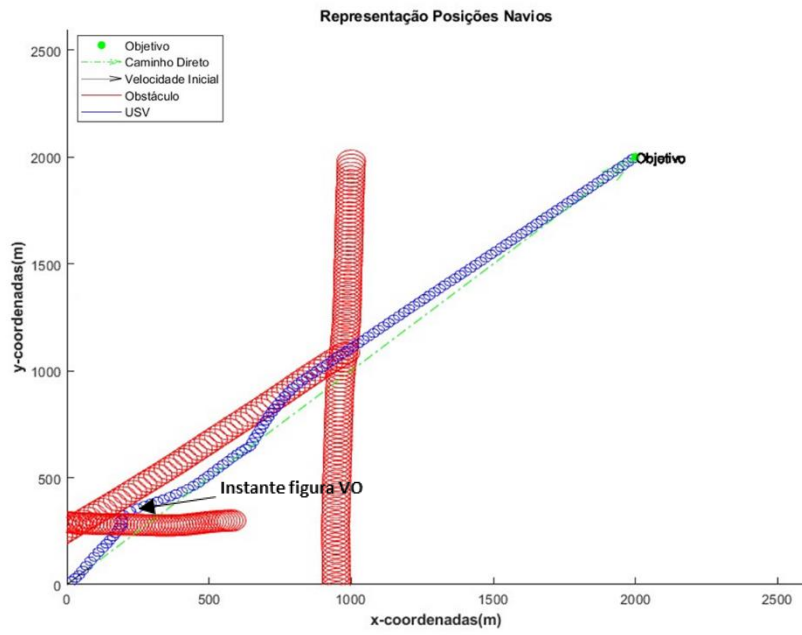


Figura 68 - Caso 4 - Representação da trajetória do USV e dos obstáculos num ambiente denso

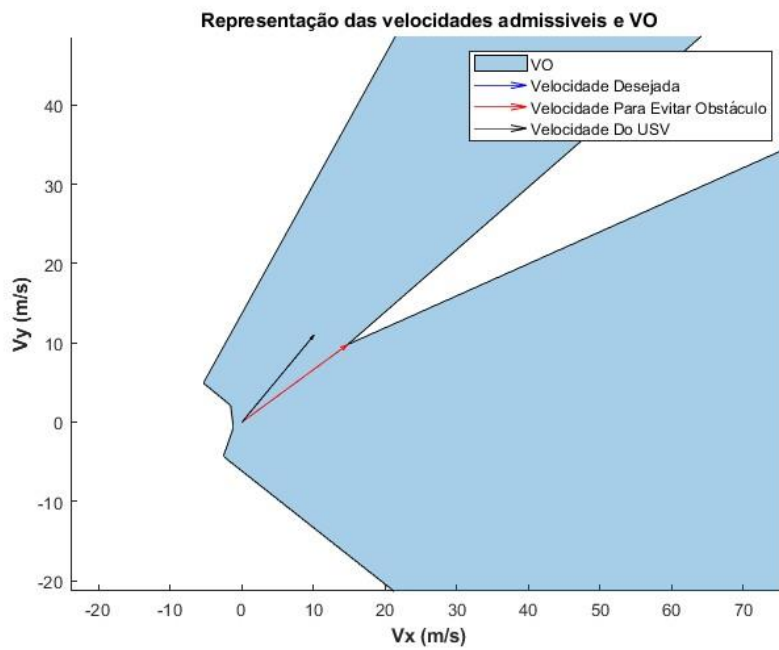


Figura 69 - Caso 4 - Representação do VO

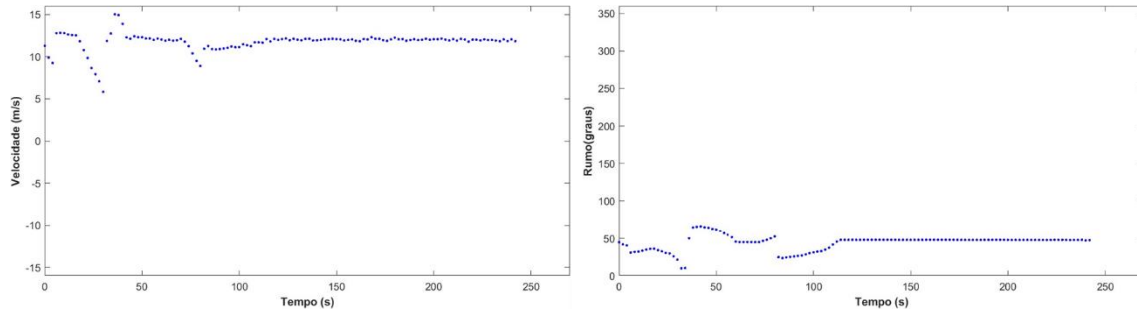


Figura 70 – Caso 4 - Valores da velocidade e do rumo ao longo do tempo

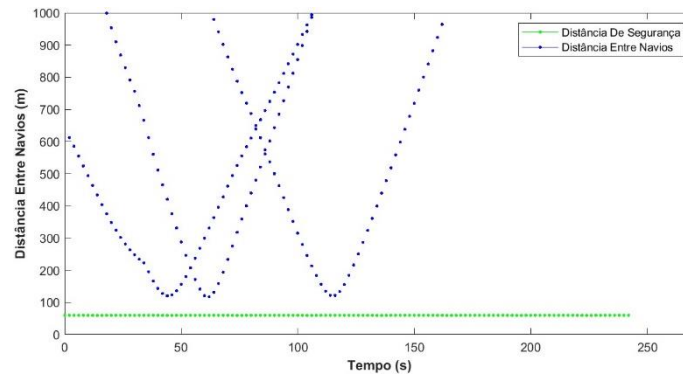


Figura 71 - Caso 4 - Valores da distância entre navios ao longo do tempo

5.3 Evitar obstáculos (com RIEAM)

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir da implementação e aplicação das regras do RIEAM. A análise dos dados e dos resultados obtidos por meio da simulação permitirá avaliar a eficácia do algoritmo, bem como comparar com os resultados obtidos nos casos anteriores. Assim, permitirá uma compreensão mais clara de como as regras são aplicadas num cenário de uma potencial colisão.

Nos cenários subsequentes serão introduzidos novos parâmetros a fim de cumprir rigorosamente com as regras. O t_{max} e a distância de segurança serão superiores comparativamente aos utilizados anteriormente, permitindo que o USV reaja antecipadamente e mantendo uma distância superior dos obstáculos.

5.3.1 Regra 13¹¹

No presente cenário o USV demonstra a capacidade do algoritmo de se desviar de um obstáculo numa situação em que este alcança outro navio. Os parâmetros utilizados estão descritos nas Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 11 - Regra 13 - Parâmetros do algoritmo

Parâmetros do algoritmo	
<i>Incerteza na velocidade do Obstáculo para representação do VO [m/s]</i>	2
<i>Incerteza nas posições e velocidades dos obstáculos e USV por segundo</i>	0.1
<i>Distancia de segurança para Regras do RIEAM [m]</i>	250
<i>Velocidade cruzeiro</i>	12
<i>t_max RIEAM regra 13(s)</i>	120

Tabela 12 - Regra 13 - Parâmetros de simulação

Parâmetros de simulação	
<i>Objetivo</i>	[400; 2800]
<i>Posição USV</i>	[400; 0]
<i>Velocidade USV inicial</i>	[8; 8]
<i>Raio USV [m]</i>	20
<i>Posição Obstáculo</i>	[400; 1000]
<i>Velocidade Obstáculo</i>	[0; 3]
<i>Raio Obstáculo [m]</i>	50

Neste cenário o USV apresenta uma trajetória bastante suave, realizando uma curva gradual para EB por forma a ultrapassar o obstáculo, cumprido com a regra proposta e a navegar em direção do objetivo. Ao contrário do que aconteceu no caso 2, nesta simulação não ocorreram oscilações na velocidade nem de rumo, resultando numa manobra mais controlada (Figura 72 e Figura 74).

¹¹ Link para visualização do algoritmo no cenário em que a regra 13 é aplicada: <https://www.youtube.com/watch?v=CP6JJguKViY>

O aumento do t_{max} permitiu uma antecipação da manobra e, consequentemente, uma maior fluidez da mesma. No que diz respeito ao aumento da distância de segurança, permitiu também manobrar antecipadamente (Figura 75). A alteração destes dois parâmetros é visível na Figura 73, no qual o VO tem uma área superior. Esse mesmo gráfico é relativo ao momento antes de o USV manobrar, uma vez que a velocidade do USV se encontra dentro do VO.

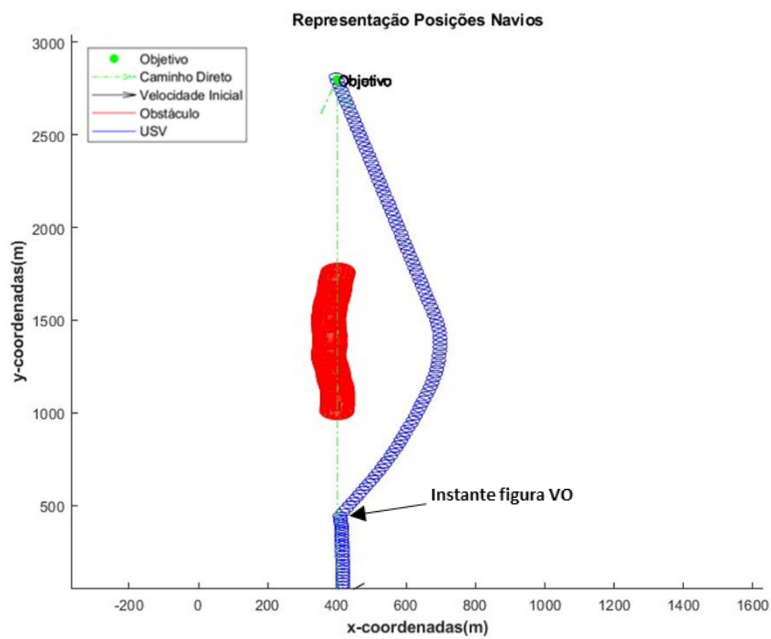


Figura 72 - Regra 13 - Trajetória do USV e do Obs

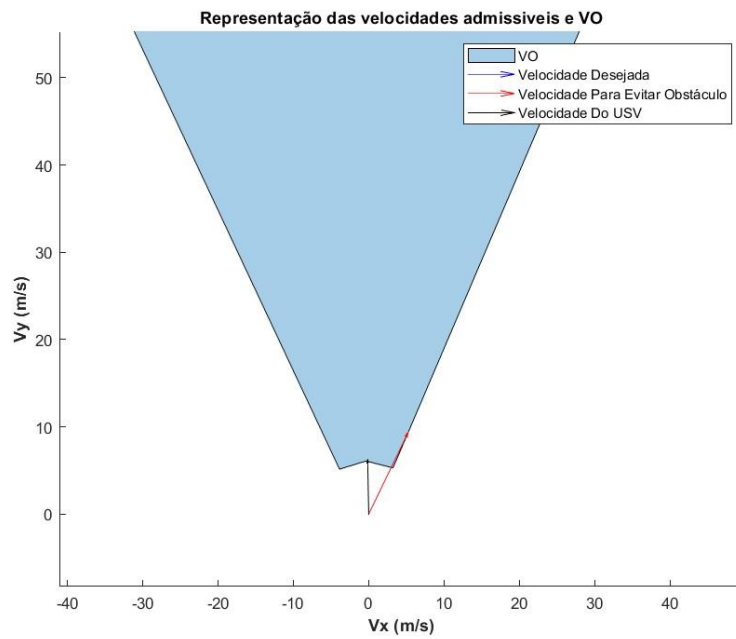


Figura 73 - Regra 13 - Representação do VO no instante em que o USV guina

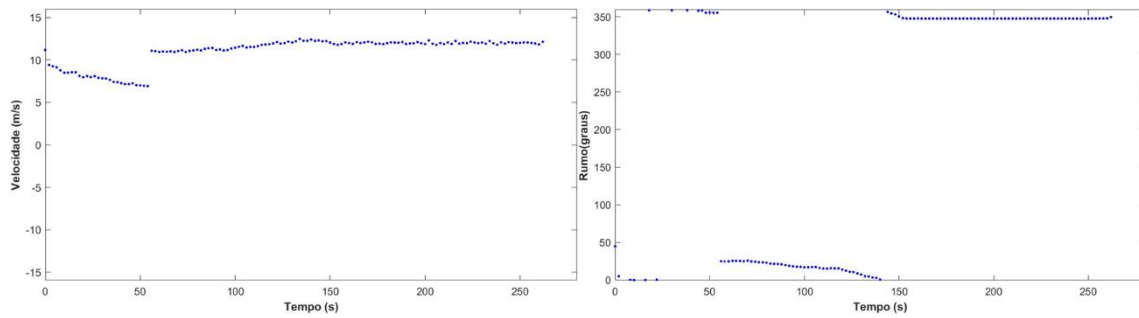


Figura 74 - Regra 13 - Valores da velocidade e do rumo ao longo do tempo

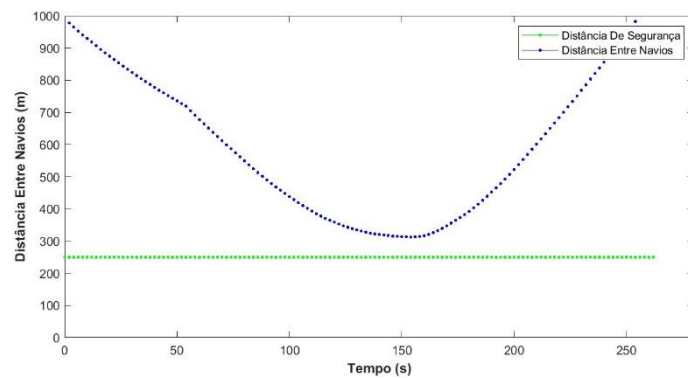


Figura 75 - Regra 13 - Valores da distância entre navios ao longo do tempo

5.3.2 -Regra 14¹²

No presente cenário é demonstrada uma situação específica relacionada com a regra 14 do RIEAM. Neste caso, os navios encontram-se numa situação de roda a roda, ou seja, a aproximar proa com proa. Os parâmetros utilizados para definir e limitar a simulação em questão, estão definidos na Tabela 13 e na Tabela 14.

Ao contrário do caso 3, em que o navio guinou para BB, neste caso o navio guina para EB cumprindo com a presente regra. De modo, a criar as limitações necessárias para manobrar, o VO é modificado assim que deteta que os navios se encontram neste tipo de situação (Figura 77). O VO proíbe as velocidades que façam com que o USV guine para BB, tal como está representado na Figura 76.

Neste cenário, a ênfase está relacionada com a aplicação precisa da regra e com parâmetros do RIEAM, bem como na habilidade do navio em executar manobras suaves e controladas em conformidade com essas diretrizes, garantindo a segurança e a integridade da navegação. No entanto, segundo a regra ambos os navios têm de manobrar o que não acontece na presente simulação, uma vez que não é possível controlar o movimento do obstáculo. Apesar disso é visível a capacidade do USV reagir corretamente nestes casos, sendo o pretendido com a presente simulação.

Tabela 13 - Regra 14 - Parâmetros do algoritmo

Parâmetros do algoritmo	
<i>Incerteza na velocidade do Obstáculo para representação do VO [m/s]</i>	2
<i>Incerteza nas posições e velocidades dos obstáculos e USV por segundo</i>	0.1
<i>Distancia de segurança para Regras do RIEAM [m]</i>	250
<i>Velocidade cruzeiro</i>	12
<i>t_max RIEAM regra 14(s)</i>	120

¹² Link para visualização do algoritmo no cenário em que a regra 14 é aplicada: <https://www.youtube.com/watch?v=foeKtCoPneM>

Tabela 14 - Regra 14 - Parâmetros de simulação

Parâmetros de simulação

Objetivo	[2500; 2500]
Posição USV	[0; 0]
Velocidade USV inicial	[8; 8]
Raio USV [m]	20
Posição Obstáculo	[1800; 1800]
Velocidade Obstáculo	[-6; -6]
Raio Obstáculo [m]	50

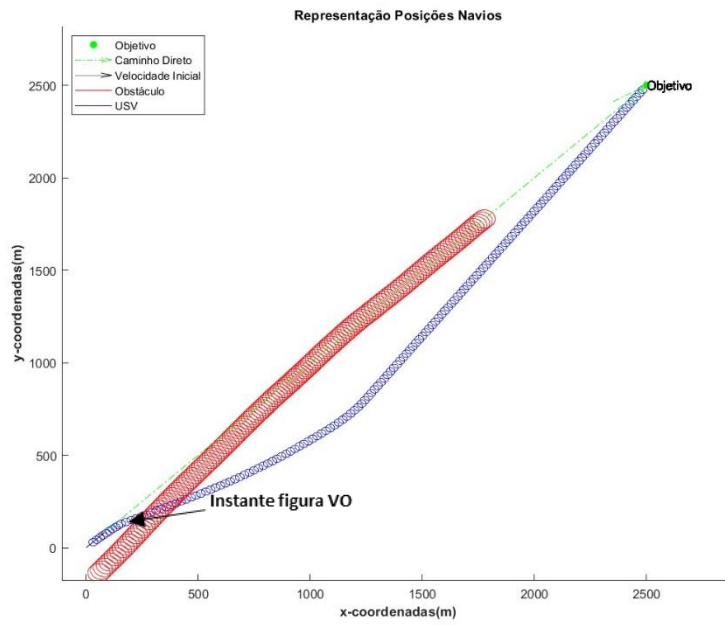


Figura 76 - Regra 14 - Trajetória do USV e do Obs

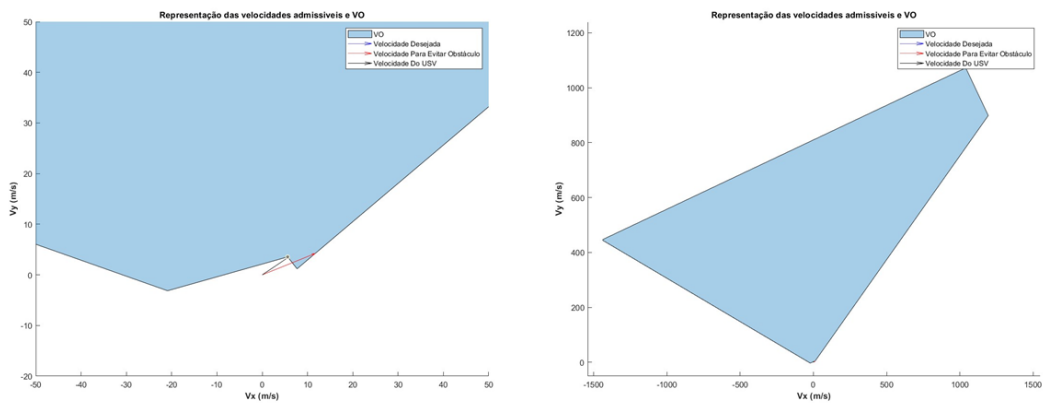


Figura 77 - Regra 14 - Representação do VO no instante em que o USV guina (esquerda) e VO completo (direita)

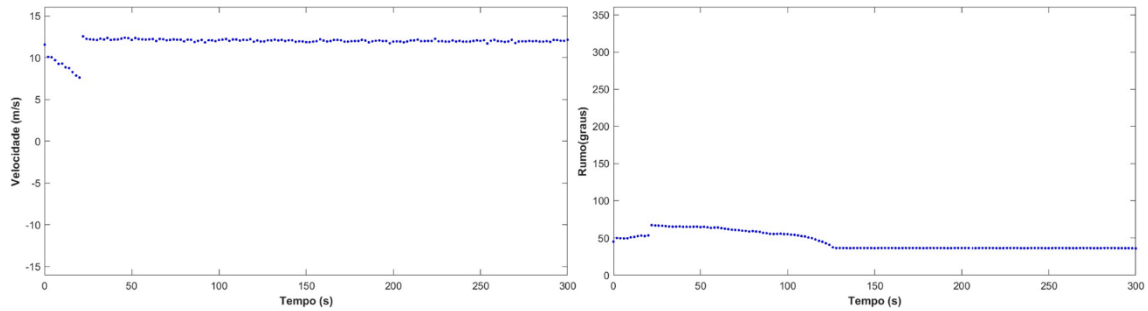


Figura 78 - Regra 14 - Valores da velocidade e do rumo ao longo do tempo

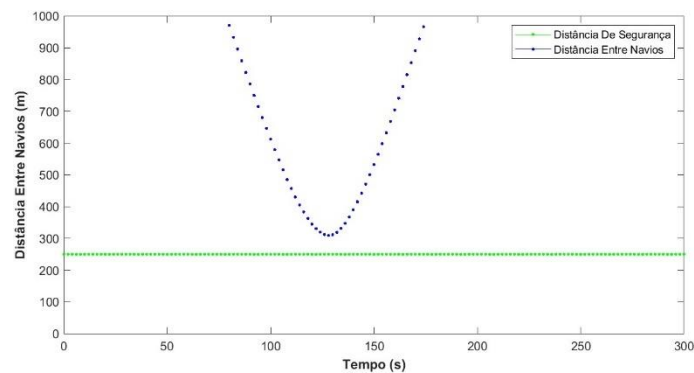


Figura 79 - Regra 14 - Valores da distância entre navios ao longo do tempo

5.3.3 Regra 15¹³

No presente cenário pretende-se demonstrar uma situação específica em que o USV se encontra numa situação de rumos cruzados, sem prioridade. Neste caso o USV necessita de cumprir com a regra 15 do RIEAM e manobrar conforme o regulamento. Os parâmetros utilizados para a simulação estão descritos nas Tabela 15 e Tabela 16.

Tabela 15 - Regra 15 - Parâmetros do algoritmo

Parâmetros do algoritmo	
<i>Incerteza na velocidade do Obstáculo para representação do VO [m/s]</i>	2
<i>Incerteza nas posições e velocidades dos obstáculos e USV por segundo</i>	0.1

¹³ Link para visualização do algoritmo no cenário em que a regra 15 é aplicada: <https://www.youtube.com/watch?v=ctSbxvYiMio>

<i>Distancia de segurança para Regras do RIEAM [m]</i>	250
<i>Velocidade cruzeiro</i>	12
<i>t_max RIEAM regra 15(s)</i>	120

Tabela 16 - Regra 15 - Parâmetros de simulação

Parâmetros de simulação

<i>Objetivo</i>	[1000; 3000]
<i>Posição USV</i>	[1000; 0]
<i>Velocidade USV inicial</i>	[8; 8]
<i>Raio USV [m]</i>	20
<i>Posição Obstáculo</i>	[3000; 1000]
<i>Velocidade Obstáculo</i>	[-10; 0]
<i>Raio Obstáculo [m]</i>	50

Assim, de acordo com o Figura 80 é possível observar que o USV cumpre com a regra mantendo sempre a distância de segurança em direção ao seu objetivo. Denote-se que a manobra executada não é perfeita, uma vez que o algoritmo tenta primeiramente, desviar-se para BB e só depois se desvia para EB de modo a cumprir com a presente regra. A Figura 81 representa o VO utilizado para limitar a guinada para BB e o momento exato em que o algoritmo detecta que tem que guinar para EB e começa a manobrar.

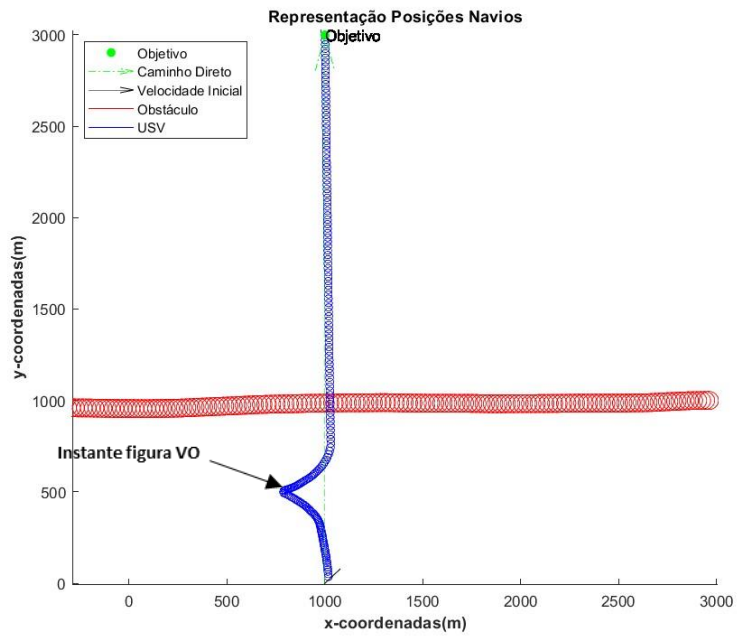


Figura 80 - Regra 15 - Trajetória do USV e do Obs

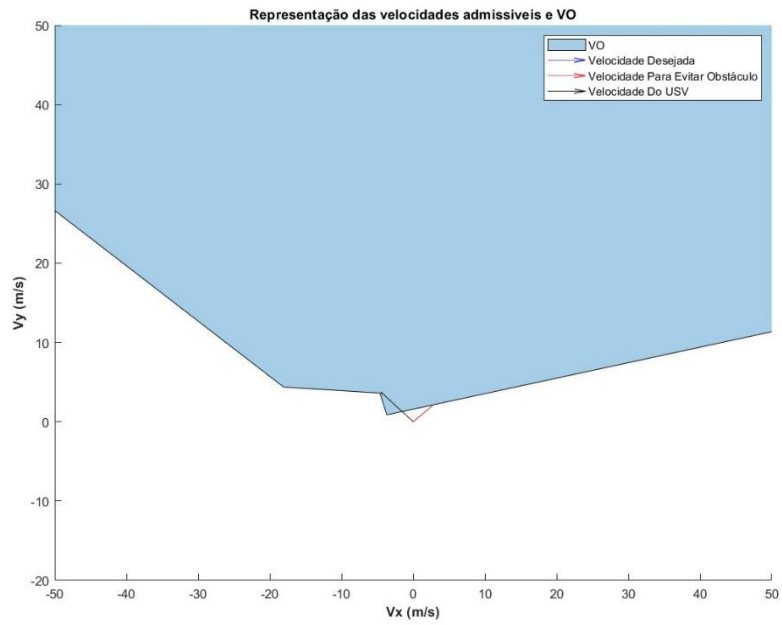


Figura 81 - Regra 15 - Representação do VO no instante em que o USV guina

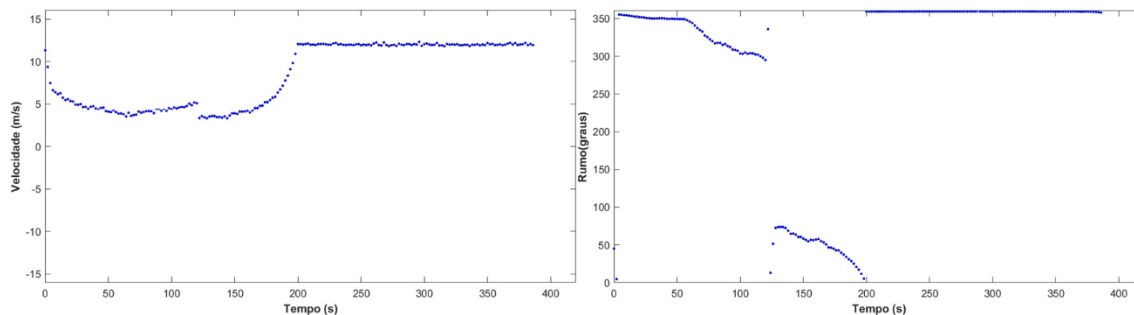


Figura 82 - Regra 15 - Valores da velocidade e do rumo ao longo do tempo

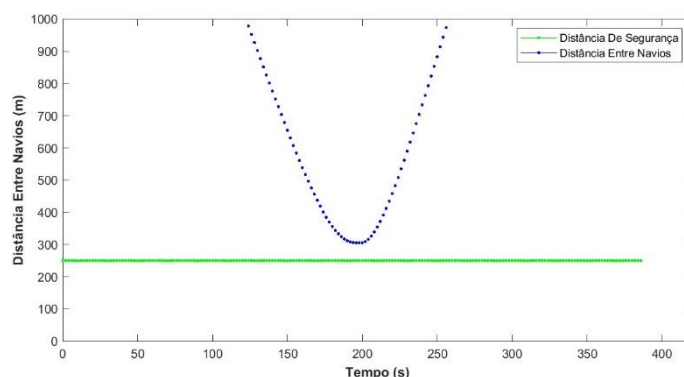


Figura 83 - Regra 15 - Valores da distância entre navios ao longo do tempo

De facto, é importante reconhecer que, embora o algoritmo desenvolvido seja altamente eficaz em evitar colisões, pode não replicar exatamente a perfeição de algumas manobras executadas por um humano em todos os aspetos. No entanto, é possível ajustar diversos parâmetros para alcançar resultados mais realistas e suaves, por forma a se aproximarem das manobras humanas.

Nesse sentido, durante a simulação, foram realizadas alterações em parâmetros chave, como a posição do obstáculo e o valor de t_{max} , a fim de explorar diferentes cenários e observar os efeitos correspondentes no comportamento do USV.

Deste modo, ao reduzir o valor de t_{max} de 120 para 60, por exemplo, foi possível observar que o USV detetou o obstáculo mais tarde, como seria de esperar, o que resultou numa manobra executada de forma mais tardia (Figura 84). Este exemplo específico o USV assume que pode seguir diretamente até o destino sem se

desviar do obstáculo e mantendo a distância de segurança. Isso pode ocorrer quando o obstáculo é detectado mais tarde devido à modificação do valor do t_{max} . No entanto, mesmo com essa mudança, o USV ainda executa uma curva no final da trajetória. Isso deve-se ao fato de o VO estar sempre ativo para a regra 15, o que influencia a manobra de guinada para BB no final do trajeto.

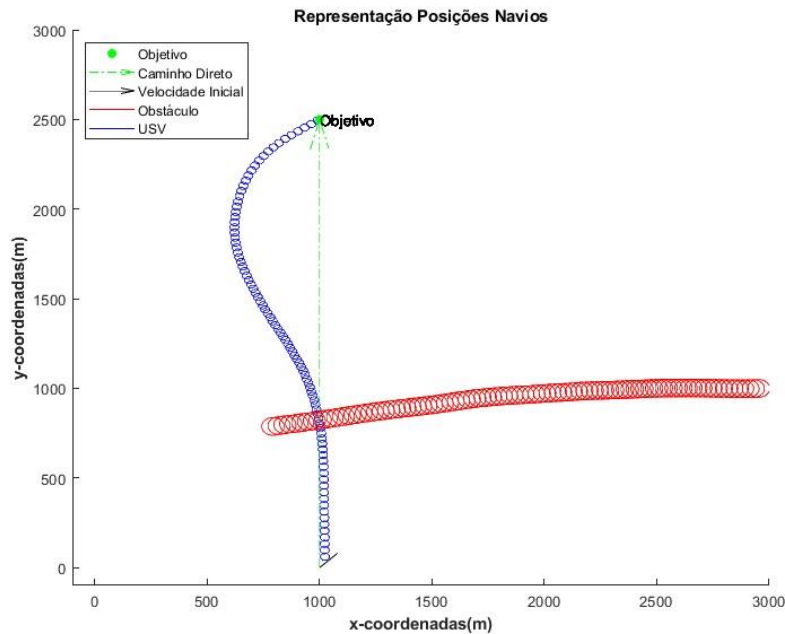


Figura 84 - Representação da trajetória do USV e do obstáculo numa situação em que o USV não tem prioridade de acordo com a regra 15 do RIEAM para um t_{max} de 60

No caso seguinte, (Figura 85) foi utilizado um valor de t_{max} igual a 180. Observou-se uma antecipação da manobra por parte do USV, resultando numa trajetória ainda mais suave e eficaz. Logo no início da situação em que os navios se aproximam, o USV começou a guinar ligeiramente para BB tal como no primeiro cenário.

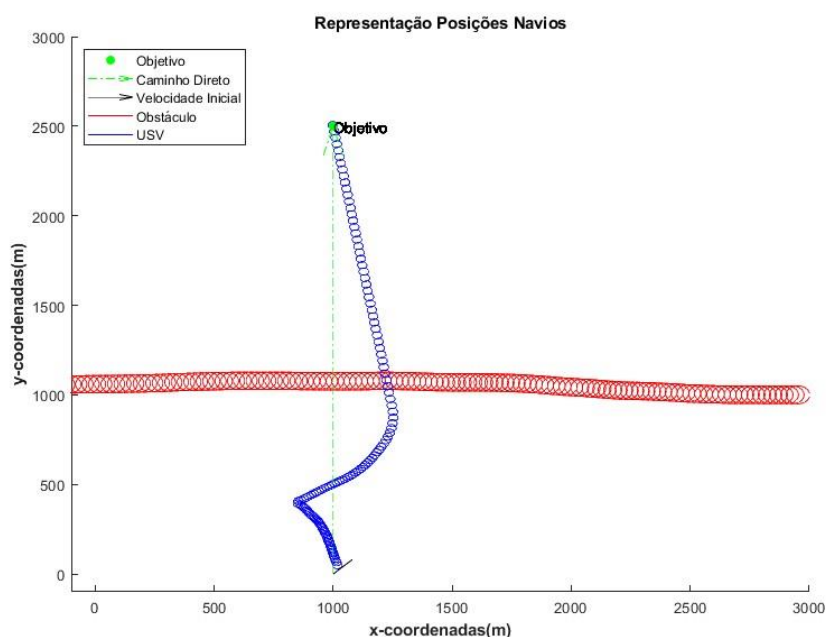


Figura 85 - Representação da trajetória do USV e do obstáculo numa situação em que o USV não tem prioridade de acordo com a regra 15 do RIEAM para um t_{max} de 180

5.3.3.1 Regra 15 situação de emergência

No entanto, numa situação onde o USV está em conformidade com a Regra 15, em que lhe é concedida a prioridade de passagem, não é possível ter a certeza de que o outro navio cumpra com o regulamento, isto é, que guine para EB.

Nesses casos, é importante que o USV mantenha o seu rumo e velocidade, conforme o regulamento, mas que esteja pronto para reagir a qualquer situação de emergência, quando o outro navio não cumpre as regras de navegação.

A simulação abordada um cenário de emergência, no qual o obstáculo não executa a manobra conforme as regras estabelecidas. Na Figura 86, é observável que o algoritmo é capaz de reagir a este tipo de situações e de se desviar do obstáculo de maneira eficiente, mesmo que este não esteja a cumprir com as regras.

Este exemplo destaca a robustez e a adaptabilidade do algoritmo, uma vez que é capaz de lidar com cenários em que as outras embarcações podem não cumprir com as regras, garantindo que o USV evite obstáculos de forma segura.

Tabela 17 - Regra 15 em situação de emergência - Parâmetros do algoritmo

Parâmetros do algoritmo	
Incerteza na velocidade do Obstáculo para representação do VO [m/s]	2
Incerteza nas posições e velocidades dos obstáculos e USV por segundo	0.1
Distancia de segurança	60
Velocidade cruzeiro	12
t_max	40

Tabela 18 - Regra 15 em situação de emergência - Parâmetros de simulação

Parâmetros de simulação	
Objetivo	[1000; 3000]
Posição USV	[1000; 0]
Velocidade USV inicial	[8; 8]
Raio USV [m]	20
Posição Obstáculo	[-1000; 1900]
Velocidade Obstáculo	[10; 0]
Raio Obstáculo [m]	50

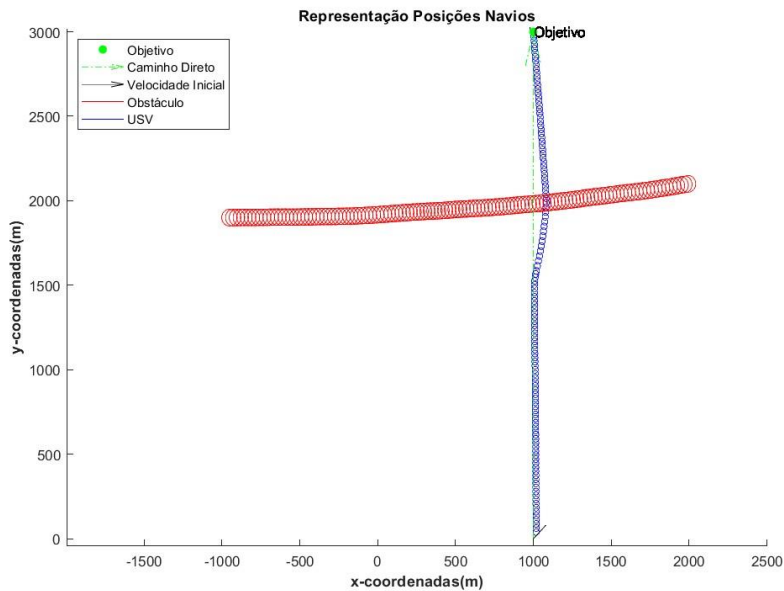


Figura 86 - Representação da trajetória do USV e do obstáculo numa situação em que o USV tem prioridade de acordo com a regra 15 do RIEAM

6. Conclusão

A presente dissertação apresenta um algoritmo de navegação marítima para evitar perigos e, simultaneamente, cumprir com o RIEAM, recorrendo à utilização do VO, obstáculo de velocidade. As regras impostas ao algoritmo são naturalmente expressas no espaço de velocidade. Este identifica a origem do obstáculo e da sua velocidade e, deste modo, aplica as restrições de modo cumprir com o RIEAM.

Para facilitar os cálculos e a simplificar a representação dos navios, foi definida a conceção de todos os obstáculos e do USV em forma circular. A criação de um VO com 6 pontos permitiu simplificar o algoritmo e eliminar as velocidades que conduziam a um horizonte temporal bastante longo. Foram ainda adicionadas incertezas nas velocidades dos navios de modo a criar um algoritmo mais realista.

A implementação das regras do RIEAM, embora tenham apresentado resultados bastante satisfatórios, não abrangem todas as possibilidades, uma vez que, o regulamento não especifica detalhadamente cada regra, dificultando a sua implementação matemática. Assim, devido à redundância do regulamento, as regras podem ser formuladas de forma ampla, deixando espaço para interpretações e decisões, o que não acontece com o algoritmo. Deste modo, uma vez que o algoritmo não possui “a experiência normal de marinheiro”, as limitações das regras foram aplicadas de forma flexível para abranger um espectro mais amplo de cenários.

No presente trabalho, foi considerado que sempre que o USV detetasse que estava em situação de cumprimento de uma regra do RIEAM, este ativava as restrições da regra em questão, mantendo-a sempre ativa até ao objetivo. Sugere-se, como trabalho futuro, a necessidade de criar uma persistência temporal das regras do RIEAM, para que não ocorram oscilações como se verificaram no 5.2.2. Poderia ser implementado para simular o tempo necessário para a realização das manobras e ainda mantendo a restrição do VO ativa. Assim, permitiria manobras mais realistas no cumprimento das regras do RIEAM permitindo que o USV tome decisões mais condizentes com o comportamento humano.

Os resultados obtidos permitiram demonstrar a capacidade que o algoritmo possui de tomar decisões em tempo real e de ajustar a sua trajetória, mantendo sempre a distância de segurança, mesmo em situações de emergência. Denote-se que, apesar dos resultados terem sido bastante satisfatórios o algoritmo não é perfeito. As manobras realizadas por vezes não são as mais eficientes, nem as que seriam de esperar sob comando humano.

Por vezes, a complexidade do ambiente e/ou a forma como os parâmetros são ajustados fazem com que mínimos locais possam ocorrer. Assim, o algoritmo do USV fica preso numa solução que parece ser a ideal num determinado ponto, mas não é a melhor solução global, levando a uma trajetória ou resultado subótimo.

No entanto, a possibilidade de explorar diferentes configurações e parâmetros reforça a capacidade que o algoritmo possui de se ajustar às condições específicas e ao ambiente de navegação. Ao otimizar parâmetros como, t_{max} , que influencia diretamente a resposta do USV em relação aos obstáculos iminentes, a distância de segurança, que permite manobras mais próximas ou mais afastadas, entre outros, é possível alcançar manobras mais realistas e suaves, apesar de não replicar perfeitamente as decisões que um humano tomaria.

Como propostas de trabalho futuro sugere-se: a melhoria do algoritmo para que este tenha em conta a dinâmica do USV, e não ocorram situações em que a velocidade necessária para evitar o obstáculo, isto é, a velocidade fornecida pelo algoritmo, não varie entre dois valores distintos, ambos na fronteira do VO; favorecer mudanças de rumo em detrimento de mudanças de velocidade, ou seja, sempre que possível o USV deve apenas alterar o seu rumo para evitar obstáculos, mantendo a velocidade constante; desenvolver um método mais robusto de detetar as regras do RIEAM que devem ser aplicadas, tendo em conta o histórico das trajetórias e garantindo uma persistência temporal, uma vez que, com o algoritmo atual, se o USV for ultrapassado por estibordo, a certa altura, vai tentar evitar o navio que o está a ultrapassar por EB, o que não deveria ocorrer.

Referências Bibliográficas

- Alves, J., Oliveira, P., Oliveira, R., Pascoal, A., Rufino, M., Sebastiao, L., & Silvestre, C. (2006). Vehicle and Mission Control of the DELFIM Autonomous Surface Craft. *2006 14th Mediterranean Conference on Control and Automation*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/MED.2006.328689>
- Benjamin, M. R., Curcio, J. A., Leonard, J. J., & Newman, P. M. (2006). Navigation of unmanned marine vehicles in accordance with the rules of the road. *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006., May*, 3581–3587. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2006.1642249>
- Bertram, V. (2008). *Unmanned Surface Vehicles – A Survey*. 1–14. [http://www.skibstekniskelskab.dk/public/dokumenter/Skibsteknisk/Download materiale/2008/10 marts 08/USVsurvey_DTU.pdf](http://www.skibstekniskelskab.dk/public/dokumenter/Skibsteknisk/Download%20materiale/2008/10%20marts%2008/USVsurvey_DTU.pdf)
- Bi, Z., Yimin, Y., & Yisan, X. (2009). Mobile Robot Navigation in Unknown Dynamic Environment Based on Ant Colony Algorithm. *2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems*, 3, 98–102. <https://doi.org/10.1109/GCIS.2009.274>
- Caccia, M., Bibuli, M., Bono, R., & Bruzzone, G. (2008). Basic navigation, guidance and control of an Unmanned Surface Vehicle. *Autonomous Robots*, 25(4), 349–365. <https://doi.org/10.1007/s10514-008-9100-0>
- Campbell, S., Abu-Tair, M., & Naeem, W. (2014). An automatic COLREGs-compliant obstacle avoidance system for an unmanned surface vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 228(2), 108–121. <https://doi.org/10.1177/1475090213498229>
- Campbell, S., Naeem, W., & Irwin, G. W. (2012). A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres. *Annual Reviews in Control*, 36(2), 267–283. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2012.09.008>

- Cao, L. (2015). Improved genetic algorithm for fast path planning of USV. In J. Liu & H. Sun (Eds.), *MIPPR 2015: Remote Sensing Image Processing, Geographic Information Systems, and Other Applications* (Vol. 9815, p. 981529). <https://doi.org/10.1117/12.2210736>
- Chen, C. H., Chen, G.-Y., & Chen, J. J. (2013). Design and implementation for USV based on fuzzy control. *2013 CACS International Automatic Control Conference (CACS)*, 345–349. <https://doi.org/10.1109/CACS.2013.6734158>
- Chen, P., Huang, Y., Mou, J., & van Gelder, P. H. A. J. M. (2018). Ship collision candidate detection method: A velocity obstacle approach. *Ocean Engineering*, 170(May), 186–198. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.10.023>
- Colito, J. (2007). *Autonomous Mission Planning and Execution for Unmanned Surface Vehicles in Compliance with the Marine Rules of the Road* [University of Washington]. http://www.aa.washington.edu/research/afsl/publications/colito_thesis_2007/thesis.pdf
- Coué, C., Pradalier, C., Laugier, C., Fraichard, T., & Bessière, P. (2006). Bayesian Occupancy Filtering for Multitarget Tracking: An Automotive Application. *The International Journal of Robotics Research*, 25(1), 19–30. <https://doi.org/10.1177/0278364906061158>
- Desa, E., Maurya, P. K., Pereira, A., Pascoal, A. M., Prabhudesai, R. G., Mascarenhas, A., Desa, E., Madhan, R., Matondkar, S. G. P., Navelkar, G., Prabhudesai, S., & Afzulpurkar, S. (2007). A Small Autonomous Surface Vehicle for Ocean Color Remote Sensing. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 32(2), 353–364. <https://doi.org/10.1109/JOE.2007.893688>
- Do, K. D., & Pan, J. (2009). Control of Ships and Underwater Vehicles. In *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952. (Vol. 3, Issue 1). Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-730-1>
- Fiorini, P., & Shiller, Z. (1998). Motion Planning in Dynamic Environments Using

Velocity Obstacles. *The International Journal of Robotics Research*, 17(7), 760–772. <https://doi.org/10.1177/027836499801700706>

Fossen, T. I. (1994). *Guidance and control of ocean vehicles*. John Wiley & Sons.

Gadre, A. S., Sonnenburg, C., Du, S., Stilwell, D. J., & Woolsey, C. (2012). Guidance and control of an unmanned surface vehicle exhibiting sternward motion. *2012 Oceans*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2012.6405021>

Ge, S. S., & Cui, Y. J. (2002). Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method. *Autonomous Robots*, 13, 207–222. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1020564024509>

Huang, Y., Chen, L., Chen, P., Negenborn, R. R., & van Gelder, P. H. A. J. M. (2020). Ship collision avoidance methods: State-of-the-art. *Safety Science*, 121, 451–473. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.09.018>

Huang, Y., Chen, L., & van Gelder, P. H. A. J. M. (2019). Generalized velocity obstacle algorithm for preventing ship collisions at sea. *Ocean Engineering*, 173(November 2018), 142–156. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.12.053>

Huang, Y., van Gelder, P. H. A. J. M., & Wen, Y. (2018). Velocity obstacle algorithms for collision prevention at sea. *Ocean Engineering*, 151(December 2017), 308–321. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.001>

Hwang, C.-N., Yang, J.-M., & Chiang, C.-Y. (2001). The Design of Fuzzy Collision-Avoidance Expert System Implemented by H^∞ - Autopilot. *Journal of Marine Science and Technology*, 9(1), 25–37. <https://doi.org/10.51400/2709-6998.2432>

Instituto Hidrográfico. (2007). *Reglamento Internacional Para Evitar Abalroamentos No Mar* (7th ed.).

International Maritime Organization. (2019). *Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972 (COLREGs)*.

<https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/COLREG.aspx>

- Khatib, O. (1985). Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2*, 500–505. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1985.1087247>
- Kim, H., Park, B., & Myung, H. (2013). Curvature Path Planning with High Resolution Graph for Unmanned Surface Vehicle. In *Advances in Intelligent Systems and Computing: Vol. 208 AISC* (pp. 147–154). https://doi.org/10.1007/978-3-642-37374-9_15
- Kuwata, Y., Wolf, M. T., Zarzhitsky, D., & Huntsberger, T. L. (2014). Safe Maritime Autonomous Navigation With COLREGS, Using Velocity Obstacles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering, 39*(1), 110–119. <https://doi.org/10.1109/JOE.2013.2254214>
- Larson, J., Bruch, M., & Ebken, J. (2006). Autonomous navigation and obstacle avoidance for unmanned surface vehicles. In G. R. Gerhart, C. M. Shoemaker, & D. W. Gage (Eds.), *Unmanned Systems Technology VIII*. <https://doi.org/10.1117/12.663798>
- Lee, S. M., Kwon, K. Y., & Joh, J. (2004). A fuzzy logic for autonomous navigation of marine vehicles satisfying COLREG guidelines. *International Journal of Control and Automation and Systems, 2*, 171–181.
- Lenart, A. S. (1983). Collision Threat Parameters for a new Radar Display and Plot Technique. *Journal of Navigation, 36*(3), 404–410. <https://doi.org/10.1017/S0373463300039758>
- Li, S., Sun, X., & Xu, Y. (2006). Particle Swarm Optimization for Route Planning of Unmanned Aerial Vehicles. *2006 IEEE International Conference on Information Acquisition, 1213–1218*. <https://doi.org/10.1109/ICIA.2006.305920>
- Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., & Yuan, C. (2016). Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control, 41*, 71–93.

<https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.04.018>

- Lyu, H., & Yin, Y. (2019). COLREGS-Constrained Real-time Path Planning for Autonomous Ships Using Modified Artificial Potential Fields. *Journal of Navigation*, 72(3), 588–608. <https://doi.org/10.1017/S0373463318000796>
- Marinha Portuguesa. (1998). *Disposições Gerais e Conceitos Fundamentais da Navegação -INA 2*.
- Martins, A., Ferreira, H. M., Almeida, C., Silva, H., Almeida, J. M., & Silva, E. (2006). ROAZ Autonomous Surface Vehicle Design and Implementation. *International Lifesaving Congress 2006*. <http://hdl.handle.net/10400.22/6974>
- Naeem, W., Irwin, G. W., & Yang, A. (2012). COLREGs-based collision avoidance strategies for unmanned surface vehicles. *Mechatronics*, 22(6), 669–678. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2011.09.012>
- Naeem, W., Sutton, R., & Xu, T. (2012). An integrated multi-sensor data fusion algorithm and autopilot implementation in an uninhabited surface craft. *Ocean Engineering*, 39, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.11.001>
- Pedersen, E., Inoue, K., & Tsugane, M. (2003). Simulator Studies on a Collision Avoidance Display that Facilitates Efficient and Precise Assessment of Evasive Manoeuvres in Congested Waterways. *Journal of Navigation*, 56(3), 411–427. <https://doi.org/10.1017/S0373463303002388>
- Peng, Z., Liu, E., Pan, C., Wang, H., Wang, D., & Liu, L. (2023). Model-based deep reinforcement learning for data-driven motion control of an under-actuated unmanned surface vehicle: Path following and trajectory tracking. *Journal of the Franklin Institute*, 360(6), 4399–4426. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2022.10.020>
- Perera, L. P., Carvalho, J. P., & Guedes Soares, C. (2010). Autonomous guidance and navigation based on the COLREGs rules and regulations of collision avoidance. In *Advanced Ship Design for Pollution Prevention* (Issue 1999, pp. 217–228). CRC

Press. <https://doi.org/10.1201/b10565-27>

Rymansaib, Z., Thomas, B., Treloar, A. A., Metcalfe, B., Wilson, P., & Hunter, A. (2023). A prototype autonomous robot for underwater crime scene investigation and emergency response. *Journal of Field Robotics*, 40(5), 983–1002. <https://doi.org/10.1002/rob.22164>

Soltan, R. A., Ashrafiuon, H., & Muske, K. R. (2009). Trajectory Real-Time Obstacle Avoidance for Underactuated Unmanned Surface Vessels. *Volume 7: 33rd Mechanisms and Robotics Conference, Parts A and B*, 7, 1059–1067. <https://doi.org/10.1115/DETC2009-86987>

Sonnenburg, C. R., & Woolsey, C. A. (2013). Modeling, Identification, and Control of an Unmanned Surface Vehicle. *Journal of Field Robotics*, 30(3), 371–398. <https://doi.org/10.1002/rob.21452>

Szlapczynski, R., & Szlapczynska, J. (2017). A method of determining and visualizing safe motion parameters of a ship navigating in restricted waters. *Ocean Engineering*, 129(December 2015), 363–373. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.11.044>

Tang, P., Zhang, R., Liu, D., Huang, L., Liu, G., & Deng, T. (2015). Local reactive obstacle avoidance approach for high-speed unmanned surface vehicle. *Ocean Engineering*, 106, 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.055>

Tang, P., Zhang, R., Liu, D., Zou, Q., & Shi, C. (2012). Research on near-field obstacle avoidance for unmanned surface vehicle based on heading window. *2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 1262–1267. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2012.6244200>

van den Berg, J., Guy, S. J., Lin, M., & Manocha, D. (2011). Reciprocal n-Body Collision Avoidance. In *IEEE Transactions on Robotics* (Vol. 29, Issue 4, pp. 3–19). https://doi.org/10.1007/978-3-642-19457-3_1

Wang, Y., Yu, X., Liang, X., & Li, B. (2018). A COLREGs-based obstacle avoidance

approach for unmanned surface vehicles. *Ocean Engineering*, 169(September), 110–124. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.09.012>

Xia, G., Han, Z., Zhao, B., & Wang, X. (2020). Local Path Planning for Unmanned Surface Vehicle Collision Avoidance Based on Modified Quantum Particle Swarm Optimization. *Complexity*, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2020/3095426>

Yuh, J., Marani, G., & Blidberg, D. R. (2011). Applications of marine robotic vehicles. *Intelligent Service Robotics*, 4(4), 221–231. <https://doi.org/10.1007/s11370-011-0096-5>

Zhang, J., Zhang, D., Yan, X., Haugen, S., & Guedes Soares, C. (2015). A distributed anti-collision decision support formulation in multi-ship encounter situations under COLREGs. *Ocean Engineering*, 105, 336–348. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.054>

