

ESTAÇÃO DE CONTROLE EM SOLO COM FUNCIONALIDADES DE VOO MÚLTIPLO PARA VANTS

ALBERTO TORRES ANGONESE, PAULO FERNANDO FERREIRA ROSA*

**Instituto Militar de Engenharia
Pç General Tibúrcio, 80
Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

Email: angonesealberto@gmail.com, rpaulo@ime.eb.br

Abstract— This work describes the development of a computational system for a GCS (Ground Control Station) able to control the flight and navigation of multiple UAVs (Unmanned Aerial Vehicles), implementing features for formation flying and obstacle avoidance. The system was structured in two modules. The mission planning, which consist of a formation planning and a path planning tool, and the multiple flight control system. We built a simulation environment for testing and validation of the proposed methodology for implementing multiple flight. With the simulator, it is possible to perform a mission planning and evaluate the potential field parameter settings, by plotting graphical flight before a mission. Another feature of this environment is the integration of the GCS, with the flight simulator X-Plane[®], which communicates through the open source interface (X-Pi - Interface Xplane), deploying multiple flight in a very close to a real situation.

Keywords— UAV, Ground Control Station, Mission Planning, Multiple Flight, Simulation

Resumo— O presente trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema computacional para uma ECS (Estação de Controle em Solo) capaz de controlar o voo e a navegação de múltiplos VANTS (Veículos Aéreos Não Tripulados), implementando funcionalidades de voo em formação e desvio de VANTS em rota de colisão. O sistema foi estruturado em dois módulos: o planejamento de missão e o módulo para controle do voo múltiplo. Foi estruturado um ambiente de simulação, para os testes e validação da metodologia proposta para a implementação do voo múltiplo. Com o simulador desenvolvido é possível realizar um planejamento de missão e avaliar os parâmetros do campo potencial, através da plotagem gráfica do voo antes de uma missão. Outra funcionalidade deste ambiente é a integração da ECS, com o simulador de voo X-Plane[®], que se comunica, através da interface de código aberto (X-Pi - XPlane Interface), implantando o voo múltiplo em um ambiente muito próximo ao de uma situação real.

Palavras-chave— VANT, Estação de Controle em Solo, Planejamento de Missão, Voo Múltiplo, Simulação

1 Introdução

Recentemente, VANTS (Veículos Aéreos Não Tripulados), tem sido constante utilizados, tanto em aplicações civis quanto militares, em geral, em situações inviáveis ou perigosas para atuação humana. Em muitos destes cenários fica evidente a importância da utilização de múltiplas aeronaves, que podem trabalhar cooperativamente para um melhor cumprimento das missões. Um exemplo disso, pôde ser observado na operação de monitoramento do desastre ocorrido na região serrana do Rio de Janeiro em 2010, realizada pelo projeto VANT-IME (Neto et al., 2011). No desastre ambiental, milhares de pessoas foram soterradas pelos desabamentos ocorridos. A comparação das fotografias aéreas retiradas pelo equipamento do VANT logo após o desabamento, comparadas com fotos do Google Maps (figura 1), auxiliaram no processo de identificação dos possíveis locais com vítimas e agilizaram o processo de busca e salvamento. Na figura 1a retrata o local antes do desabamento, enquanto a figura 1b, exibe as mesmas imagens sobrepostas em fotos retiradas pelo equipamento do VANT-IME para comparação e identificação dos locais. Neste cenário, o tempo é um fator crítico para o resgate de vítimas com vida. A utilização de múltiplas aeronaves trabalhando

cooperativamente, pode auxiliar na redução desse tempo aumentando as chances de sobrevivência das vítimas soterradas.

Das pesquisas realizadas pelo projeto VANT-IME, destacamos a de (Pinheiro, 2006) que modelou um sistema para uma frota de Dirigíveis Autônomos não Tripulados (DANTS), por meio de técnicas de Engenharia de Sistemas Multi Agentes (MultiAgent System Engineering - MaSE), chegando a um modelo no qual os componentes da frota são mapeados em modelos de agentes. O de (Maroquio, 2007), que implementou um simulador para Dirigíveis Autônomos não Tripulados (DANTS), como continuidade do trabalho de Pinheiro e o de (Vidal, 2007), que implementou um sistema de navegação baseado em visão para dirigíveis autônomos.

Os trabalhos apresentados por (Garcia and Barnes, 2010), (Barnes et al., 2007) e (Paul et al., 2008), abordaram a problemática do voo múltiplo com base em campos potenciais e utilizaram ambientes de simulação para validação e testes das soluções propostas. Em (Garcia and Barnes, 2010) foi proposto o desenvolvimento de um *cluster* composto por 7 máquinas, para conexão do simulador de voo X-lane[®] (Meyer, 2011) e o Matlab/Simulink, compondo um ambiente de alto desempenho gráfico para simulação de múltiplas aeronaves.



(a) Imagens do Google Maps antes do desabamento



(b) Imagens do mesmo local, capturadas logo após o desastre.

Figura 1: Operação Região Serrana - RJ VANT-IME. Fonte:(Neto et al., 2011)

O controle e a formação de voo, abordados no trabalho de (Garcia and Barnes, 2010) basearam-se em (Barnes et al., 2007) que, através da utilização de funções potenciais, descreve o controle de enxames de veículos. O trabalho de (Paul et al., 2008), descreve uma abordagem de formação baseada em um líder virtual, em que VANTs denominados *seguidores* são atraídos para a área de influência do VANT virtual, denominado *líder* e acompanham a sua movimentação ao longo de uma trajetória.

Neste trabalho, apresentamos o desenvolvimento de uma solução de software de uma ECS (Estação de Controle em Solo) capaz de controlar múltiplas aeronaves não tripuladas em voo em formação. Uma metodologia baseada em campos potenciais adaptada de (Goodrich, 2002), foi desenvolvida para o tratamento do voo múltiplo. Para testes e validação dos métodos propostos para implementação das funcionalidades de voo múltiplo foi estruturado um ambiente de simulação composto por dois módulos. Um módulo de planejamento de missão e um módulo de controle do voo múltiplo. O módulo de planejamento de missão gráfico foi baseado na API NASA World Wind (Hogan, 2011), que forneceu ferramentas para manipulação e visualização de dados geográficos 3D. Após o planejamento da missão, o simulador permite uma análise da situação do voo através da visualização das trajetórias simuladas. Com essa

função é possível rever os parâmetros do campo potencial e reavaliar um planejamento de voo antes de uma missão. Outra funcionalidade da ECS é a integração com o simulador de voo X-Plane® (Meyer, 2011), que se comunica através da interface de código aberto X-Pi (*XPlane Interface*), proposta por (Cantoni, 2010), implementando o voo múltiplo em um ambiente próximo ao real.

Além da introdução, este trabalho está organizado em mais 3 seções. A seção 2, detalha os módulos da aplicação desenvolvida neste trabalho e na seção 3, são descritos os experimentos e resultados obtidos dos testes efetuados. Por fim na seção 4, concluímos o trabalho e apresentamos as propostas de trabalhos futuros.

2 Módulos da ECS

A aplicação da ECS é composta por dois módulos: o de planejamento de missão e o de controle do voo múltiplo. O módulo de planejamento da missão é dividido em outros dois sub-módulos, o de planejamento de formação e de trajetória, que foram implementados com base na API - Nasa World Wind (Hogan, 2011). A World Wind é uma API para aplicações JAVA que disponibiliza uma série de componentes para a manipulação e tratamento de informações geográficas utilizando mapas 3D. A partir desta API foi possível desenvolver uma ferramenta gráfica de planejamento de trajetórias e de formação de voo utilizando mapas. O fluxograma da figura 2, apresenta uma visão detalhada dos módulos do planejamento de missão.

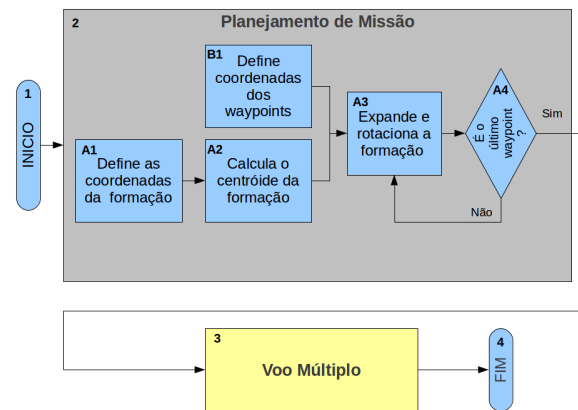


Figura 2: Fluxograma do Planejamento da Missão

Na fase A1 do fluxograma da figura 2, as coordenadas da formação são obtidas graficamente utilizando o módulo de planejamento da formação. A figura 3, demonstra um exemplo de formação triangular, que neste trabalho denominamos de formação *delta*, em que cada marcador definido no mapa corresponderá a uma aeronave instanciada no simulador. O painel à esquerda da imagem, alterna entre o módulo de formação e planejamento de trajetória, que correspondem às etapas 2 e 3 do fluxograma. Na fase B1, as coordenadas dos *waypoints* são definidas através da



Figura 3: Módulo gráfico de planejamento da formação (etapas A1 e A2 do fluxograma)

ferramenta de planejamento de trajetória de voo. Neste módulo, as coordenadas dos *waypoints* para o plano de voo, também são obtidas graficamente pela plotagem dos marcadores no mapa, conforme ilustrado na figura 6. Na fase A2, ainda no fluxograma do planejamento da missão ilustrado na figura 2, é definido o centróide da formação a partir das coordenadas (latitude e longitude) de cada aeronave definida na etapa anterior A1. O cálculo das coordenadas do centroide pode ser obtido por:

$$(x_c, y_c) = \sum_{i=1}^{n_v} (lat_i, lon_i) / n_v$$

onde, x_c, y_c são as coordenadas do centroide, n_v é o número total de VANTs e lat_i e lon_i são as respectivas latitudes e longitudes de cada VANT i , obtidas da fase A1 descrita no fluxograma do planejamento da missão.

Uma vez definida a formação (fase A1), calculado o centróide (fase A2) e definidas as coordenadas dos *waypoints* (fase B1), o módulo de planejamento da missão, expande e rotaciona as coordenadas de formação para cada *waypoint* do planejamento de trajetória. (fases A3 e A4 do fluxograma da figura 2). Esse processo é realizado pelos seguintes cálculos:

$$W_{i_x} = W_{atual_x} + (dx_c \cos(\phi) + dy_c \sin(\phi))$$

$$W_{i_y} = W_{atual_y} + (-dx_c \sin(\phi) + dy_c \cos(\phi))$$

onde, dx_c é a distância do centroide para a coordenada de latitude do VANT e dy_c é a distância do centroide para a coordenada de longitude, obtidos na etapa A1 do fluxograma. ϕ é o ângulo entre o *waypoint* atual (W_{atual}) e o próximo *waypoint* (W_{prox}) e (W_{i_x}, W_{i_y}) correspondem às coordenadas dos waypoints individuais de cada VANT da formação, expandidos e rotacionados em relação ao próximo *waypoint*. Isso significa, que para cada *waypoint*, são criados *waypoints* virtuais para cada VANT, com a configuração da formação definida, e para os quais as aeronaves são atraídas,

proporcionando o voo em formação pela trajetória. Após o planejamento da missão, é iniciado o módulo de controle do voo múltiplo, conforme a etapa 3 do fluxograma da figura 4.

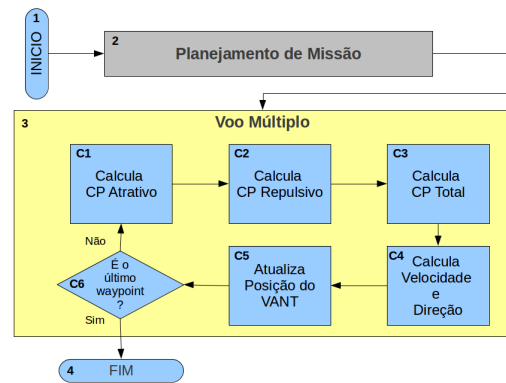


Figura 4: Fluxograma do módulo de controle do voo múltiplo

Para o cálculo do campo potencial atrativo (fase C1), consideramos que $[x_G, y_G]$ representam as coordenadas do ponto objetivo (G do inglês *Goal*) e que $[x_V, y_V]$ representam a posição do VANT, r o raio, s a distância que define a área de influência e α a força de atração. A partir destes, calculamos a distância $d = \sqrt{(x_G - x_V)^2 + (y_G - y_V)^2}$ entre o VANT e o *waypoint* e a direção $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y_G - y_V}{x_G - x_V} \right)$. Após isso, ∇x_G e ∇y_G são calculados conforme as regras:

1. Se $d < r$ então $\nabla x_G = \nabla y_G = 0$
2. Se $d > r + s$ então
 $\nabla x_G = \alpha s \cos(\theta)$ e $\nabla y_G = \alpha s \sin(\theta)$
3. Se $r \leq d \leq r + s$ então
 $\nabla x_G = \alpha r \cos(\theta)$ e $\nabla y_G = \alpha r \sin(\theta)$

Na fase C2 é calculado o campo repulsivo em que consideramos, $[x_O, y_O]$ representando as coord-

nados do obstáculo¹, $[x_V, y_V]$ a posição do VANT, R o raio do obstáculo, S a distância que define a área de influência repulsiva e β a força repulsiva. Da mesma forma que na fase C1 d e θ são calculados e a partir destes, ∇x_O e ∇y_O podem ser calculados pelas regras:

1. Se $d < r$ então
 $\nabla x_O = -\beta s \cos(\theta)$ e $\nabla y_O = -\beta s \sin(\theta)$
2. Se $r \leq d \leq r + s$ então
 $\nabla x_O = -\beta(R + S - d) \cos(\theta)$
 $\nabla y_O = -\beta(R + S - d) \sin(\theta)$
3. Se $d > r + s$ então
 $\nabla x_O = \nabla y_O = 0$

Os gradientes ∇x_G e ∇y_G gerados pelo campo atrativo calculado na fase C1 e ∇x_O e ∇y_O provenientes do campo repulsivo calculado na fase C2, são combinados na fase C3 para o cálculo do campo potencial total, atraindo os VANTs para os waypoints e repelindo-os entre si ao longo da trajetória. O campo potencial total é calculado de acordo com as equações:

$$\begin{aligned}\nabla x_{total} &= \nabla x_O + \nabla x_G \\ \nabla y_{total} &= \nabla y_O + \nabla y_G\end{aligned}$$

Na fase C4 do fluxograma são determinados a velocidade $v = \sqrt{\nabla x^2 + \nabla y^2}$ e o ângulo $\psi = \tan^{-1}(\nabla y/\nabla x)$ do vetor de força do campo potencial. Na fase C5 do fluxograma, as coordenadas de latitude e longitude da cada aeronave são atualizadas a cada passo de tempo. São calculadas, então, a distância e a orientação de navegação, das posições atualizadas de cada aeronave até seu *waypoint* individual. Na fase C6 é verificado se o *waypoint* atual (W_{atual}) corresponde ao último *waypoint* da lista definida na fase B1 da etapa 2 do fluxograma do planejamento de missão. Caso não seja o último, as fases C1 até C5 são recalculadas até que seja verificado o último *waypoint* da trajetória, quando a missão será encerrada.

3 Experimentos e Resultados

Nesta seção, descrevemos a utilização da ECS, simulando o voo de múltiplas aeronaves para a validação dos algoritmos de campo potencial do módulo de controle de voo múltiplo e para avaliação do comportamento das aeronaves em formação de voo. Para a definição das coordenadas dos *waypoints* e da posição das aeronaves, foi utilizado uma representação em pontos no plano cartesiano com origem no ponto $(x, y) = (0, 0)$.

3.1 Experimento 1

O gráfico da figura 5, representa uma trajetória de voo simulada em formação *delta*. Nesta formação os pontos das coordenadas iniciais das aeronaves foram definidos como $(0,0)$ para o VANT 1,

¹Em nossa abordagem consideramos os VANTs como obstaculos entre si

$(-1,-1)$ para o VANT 2 e $(1,-1)$ para o VANT 3, estabelecendo um formato de coordenadas triangular, (*delta*). O experimento 1, demonstrou al-

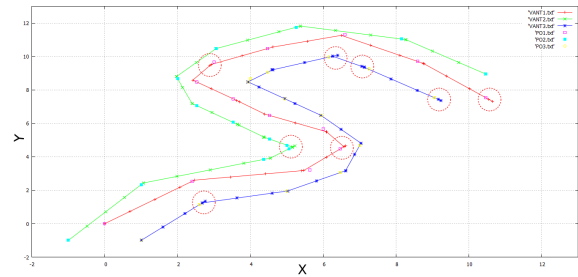


Figura 5: Simulação de voo em formação *delta*: Os VANTs 1, 2 e 3 estão representados pelas trajetória em vermelho, verde e azul respectivamente. Os *waypoints* PO1, PO2 e PO3 são representados pelo quadrados rosa, verde e amarelo. Os círculos indicam comportamentos indesejáveis das aeronaves.

guns comportamentos que são impossíveis se considerarmos a dinâmica de voo de uma aeronave de asa fixa. O primeiro problema detectado, foi quando um VANT ultrapassa o *waypoint* de destino e retorna, (“voa para trás”) para identificá-lo. Outro problema, foi quando um VANT chega primeiro no *waypoint* de destino e permanece “parado” esperando que as outras aeronaves cheguem nos *waypoints*, para então, prosseguir com o voo. Tais comportamentos estão indicados pelos círculos ilustrados no gráfico da figura 5. A solução desses problemas, consistiu na implementação de um método de velocidade proporcional em que cada VANT passa a consumir uma lista de *waypoints* individualmente. Assim que cada VANT detecta seu *waypoint*, passa para o próximo sem a necessidade de aguardar pelos outros VANTs. O parâmetro s do campo atrativo, passa a ser alterado dinamicamente durante a simulação, pelo recebimento dos valores de S_{max} , S_{med} ou S_{min} , que controlam a velocidade máxima, média e mínima de cada VANT.

O método para controle das velocidades com base na distância relativa entre as aeronaves e na distância de cada VANT até o último *waypoint* da trajetória, consiste nos seguintes passos:

1. Cálculo da distância de cada VANT até o *Waypoint*;
2. Verificação da distância relativa entre as aeronaves da formação. Se a distância for menor que o limite definido, é atribuído $s = S_{max}$ para o VANT mais afastado do *Waypoint* aumentando sua velocidade e $s = S_{min}$ para os VANTs mais próximos do *Waypoint*, diminuindo suas velocidades. Quando os VANTs estão dentro da distância limite é atribuído $s = S_{med}$, o que mantém os VANTs em velocidade cruzeiro.



Figura 6: Planejamento de Missão: Definição da trajetória de voo para o X-Plane

3.2 Experimento 2

Nas simulações representadas nos gráficos das figuras, 7 e 8 comparamos a utilização do método de velocidade proporcional para a manutenção do voo em formação *delta*, ao longo de toda a trajetória planejada. No gráfico 7 é possível observar que a formação vai se desfazendo ao longo da trajetória de voo, enquanto que no gráfico 8 a formação é retomada após a curva mais acentuada.

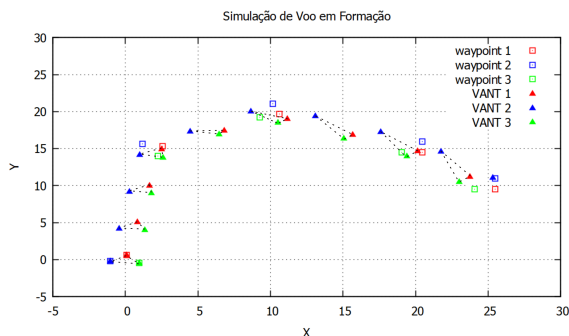


Figura 7: Simulação de voo em formação *delta* sem velocidade proporcional.

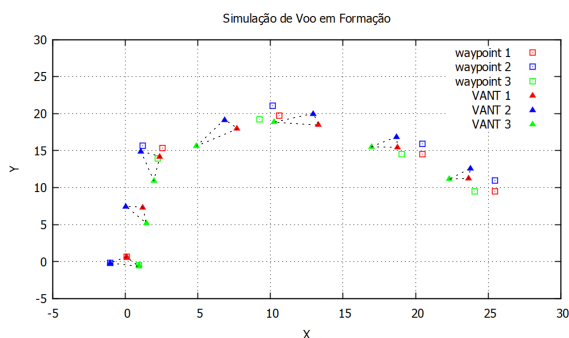


Figura 8: Simulação de voo em formação *delta* com velocidade proporcional.

Conforme a legenda descrita no canto superior direito dos gráficos, os VANTs 1, 2 e 3 estão representados pelos triângulos em vermelho, azul e verde, respectivamente e os waypoints 1, 2 e 3 dos VANTs estão representados pelos quadrados em vermelho azul e verde, nesta ordem.

3.3 Experimento 3

As figuras 6, 9, 10 e 11 representam todas as fases de execução da ECS, desde o planejamento da missão até o controle da navegação de duas aeronaves por uma trajetória planejada. As aeronaves utilizadas neste teste de voo são do modelo Cessna Skyhawk[®], modelado no ambiente do simulador X-Plane[®]. Em nosso trabalho, todos os experimentos consideraram uma altitude constante de voo de 2000 pés, simplificando os métodos implementados para uma abordagem 2D. A figura 6 demonstra o planejamento da trajetória e a figura 9 a trajetória simulada antes do voo. A figura 10 ilustra as aeronaves em formação de voo e por fim no mapa da figura 11 é demonstrado o resultado da simulação do voo no ambiente do X-Plane[®].

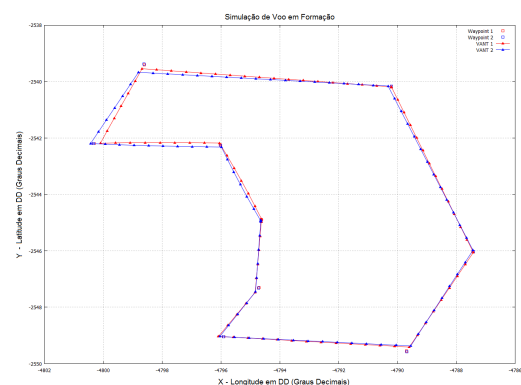


Figura 9: Gráfico gerado antes da simulação: VANT 1 em vermelho e VANT 2 em azul



Figura 10: Aeronaves Cessna 172 Skyhawk, voando em formação no ambiente simulado do XPlane®.

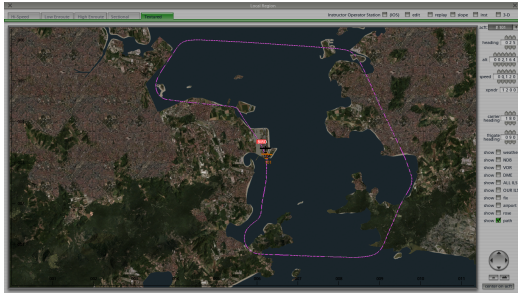


Figura 11: Mapa resultante da simulação de voo no X-Plane®: VANT 1 em laranja e VANT 2 em preto. São identificados pelos números 102 e 104 respectivamente, que correspondem ao último octeto do IP das aeronaves.

4 Considerações finais e trabalhos futuros

Neste trabalho, apresentamos o desenvolvimento do software para uma ECS capaz de controlar múltiplas aeronaves não tripuladas em voo em formação. Foi estruturado um ambiente de simulação baseado no simulador de voo X-Plane®, através do qual foram realizados experimentos que permitiram validar os métodos propostos para o controle de voo múltiplo. A integração com o X-plane®, demonstrou o funcionamento completo da ECS para o controle de voo de múltiplas aeronaves não tripuladas em ambientes próximos aos reais.

A solução de software da ECS apresentada neste trabalho, se mostrou prática e funcionalmente completa, porém se configura como uma proposta inicial na qual muitas melhorias podem ser realizadas, expandindo suas funcionalidades e aplicações. Como exemplo, pode ser implementado um controle inteligente de navegação, em que as aeronaves poderão cooperar entre si para a realização de diferentes missões. Outro desenvolvimento seria descentralizar o sistema da ECS. Nesta abordagem o sistema não funcionaria mais em uma estação em solo e sim embarcado nas aeronaves. Nesta configuração, os VANTs passam a se comportar como agentes e a tomar decisões de navegação e cumprimento da missão baseados em um planejamento inicial. Além destas sugestões, outra continuação lógica deste trabalho é a

implementação de um hardware de piloto automático, para a expansão da utilização da ECS no controle de aeronaves reais. A adaptação da ECS atual para esta finalidade se mostra bastante viável, uma vez que o método utilizado demonstrou ser robusto e com um baixo consumo computacional, sendo favorável para soluções embarcadas.

Referências

- Barnes, L., Fields, M. and Valavanis, K. (2007). Unmanned ground vehicle swarm formation control using potential fields, *15th Mediterranean Conference on Control & Automation*.
- Cantoni, L. F. A. (2010). *Avaliação do uso da linguagem pddl no planejamento de missões para robôs aéreos*, Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Garcia, R. and Barnes, L. (2010). Multi-uav simulator utilizing x-plane, *J. Intell. Robotics Syst.* **57**(1-4): 393–406.
- Goodrich, M. A. (2002). Introduction potential fields tutorial.
- Hogan, P. (2011). Nasa world wind: <http://worldwind.arc.nasa.gov/java/>.
- Maroquio, R. B. (2007). *Simublimp - uma contribuição ao desenvolvimento de algoritmos inteligentes para uma equipe de dirigíveis robóticos autônomos*, Master's thesis, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- Meyer, A. (2011). *X-Plane Operation Manual* : www.x-plane.com/files/manuals/X-Plane_Desktop_manual.pdf, Laminar Research, 5001 Radcliffe - Rd Columbia SC 29206. last updated on June 19, 2011.
- Neto, J. M. M., Rodrigues, L. R. L., Moreira, E. M., dos Santos, J. C. J. and Rosa, P. F. F. (2011). Uma missão de monitoramento para o projeto vant-ime: Operação região serrana-rj, *AutoSoft*.
- Paul, T., Krogstad, T. R. and Gravdahl, J. T. (2008). Modelling of uav formation flight using 3d potential field, *Simulation Modelling Practice and Theory* **16**(9): 1453 – 1462.
- Pinheiro, C. A. P. (2006). *Veículos aéreos autônomos não-tripulados para monitoramento de ambientes desestruturados e comunicação de dados*, Master's thesis, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- Vidal, F. S. (2007). *Sistema de navegação para dirigíveis aéreos não-tripulados baseado em imagens*, Master's thesis, Instituto Militar de Engenharia.