

Formação Dinâmica de Frotas de Quadricópteros por Campos Potenciais na Presença de Obstáculos

Carlos Bentes, Osamu Saotome

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos – SP, Brasil

Resumo — A formação dinâmica de um grupo de veículos aéreos não tripulados (VANT) é apresentada através de simulações. A utilização de campos potenciais, em conjunto com algoritmo de rota *A estrela* (A^*), permite a navegação em ambientes parcialmente estruturados na presença de obstáculos. O algoritmo A^* encontra um caminho livre de obstáculos que é posteriormente utilizado para guiar o centro de formação do agrupamento de quadricópteros. A função de campo potencial é utilizada para controlar a formação da frota e evitar obstáculos localmente enquanto navega pela rota planejada. Resultados de simulação são apresentados para formações de diferentes formatos na presença de obstáculos.

Palavras-Chave — Simulações, Robótica, Navegação Frota.

I. INTRODUÇÃO

A utilização de veículos aéreos não tripulados em missões de reconhecimento e controle de desastres é de grande valia estratégica. Dado ao seu tamanho reduzido e relativo baixo custo, frotas de veículos autônomos podem ser coordenadas em regiões de risco, como por exemplo para avaliação de dados em um desastre de planta nuclear, em estruturas abaladas com risco de desmoronamento ou em missões de inteligência atrás da linha inimiga. Uma frota de micro-quadricópteros composta de várias unidades poderia ser utilizada em tais situações. Para controle de formação e navegação a utilização de funções artificiais de campos potenciais pode ser utilizada [1][2][4][5]. Ela permite uma representação simples de pontos de interesse, tais como o ponto de destino, e obstáculos. Um robô utilizando-se de campos potenciais para navegação seria, por exemplo, atraído por seu ponto de destino e repelido por obstáculos em seu caminho. Um campo potencial é representado por [6]:

$$U(\vec{p}) = U_{\text{atração}}(\vec{p}) + U_{\text{repulsão}}(\vec{p}) \quad (1)$$

Onde \vec{p} representa o vetor posição do ponto considerado em um sistema de coordenadas globais.

Tomando-se a derivada parcial do campo acima obtém-se um vetor que pode ser utilizado como entrada de um controlador de robô, fazendo-o seguir a direção determinada pelo vetor.

$$\vec{F} = -\nabla U(\vec{p}) \quad (2)$$

Este artigo propõe a criação de um campo artificial para controle de formação de frotas de quadricópteros em coordenadas 3D, através da extensão da função de agrupamento apresentada em [2] e [7]. Diferentes agrupamentos são comparados e resultados de simulações em ambientes com obstáculos são apresentados.

II. NAVEGAÇÃO E FORMAÇÃO DE VOO

O agrupamento de quadricópteros utilizando-se funções artificiais de campo é conveniente por permitir expressar com simples relações matemáticas e com baixo custo computacional as relações dinâmicas entre o posicionamento de diversos participantes de um frota e interações com outros membros e obstáculos.

Suponha que o centro de agrupamento é dado por (x_c, y_c, z_c) . É possível definir um formação esférica utilizando-se campos potenciais da seguinte forma [2][7]:

$$U(x, y, z) = w D_c(x, y, z) \quad (3)$$

$$D_c(x, y, z) = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2} \quad (4)$$

onde w é uma constante e $D_c(x, y, z)$ é a distância Euclidiana do ponto (x, y, z) ao centro de formação (x_c, y_c, z_c) . O campo vetorial de agrupamento tem a seguinte forma:

$$V(x, y, z) = \begin{cases} W(x, y, z) \frac{1}{D_c(x, y, z)} \begin{pmatrix} x_c - x \\ y_c - y \\ h * (z_c - z) \end{pmatrix} & \text{for } (x, y, z) \neq (x_c, y_c, z_c) \\ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} & \text{for } (x, y, z) = (x_c, y_c, z_c) \end{cases} \quad (5)$$

Onde h é o parâmetro responsável por controlar a excentricidade do plano (x, y) , variando a forma do agrupamento de um plano ($h=0$) até uma esfera ($h=1$).

O peso $W(x, y, z)$ é usado para definir as regiões de atração do campo vetorial.

Dado duas esferas de raio R_i e R_o , tal que $R_i < R_o$, é possível definir o seguinte comportamento: Para uma partícula P centrada em (x_p, y_p, z_p) dentro da região no espaço limitada pelo raio R_i , é desejado que essa partícula observe um campo de repulsão de forma a mover a partícula para longe do centro de formação (x_c, y_c, z_c) . Se a partícula se encontra na região do espaço exterior a esfera centrada em (x_c, y_c, z_c) de raio R_o , é desejado que a mesma perceba uma força de atração no sentido de movê-la na direção de (x_c, y_c, z_c) . Se a partícula P está posicionada entre os raios R_i e R_o , não é necessário aplicar nenhuma força, e a partícula já se encontra dentro da região de formação estabelecida. Desta forma, utilizando-se (2), tem-se:

- Se $D_c(x_p, y_p, z_p) \leq R_i$ então $\vec{V}(P)$ move o ponto P para fora do centro de formação (x_c, y_c, z_c) .
- Se $D_c(x_p, y_p, z_p) \geq R_o$ então $\vec{V}(P)$ move o ponto P na direção do centro de formação (x_c, y_c, z_c) .
- Se $R_i < D_c(x_p, y_p, z_p) < R_o$, então $\vec{V}(P) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$.

Desta forma, torna-se conveniente expressar a função peso $W(x, y, z)$ através da distância r entre o ponto P e o centro de formação (x_c, y_c, z_c) . Portanto:

$$W(r) = S_i(r) - S_o(r) \quad (6)$$

onde $S_i(r)$ e $S_o(r)$ são projetadas para atender ao comportamento requerido, e são definidas através da função Sigmoidal de acordo com:

$$S_{in}(r) = 1 - \frac{1}{1 + e^{k_i * (r - k * R_{in})}} \quad (7)$$

$$S_{out}(r) = 1 - \frac{1}{1 + e^{-k_o * (r - R_o)}} \quad (8)$$

O parâmetro k é utilizado como controle interno de formação do campo vetorial de repulsão, de forma a se obter um maior controle na formação quando próxima a obstáculos, permitindo desta forma que os membros do agrupamento se movam para o interior da esfera de formação. Ele é definido com o auxílio de sensores virtuais S_i , tal que:

$$k = \min(F_s(S_1), F_s(S_2), F_s(S_3), F_s(S_4), F_s(S_5), F_s(S_6)) \quad (9)$$

Onde:

- Sensor virtual S_1 na posição $(x_c + R_o, y_c, z_c)$
- Sensor virtual S_2 na posição $(x_c, y_c + R_o, z_c)$
- Sensor virtual S_3 na posição $(x_c - R_o, y_c, z_c)$
- Sensor virtual S_4 na posição $(x_c, y_c - R_o, z_c)$
- Sensor virtual S_5 na posição $(x_c, y_c, z_c + R_o)$
- Sensor virtual S_6 na posição $(x_c, y_c, z_c - R_o)$

e $F_s(S_i)$ representa a função de campo potencial percebida na posição S_i e é dada por:

$$F_s(S_i) = \frac{1}{e^{k_s * P_o(S_i)}} \quad (10)$$

O posicionamento proposto para os sensores virtuais S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 e S_6 é ilustrado na Fig. 1.

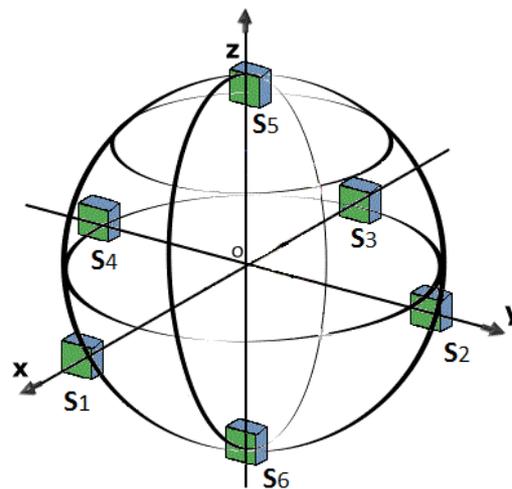


Fig. 1. Posicionamento dos sensores virtuais ao longo do raio externo da formação esférica.

Através da utilização de sensores virtuais, que medem os valores de campos potenciais em posições ao redor do centro de formação, pode se controlar o valor de k em (7) e a variação do campo artificial obtida é ilustrada na Fig. 2.

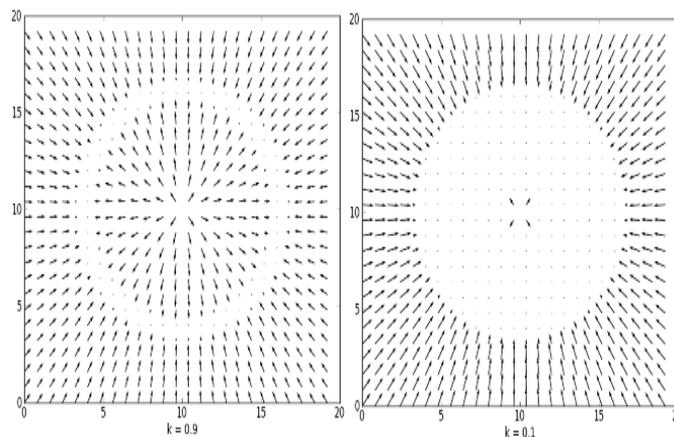


Fig. 2. Variação da função artificial de campo para diferentes valores de k.

Da mesma forma, pode-se definir as condições desejadas para formação de um campo vetorial artificial para formação cúbica. Para tal, define-se (x_c, y_c, z_c) como o centro de

formação e (x_p, y_p, z_p) como a posição da partícula P no sistema de coordenadas considerado. Para uma formação volumétrica de lados L_x, L_y, L_z , tem-se:

- Se $|x_c - x_p| > L_x$ então:

$$f_x = \frac{-(x_c - x_p)}{|x_c - x_p|} (|x_c - x_p| - L_x)$$

- Se $|y_c - y_p| > L_y$ então:

$$f_y = \frac{-(y_c - y_p)}{|y_c - y_p|} (|y_c - y_p| - L_y)$$

- Se $|z_c - z_p| > L_z$ então:

$$f_z = \frac{-(z_c - z_p)}{|z_c - z_p|} (|z_c - z_p| - L_z)$$

E o campo vetorial que mantém o agrupamento de partículas na região volumétrica de lados L_x, L_y, L_z é então dada por:

$$V(P) = [f_x \quad f_y \quad f_z]^T \quad (11)$$

A ilustração do campo vetorial criado por essa definição de campo artificial é apresentada na Fig. 3.

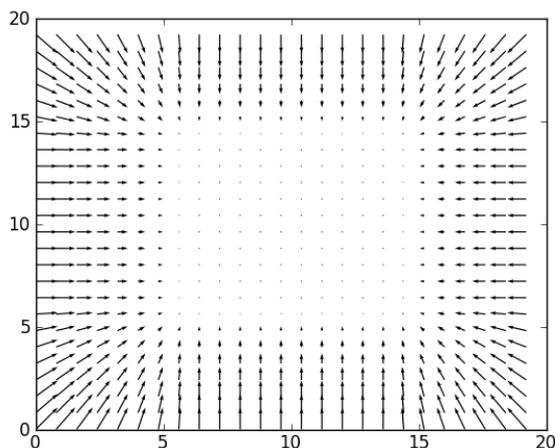


Fig. 3. Campo vetorial para agrupamento em formato cúbico.

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para a simulação de navegação e formação foram utilizadas 12 partículas representando micro-quadrirrotores em agrupamento.

O primeiro passo da simulação é encontrar um caminho livre de obstáculos do ponto inicial ao ponto final. Esta tarefa

é realizada através do algoritmo *A estrela* (A^*) em uma representação discreta do ambiente simulado. O caminho encontrado na etapa de planejamento é então utilizado para guiar o centro de formação ao longo do ambiente simulado.

O agrupamento é controlado pela função potencial artificial, utilizando-se das equações (5) e (11), e cujos valores de parâmetros encontram-se na tabela 1.

TABELA I VALORES DE PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Parâmetro	Valor
R_i	3.0
k_i	50.0
R_o	3.5
k_o	50.0-

A simulação é implementada em Python com o auxílio das bibliotecas de software livre para análise numérica *Numpy* [8], e de visualização de dados *Matplotlib* [9].

1) *Formação esférica*: A formação esférica é obtida através de (5). A simulação inicia com as partículas fora de formação, e após iterações de agrupamento as partículas são direcionadas para o volume de agrupamento desejado. O agrupamento esférico é ilustrado na Fig. 4.

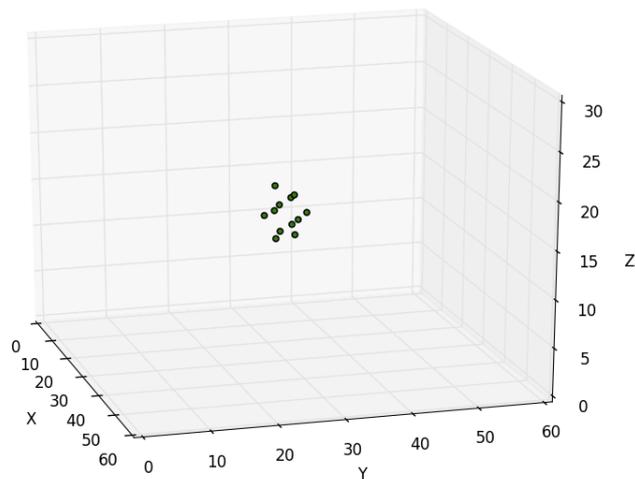


Fig. 4. Resultado simulado de agrupamento de 12 partículas através de um campo vetorial artificial e formação volumétrica esférica.

2) *Formação Cúbica*: A formação cúbica é obtida através de (11). Após agrupamento, as partículas se encontram contidas na região do espaço limitada pelo volume no formato de um cubo, como ilustrado na Fig. 5.

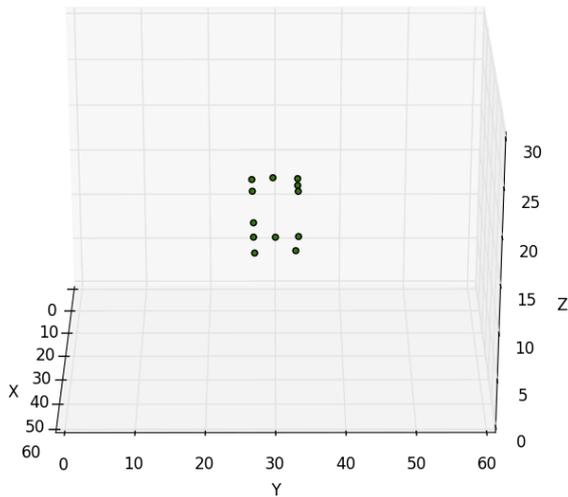


Fig. 5. Resultado simulado de agrupamento de 12 partículas através de um campo vetorial artificial e formação volumétrica cúbica.

3) *Formação circular*: Da mesma forma, é possível limitar a formação a um plano de navegação, evitando que as aeronaves se sobreponham umas as outras. A formação esférica é então degenerada para a formação circular apresentada na Fig. 6. e a formação cúbica é por sua vez degenerada para sua representação retangular, de acordo com a Fig. 7.

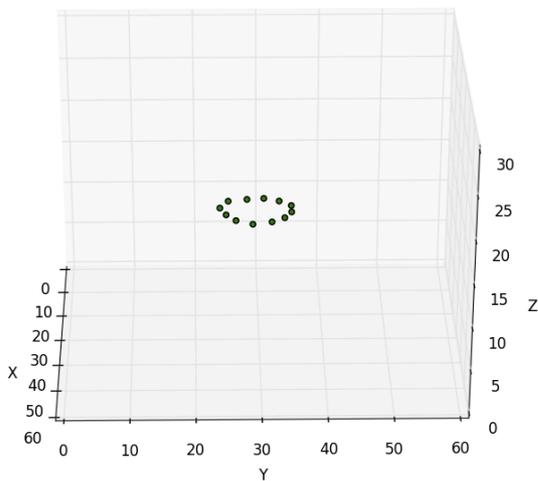


Fig. 6. Formação esférica degenerada em um círculo. Tal formação limita o plano de altitude para todas as aeronaves participantes do agrupamento.

4) *Navegação*: A navegação no ambiente simulado se dá pelo cálculo de *waypoints* através do algoritmo A*. Um ambiente contendo obstáculos é representado na forma discreta de um grid. Cada obstáculo é representado no grid como pontos vermelhos (Fig. 8 – A). O caminho calculado pelo planejador de rotas é livre de obstáculos, e é ilustrado como um conjunto de pontos azuis (Fig. 8 – B). Para evitar

que o algoritmo A* encontre caminhos que passem muito próximo a obstáculos, utiliza-se uma função potencial de repulsão nos obstáculos como penalização para o cálculo de rota. Tal penalização faz com que o algoritmo A* não seja mais ótimo no sentido de menor caminho, mas evita que o centro de formação do agrupamento passe muito próximo a um obstáculo.

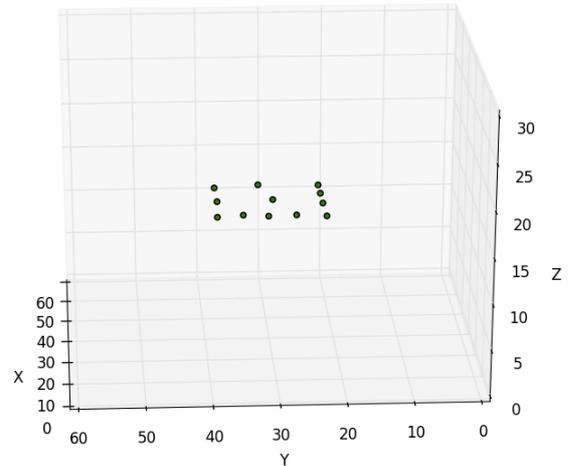


Fig. 7. Formação cúbica degenerada em um retângulo. Ao se limitar o plano de agrupamento entre as aeronaves se obtém uma formação visualmente mais homogênea.

A Fig. 8 ilustra o cenário utilizado para simulações de navegação e agrupamento.

Após determinar um caminho livre de obstáculos, a simulação prossegue calculando a formação em torno do centro de agrupamento, enquanto movimenta o mesmo pelos *waypoints* calculados.

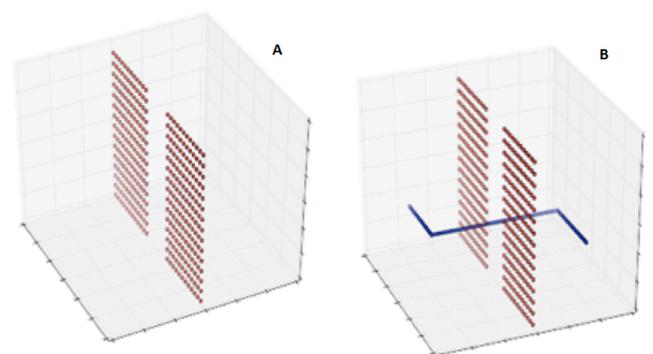


Fig. 8. Cenário utilizado para simulação de formação e navegação. Em (A) tem-se a representação de obstáculos como pontos vermelhos no cenário discretizado. Em (B) observa-se o caminho de pontos (em azul) representando o caminho livre de obstáculos.

Nas Fig. 9 e Fig. 10, é apresentado o resultado da simulação de uma frota em formação retangular ao atravessar um conjunto de obstáculos.

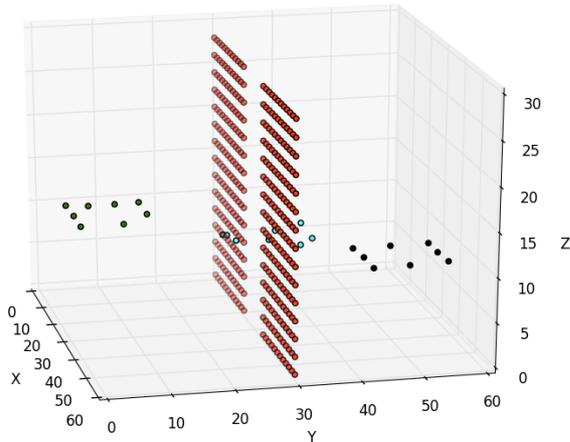


Fig. 9. Simulação de uma frota em formação planar atravessando uma região na presença de obstáculos. A formação composta de 8 aeronaves é mostrada em 3 diferentes estágios da simulação. A esquerda (verde escuro) em sua posição de agrupamento inicial. No centro (verde claro) ao passar pela barreira estreita de obstáculos e a direita (em preto) em sua posição de formação final.

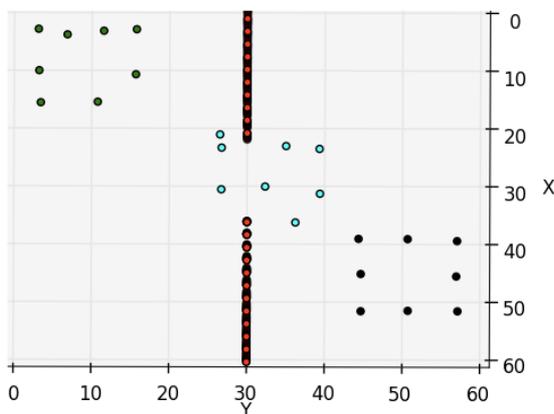


Fig. 10. Visualização da simulação apresentada em (Fig. 9) vista do topo. Novamente, a formação composta de 8 aeronaves é mostrada em 3 diferentes estágios da simulação. No topo à esquerda (verde escuro) em sua posição de agrupamento inicial. No centro (verde claro) ao passar pela barreira estreita de obstáculos e em baixo à direita (em preto) em sua posição de formação retangular final.

5) *Simulador Morse*: O simulador Morse é um simulador de código aberto desenvolvido pelo LAAS-CNRS e é atualmente mantido por universidades para uso em pesquisas de robótica [10]. Desenvolvido com base no ambiente de modelagem Blender 3D [11], o Morse apresenta interface através de pacotes de rede para controle de atuadores e leitura de sensores em seu ambiente simulado.

Para avaliar a navegação e agrupamento da frota de quadricópteros em um ambiente virtual simulado foi construída uma interface de controle para acesso ao Morse. Em cada passo da simulação, dados das posições dos quadricópteros no mundo virtual são obtidos pela interface de simulação, e utilizados como entrada do algoritmo de navegação e agrupamento descrito em Python. Após processamento utilizando A* e campos artificiais, a resposta de reação para cada partícula simulada é utilizada para se calcular a posição para qual cada partícula deve se mover, e este é usado como referência de entrada para o atuador de movimento presente do simulador. Os comandos de atuação são enviados para o simulador Morse através de um canal TCP/IP de comunicação. Construiu-se um modelo tridimensional de um micro-quadricóptero para ser utilizado no simulador Morse, e esse modelo é apresentado na Fig. 11.

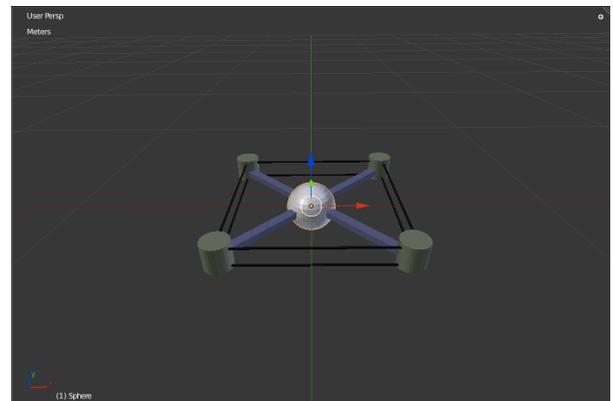


Fig. 11 – Modelo tridimensional do quadricóptero utilizado na simulação em Morse. Esse modelo foi construído através da plataforma de modelagem 3D Blender e baseado na estrutura de um quadricóptero.

O mundo virtual simulado é baseado em um cenário presente no Morse contendo árvores e prédios, de acordo com o ilustrado na Fig. 12. Como obstáculos são utilizadas coordenadas representando regiões espaciais a serem evitadas pelo agrupamento.

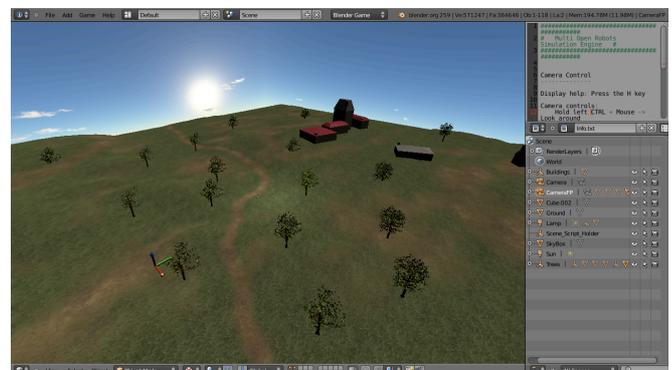


Fig. 12 – Ambiente virtual gerado pelo simulador Morse, através da ferramenta Blender.

Os resultados da simulação contendo trajetória de navegação e posições de agrupamento é mostrado na Fig. 13.

Nela pode-se observar 5 momentos distintos da simulação:

1. Posição inicial antes de agrupamento (verde)
2. Posição de agrupamento no início de percurso de trajetória (amarelo)
3. Reorganização da frota próxima a obstáculo (preto)
4. Frota transpassando obstáculo (ciano)
5. Formação ao final do percurso de trajetória (azul).

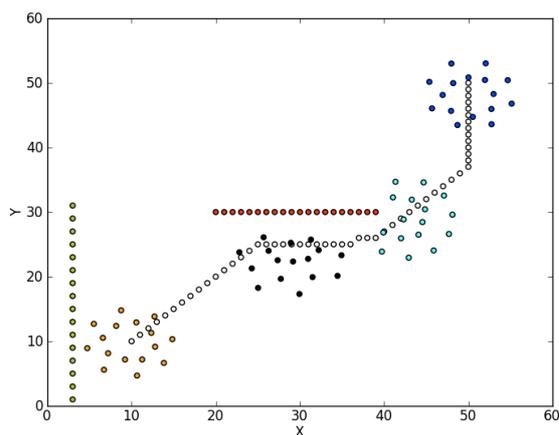


Fig. 13 – Trajetória e formação de um enxame de micro-quadrrótores simulados como partículas navegando em um ambiente com presença de obstáculo. A barreira de obstáculos mostrada em vermelho pode representar obstáculos físicos ou lógicos, como no caso de uma região a ser evitada no sobrevoo pela frota.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a utilização de funções de campo potencial para agrupamento e navegação de frotas de quadrrótores, simulados como partículas, em ambientes 3D na presença de obstáculos. Diferentes formas de agrupamento são apresentadas e simuladas na presença de obstáculos. Tais agrupamentos são modificados dinamicamente durante o voo através da utilização de sensores virtuais, o que permite uma reconfiguração dinâmica de formação para melhor se adaptar a obstáculos em seu percurso, como no caso de janelas e corredores estreitos.

Como aplicação pode-se citar a utilização de frotas de micro-quadrrótores em missões de reconhecimento e exploração, onde a habilidade de navegar em grupo, enquanto se evita obstáculos e áreas proibidas, é necessária.

REFERÊNCIAS

- [1] Y. Koren and J. Borenstein; “Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation”, IEEE Conference on Robotics and Automation, 1991.
- [2] L. Barnes, M.A. Fields, K. Valavanis, “Unmanned Ground Vehicle Swarm Formation Control Using Potential Fields”, IEEE Conference on Control and Automation, Athens – Greece, 2007.
- [3] H. Rezaee, F. Abdollahi, “Mobile Robots Cooperative Control and Obstacle Avoidance Using Potential Field”, IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2011.
- [4] H. Adeli, M. Tabrizi, A. Mazloomian, E. Hajipour and M. Jahed; “Path Planning for Mobile Robots using Iterative Potential Field Method”, International Journal of Computer Science Issues, IJCSI, Vol.8 Issue 4, 2011.
- [5] J. Borenstein and Y. Koren; “The Vector Field Histogram – Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots”, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.7 No.3, 1991.
- [6] H. Howie, et al., “Principles of Robot Motion – Theory, Algorithms, and Implementations”, MIT Press, 2005, pp. 527 – 535.
- [7] C. Bentes, O. Saotome, “Dynamic Swarm Formation with Potential Fields and A* Path Planning in 3D Environments”, Latin American Robotics Symposium, Fortaleza, Brazil, 2012.
- [8] <http://numpy.scipy.org>, acesso em 01/07/2012.
- [9] <http://matplotlib.sourceforge.net>, acesso em 01/07/2012.
- [10] http://www.openrobots.org/morse/doc/latest/what_is_morse.html, acesso em 01/07/2012.
- [11] <http://www.blender.com>, acesso em 01/07/2012.