



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

BRUNORIO SERAFINI DE OLIVEIRA
FELIPE VIANNA RIGUETE

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE VIGILÂNCIA POR
DRONE AUTÔNOMO**

VITÓRIA
2014

BRUNORIO SERAFINI DE OLIVEIRA
FELIPE VIANNA RIGUETE

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE VIGILÂNCIA POR
DRONE AUTÔNOMO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Orientador: Prof. Rafael Milanezi de Andrade, M.Sc.

VITÓRIA
2014

BRUNORIO SERAFINI DE OLIVEIRA
FELIPE VIANNA RIGUETE

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE VIGILÂNCIA POR DRONE AUTÔNOMO

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em ____/____/2014

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Rafael Milanezi de Andrade
Universidade Federal do Estado do
Espírito Santo - UFES
Orientador

Prof. Dr. Marcos Aurélio Scopel Simões
Universidade Federal do Estado do
Espírito Santo - UFES

Prof. Dr. Antônio Bento Filho
Universidade Federal do Estado do
Espírito Santo – UFES

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos nossos familiares.

Ao nosso Orientador Rafael Milanezi pela oportunidade, orientação e principalmente pela confiança depositada.

Aos nossos amigos, que direta ou indiretamente colaboraram na elaboração deste trabalho, principalmente Gustavo Santi, Romualdo Alcântara, Marcos Tesch, Igor Bermudes e Victor Hugo Fernandes & família.

RESUMO

Os veículos aéreos não tripulados, comumente conhecidos como drones, são largamente utilizados na indústria militar para diversos fins, como reconhecimento e ataques, mas nos últimos anos os drones têm ganhado espaço em aplicações civis principalmente no ramo de filmagens e fotografias. Além destas aplicações, novos desenvolvimentos para o uso civil estão concentrados na realização de entregas de produtos utilizando este tipo de veículo. Este trabalho estuda a viabilidade de implementação de um sistema de vigilância utilizando drones. Para este propósito é realizada a programação do ar.Drone 2.0, da empresa francesa Parrot de modo que o mesmo possa realizar voos predeterminados quando acionado um sensor de presença. São realizados testes para estimar os erros de posicionamento após o voo do drone, visando avaliar a precisão e acurácia do sistema. Os resultados mostram que para ambientes internos os erros de posicionamento não são um fator limitante para este tipo de sistema, porém em ambientes externos ainda ser faz necessário o aperfeiçoamento do sistema de controle do drone.

Palavras Chaves: Drone, VANT, Sistema de vigilância, ar.Drone 2.0, Automático

ABSTRACT

The Unmanned Aerial Vehicles (UAV), commonly known as drones , are widely used in military industry for many applications, as surveillance and attack missions, but in the last years it has gained civilian applications mostly in the film and photo industry. New developments for civilian applications are concentrated in delivering products, but still bump in the absence of specific rules for this type of aerial vehicle. This work aims to study the feasibility of implementing a surveillance system using drones. In order to achieve that, the ar.Drone 2.0, from the French company Parrot was programmed so it could perform predetermined flights when a presence sensor was triggered. Tests were carried out in order to estimate positioning errors after the drone had performed such flights to determine its accuracy and precision. The results showed that when used in internal areas the positioning errors are not a limiting factor but in external areas it is still necessary a development of the drone's control system.

Keywords: Drone, UAV, Surveillance system, ar.Drone 2.0, Automatic

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 VANT	11
1.1.1. Histórico	11
1.1.2. Estado da Arte	19
1.2 OBJETIVO	23
1.3 MOTIVAÇÃO	24
2. REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1. AR.DRONE 2.0	25
2.1.1. Especificações Técnicas	26
2.1.2. Física do voo	27
2.2. SOFTWARE	29
3. METODOLOGIA	31
3.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	31
3.2. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	31
3.3. TESTES	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5. CONCLUSÕES	39
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
REFERÊNCIAS	41
ANEXOS	44
São apresentados os resultados detalhados dos testes realizados. Em todos os testes o drone decolou da origem (0,0) e pousou nos pontos marcados. Todos os gráficos estão em centímetros	
1. Erro de posicionamento final após realizar a seguinte sequência de operações: decolagem e pouso;	44
a. Interno	44
b. Externo	45
2. Erro de posicionamento final após realizar a seguinte sequência de operações: decolagem, deslocamento linear de 5 metros para frente, deslocamento linear de 5 metros para trás e pouso;	46
a. Interno	46
b. Externo	47
3. Erro de posicionamento final após realizar a seguinte sequência de operações: decolagem, deslocamento linear de 5 metros para a esquerda, deslocamento linear de 5 metros para a direita e pouso;	49

a. Interno	49
b. Externo	50
4. Erro de posicionamento final após realizar a seguinte sequência de operações: decolagem, deslocamento linear de 5 metros para frente, rotação de 180° no sentido horário, deslocamento de 5 metros para frente e pouso;	52
a. Interno	52
b. Externo	53
5. Erro de posicionamento final após realizar a seguinte sequência de operações: decolagem, deslocamento linear de 5 metros para frente, rotação de 180° no sentido anti- horário, deslocamento de 5 metros para frente e pouso;	55
a. Interno	55
b. Externo	56
6. Erro de posicionamento final após realizar a seguinte sequência de operações: decolagem, elevação linear de 2 metros e pouso;	58
a. Interno	58
b. Externo	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – VANT OQ-1. Fonte: HARDGRAVE (2005).....	12
Figura 2 - Bomba alemã Fritz X. Fonte: Smithsonian Air and Space Museum.....	12
Figura 3 - OQ-3 momentos antes da decolagem. Fonte: HARDGRAVE (2005)	13
Figura 4 - Ryan Firebee. Fonte: National Museum of the US Air Force	14
Figura 5 - Global Hawk. Fonte:Northrop Grumman.....	15
Figura 6 - Veículo Acauã. Fonte: Força Aérea Brasileira	15
Figura 7 - Drone de asa fixa pousando em uma pista para deolagens e pousos. Fonte: NBC News.....	16
Figura 8 - Drone de asa fixa sendo lançado manualmente. Fonte: NBC News	16
Figura 9 - Drone de asa rotativa semelhante a um helicóptero. Fonte: Navy Times .	17
Figura 10 - Drone equipado com seis asas rotativas. Fonte: NBC News	17
Figura 11 - Drone modelo Phantom 2 da empresa DJI. Fonte: DJI.....	18
Figura 12 - Super Heron. Fonte:IAI	19
Figura 13 - Asa artificial desenvolvida em Harvard. Fonte:Harvard University - Department of Organismic and Evolutionary Biology	20
Figura 14 - Black Hornet utilizado em missões no Afeganistão. Fonte: BBC UK	21
Figura 15 - MQ-9 Reaper. Fonte: US Air Force.....	22
Figura 16 - Centro de comando do drone MQ-9 Reaper. Fonte: ABC News	22
Figura 17 - Drone da empresa Amazon em fase de testes	23
Figura 18 - ar.Drone 2.0 da empresa Parrot. Fonte: Parrot.....	25
Figura 19 - Capas externa e interna para o ar.Drone2.0	26
Figura 20 - ar.Drone 2.0 durante voo	27
Figura 21 - Física do voo.....	27
Figura 22 - Movimentos Realizáveis pelo drone.....	28
Figura 23 - Movimento de Pitch.....	28
Figura 24 - Movimento de Roll	28
Figura 25 - Movimento de yaw	29
Figura 26 - Movimento de elevação	29
Figura 27 - Drone no ponto inicial em testes internos	33
Figura 28 - Drone durante testes internos.....	33
Figura 29 - Drone no ponto inicial em testes externos	34

Figura 30 - Drone durante testes externos.....	34
Figura 31 - Sistema de GPS para o ar.Drone 2.0.....	37

1. INTRODUÇÃO

1.1 VANT

1.1.1.Histórico

Um veículo aéreo não tripulado, VANT em português e UAV (Unmanned Aerial Vehicle) em inglês, é toda e qualquer aeronave que não necessita de pilotos embarcados para ser controlada.

O conceito de veículo aéreo não tripulado foi utilizado pela primeira vez durante um ataque do exército austríaco à cidade italiana de Veneza, em 12 de julho de 1849. Naquela ocasião os austríacos carregaram balões com explosivos e lançaram-os de um navio com intuito de que estes caíssem sobre a cidade de Veneza e explodissem a carga neles carregada. Apesar de alguns balões terem alcançado o objetivo, outros retornaram às linhas austríacas devido a uma mudança repentina dos ventos. [1]

De maneira semelhante, esta técnica foi novamente utilizada durante a Guerra Civil Americana (1861-1865) pelos exércitos do Sul e do Norte e na primeira guerra mundial entre 1914 e 1918 quando o cientista militar Archibald Low projetou um avião sem piloto carregado de explosivos para atacar zepelins estrangeiros que estavam bombardeando a Inglaterra.

De acordo com Hardgrave [1], em 1935 o norte-americano Reginald Denny projetou e testou o RP-1, primeiro RPV (Remoted Piloted Vehicle) ou veículo aéreo não tripulado remotamente controlado. A partir deste momento iniciaram-se os estudos de aperfeiçoamento, de modo que nos anos seguintes dois novos protótipos foram desenvolvidos: o RP-2 e RP-3. Em novembro de 1939 o protótipo RP-4 foi finalizado e naquele momento era o mais completo dos veículos remotamente controlados. Nesta época o exército dos Estados Unidos da América requisitou 53 unidades do RP-4, chamando-os de OQ-1. (Figura 1)

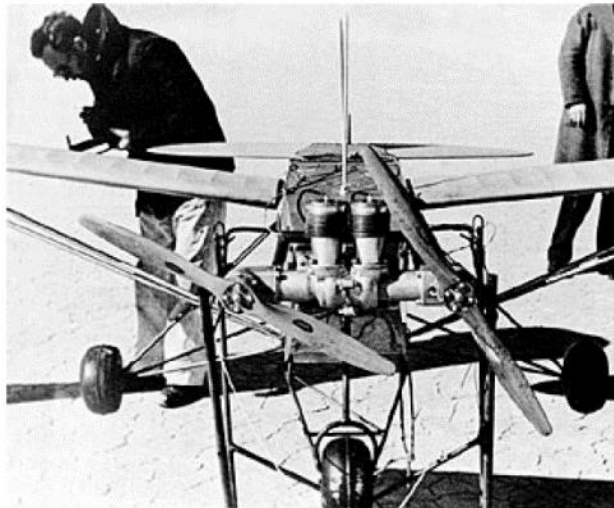


Figura 1 – VANT OQ-1. Fonte: HARDGRAVE (2005)

No ano de 1938 a companhia alemã Ruhrstahl iniciou o chamado projeto Fritz X, que consistia no desenvolvimento de bombas planadoras guiadas dotadas de 300 kg de explosivos e impulsionadas por um motor foguete para ataques contra navios. O projeto Fritz X só foi colocado em prática após cinco anos, em 1943, durante a Segunda Guerra Mundial. Seu primeiro teste foi realizado com sucesso, afundando o navio italiano “Roma” [2]. A Figura 2 mostra a bomba Fritz X.



Figura 2 - Bomba alemã Fritz X. Fonte: Smithsonian Air and Space Museum

Ainda em 1943 os EUA apresentaram o OQ-3, que teve as características de construção alteradas, recebendo modificações utilizando tubos de aço na fuselagem

e utilizando um motor com uma única hélice. Em seu primeiro voo chegou a atingir 165km/h. A Figura 3 apresenta o OQ-3 momentos antes da decolagem.

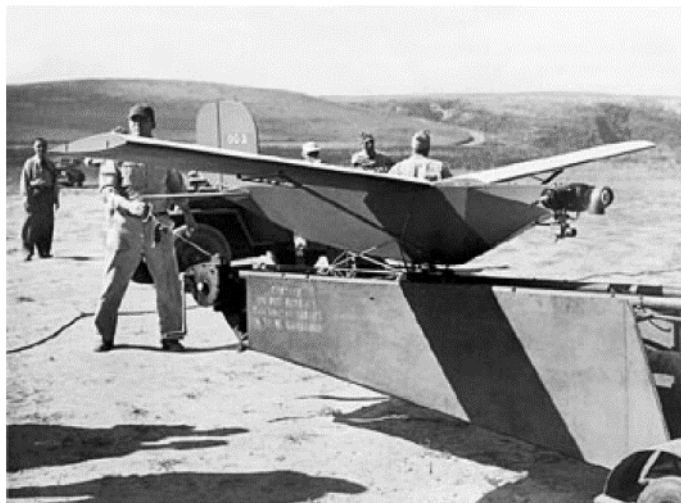


Figura 3 - OQ-3 momentos antes da decolagem. Fonte: HARDGRAVE (2005)

Nas décadas seguintes o desenvolvimento de veículos aéreos não tripulados continuou intenso e durante a Guerra da Coréia e do Vietnã os EUA puderam efetivamente testar seu último modelo de VANT, o Ryan FireBee (Figura 4). Neste caso sua função não era de destruição, mas de realizar o monitoramento de comunicações entre as tropas inimigas e o reconhecimento aéreo de objetivos estratégicos para as tropas terrestres. Era lançado de um avião e então controlado por um piloto utilizando um controle remoto em terra, conseguindo interceptar sinais de rádio a uma distância de até 300 milhas e transmitir em tempo real. Para resgatar o VANT o piloto o guiava até uma área segura sobre a água, liberava um paraquedas e um helicóptero modificado o capturava ainda no ar. Se a operação falhasse o veículo era então resgatado no mar [3].



Figura 4 - Ryan Firebee. Fonte: National Museum of the US Air Force

Com o passar dos anos e o desenvolvimento de novas tecnologias, os VANT's se tornaram cada vez mais sofisticados e passaram a ser chamados de drones, desempenhando atividades nos mais variados setores como filmagem de eventos e festas, inspeção de áreas agrícolas, segurança de fronteiras, missões de busca e resgate, detecção de queimadas e até entregas. Como era de se esperar, a utilização para fins militares também evoluiu e desde 2001 os EUA utilizam os drones para efetuar missões de busca e localização em ações antiterroristas no Oriente Médio [4].

Um dos drones mais conhecidos mundialmente é o Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk (Figura 5) desenhado inicialmente pela Ryan Aeronautical. Fez seu primeiro voo em 1998 [5] com o objetivo de realizar missões de segurança e vigilância, além de garantir suporte com imagens aéreas de territórios inimigos para as equipes em terra. Em março de 2001 o Global Hawk se tornou o primeiro veículo aéreo não tripulado a cruzar o Oceano Pacífico, após uma viagem de 23 horas e 20 minutos. Com uma envergadura de quase 40 metros consegue atingir altitudes de até 18.3km, voando a mais de 570 km/h e podendo carregar cargas de quase 1.5 toneladas. Após mais de 16 anos de operação ainda hoje tem sido utilizado pela NASA (National Aeronautics and Space Administration) para fazer mapas meteorológicos, principalmente durante a temporada de furacões [6].



Figura 5 - Global Hawk. Fonte: Northrop Grumman

No Brasil os projetos utilizando drones ainda estão em um ritmo mais lento de desenvolvimento. Utilizando o veículo Acauã (Figura 6), o Instituto de Aeronáutica e Espaço tem trabalhado em um projeto onde se pretende realizar taxiamento, decolagem e pouso totalmente autônomos, apenas com a supervisão externa de um piloto na estação de solo [7].



Figura 6 - Veículo Acauã. Fonte: Força Aérea Brasileira

Atualmente os drones são divididos em duas categorias baseados no formato de suas hélices e de sua estrutura: os de asa fixa e os de asa rotativa [8].

Os drones de asa fixa mais comuns dependem de uma pista para decolagem e pouso porém modelos menores podem ser lançados manualmente como mostram a Figura

7 e a Figura 8. Durante o voo o drone se desloca paralelamente em relação ao solo e precisa manter uma velocidade mínima para manter sua sustentação e uma altitude mínima de operação para garantir a coleta eficaz das imagens. Por esta característica de voo, semelhante a de uma aeronave convencional, são mais utilizados para coleta de imagens perpendiculares ao solo. Estes tipos de drones possuem maior autonomia de voo em relação aos drones de asa rotativa, o que garante a cobertura de áreas maiores. É nesta categoria que se encaixam a maioria dos drones de uso militar.



Figura 7 - Drone de asa fixa pousando em uma pista para deolagens e pousos.

Fonte: NBC News



Figura 8 - Drone de asa fixa sendo lançado manualmente. Fonte: NBC News

Os drones de asa rotativa não dependem de uma pista de decolagem e pouso e são mais ágeis e rápidos durante as manobras. Veículos deste tipo são capazes de voar na horizontal, vertical, planar em um ponto fixo e girar em torno do próprio eixo e devido a essas características de voo podem obter imagens em altitudes pequenas, próximas ao objeto de estudo e em diversos ângulos. A grande desvantagem e os desafios para os drones deste tipo ficam por conta das velocidades mais baixas e da autonomia de voo, que chegam em média a 60km/h e 30 min, respectivamente. Drones deste tipo, com funcionamento semelhante aos helicópteros estão exemplificados na Figura 9 e na Figura 10.



Figura 9 - Drone de asa rotativa semelhante a um helicóptero. Fonte: Navy Times



Figura 10 - Drone equipado com seis asas rotativas. Fonte: NBC News

Os quadrirotores, ou quadricópteros (Figura 11) como são comumente chamados, objetos de estudo deste trabalho, se encaixam na categoria de drones de asa rotativa.

Os quadrirotores possuem quatro motores independentes e igualmente espaçados, geralmente distribuídos no que seriam os vértices de um quadrado. Devido à dificuldade de operar simultaneamente os motores, apenas com o recente desenvolvimento da tecnologia de controladores eletrônicos se tornou possível a utilização deste tipo de drone. A redução dos preços dos componentes eletrônicos faz com que, apesar de recente, este desenvolvimento esteja ocorrendo de maneira bastante acelerada, existem hoje drones utilizáveis para tarefas profissionais por cerca de 2000 dólares e drones para entretenimento por até 150 dólares.

Um dos fatores limitantes para drones de asa rotativa são as baterias. Os modelos mais comuns de mercado oferecem uma autonomia de aproximadamente 15 minutos e apenas equipamentos profissionais e militares conseguem maiores autonomias. Para auxiliar nesse quesito, o peso do drone necessita ser o mais reduzido possível, sendo extensamente empregado em sua fabricação a fibra de carbono, o isopor e plásticos leves a fim de aumentar sua autonomia de voo.



Figura 11 - Drone modelo Phantom 2 da empresa DJI. Fonte: DJI

1.1.2.Estado da Arte

Assim como na maioria dos casos os carros de passeio recebem tecnologia que anteriormente fora desenvolvida para carros de Fórmula 1, os drones “comerciais” também utilizam tecnologia originalmente desenvolvida para fins militares. Atualmente os drones utilizados exclusivamente para vigilância estão caminhando na direção de se tornarem cada vez menores e utilizando sistemas de inteligência artificial. Esta última é o grande desafio nos sistemas de vigilância autônomos, pois os drones devem não apenas transmitir as imagens, mas analisá-las e serem capazes de tomar ações baseadas nas imagens capturadas.

No dia 14 de fevereiro de 2014 durante a Singapore Airshow, a maior feira de aviação, aeroespacial e de defesa da Ásia e uma das mais importantes do mundo, foi apresentado pela empresa IAI (Israel Aerospace Industries) o VANT Super Heron (Figura 12). Com a premissa de ser um dos drones mais modernos para vigilância, foi desenvolvido utilizando um motor diesel de 200 cavalos, fazendo com que possa permanecer no ar por mais de 45 horas a uma altitude de mais de 35.000 pés (aproximadamente 10km). O Super Heron pode carregar uma carga de até 450 kg e voar comandado por satélites em um raio de 1.000 km, decolando e pousando autonomamente. Equipado com câmeras e sensores que podem operar de dia, noite ou utilizando infra-vermelho, sendo possível a operação de suas câmeras manualmente ou utilizando o modo de rastreamento automático [9].



Figura 12 - Super Heron. Fonte:IAI

Uma segunda linha de pesquisa nos drones para vigilância envolve os chamados MAV's (*Micro Air Vehicles*) ou micro veículos aéreos em tradução livre. Estes drones têm entre 10 e 50 cm de comprimento, pesam entre 0.1 e 0.5 kg [10] e são amplamente utilizados em operações de espionagem, vigilância e reconhecimento de área em ambientes onde drones convencionais são facilmente detectados ou onde as pessoas envolvidas na missão podem sofrer algum tipo de risco [11].

O desenvolvimento destes drones toma como base o voo de insetos como moscas e libélulas e encontra desafios na falta de conhecimento da dinâmica do sistema devido a complexidade dos modelos aerodinâmicos. Os participantes do projeto *Robobees* da universidade Harvard [12] conseguiram desenvolver uma asa artificial que apresenta características estáticas semelhantes a de insetos (Figura 13), porém a tecnologia atual ainda não permite utilizar sensores para obter as forças produzidas por um inseto durante o voo e modelos numéricos ainda não conseguem prover resultados válidos, logo esta tecnologia precisa ser melhor desenvolvida [13]. Ainda que asas artificiais sejam desenvolvidas e testadas com sucesso, outras grandes limitações destes drones são a fonte de energia e os efeitos do vento.

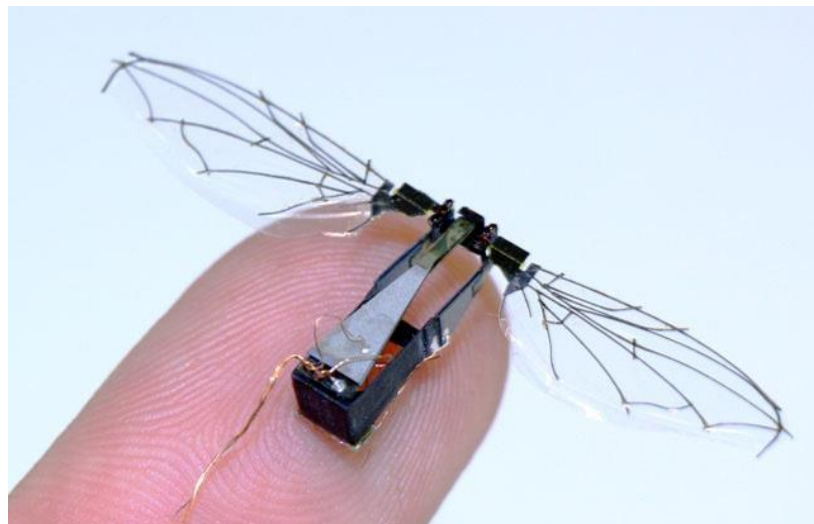


Figura 13 - Asa artificial desenvolvida em Harvard. Fonte:Harvard University - Department of Organismic and Evolutionary Biology

Ainda que os drones inspirados em insetos não sejam uma realidade no presente, a empresa norueguesa *Proxy Dynamics* desenvolveu o MAV PD-100 Black Hornet (Figura 14) medindo 10 cm de comprimento e 2.5 cm de largura e pesando apenas

16g já com as baterias incluídas e capaz de voar por vinte e cinco minutos e transmitir imagens em tempo real numa distância de até 1km em linha reta. Tropas britânicas vêm utilizando 160 drones Black Hornet desde 2012 no Afeganistão, fruto de um contrato de 20 milhões de libras [14].



Figura 14 - Black Hornet utilizado em missões no Afeganistão. Fonte: BBC UK

No caso dos drones utilizados para a realização de ataques, o grande desafio é unir a altitude de voo com a precisão dos ataques. Ao mesmo tempo em que seria ideal voar a baixas altitudes para que a precisão dos ataques fosse elevada, é necessário considerar os sistemas de defesa antiaéreo dos inimigos para que o drone não seja abatido. Ademais, é necessário garantir a precisão no momento da realização dos ataques, visto que estes veículos somente são equipados com artilharia de destruição em área, como bombas e mísseis. É justamente esta falta de capacidade de atingir somente os alvos desejados que tem gerado discussões envolvendo os aspectos legais de utilização dos drones para ataques. Com o aumento do poder de destruição dos drones e o rumo das pesquisas para o desenvolvimento de drones capazes de realizar missões totalmente autônomas, incluindo os ataques, fica a dúvida quanto à capacidade de distinção dos alvos. Além disso, é altamente necessário um sistema de troca de dados seguro, visto que todo o controle do drone é feito remotamente.

Dentre os drones de ataque destaca-se o MQ-9 Reaper (Figura 15), produzido pela empresa General Atomics Aeronautical e utilizado pelas forças americanas desde outubro de 2007. Este drone é comandado remotamente por dois oficiais em um

centro de comando (Figura 16) e possui sensores óticos, infravermelhos e radares para atacar alvos terrestres fixos ou móveis utilizando mísseis ou bombas guiadas por laser acopladas sobre as asas. Pode iniciar suas missões decolando a partir de uma pista ou sendo lançado de um avião [15].



Figura 15 - MQ-9 Reaper. Fonte: US Air Force



Figura 16 - Centro de comando do drone MQ-9 Reaper. Fonte: ABC News

Usos não militares incluem a empresa americana Amazon que está testando drones para realizar suas entregas e pretende lançar o serviço em 2015 (Figura 17), a

distribuição de kits promocionais durante a Campus Party de 2014, realizada em São Paulo, o escaneamento do Cristo Redentor no Rio de Janeiro utilizando fotografias tiradas por drones para a reprodução de réplicas em escala que serão vendidas durante as olimpíadas de 2016 [16], a recente medição e monitoramento do nível de radiação das usinas de *Fukushima* após o acidente nuclear de 2011 provocado por um terremoto e tsunami [17] e até mesmo durante o carnaval de 2014, onde a escola Portela utilizou um drone para representar uma águia (símbolo da escola) voando.



Figura 17 - Drone da empresa Amazon em fase de testes

1.2 OBJETIVO

O projeto tem como objetivo estudar um sistema de vigilância utilizando quadricópteros. O sistema deve receber sinais por meio de sensores e ser capaz de autonomamente enviar um drone até o local onde o sensor foi acionado seguindo uma rota previamente estabelecida. Este percurso deverá ser filmado e transmitido em tempo real para um computador de monitoramento, bem como gerar um arquivo de vídeo para armazenamento. O drone também deverá retornar para a base, onde será carregado.

1.3 MOTIVAÇÃO

Este sistema visa ser mais eficiente que os tradicionais modelos de vigilância que utilizam câmeras fixas. Como vantagens do sistema utilizando drones, podemos citar:

- 1) Melhores ângulos de filmagem: como os drones tem livre movimento, podem filmar qualquer ponto da área a ser monitorada, diferente das câmeras, que são fixas ou conseguem girar apenas no mesmo ponto.
- 2) Maior simplicidade de instalação: como serão necessários apenas sensores de presença, não há necessidade de cabos para as câmeras.
- 3) Maior flexibilidade: mesmo em locais onde não foram instalados os sensores de presença, pode-se realizar uma verificação manual com o drone.
- 4) Escalabilidade: ao se aumentar a área vigiada os custos crescem pouco, já que o mesmo drone pode ser programado para realizar diferentes rotas.

Tomando como exemplo uma biblioteca com vários corredores de livros, se torna inviável a instalação de uma câmera de vigilância para cada corredor. Neste caso as câmeras podem ser substituídas por sensores de movimento que serão ativados após o fechamento da biblioteca, e caso detectem movimento enviarão um sinal ao drone que será enviado ao corredor em questão, registrando em vídeo o seu deslocamento. Uma outra aplicação para esse sistema é a substituição de seguranças desarmados na realização de rotas de vigilância, visto que o segurança acompanharia remotamente de uma sala de comando a realização da rota pelo drone. Caso seja percebida alguma atividade suspeita o segurança poderia tomar decisões sem por sua vida em risco. Além disso toda rota realizada seria registrada em vídeo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. AR.DRONE 2.0

O AR.Drone 2.0 mostrado na Figura 18 é a segunda versão de um quadricoptero fabricado pela empresa francesa Parrot. Este drone foi escolhido por vários fatores, dentre as quais podemos destacar o baixo preço comparado aos demais, a boa resistência do equipamento, sua simplicidade, o fato de já possuir uma câmera embutida e principalmente por ser um drone largamente utilizado em pesquisas no campo da robótica [18].

O fato de ter o sistema operacional Linux embutido, permite um grande número de projetos e personalizações, incluindo os módulos utilizados neste trabalho. Também foi utilizado um arduino por ser uma plataforma aberta e de total personalização, podendo ser adequada a vários usos com o sensor de presença. Sua comunicação pode ser via USB, rede, wireless e também permite o tratamento do sinal recebido pelo sensor antes de se enviar o drone. É muito importante estudar as características do drone pois elas são primordiais para determinar a dificuldade dos controles e do sistema de vigilância. O ar.Drone 2.0 recebe comandos via conexão wireless em uma rede criada automaticamente por ele ou pode ser conectado a uma rede externa, podendo ser utilizado em ambientes internos ou externos com opção de duas capas de proteção mostradas na Figura 19.



Figura 18 - ar.Drone 2.0 da empresa Parrot. Fonte: Parrot



Figura 19 - Capas externa e interna para o ar.Drone2.0

2.1.1. Especificações Técnicas

- 1) Câmera frontal HD de 720p e 30fps
- 2) Câmera vertical QVGA de 60 fps para medição da velocidade
- 3) Lente panorâmica com abertura de 92°
- 4) Armazenamento de vídeo durante o voo para um pendrive conectado no drone
- 5) Casco de polipropileno expandido (PPE)
- 6) Hastes de fibra de carbono
- 7) 4 motores de 14,5W e 28.500 rpm
- 8) Processador A8 Cortex ARM de 32 bits
- 9) 1 Gbit de RAM
- 10) Wi-Fi b/g/n
- 11) Acelerômetro de 3 eixos
- 12) Giroscópio de 3 eixos
- 13) Sensor de pressão
- 14) Magnetômetro de 3 eixos
- 15) Sensores ultra-som para medição da altitude
- 16) Porta USB 2.0
- 17) Linux 2.6.32

O drone possui um peso total de 380g com o capa utilizada para voos em ambientes externos e 420g com o casco para voos em ambientes internos. Usuários relataram

ter atingido altitudes de aproximadamente 200 metros e velocidades de 40km/h [19]. Nos testes realizados para este trabalho atingiu-se uma velocidade de 18 km/h e altitude de aproximadamente 15 m, como mostra a Figura 20.



Figura 20 - ar.Drone 2.0 durante voo

2.1.2. Física do voo

A figura a seguir mostra o princípio de voo do drone.

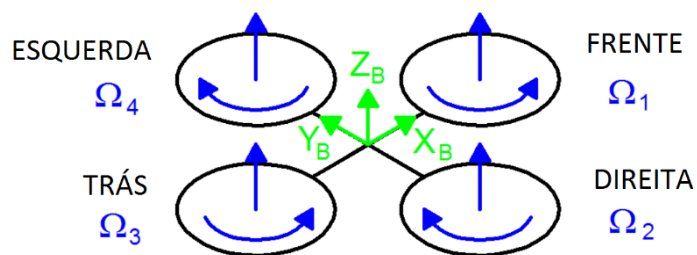


Figura 21 - Física do voo

Cada par de motores opostos gira na mesma direção. Um par gira no sentido horário e o outro par no sentido anti-horário. Considere Ω_1 , Ω_2 , Ω_3 e Ω_4 como as velocidades angulares de cada motor. Caso o objetivo seja manter o drone parado em uma mesma posição, todos os motores devem manter as mesmas velocidades angulares. No entanto para deslocar o drone os motores devem ser ajustados para que as velocidades angulares sejam diferentes, resultando em uma força que o movimentará.

O drone pode se deslocar alterando seus ângulos de inclinação, rolamento e guinada, em inglês *pitch*, *roll* e *yaw*, respectivamente, além dos movimentos de elevação vertical. A Figura 22 exemplifica os movimentos que dependem da alteração dos ângulos:

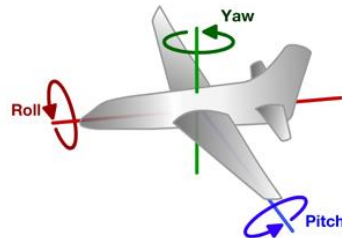


Figura 22 - Movimentos Realizáveis pelo drone

Para movimentar o drone para frente e para trás, deve ser modificado o ângulo de *pitch*, alterando as velocidades angulares dos motores traseiro ou dianteiro, como mostra a Figura 23.

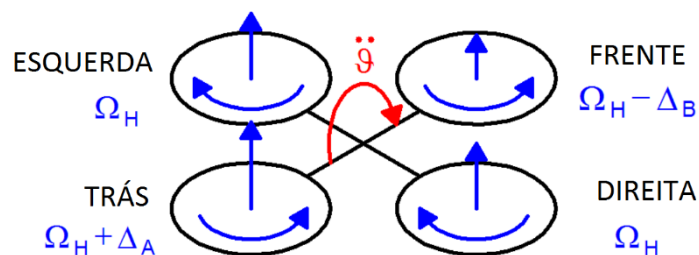


Figura 23 - Movimento de Pitch

Do mesmo modo, para se deslocar lateralmente, o drone deve alterar seu ângulo de *roll*, modificando a velocidade angular dos motores esquerdo ou direito, representado pela Figura 24

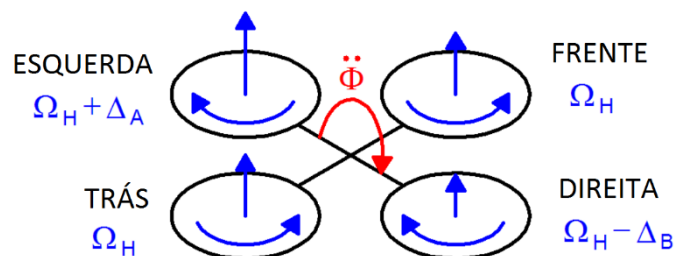


Figura 24 - Movimento de Roll

Para girar em torno de seu próprio eixo fazendo o movimento de yaw, a velocidade angular de todos os motores deve ser alterada. Neste caso pares de motores opostos modificam suas velocidades igualmente, como representado na Figura 25.

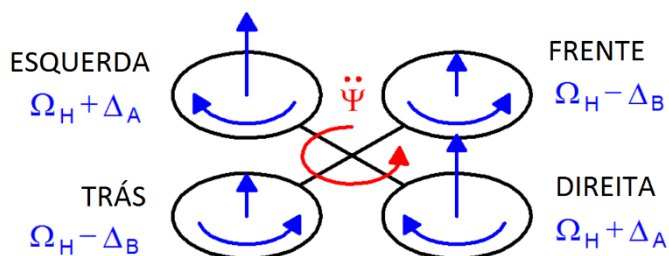


Figura 25 - Movimento de yaw

Finalmente, o movimento mais simples que o drone pode realizar, o deslocamento vertical é obtido modificando a velocidade angular de todos os motores da mesma quantidade, mostrado na Figura 26.

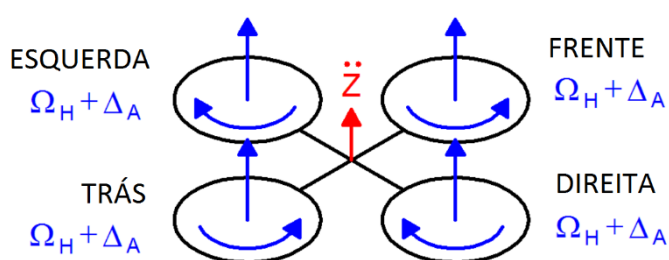


Figura 26 - Movimento de elevação

2.2. SOFTWARE

JavaScript é uma linguagem de programação constantemente utilizada para fazer páginas de web interativas. É uma linguagem dinâmica, orientada a objetos e criada com sintaxe similar à linguagem C. Sua grande vantagem é que ela é executada no lado do cliente e não no do servidor, ou seja, não é necessário tráfego de informações entre cliente e servidor. Um exemplo do uso da linguagem são calculadoras online, toda a programação já está feita e o usuário pode interagir com a página (realizar contas) sem receber ou enviar informações ao servidor.

O Node.js é uma plataforma construída para que seja possível utilizar o JavaScript do lado do servidor, tornando-se uma excelente opção para aplicações em tempo real com troca intensa de dados através de dispositivos distribuídos. Este software torna-se particularmente útil ao projeto, pois o envio de comandos para o drone é muito rápido e intenso, não podendo haver demoras ou erros de comunicação pois estes comandos serão enviados quando o equipamento estiver em voo.

Como o projeto também inclui a utilização de sensores de presença, foi utilizado um arduino para conectar um sensor ao computador e desenvolvido um programa para o mesmo, que ao receber o sinal do sensor, envie os comandos ao drone que decola e realiza manobras predeterminadas gravadas em um programa no computador.

O drone funciona com a versão 2.6.32.9 do Linux utilizando o pacote de aplicativos BusyBox. A comunicação entre o drone e o computador é realizada por meio de uma rede Wi-Fi criada pelo próprio drone. O controle, bem como a configuração, é realizado mediante o envio de comandos por uma porta *UDP*. Estes comandos são recebidos e convertidos em ações pelo drone e são enviados a uma taxa de 30Hz [18].

3. METODOLOGIA

3.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Os sistemas de vigilância atuais utilizam em sua maioria câmeras de vídeo fixas em um ponto que possuem no máximo dois graus de liberdade. Em lugares onde é necessário monitorar grandes áreas, que possuam locais de difícil acesso ou ainda onde se deseja eliminar pessoas na função de vigilância, os drones apresentam uma ótima solução.

3.2. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

De modo a simular o sistema de vigilância proposto, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- 1) Parrot AR.Drone 2.0
- 2) Arduino e sensor de presença para arduino
- 3) Notebook utilizando o sistema operacional Windows

3.3. TESTES

Foram definidos testes de modo a verificar a viabilidade de implementação do projeto. Estes testes visam simular as condições de operação que o drone seria submetido.

1. Erro de posicionamento final após realizar a seguinte sequência de operações: decolagem e pouso;
2. Erro de posicionamento final após realizar a seguinte sequência de operações: decolagem, deslocamento linear de 5 metros para frente, deslocamento linear de 5 metros para trás e pouso;

3. Erro de posicionamento final após realizar a seguinte sequência de operações: decolagem, deslocamento linear de 5 metros para a esquerda, deslocamento linear de 5 metros para a direita e pouso;
4. Erro de posicionamento final após realizar a seguinte sequência de operações: decolagem, deslocamento linear de 5 metros para frente, rotação de 180° no sentido horário, deslocamento de 5 metros para frente e pouso;
5. Erro de posicionamento final após realizar a seguinte sequência de operações: decolagem, deslocamento linear de 5 metros para frente, rotação de 180° no sentido anti-horário, deslocamento de 5 metros para frente e pouso;
6. Erro de posicionamento final após realizar a seguinte sequência de operações: decolagem, elevação linear de 2 metros e pouso;

Com exceção do teste 1, onde o drone utiliza sempre 100% da potência de seu motor, os demais testes foram realizados com os motores operando em 10, 60 e 100% da potência máxima. Para cada potência, cada teste foi repetido 3 vezes em ambiente fechado (Figura 27 e Figura 28) e outras 3 vezes em ambiente aberto (Figura 29 e Figura 30), resultando em um total de 92 testes. A potência em que o motor é operado está diretamente ligada à velocidade de deslocamento do drone.

O objetivo de se registrar o erro de posicionamento do drone ao final destes percursos é garantir que o mesmo terá condições de retornar adequadamente para a base que fará o recarregamento de sua bateria.



Figura 27 - Drone no ponto inicial em testes internos



Figura 28 - Drone durante testes internos



Figura 29 - Drone no ponto inicial em testes externos



Figura 30 - Drone durante testes externos

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados detalhados de cada teste nas duas condições de ambiente e nas três condições de potência do motor serão apresentados no anexo I. A Tabela 1 apresenta a máxima distância linear entre o ponto de decolagem e o ponto de pouso de cada família de testes internos, em centímetros.

	Interno		
Teste	10%	60%	100%
1	-	-	37.2
2	43.6	48.3	55.3
3	42.5	58.0	46.6
4	22.0	33.6	58.7
5	48.7	51.0	46.8
6	14.8	23.3	31.1

Tabela 1 - Máxima distância linear entre ponto de decolagem e pouso, em centímetros

Como se pode observar, em ambientes internos, onde o drone não sofre efeito do vento, os resultados foram bastante satisfatórios, sendo o erro máximo de posicionamento final contido em um raio de aproximadamente 60 centímetros, podendo facilmente ser construída uma estação circular para decolagens, pousos e carregamento da bateria de raio 75 centímetros, para evitar que o drone pouse muito próximo da extremidade da base. Os resultados de todos os testes internos estão representados no Gráfico 1, bem como a possível estação de carregamento.

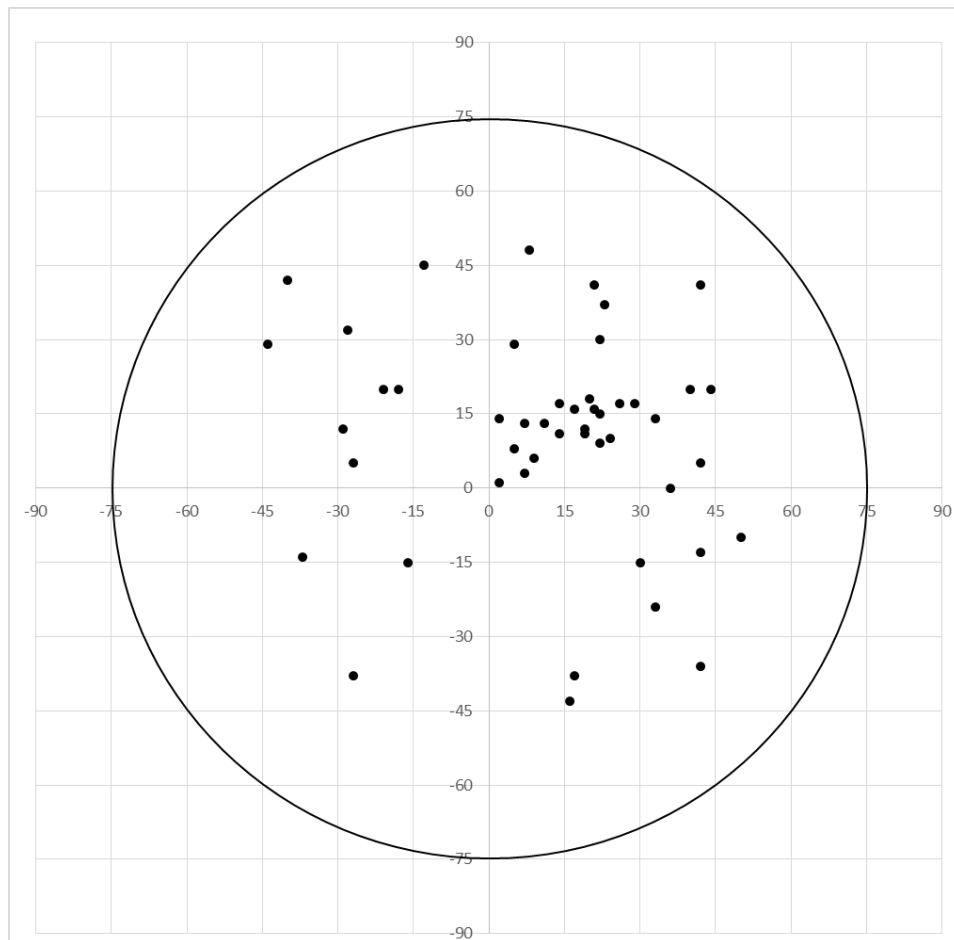


Gráfico 1 - Resultados dos testes internos e possível estação de recarga, em centímetros

Também fica claro que quanto maior a potência do motor, maiores os erros finais de posicionamento, fato que pode ser explicado pelas restrições do controlador do drone, visto que o mesmo é projetado para uso recreacional e não profissional. A solução deste problema envolve o projeto de um novo controlador de maior precisão.

Ao contrário do ambiente interno, os testes realizados em ambientes externos foram influenciados pelo efeito do vento, fazendo com que os resultados não fossem tão satisfatórios. Como pode-se observar, os erros de posicionamento final foram em média maiores que 2 metros tornando inviável a construção de uma base para realizar o carregamento da bateria do drone.

Tal fato ocorreu pois o drone realiza apenas os comandos programados, ou seja, é definida uma potência e uma direção de deslocamento, quando o mesmo sofria um desvio na rota devido à uma rajada de vento a trajetória não era corrigida e o drone simplesmente continuava realizando os mesmo comandos como se estivesse na

trajetória correta. Também, quando a trajetória estava na direção contrária do vento o drone não percebia que ainda não havia chegado na posição esperada e continuava com a realização do próximo comando. O mesmo ocorria quando estava no mesmo sentido do vento, ultrapassando a posição em que deveria atingir. Nos casos onde a potência estava a 10% o mesmo sequer se movia quando estava na direção contrária ao vento, ou seja, a força realizada pelos motores era suficiente apenas para anular os efeitos do vento.

Ainda que tenha comprometido os resultados dos testes realizados, tal fato não inviabiliza o projeto, sendo uma alternativa para contornar essa dificuldade a utilização de um sistema de localização como o *Global Positioning System (GPS)*. Tal ferramenta já está inclusive disponível para este tipo de drone (Figura 31), porém não foi possível ser adquirida por falta de recursos e tempo hábil, visto que o mesmo não é oficialmente comercializado no Brasil. Com este sistema seria possível implementar o sistema de localização SPS, *Standard Positioning Service*, ou Serviço de posicionamento padrão em português. Este sistema está disponível para todos os usuários no mundo e permite que seja utilizado o GPS sem que seja necessário pagamento de qualquer taxa. Com tal sistema é possível definir mais precisamente o local de decolagem e pouso, bem como a velocidade de deslocamento. Neste caso o drone seria capaz de reconhecer o desvio de rota sofrido pelo vento e automaticamente programaria uma nova rota para que atingisse o objetivo.



Figura 31 - Sistema de GPS para o ar.Drone 2.0

Nenhuma técnica de desvio de obstáculos foi implementada no código de controle de trajetória do drone. Tal funcionalidade é importante para sistemas que operam a altitudes de até 10m, mas para sua implementação seria necessário o processamento das imagens em tempo real e o reconhecimento de obstáculos, tarefas complexas que consomem muito processamento e, conseqüentemente, bateria.

5. CONCLUSÕES

Os estudos e testes realizados mostraram que o sistema é viável porém ainda contém limitações. Para usos internos em ambientes estruturados pode ser uma solução de vigilância simples, confiável, de baixo custo, e flexível. Pode ser programado para realizar rotas de vigilância quando sensores forem acionados, a cada intervalo de tempo ou simplesmente através do acionamento manual, substituindo o atual modelo de vigilância utilizando câmeras fixas e podendo eliminar o risco quando pessoas são utilizadas para este tipo de tarefa. Em ambientes externos estruturados ou onde a altitude de voo não apresentaria obstáculos também poderia ser utilizado sem problemas, desde que utilizando um sistema de localização como o apresentado anteriormente. O grande desafio fica por conta dos ambientes não estruturados com e muitos obstáculos, sejam eles internos ou externos, como no caso de uma área industrial onde é necessário que o drone voe a baixas altitudes. Neste caso é necessária a implementação de uma técnica de localização e desvio de obstáculos através do processamento de imagens em tempo real, além de um sistema que seja alimentado com essas informações e capaz de auto reprogramar a rota do drone após desviar dos obstáculos.

Como as baterias são outro recurso limitante ao sistema, o raio de voo do drone deve ser calculado para que não exista a possibilidade de faltar energia durante o voo. Em áreas grandes um sistema contendo mais de uma estação de carregamento deveria ser considerado.

Ainda que atualmente contenham limitações, fica claro que os drones estarão cada vez mais presentes no ambiente urbano e militar. Seja realizando missões de espionagem e ataque, utilizados como sistema de vigilância civil, realizando entregas ou simplesmente por diversão. Com todos estes avanços, as questões legais também deverão ser amplamente discutidas para que o uso dos drones seja sempre benéfico.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1) Aquisição do GPS e implementação de uma técnica de localização e cálculo automático da trajetória.
- 2) Implementação de técnicas de desvio de obstáculos com base no processamento de imagens em tempo real.

REFERÊNCIAS

[1] Hardgrave, "Remote Piloted Aerial Vehicles : An Anthology"; Estados Unidos da America, 2005. Disponível em: <http://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/rpav_home.html>. Acesso em 10 de Outubro de 2014.

[2] Smithsonian National Air and Space Museum, "Bomb, Guided, Fritz X (X-1)". Disponível em: <http://airandspace.si.edu/collections/artifact.cfm?object=nasm_A19840794000>. Acesso em 25 de Novembro de 2014.

[3] National Museum of the US Air Force, "Teledyne-Ryan Aqm-34q Combat Dawn Firebee". Disponível em: <<http://www.nationalmuseum.af.mil/factsheets/factsheet.asp?id=4044>>. Acesso em 27 de Novembro de 2014.

[4] GREENEMEIER, L. The Drone Wars: 9/11-Inspired Combat Leans Heavily on Robot Aircraft, Scientific American, 02 de Setembro de 2011. Disponível em: <<http://www.scientificamerican.com/article/post-911-military-tech-drones/>>. Acesso em 25 de Novembro de 2014.

[5] U.S. Department of Defense, Global Hawk Completes First Flight, 02 de Março de 1998. Disponível em: <<http://www.defense.gov/releases/release.aspx?releaseid=1597>>. Acesso em 27 de Novembro de 2014.

[6] GUTRO, R. NASA Begins Hurricane Mission with Global Hawk Flight to Cristobal, 27 de Agosto de 2014. Disponível em: <<http://www.nasa.gov/content/goddard/nasa-begins-hurricane-mission-with-global-hawk-flight-to-cristobal/#.VldD1zHF9UV>>. Acesso em 27 de Novembro de 2014.

[7] Força Aérea Brasileira, “Projeto desenvolvido pela FAB faz primeira decolagem automática”, 21 de Agosto de 2013. Disponível em: <<http://www.fab.mil.br/noticias/mostra/16003/VANT-%E2%80%93-Projeto-desenvolvido-pela-FAB-faz-primeira-decolagem-autom%C3%A1tica>>. Acesso em 27 de Novembro de 2014.

[8] HARMON, R. L. Aerodynamic modeling of a flapping membrane wing using motion tracking experiments, Graduate School of the University of Maryland, Department of Aerospace Engineering, 2008.

[9] Israel Aerospace Industries, Super Heron. Disponível em: <<http://www.iai.co.il/2013/18900-45847-en/IAI.aspx>>. Acesso em 25 de Novembro de 2014.

[10] KUMAR, V.; MICHAEL, N. Opportunities and challenges with autonomous micro aerial vehicles, The International Journal of Robotics Research, 21 de Agosto de 2012.

[11] PETRICCA, L; OHLCKERS, P.; GRINDE, C. Micro- and Nano-Air Vehicles: State of the Art,” International Journal of Aerospace Engineering, vol. 2011, Article ID 214549, 17 pages, 2011. doi:10.1155/2011/214549.

[12] Robobees Project, Harvard University. Disponível em: <http://robobees.seas.harvard.edu/>>. Acesso em 25 de Novembro de 2014.

[13] SHANG J. K.; COMBES S. A.; FINIO B. M.; WOOD R. J. Artificial insect wings of diverse morphology for flapping-wing micro air vehicles, School of Engineering and Applied Sciences - Department of Organismic and Evolutionary Biology, Harvard University, Cambridge, USA, 2009.

[14] BBC News UK, Mini helicopter drone for UK troops in Afghanistan, 03 de Fevereiro de 2013. Disponível em: <<http://www.bbc.com/news/uk-21313323>>. Acesso em 25 de Novembro de 2014.

[15] General Atomics Aeronautical Systems, Inc, MQ-9 Reaper/Predator B Brochure. Disponível em: <http://www.ga-asi.com/products/aircraft/pdf/Predator_B.pdf>. Acesso em 25 de Novembro de 2014.

[16] RÍPOLI, Aline. Projeto Redentor vai criar cópias do Cristo, Jornal da PUC, 22 de Setembro de 2014. Disponível em: <<http://jornaldapuc.vrc.puc-rio.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=3679&sid=40#.VGvljfnF9UU>>. Acesso em 25 de Novembro de 2014.

[17] PAMINTUAN-LAMORENA, Maan. Drones used to measure radiation in Fukushima nuclear plant, Japan Daily Press, 27 de Janeiro de 2014. Disponível em: <<http://japandailynews.com/drones-used-to-measure-radiation-in-fukushima-nuclear-plant-2743074/>>. Acesso em 25 de Novembro de 2014.

[18] KRAJNÍK, T.; VONÁSEK, V.; FISER, D.; FAIGL, J.; AR-Drone as a Platform for Robotic Research and Education, Research and Education in Robotics, 2011.

[19] Parrot ar.Drone 2.0 Elite Edition. Disponível em: <<http://ardrone2.parrot.com/>>. Acesso em 25 de Novembro de 2014.

[20] ELRUBY, A. Y.; EL-KHATIB, M. M.; EL-AMARY N. H.; HASHAD, A. I. Dynamic modeling and control of quadrotor vehicle, Arab Academy for Science, Technology & Maritime Transport.

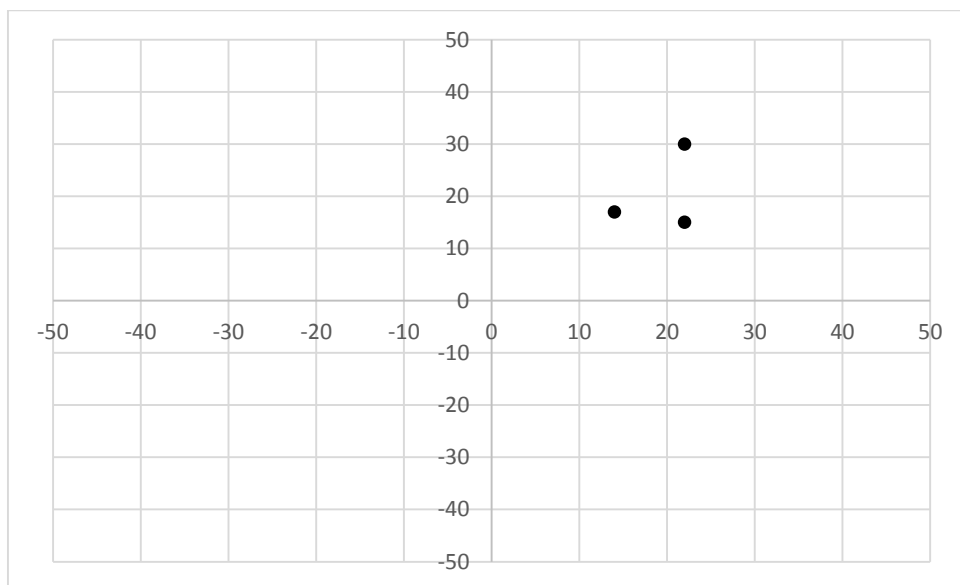
ANEXOS

RESULTADO DETALHADO DOS TESTES

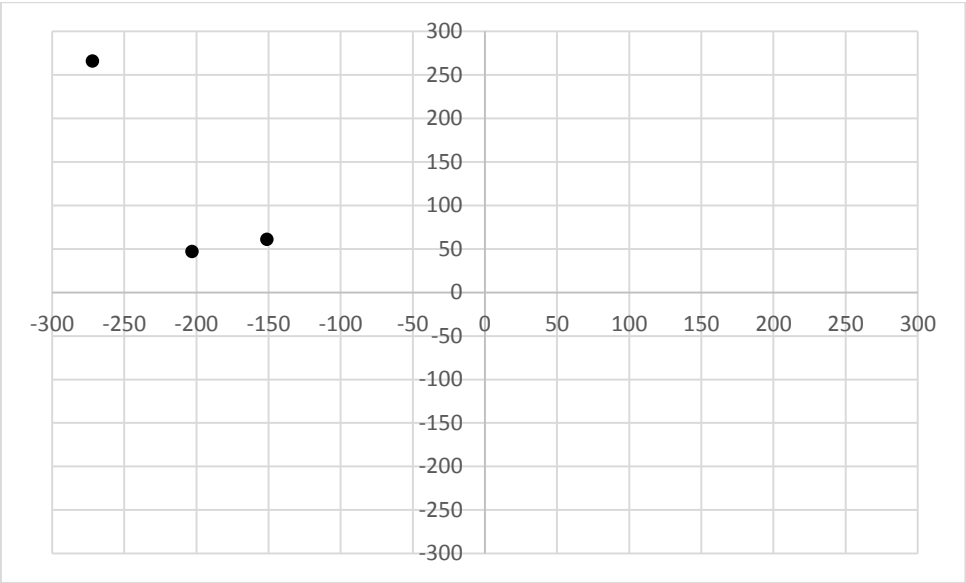
São apresentados os resultados detalhados dos testes realizados. Em todos os testes o drone decolou da origem (0,0) e pousou nos pontos marcados. Todos os gráficos estão em contímetros.

1. Erro de posicionamento final após realizar a seguinte sequência de operações: decolagem e pouso;

a. Interno

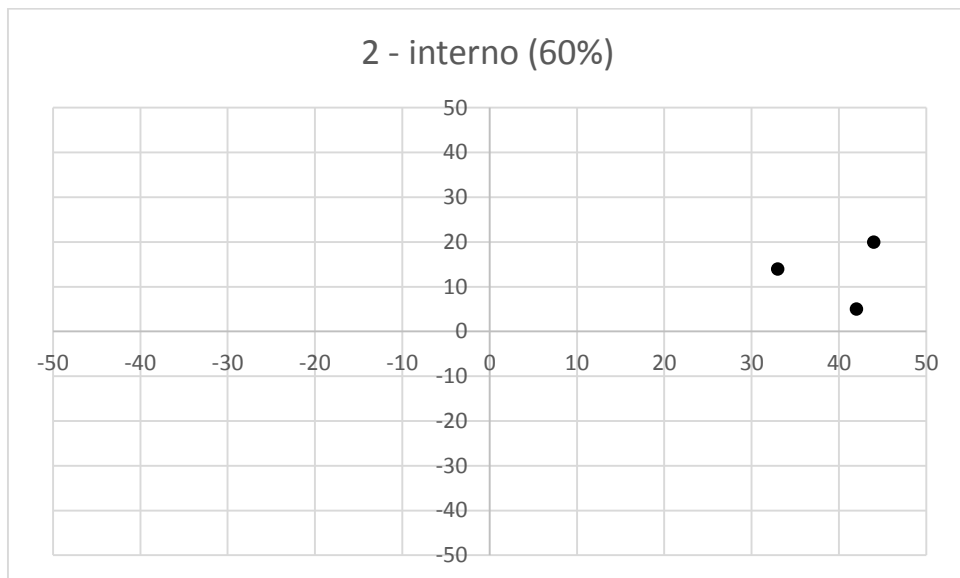
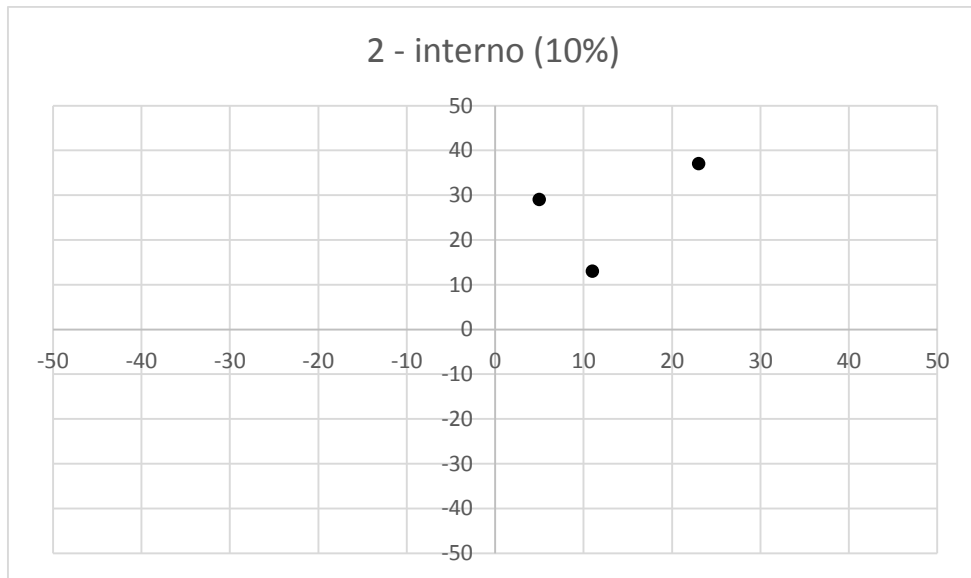


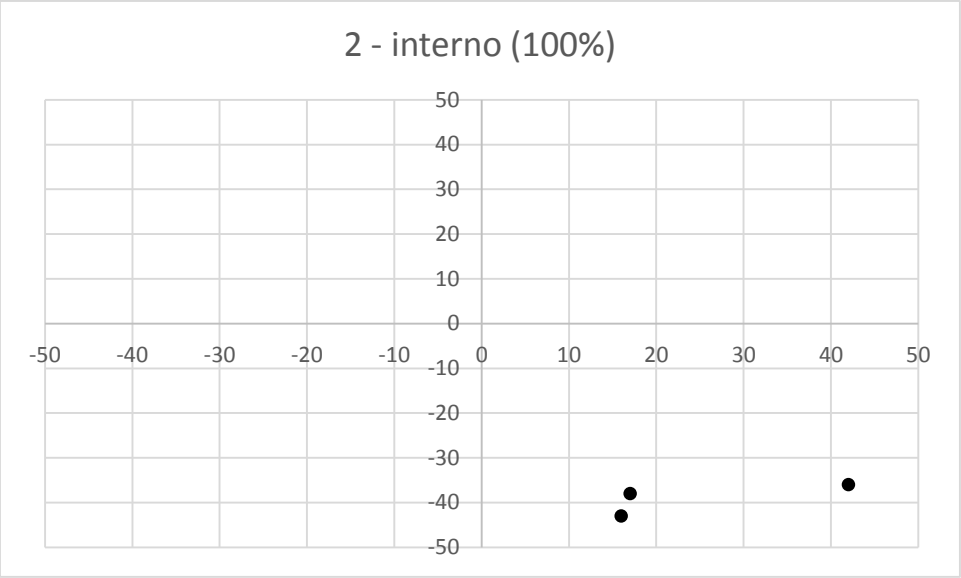
b. Externo



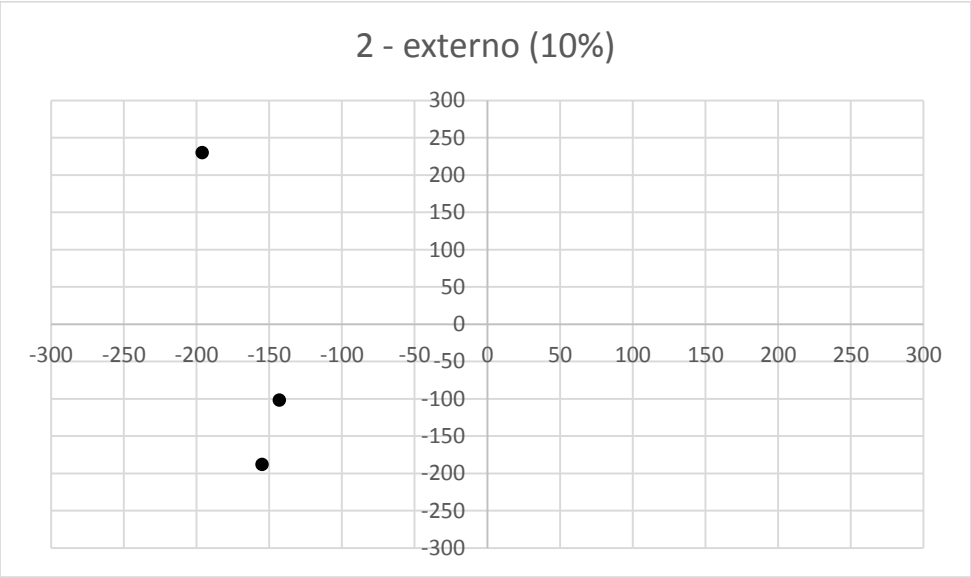
2. Erro de posicionamento final após realizar a seguinte sequência de operações: decolagem, deslocamento linear de 5 metros para frente, deslocamento linear de 5 metros para trás e pouso;

a. Interno

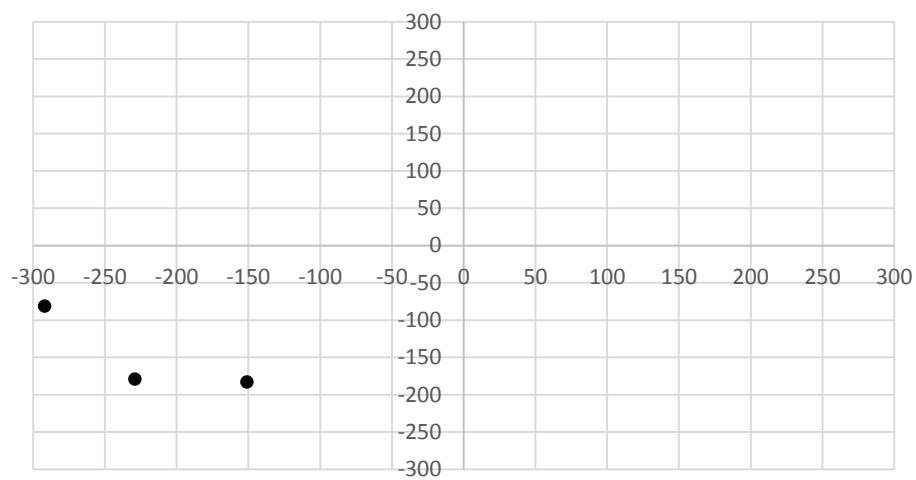




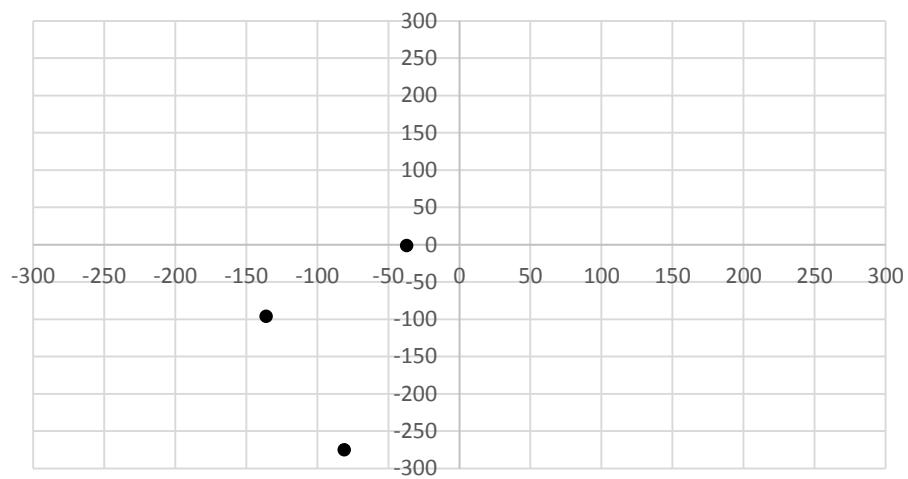
b. Externo



2 - extremo (60%)

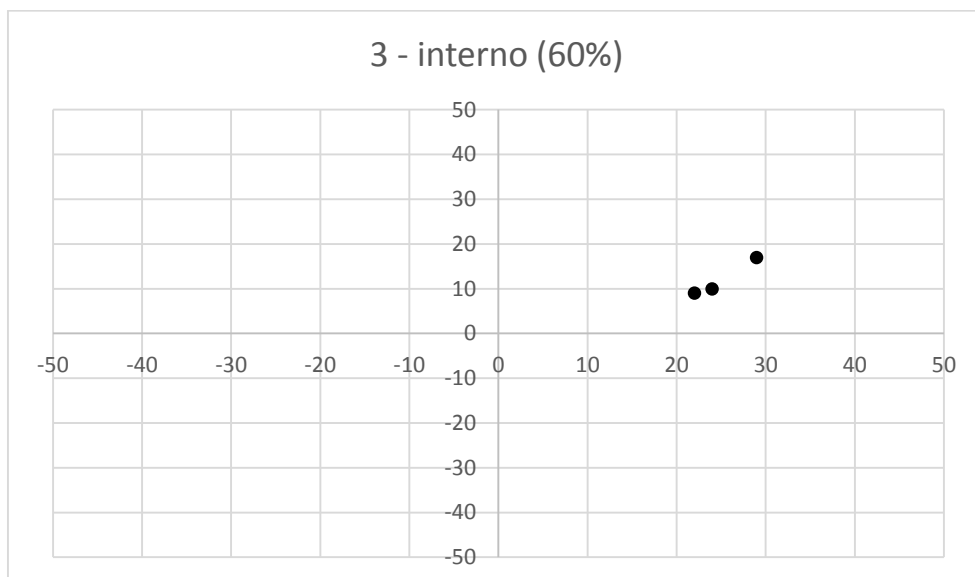
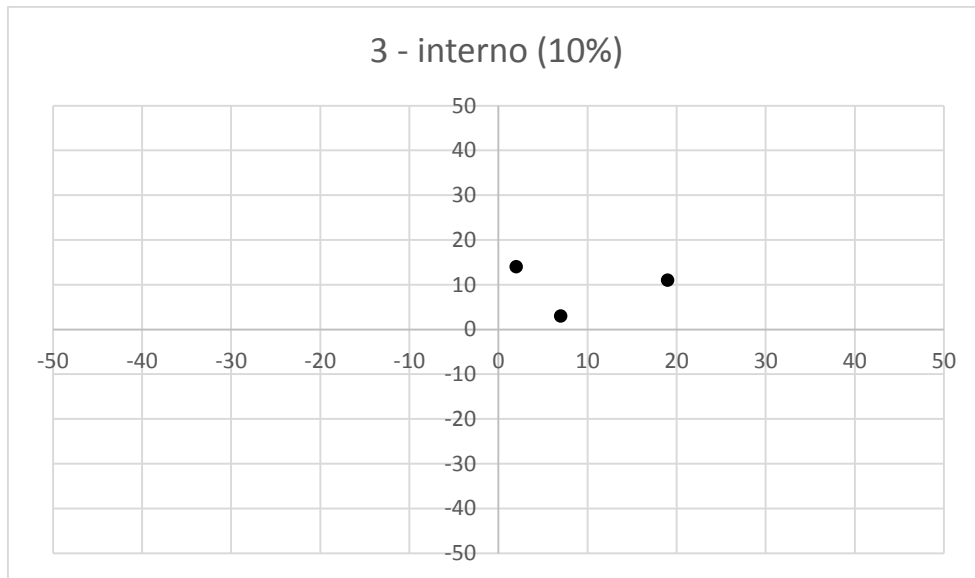


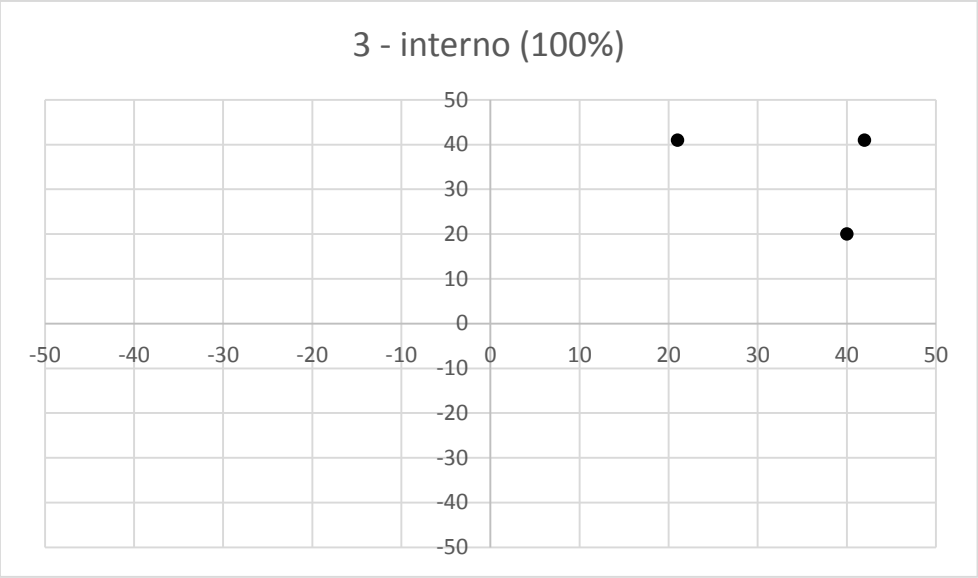
2 - externo (100%)



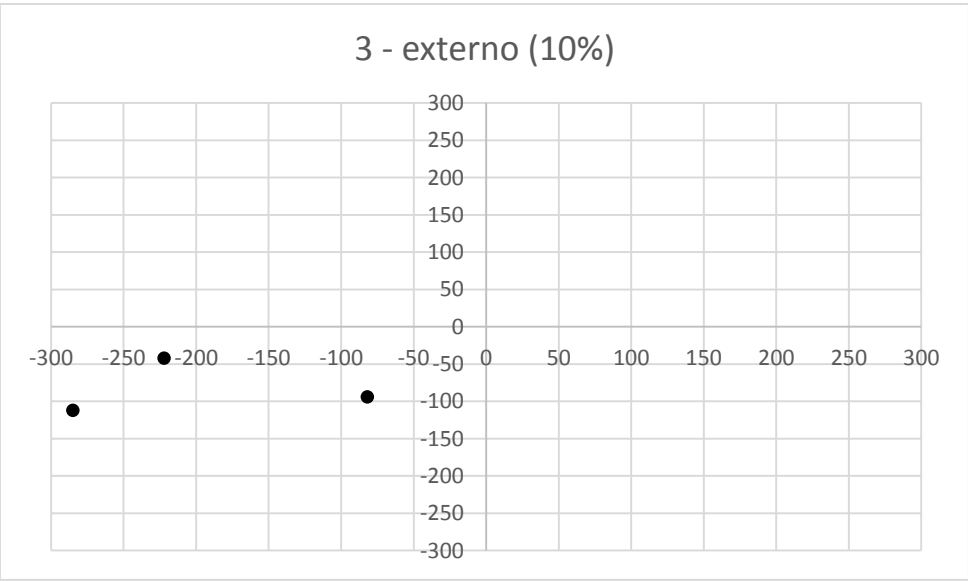
3. Erro de posicionamento final após realizar a seguinte sequência de operações: decolagem, deslocamento linear de 5 metros para a esquerda, deslocamento linear de 5 metros para a direita e pouso;

a. Interno

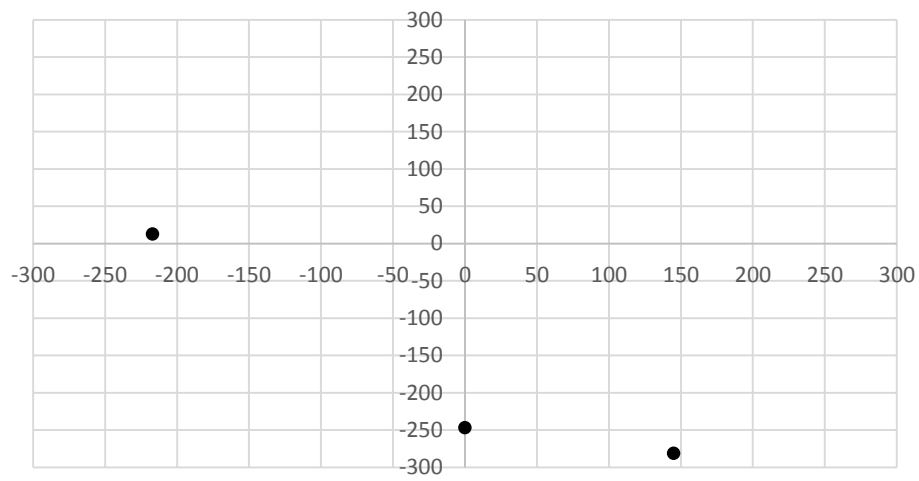




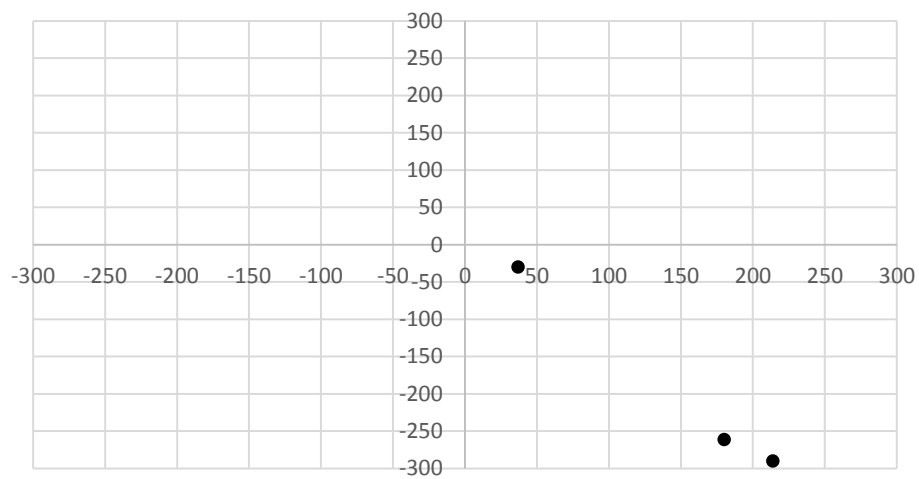
b. Externo



3 - externo (60%)

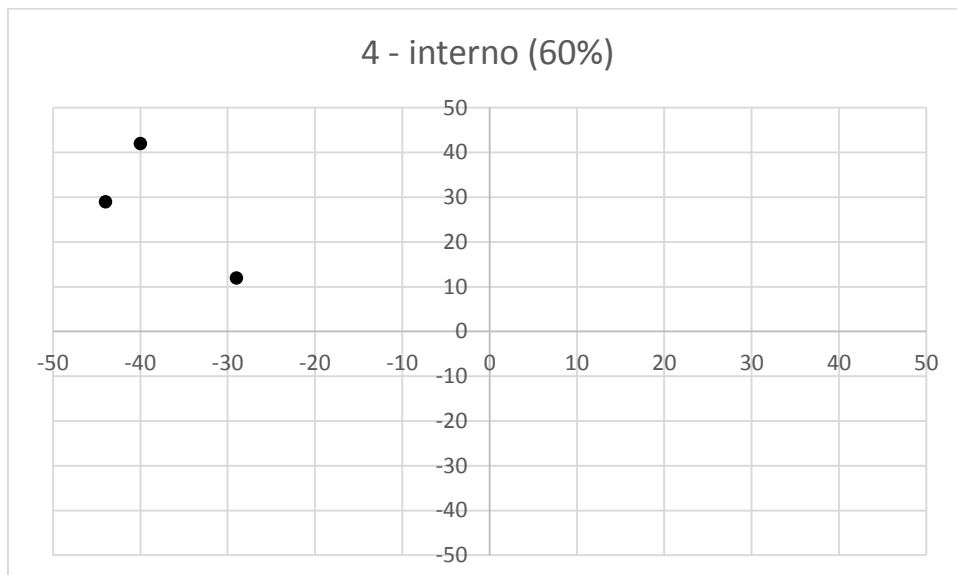
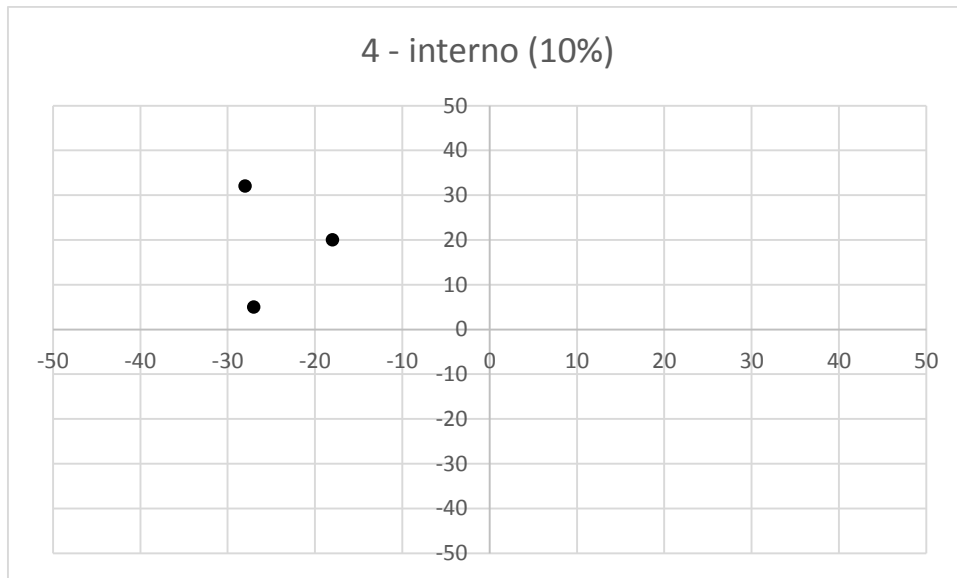


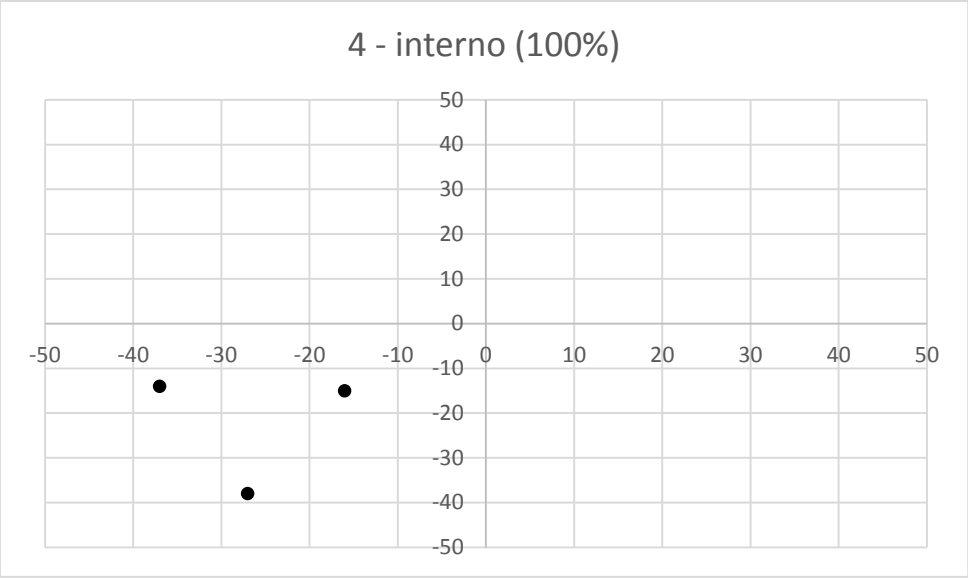
3 - externo (100%)



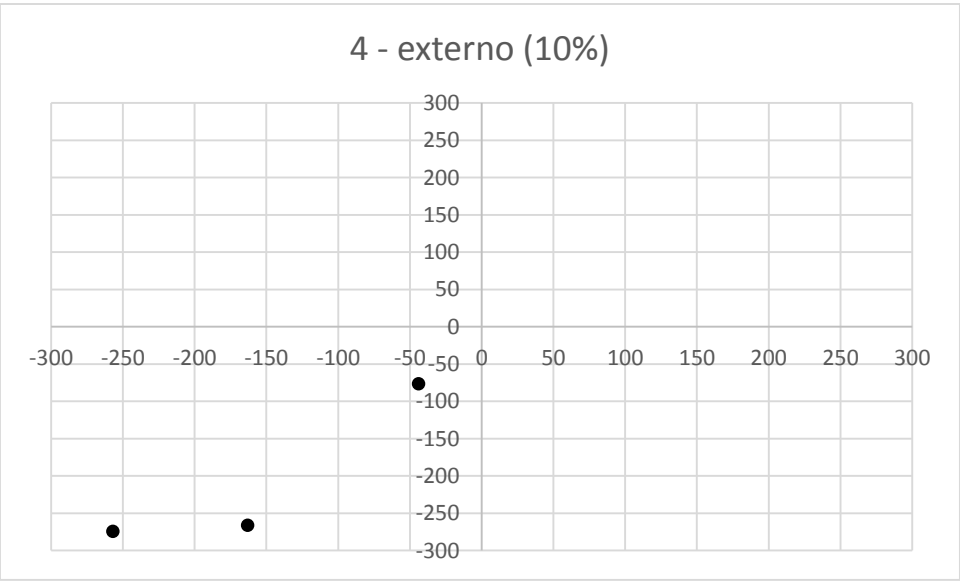
4. Erro de posicionamento final após realizar a seguinte sequência de operações: decolagem, deslocamento linear de 5 metros para frente, rotação de 180° no sentido horário, deslocamento de 5 metros para frente e pouso;

a. Interno

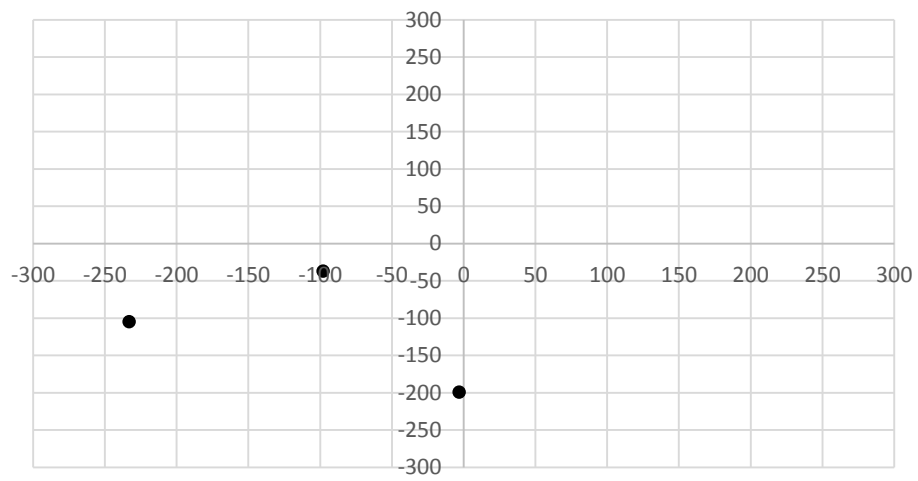




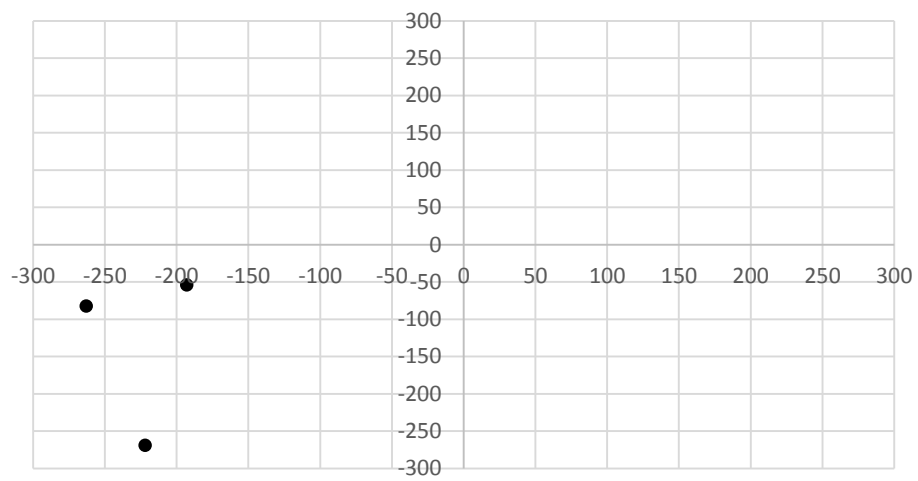
b. Externo



4 - externo (60%)

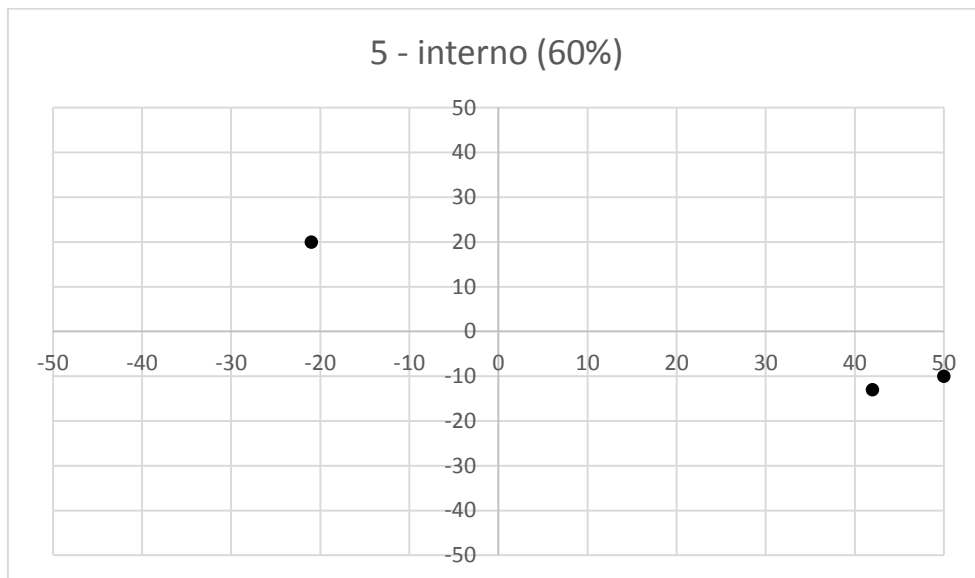
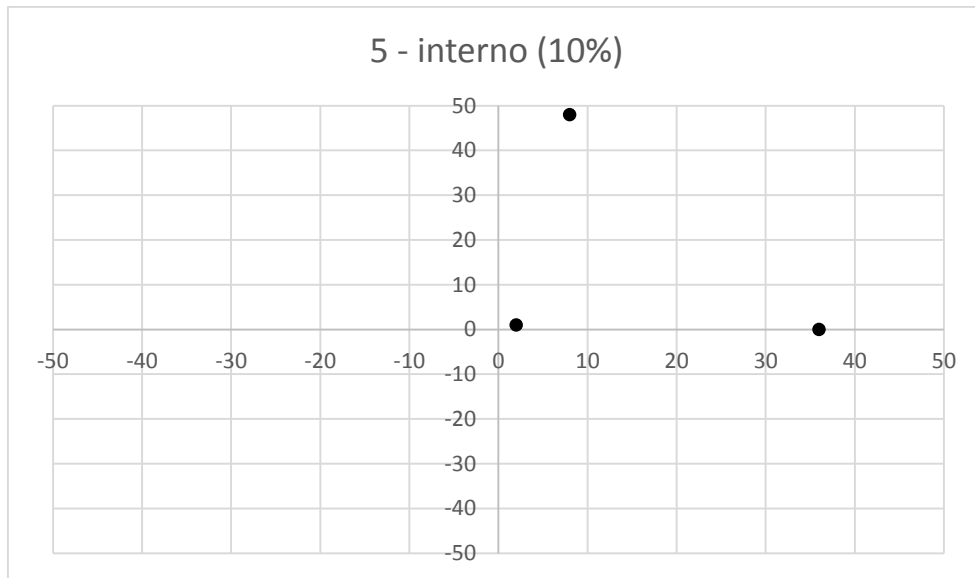


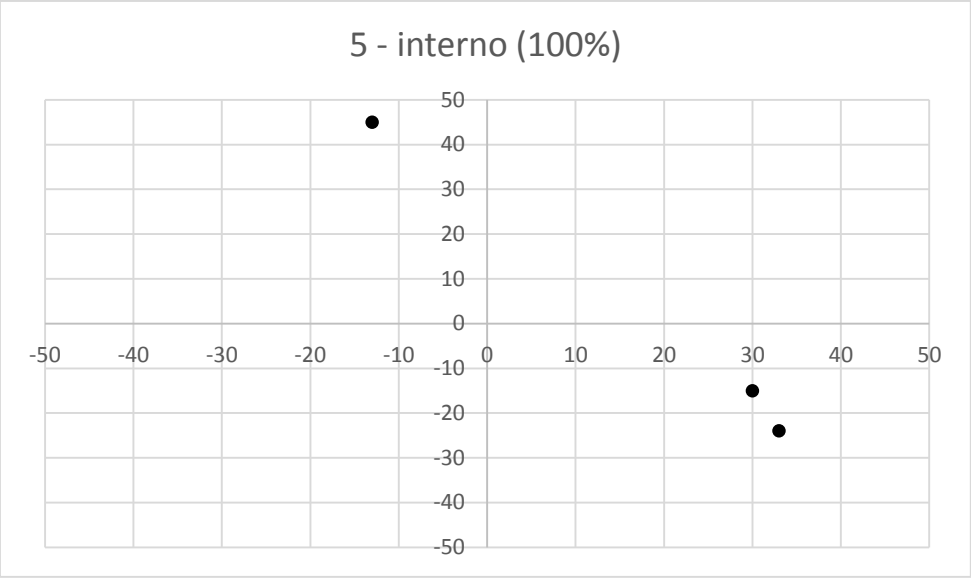
4 - externo (100%)



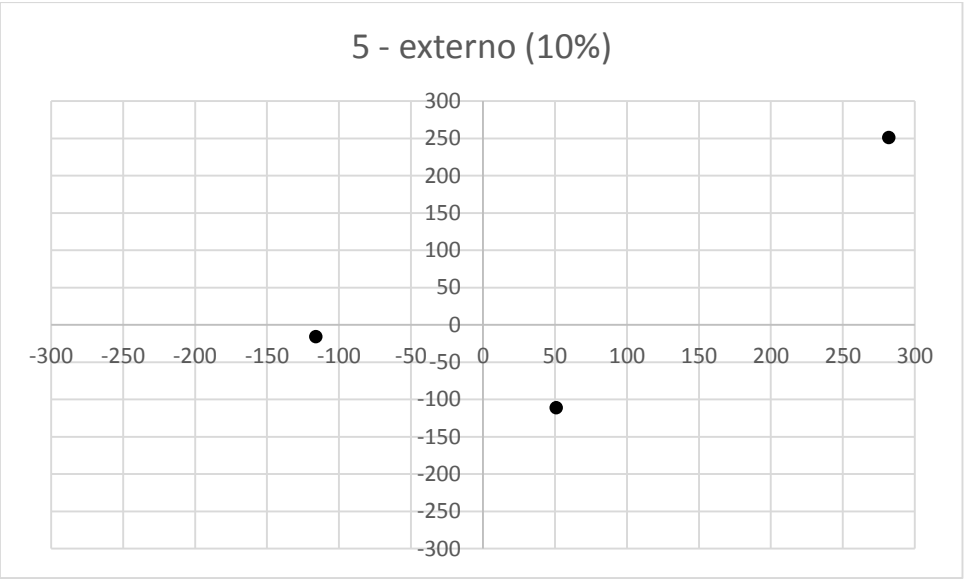
5. Erro de posicionamento final após realizar a seguinte sequência de operações: decolagem, deslocamento linear de 5 metros para frente, rotação de 180° no sentido anti-horário, deslocamento de 5 metros para frente e pouso;

a. Interno

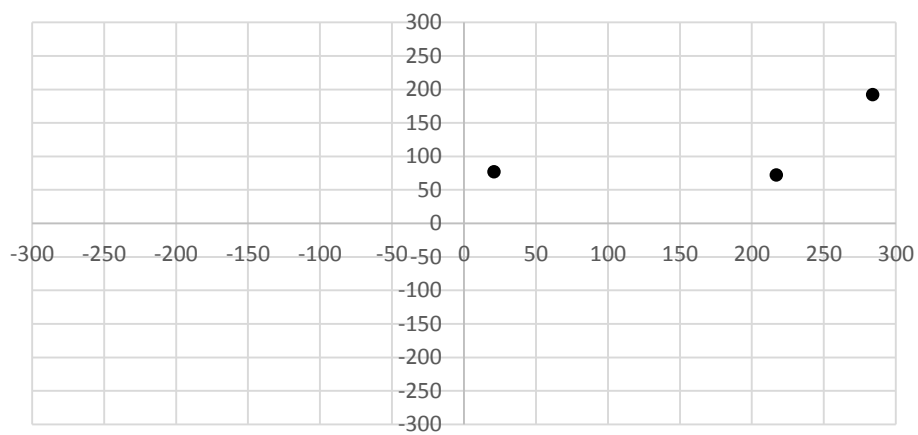




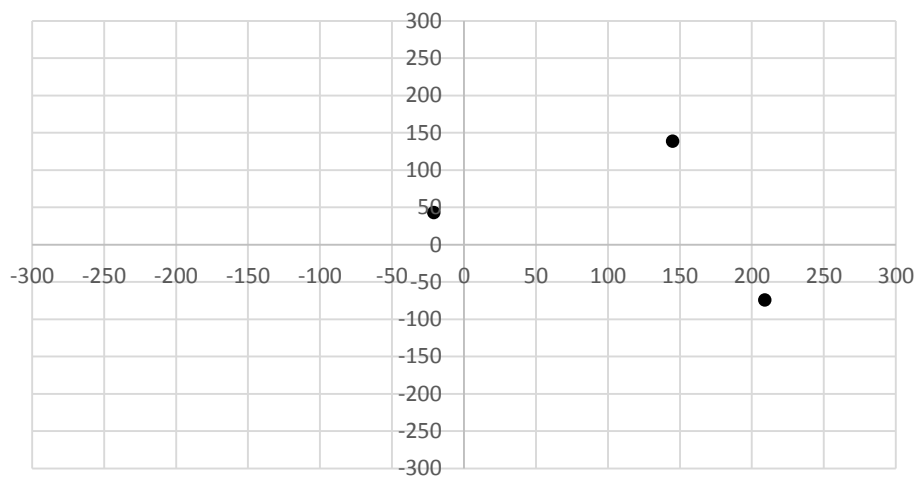
b. Externo



5 - externo (60%)

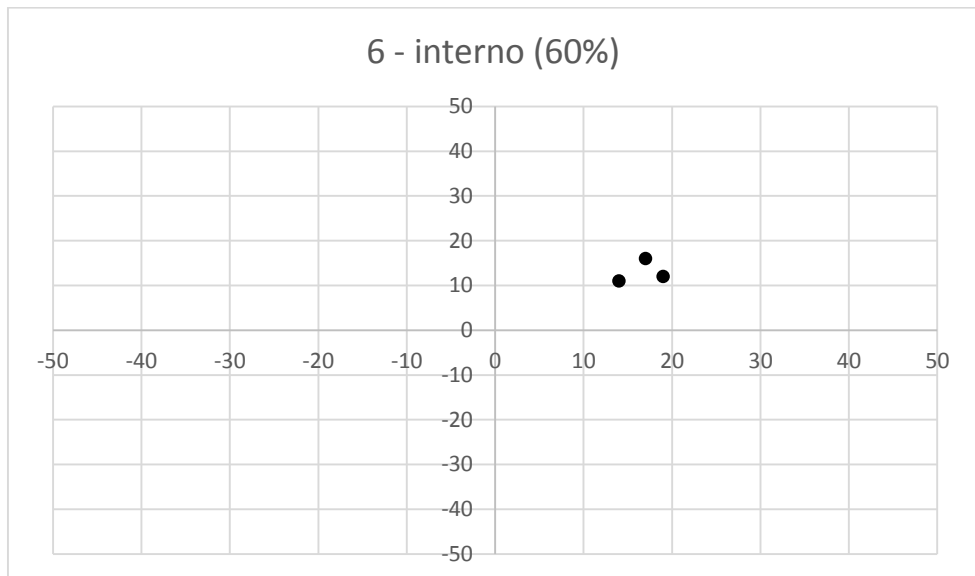
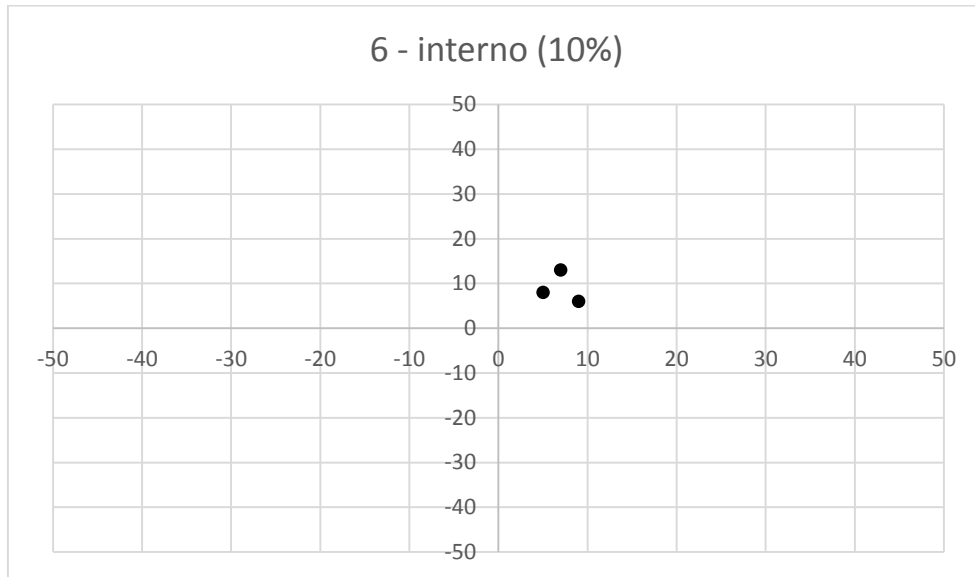


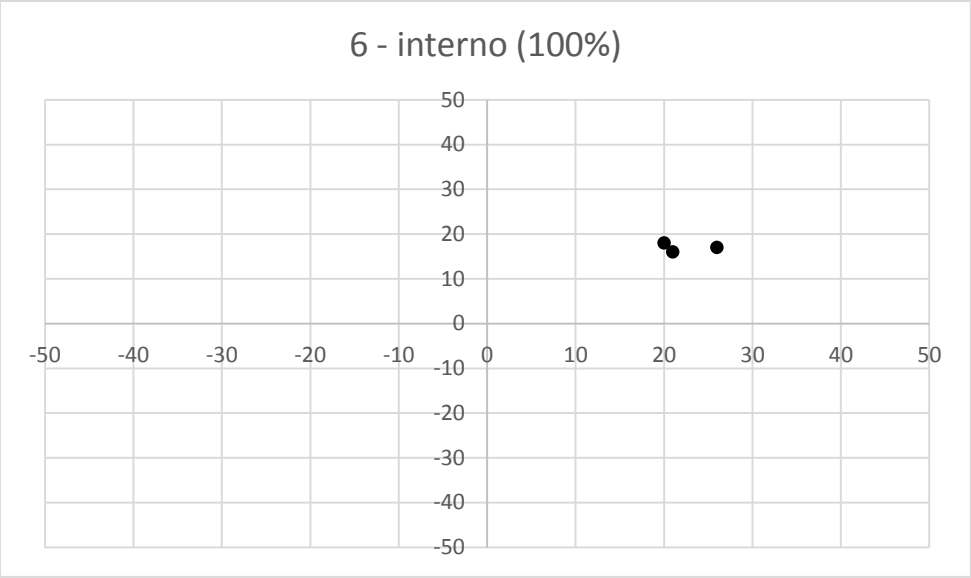
5 - externo (100%)



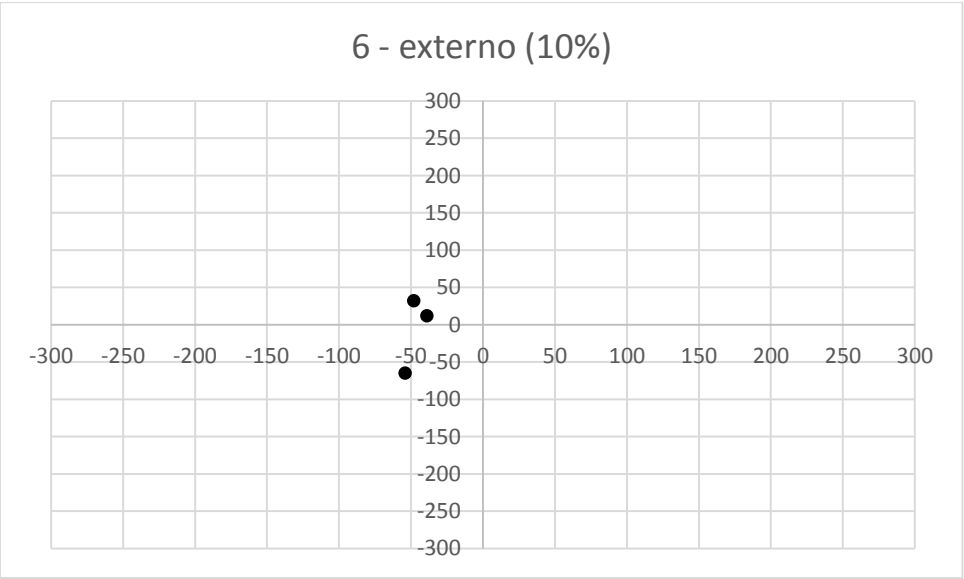
6. Erro de posicionamento final após realizar a seguinte sequência de operações:
decolagem, elevação linear de 2 metros e pouso;

a. Interno

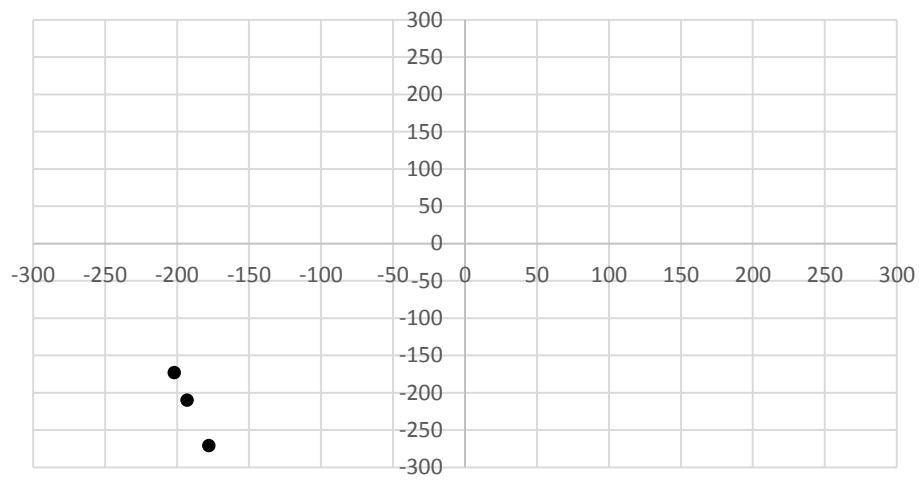




b. Externo



6 - externo (60%)



6 - externo (100%)

