



Universidade de São Paulo - USP
Escola de Engenharia de São Carlos - EESC
Departamento de Engenharia Mecânica - SEM
Laboratório de Robótica Móvel - LabRoM



Proposta de Projeto Iniciação Científica

Titulo do Projeto:

Controle Teleoperado de Quadrotor com uso de IMU (*Inertial Measurement Unit*) fixo em uma Luva de Controle

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC - USP

Aluno: Giovani Benatti Debiagi, Graduando em Engenharia Mecatrônica

Resumo: O projeto aqui apresentado, será realizado no Laboratório de Robótica Móvel da EESC-USP (Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo), no ART (*Aerial Robots Team*). Este projeto tem como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema de controle tele-operado de veículos aéreos quadrotores por meio de um sensor inercial (IMU) acoplado a uma luva a ser usada pelo piloto do veículo. O projeto tem como foco o total desenvolvimento do sistema acima citado, que consiste na captação de dados da IMU “embarcada” na luva que será vestida pelo piloto. De acordo com o movimento desta luva, a aeronave deverá executar manobras (p.e.: *hovering*, mover-se para frente, para trás, etc.). Para tal, será desenvolvido um algoritmo que será embarcado em um microcontrolador Arduino Nano capaz de interpretar os dados recebidos. Será feito o envio das informações obtidas para um computador portátil por meio de um par de módulos de transmissão via *Bluetooth*. Em adição a isto, também será feito o desenvolvimento de outro algoritmo, dessa vez no computador portátil, capaz de tomar decisões de atitude com base nas informações recebidas e enviá-las a um quadrotor modelo Pelican, da Ascending Technologies, por meio de um conjunto de módulos Xbee de rádio frequência, controlando-o.



UNIVERSITY OF SÃO PAULO - USP
ENGINEERING SCHOOL OF SÃO CARLOS - EESC
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT - SEM
MOBILE ROBOTICS LAB - LABRoM



Undergraduate Research Project Proposal

Project Title:

Quadrotor Control by Teleoperation using an IMU (Inertial Measurement Unit)

Supervisor: Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC - USP

Fellow: Giovani Benatti Debiagi, Mechatronics Engineering Undergraduate Student

Abstract: This project, which will be developed in the Mobile Robotics Laboratory of EESC – USP (Sao Carlos School of Engineering – University of Sao Paulo), supported by the ART (Aerial Robots Team) from the same unit, presents, as main objective, a quadrotor aerial vehicle control system by teleoperation, using an inertial measurement unit (IMU) attached to a glove which will be used by the vehicle pilot. The project focuses on the complete development of the system mentioned above, that consists of data catchment from the IMU used by the pilot, considering the movements of his glove-wearing arm; development of an algorithm inside a microcontroller Arduino Nano, capable of interpreting the received data; sending of the acquired information to a laptop via a pair of Bluetooth modules; development of another algorithm, this time, inside the laptop, capable of making decisions of attitude based on the acquired information and send them to a quadrotor Pelican, manufactured by Ascending Technologies, via a pair of Xbee radio frequency transmission modules, controlling it.

São Carlos, February / 2016.

1 – Introdução e Justificativa

Conforme o tempo passa e as sociedades modernas avançam, aumenta cada vez mais a necessidade de realização de tarefas de forma mais rápida e eficiente, de modo a economizar tempo e dinheiro. Surgem também tarefas extremamente desafiadoras, algumas até inviáveis para a realização por seres humanos.

Com base nisso, a humanidade tem se voltado para novas tecnologias que prometem resolver essas questões, ou, pelo menos, abordá-las de forma mais efetiva. Uma das áreas que mais têm apresentado resultados positivos é a da robótica. Os robôs estão cada vez mais inseridos na vida cotidiana da população e suas aplicações abrangem enorme parte das necessidades mundiais atuais, desde a substituição de mão de obra humana em uma montadora de automóveis até a inspeção de falhas técnicas em uma usina nuclear. Verifica-se que o emprego dessas máquinas busca melhorar condições de trabalho, produtividade e qualidade de vida.

É dentro deste cenário que se encontram os drones ou VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados), em especial os drones de pequeno porte: robôs aéreos de alta mobilidade e tamanho reduzido. Devido a estas características, os VANTs são utilizados em um vasta gama de atividades. Exemplos disto são o uso desses veículos na agricultura para monitoramento e controle de plantações; operações militares para patrulha de fronteiras; e pela companhias de energia para supervisão de linhas aéreas; entre outros. É neste contexto que o ART (*AerialRobotics Team*) conduz seus projetos de pesquisa. O grupo desenvolve robôs híbridos, como o H2Omni ([Sampaio, 2015](#)), capaz de voar e navegar no leito de rios e lagos, o Sharky ([Sampaio, 2014](#)), capaz de voar como um *glider*, ou como um quadrotor ou o Squid ([Sampaio, 2014](#)), capaz de realizar inspeções. Além disso, a equipe pesquisa algoritmos de percepção, fusão de dados e controle que são embarcados nas aeronaves.

Neste projeto de IC, com o auxílio do ART, o aluno desenvolverá um sistema de controle de VANT baseado em um sensor (IMU) preso a uma luva. Utilizando um microcontrolador e um computador portátil, o sistema dará ao usuário o poder controlar o drone baseado no movimento de um de seus membros superiores. O veículo a ser utilizado nas experiências será o quadrotor Pelican, produzido pela Ascending Technologies. O ART possui 3 aeronaves deste modelo disponíveis para voo e testes.

O projeto se justifica pelo fato de os drones estarem cada vez mais inseridos no cotidiano da população e, conseqüentemente, pela necessidade de controle prático e fácil

dessas máquinas por iniciantes e leigos no assunto, para a execução de tarefas sem a necessidade de supervisão profissional.

O funcionamento do sistema consiste nos seguintes passos:

1. Ativação do sistema por meio de um botão ON/OFF presente na luva vestida pelo usuário.
2. Aquisição de dados pela IMU (*Inertial Measurement Unit*) com a movimentação do braço do usuário com a luva.
3. Transformação dos dados recebidos pela IMU em medidas quantitativas de aceleração em 3 eixos, pelo microcontrolador Arduino Nano.
4. Envio dos dados interpretados do microcontrolador a um computador portátil via módulos Bluetooth RS232 HC-06.
5. Recepção e utilização dos dados em um algoritmo implementado no computador portátil para tomar decisões e criar comandos de movimentação para drone.
6. Envio dos comandos de movimentação para o drone via transmissores Xbee de rádio frequência.
7. Movimentação do drone de acordo com a movimentação do braço do usuário.
8. Caso o sistema seja desligado pelo botão ON/OFF com a aeronave em voo, a mesma altera seu sistema automaticamente para o modo "PosHold" (padrão do computador embarcado da aeronave), no qual ela permanece na mesma posição pairando no ar, com movimentos mínimos, até que o sistema seja ativado novamente ou usuário retome controle por um rádio controle.

2- Objetivos

Tendo-se em vista o que foi apresentado no item anterior, tem-se que os objetivos deste projeto são:

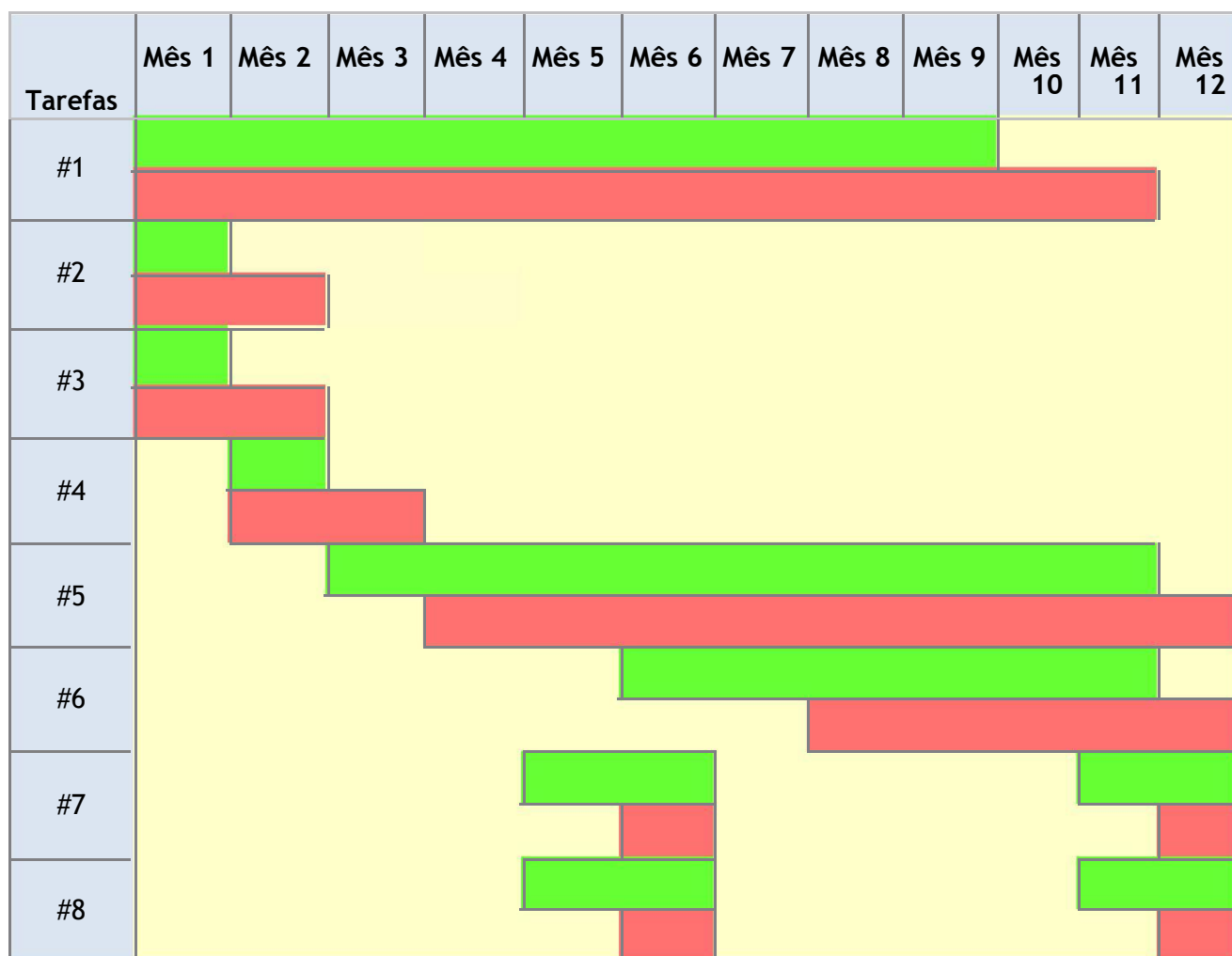
- a) Desenvolver uma biblioteca em linguagem C/C++ com funções que simplifiquem a utilização de uma IMU (*Inertial Measurement Unit*) associada a um microcontrolador Arduino Nano.
- b) Sobre o microcontrolador, implementar um algoritmo em linguagem C/C++, utilizando a biblioteca citada no item **a)**, capaz de receber os dados adquiridos pela IMU por comunicação I2C, interpretá-los, fazendo a conversão para medidas de aceleração palpáveis em 3 eixos, e enviá-las a um computador portátil via módulos Xbee de transmissão por rádio frequência.
- c) Ainda sobre o microcontrolador, montar um circuito com um botão ON/OFF, e implementar um algoritmo de segurança, otimizando a confiabilidade do sistema.
- d) No computador portátil, implementar um algoritmo em linguagem C/C++, utilizando a biblioteca citada no item **a)**, capaz de receber os dados já interpretados pelo microcontrolador e, a partir deles, desenvolver comandos de movimentação.
- e) Estabelecer comunicação estável entre o computador portátil e um drone quadrotor modelo Pelican, da Ascending Technologies, e enviar-lhe comandos de movimentação.
- f) Avaliar e otimizar a fidelidade dos movimentos do drone com relação aos executados pelo usuário, bem como o seu tempo de resposta. Para tal será empregada a gaiola de testes que o ART utiliza e que tem um sistema de visão com 4 câmeras Vicon.

Esse projeto visa, portanto, desenvolver um controle remoto para drones, utilizando, basicamente, movimentos de um dos membros superiores do usuário, de fácil utilização, sendo possível de ser operado por um leigo ou iniciante. Isto o tornará capaz de pilotar aeronaves deste tipo sem grandes preocupações.

3 – Plano de Trabalho e Cronograma

A Tabela 1 a seguir apresenta de forma resumida o cronograma de desenvolvimento proposto para o projeto de Iniciação Científica. Sendo que em verde está o cronograma ideal, e o que está representado em vermelho apresenta o cronograma pessimista. Após a tabela é apresentada uma descrição sucinta das atividades que serão executadas. Durante a execução do plano de trabalho, o aluno também contará, além do professor orientador, com o auxílio de dois alunos de mestrado e um outro de graduação para discussão dos resultados.

Tabela 1. Cronograma de execução do projeto.



Lista de atividades:

1. Revisão Bibliográfica.
2. Desenvolvimento biblioteca em C/C++
3. Desenvolvimento do algoritmo capaz de traduzir os dados recebidos pela IMU em medidas de aceleração palpáveis.
4. Montagem do circuito e implementação do sistema de desligamento (botão ON/OFF).
5. Desenvolvimento e implementação dos algoritmos para tomada de decisão de atitude e envio para o Pelican.
6. Testes pós-processados dos algoritmos.
7. Elaboração de relatório parcial e final.
8. Redação de trabalhos e publicações.

4 – Materiais e Métodos

Para a captação de movimento do braço do usuário do sistema, será utilizada uma IMU (*Inertial Measurement Unit*) GY-80, munida de um acelerômetro ADXL345, um giroscópio L3G4200D, um magnetômetro HMC5883L e um barômetro BMP085, acoplada a uma luva, que irá detectar aceleração da luva em 3 eixos. Esses dados serão, posteriormente, transferidos por comunicação I2C e transformados em medidas de aceleração em metros por segundo por um microcontrolador Arduino Nano, também preso à luva. Para isso, o aluno desenvolverá, mutuamente, um algoritmo em linguagem C/C++ capaz de fazer a tradução dos dados recebidos pela IMU em medidas de aceleração em metros por segundo no microcontrolador, e uma biblioteca, também em linguagem C/C++, com funções que auxiliem o desenvolvimento e aprimorem a organização do algoritmo acima citado. O microcontrolador Arduino Nano foi escolhido para a realização dessa tarefa pelo baixo preço, versatilidade e tamanho reduzido. A alimentação do microcontrolador será feita por uma bateria 9V, também presa à luva.

A próxima etapa do desenvolvimento do projeto é estabelecer comunicação estável entre o microcontrolador e um laptop para que as informações já interpretadas sejam transferidas para o último. Essa comunicação será feita por meio de tecnologia Bluetooth, usando o módulo RS232 HC-06.

Para finalizar a montagem da luva, o aluno montará um circuito eletrônico com um botão ON/OFF capaz de desativar a comunicação Bluetooth entre o microcontrolador e o laptop, forçando o Pelican a entrar em seu modo padrão “PosHold”, como citado acima. A Figura 1 ilustra os componentes presentes na luva a ser vestida pelo usuário do sistema.

Depois de estabelecida a comunicação via Bluetooth entre o microcontrolador e o laptop, o aluno desenvolverá um algoritmo em C/C++, no laptop, para tomar decisões de atitude que serão enviadas posteriormente ao computador embarcado do Pelican. A Figura 2 ilustra o esquema geral de comunicação do sistema.

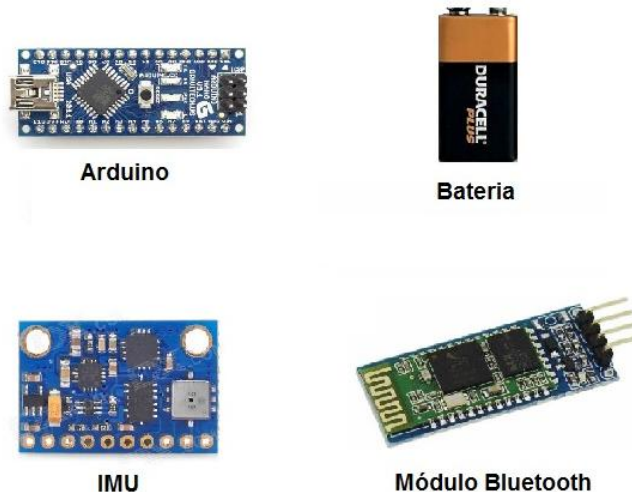


Figura 1 – Componentes presentes na luva. Fonte: Elaborado pelo autor.

Para entender o mecanismo de tomada de decisão de movimentação para o drone, é preciso, primeiro, entender a cinemática de vôo da aeronave.

O drone se movimenta com base na inclinação de seu referencial em relação a um referencial fixo (Terra). Essa inclinação é causada por movimentos rotativos do referencial da aeronave em torno dos 3 eixos que formam o referencial fixo, e é quantificada por medidas de 3 ângulos, os ângulos de yaw, de roll e de pitch. A Figura 3 ilustra a rotação da aeronave em relação aos eixos do referencial fixo, identificando cada um dos ângulos acima citados. Usualmente, assumimos como movimento de roll a rotação em torno do eixo que atravessa a aeronave no sentido trás-frente, portanto, a frente da aeronave, na Figura 3, se encontra perpendicular ao eixo X.

Com base nos ângulos de pitch, yaw e roll, e assumindo que a Figura 3 ilustre uma vista traseira de um drone qualquer, a cinemática de vôo funciona da seguinte forma:

Pitch: Se os motores aplicarem um torque resultante na direção do eixo Y, no sentidomostrado na figura, o drone se inclinará para frente e será criado, assim, um ângulo de pitch. Essa inclinação criará uma componente de força na direção X e fará com que o drone se movimente para frente. Se o sentido do torque aplicado for invertido, o drone se movimentará para trás.

Yaw: Se os motores aplicarem um torque resultante na direção do eixo Z, no sentidomostrado na figura, o drone rotacionar-se-á no sentido do torque e será criado, assim, um ângulo de yaw, mas a aeronave não se inclinará, portanto, não apresentará movimento de

translação. Se o sentido do torque aplicado for invertido, o drone rotacionar-se-á no sentido oposto.

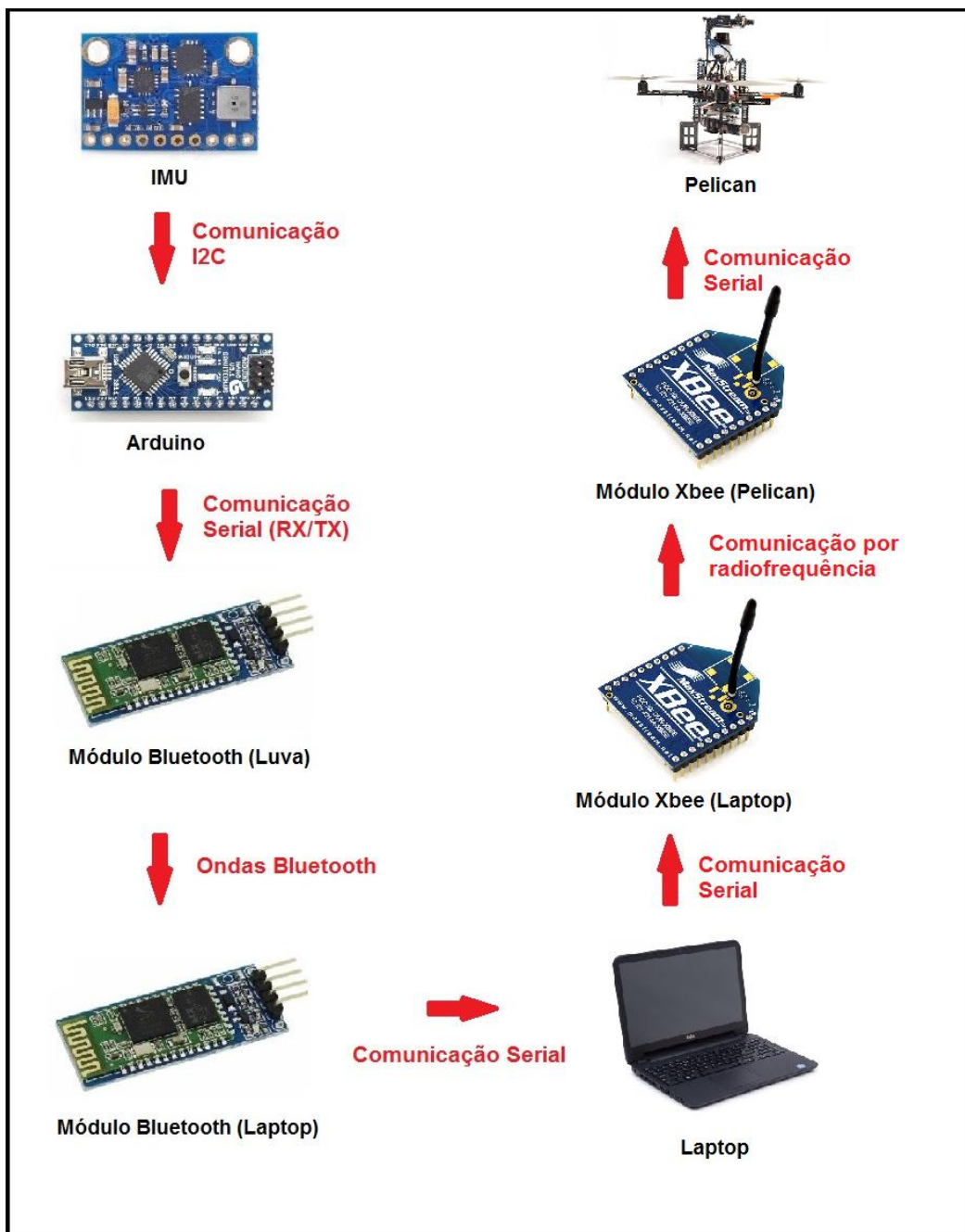


Figura 2 – Esquema geral de comunicação do sistema IMU-Drone. Fonte: Elaborado pelo autor.

Roll: Se os motores aplicarem um torque na direção do eixo X, no sentido mostrado na figura, o drone se inclinará para a esquerda e será criado, assim, um ângulo de roll. Essa inclinação criará uma componente de força na direção Y e fará com que o drone se

movimente para a esquerda. Se o sentido do toque aplicado for invertido, o drone se movimentará para a direita.

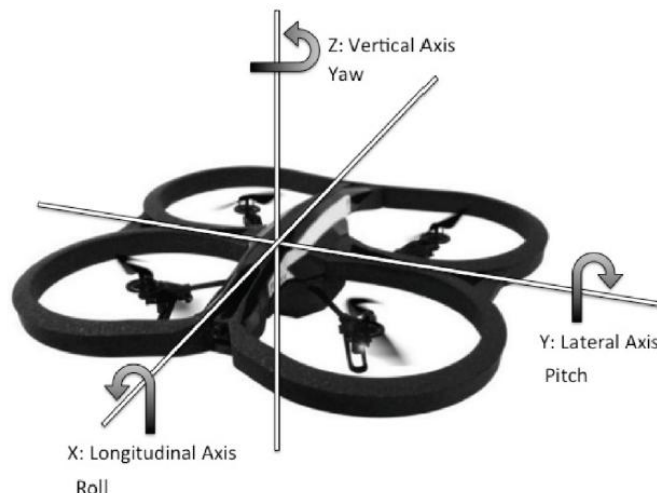


Figura 3 – Cinemática de vôo de um drone com base em seus movimentos rotativos em relação aos 3 eixos do referencial fixo. Disponível em: <http://www.yorku.ca/mack/etra2014.html>. Acesso em mar.2016.

Com base na cinemática dos drones, acima descrita, pode-se relacionar os movimentos aplicados pelo pulso à IMU aos executados pelo Pelican. A Figura 4 ilustra 3 tipos de rotação que o pulso humano é capaz de executar e a Tabela 2 relaciona os movimentos do pulso com os de Yaw, Roll e Pitch, executados pelo Pelican.

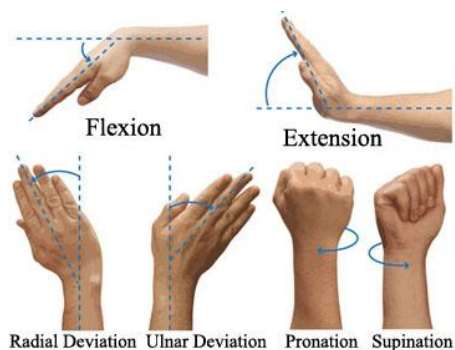


Figura 4 – Tipos de rotação executadas pelo pulso humano. Disponível em: <http://www.revolutionarytennis.com/wristuse.html>. Acesso em: mar.2016.

Tabela 2. Relação entre movimento do pulso e movimento do Pelican

| Tipo de movimento | Atitude do Pelican |
|--------------------------|---|
| Flexão | Inclina-se para frente (Pitch) |
| Extensão | Inclina-se para trás (Pitch) |
| Desvio Radial | Visto de cima, gira em sentido anti-horário (Yaw) |
| Desvio Ulnar | Visto de cima, gira em sentido horário (Yaw) |
| Supinação | Inclina-se para a direita (Roll) |
| Pronação | Inclina-se para a esquerda (Roll) |

Nota-se que, na tabela, os sentidos “frente”, “trás”, “direita” e “esquerda” não se encontram referenciados. Isso ocorre porque, cada um dos métodos a seguir, toma um referencial diferente para adotar esses sentidos.

Os métodos a serem aplicados à cinemática de vôo do Pelican neste projeto de Iniciação Científica serão aplicados com a implementação de algoritmos em C/C++ capazes de tomar as decisões e fazer o controle de vôo do drone, e são os três descritos a seguir:

Método 1- Controle de Yaw e translação vertical.

Esse método consiste em garantir apenas o controle de Yaw e de translação vertical do Pelican, ou seja, os movimentos de flexão, extensão, supinação e pronação do pulso serão desprezados.

Yaw – O controle de Yaw, como citado na descrição da cinemática de vôo do quadrotor, será feito pelos movimentos de Desvio Ulnar e Desvio Radial do pulso do usuário. Como a movimentação do pulso é limitada e espera-se que o drone possa rotacionar mais de 360° em torno de seu eixo vertical, o controle de Yaw administrará a velocidade angular do Pelican, e não sua posição ou orientação.

Serão estabelecidos dois limites angulares para os desvios do pulso, pois, geralmente, o pulso humano pode sofrer maior desvio ulnar do que radial. Assim que um desses limites for

atingido, o computador de bordo do Pelican manterá uma taxa de rotação máxima do drone constante, mesmo que o pulso do usuário possa rotacionar além do limite admitido. A criação desses limites de rotação possibilitará que o sistema seja mais versátil, sendo útil a usuários com menos ou mais mobilidade do pulso, sem prejuízos ao controle do quadrotor.

A Tabela 3 representa as velocidades angulares do Pelican de acordo com o desvio ulnar ou radial aplicado ao pulso do usuário, em que ω_1 e ω_2 são constantes.

Translação vertical – Os movimentos de translação vertical do Pelican (na direção do Eixo Z apresentado na Figura 3) serão controlados pelo movimento do polegar do usuário, por meio de um joystick preso à luva. A extremidade do joystick ficará presa ao polegar da luva e sua base conectada ao Arduino Nano, assim, o movimento do polegar do usuário em relação à sua mão será captado.

Análogo ao controle de Yaw, o controle de translação vertical será executado a partir da administração da velocidade vertical do Pelican, e não de sua posição. Serão definidas uma velocidade constante de subida outra de descida. A posição do polegar em relação a mão do usuário está relacionada com a atitude do quadrotor pela Figura 5.

Tabela 3. Velocidade angular de acordo com os limites de desvio do pulso

| Movimentação do pulso | Velocidade angular do Pelican (módulo) |
|------------------------------|---|
| < limite desvio ulnar/radial | $\omega_1 = 0$ |
| = limite desvio ulnar/radial | $\omega_2 \neq 0$ |
| > limite desvio ulnar/radial | $\omega_2 \neq 0$ |

O Método 1 tem, por finalidade, testar a estabilidade da comunicação entre os elementos do sistema, avaliar seu tempo de resposta, e qualificar a fidelidade dos movimentos do quadrotor em relação ao piloto.

Método 2- Movimentação completa no referencial da aeronave.

No segundo método, serão considerados todos os tipos de movimentos aplicados à IMU: ângulos de yaw, pitch e roll criados pela rotação do pulso do usuário vestido da luva.

Esses movimentos serão interpretados por um algoritmo implementado em C/C++ no microcontrolador e enviados ao laptop via Bluetooth, onde serão transformados em comandos de deslocamento a serem enviados ao Pelican.

A tradução dos movimentos realizados pelo pulso do usuário em movimentos a serem realizados pelo quadrotor se dará diretamente em relação ao referencial do Pelican, ou seja, um ângulo de Pitch captado pelo Arduino Nano será traduzido em um ângulo de Pitch criado pelo drone, em seu referencial. O movimento de Roll é análogo e os controles de Yaw e de translação vertical serão os mesmos descritos no Método 1.

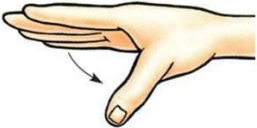
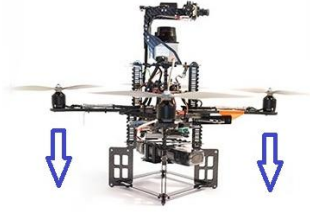


| Movimento do polegar | Atitude do Quadrirrotor |
|---|--|
|  |  |
|  |  |

Figura 5 – Atitude do Pelican de acordo com o movimento do polegar. Fonte: Elaborado pelo autor.

Exemplo de movimento de Pitch:

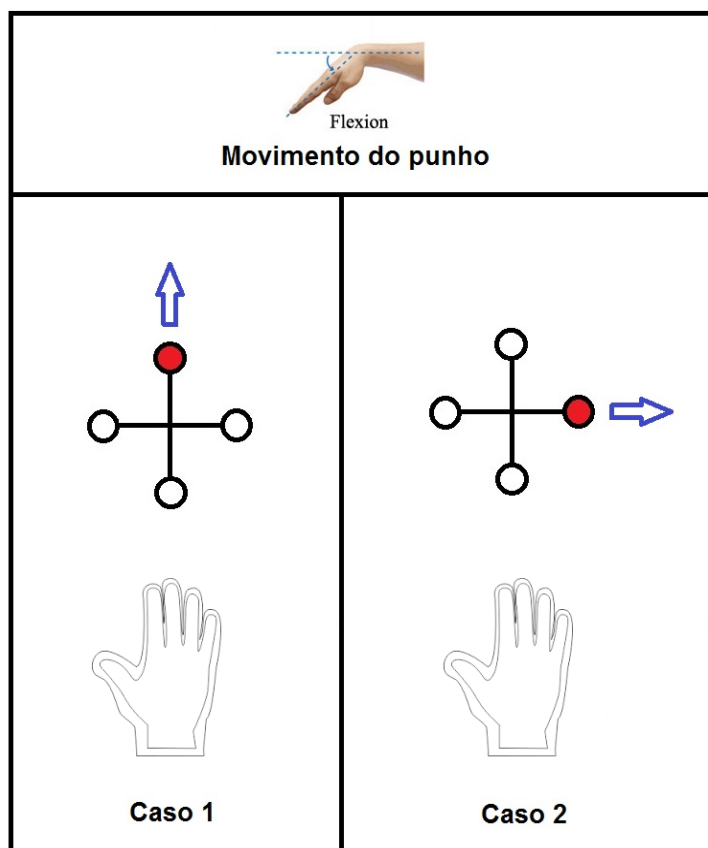


Figura 6 – Exemplo de aplicação do Método 2. Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 6, são mostradas a flexão do pulso, a orientação e a direção e sentido de deslocamento do Pelican, e a orientação da mão vestindo a luva com a IMU. A frente do drone está destacada em vermelho. Pode-se ver que, independentemente da orientação em que o drone se encontra em relação ao referencial da luva, o movimento de flexão do pulso ocasionará numa inclinação do Pelican para frente, no seu referencial. Esse método tem por objetivo obter total controle sobre todos os movimentos a serem realizados pelo drone.

Método 3 - Movimentação completa no referencial do piloto.

O Método 2, como descrito, tem por objetivo dar total controle do veículo aéreo quadrotor ao usuário do sistema em questão, porém, o modo de voo imposto por ele é baseado no referencial do drone, e não do piloto. Isso impõe grande dificuldade no uso desse modo de voo, visto que o cérebro humano não é capaz de mapear os comandos por feedback visual com a eficiência e velocidade requeridas para a pilotagem de qualquer veículo aéreo.

Essa dificuldade faz com que seja quase necessária a manutenção da orientação do drone coincidindo com a do piloto.

Tendo isso em vista, o objetivo do Método 3 é o de dar o total controle da aeronave ao piloto como no Método 2, mas, dessa vez, em relação ao referencial do próprio piloto, independente da orientação do Pelican. O funcionamento do modo de voo imposto por esse método é ilustrado na Figura 7, de forma análoga ao esquema da Figura 6. Nota-se que a diferença entre ele e o imposto pelo método anterior está na independência da orientação do drone em relação ao piloto.

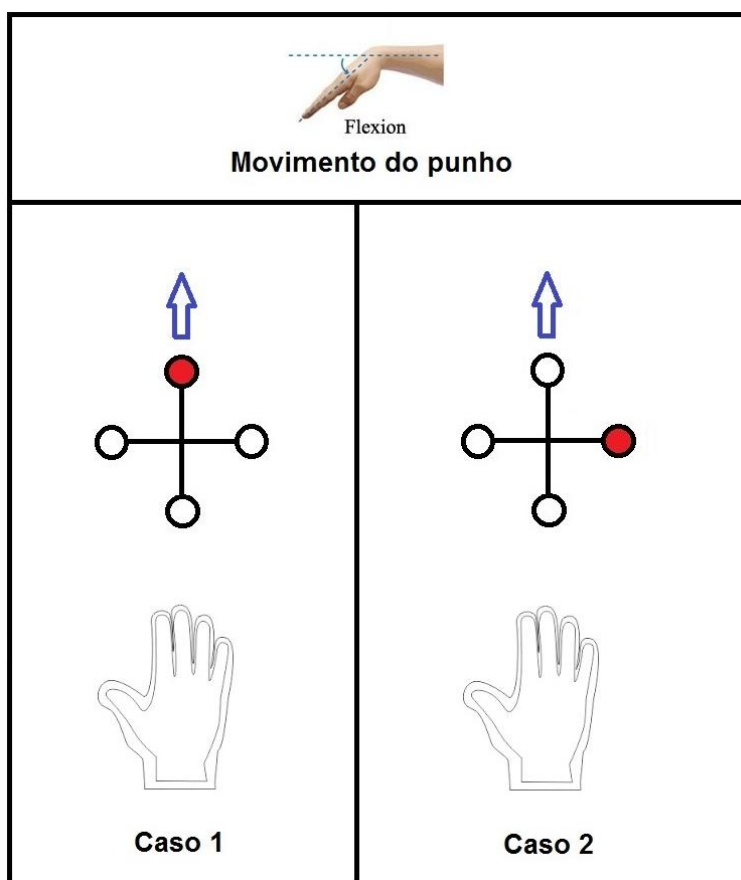


Figura 7 – Exemplo de aplicação do Método 3. Fonte: Elaborado pelo autor.

O Método 3 traz consigo grande complexidade de desenvolvimento por fazer necessária a manipulação e transformação de referenciais, envolvendo operações com matrizes de rotação.

Para realizar as operações necessárias na conversão do referencial do Pelican para o referencial do piloto, será utilizado, a princípio, o software MATLAB[®], e posteriormente, o algoritmo será adaptado para o ROS (*Robot Operating System*).

A seguir será apresentado o método de manipulação e transformação dos referenciais que constituem o Método 3.

Considerando um referencial inercial $\{F\}$, um referencial $\{D\}$, fixo ao drone, e um referencial $\{P\}$, cuja origem coincide com a de $\{D\}$, mas seus eixos x e y são paralelos ao chão, analisar-se-á o movimento plano do Pelican paralelo ao chão. A Figura 8 ilustra os 3 referenciais citados em relação ao quadrotor e ao piloto.

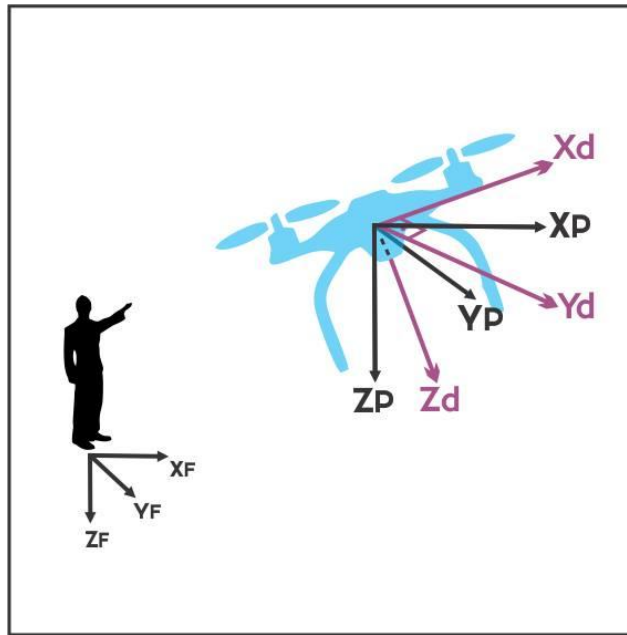


Figura 8 – Ilustração dos referenciais. Fonte: Elaborado pelo autor.

Para movimentar o veículo na direção x_p (ângulo de roll aproximadamente igual a zero), tem-se a seguinte matriz dinâmica de voo em relação ao piloto:

$$F = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T \end{bmatrix}, \quad (1)$$

na qual o primeiro termo da direita é a matriz de rotação do referencial do drone rotacionado em pitch em relação ao referencial inercial do piloto, θ é o ângulo de pitch entre os referenciais $\{D\}$ e $\{P\}$, T é o somatório das forças perpendiculares ao drone exercidas pelos motores.

Resolvendo a equação acima, obtém-se:

$$F = \begin{bmatrix} T \sin \theta \\ 0 \\ T \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Ou seja, devemos dar um ângulo de pitch para gerar uma força cuja componente tem direção x_p . Essa força, através da 2ª Lei de Newton, traduz-se numa aceleração em x_p .

Aplicando o mesmo princípio para o deslocamento em y_p (ângulo de pitch aproximadamente igual a zero), chegamos a

$$F = \begin{bmatrix} 0 \\ -T \sin \alpha \\ T \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde α é o ângulo de roll entre os referenciais $\{D\}$ e $\{P\}$.

Para um piloto fixo em $\{F\}$ com o braço a apontar para x_F , tem-se:

$${}^F a = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ax \\ ay \\ az \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde “ ${}^F a$ ” é a aceleração no referencial do piloto, β é o ângulo de yaw entre os referenciais $\{P\}$ e $\{F\}$, o primeiro termo do lado direito é a matriz de rotação em z_F (yaw) do referencial $\{P\}$ em relação ao referencial fixo $\{F\}$, e o segundo termo são as componentes da aceleração do drone no referencial $\{P\}$.

Resolvendo a equação (4) e nela substituindo as equações (1) e (2) obtém-se

$${}^F a = \begin{bmatrix} (T \cdot \sin \theta \cdot \cos \beta + T \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta) / m \\ (T \cdot \sin \theta \cdot \sin \beta - T \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta) / m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Ou seja, através de (6), percebe-se que se , então para o piloto fixo em $\{F\}$, uma atuação no ângulo de pitch gera componentes de aceleração tanto em x_F , quanto em y_F . O mesmo vale para o roll.

Tendo em vista a dinâmica de vôo do drone, será feito um mapeamento dos comandos do referencial $\{F\}$ para o referencial $\{P\}$. A matriz de rotação poderá ser obtida através da IMU a bordo do veículo. Dessa forma, será desenvolvido um controlador PID a ser embarcado na Atomboard, o computador embarcado que acompanha o Pelican.

5 - Formas de Análise e Disseminação dos Resultados

O desempenho e a eficiência do projeto serão avaliados considerando-se o tempo de resposta e a fidelidade dos movimentos, considerando uma tolerância para erros de direção e tempo de resposta após o movimento ser feito pelo braço do usuário.

A disseminação dos resultados será feita através de envio de trabalhos para conferências nacionais e revistas da área de robótica. Como exemplo de conferências nacionais e internacionais, pode-se citar o SBAI – Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente.

6 – Bibliografia

[1] JORNAL O GLOBO (Brasil). 17/08/2014. **Originalmente bélico, drone ganhaimportância como instrumento para foto, vídeo e instalações.** Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/cultura/originalmente-belico-drone-ganha-importancia-como-instrumento-para-foto-video-instalacoes-13630406>>. Acesso em: 17 nov. 2015.

[2] FOLHA (Brasil). 22/06/2014. **Empresas de drones proliferam em SP:** <<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2014/06/1474144-empresas-de-drones-se-proliferam-em-sp.shtml>>. Acesso em: 17 nov. 2015.

[3] CORKE, Peter. **Robotics, Vision and Control – Fundamental Algorithms inMATLAB.** 1. ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg , 2011. 570 p.

[4] BANZI, Massimo – **Getting Started with Arduino.** 2. ed. Maker Media, Inc., 2011. 128 p. Acesso em: 17 nov. 2015.

[5] SIEGWART, Roland; NOURBAKHSH, Illah R.; SCARAMUZZA, Davide. **Introduction toAutonomous Mobile Robots.** 2. ed. The MIT Press, 2011. 472 p. Acesso em: 17 nov 2015.

[6] FERNANDEZ, E.; CRESPO, L.S.; MAHTANI A.; MARTINEZ, A.. **Learning ROS forRobotics Programming.** 2 ed. Packt Publishing, 2015. 458 p. Acesso em 19 nov. 2015.

[7] SAMPAIO, Rafael Coronel B. ; HERNANDES, Andre C. ; BECKER, Marcelo ; CATALANO, Fernando M. ; ZANINI, Fabio ; NOBREGA, Joao L. E. M. ; MARTINS, Caio . **SquidCop: Design and evaluation of a novel quadroter MAV for in-flight launching air-to-ground missions.** In: 2014 IEEE Aerospace Conference, 2014, Big Sky. 2014 IEEE Aerospace Conference. v. 1. p. 1-10. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6836413>. Acesso em: 29 fev. 2016.

[8] SAMPAIO, Rafael Coronel B. ; HERNANDES, Andre C. ; BECKER, Marcelo ; CATALANO, Fernando M. ; ZANINI, Fabio ; NOBREGA, Joao L. E. M. ; MARTINS, Caio . **Novel hybrid electric motor glider-quadroter MAV for in-flight/V-STOL launching.** In: 2014 IEEE Aerospace Conference, 2014, Big Sky. 2014 IEEE Aerospace Conference. v. 1. p. 1-10. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6836414>. Acesso em: 29 fev. 2016.

[9] SAMPAIO, Rafael Coronel B. **Novas Morfologias para Robôs Aéreos: Projeto para Aplicações de Campo.** Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015.