

QUADRICÓPTERO COM AUTO ESTABILIZAÇÃO

Cyro José Soares; Israel Cortez.

Orientador: Prof. Renato Camargo Giacomini.

Co-orientador: Prof. Alexandre Brincalepe Campo.

TG-01-2011-EP

Graduando do Curso de Engenharia da Computação da USJT, turma de 2011

e-mail: cyro.soares@controlchip.com.br; israel.cortez@controlchip.com.br

Resumo – O quadricóptero consiste em robô móvel, capaz de se deslocar por meio aéreo. Os atuadores que possibilitam levantar vôo são quatro hélices dedicadas para aeromodelismo.

Um vôo estável torna-se possível sem necessidade de habilidade por parte do usuário (*via RF*), pois o quadricóptero possui controle em malha fechada no mínimo em dois eixos (*X e Y*) e, em alguns casos mais sofisticados, também no eixo *Z*, controlando inclusive a altura.

A proposta deste trabalho de graduação prevê uma implementação parcial de um quadricóptero. Ele objetiva o controle em malha fechada apenas no eixo *X*, de modo que o usuário informará ao quadricóptero, via rádio controle, a angulação desejada e o quadricóptero automaticamente se ajustará ao ângulo informado.

A malha de controle é feita por um controlador Proporcional Derivativo (*PD*). Esse controlador tem atuação sobre dois motores de forma diferencial.

Abstract – The QUADRICOPTER consists of mobile robot capable to move through air. Four propellers, devoted to model airplanes, works as actuators to allow the system to fly.

It provides a stable flight without the need of skill by the user because it has closed loop control in at least two axes (*X and Y*) and in some cases also in the *Z* axis, so even controlling the height.

The quadricopter provides a partial implementation of a quadricopter. It's aimed at the control system only in the *X* axis, so that the user inform the quadricopter (by *RF* control), the desired angle on the *X* axis, and the quadricopter will close the loop control to keep informed angle.

The control loop is made by a *PD* controller (Proportional, Derivative), this controller acts on two engines DIFFERENTIALLY between them.

Palavras Chave: Quadricóptero, controlador *PD*, acelerômetro, giroscópio, filtro de Kalman, fusão sensores, comunicação *RF*, motores Brushless, *ESC*.

Introdução

Este projeto tem como finalidade aplicar os conhecimentos adquiridos em automação e controle, eletrônica analógica e digital, circuitos digitais e programação em linguagens Assembly e C.

Por apresentar um baixo nível de ruído sonoro, pode deslocar-se sem que seja percebido, podendo ser utilizado também para espionagem. Com essas aplicações, um dos maiores benefícios à sociedade seria o monitoramento de uma determinada área, crítica em assaltos ou tráfico, garantindo a segurança desejada.

Responsabilidade Social

O desenvolvimento de um sistema de transmissão de imagem neste projeto possibilitaria a realização do monitoramento aéreo de uma determinada área, através de imagens capturadas em tempo real. Além do quadricóptero ser capaz de deslocar-se pelo ar para acompanhar alguma movimentação suspeita.

Sustentabilidade

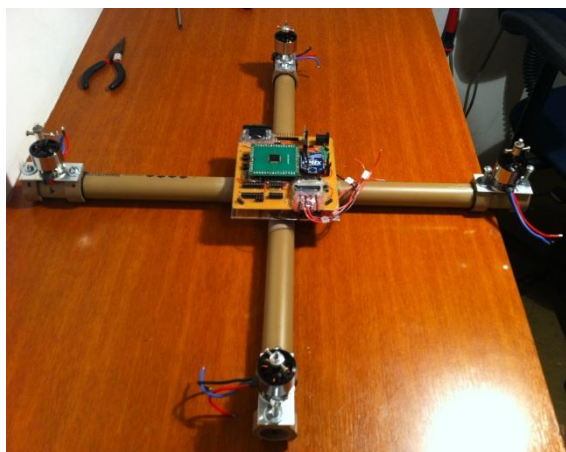
A madeira utilizada na estrutura para ensaios com o projeto, é do tipo *MDF* (*Medium Density Fiberboard – Chapa de Fibra de Média Densidade*), conhecida mundialmente por ser ecologicamente correta.

Metodologia

Estrutura do quadricóptero

A estrutura base do quadricóptero é composta por quatro hastes de PVC de forma que a distância ideal entre elas seja sempre um múltiplo inteiro do ângulo de 90 graus.

Figura 1: Estrutura do quadricóptero.



No centro da estrutura de PVC está a placa-mãe que aloja o microcontrolador ARM LPC-2138, um módulo de comunicação RF denominado Xbee e os sensores de posicionamento (*acelerômetro e giroscópio*).

Na extremidade superior de cada haste encontra-se um motor com hélices balanceadas e específicas para aeromodelismo.

Os Motores Brushless são motores trifásicos, portanto surge a necessidade de um controlador eletrônico de velocidade (*ESC - Electronic Speed Control*) responsável pela conversão.

Quase invariavelmente o sinal de entrada do ESC para controle de velocidade é um sinal PWM, trabalhando de 50 a 400Hz.

Ao contrário dos motores brushed, os brushless não utilizam escovas, o Estator é constituído por bobinas e o rotor por um ímã indutor. São motores onde o consumo de corrente é menor por rendimento/força motriz disponível comparativamente aos motores brushed e por esse motivo dão-se ao luxo de usarem Hélices de maiores dimensões sem perderem a sua eficácia permitindo-se a serem usados em aeromodelos onde o peso ou carga alar é maior.



Figura 2 : Motor Brushless.

Os módulos ESC são microcontrolados e podem ser programados por sinais PWM, onde, através de sons, é possível saber em qual parâmetro será feita a configuração desejada. Alguns parâmetros configuráveis são: tipo de freio, nível de corte para proteção de carga da bateria, modo de partida, número de células da bateria e etc.

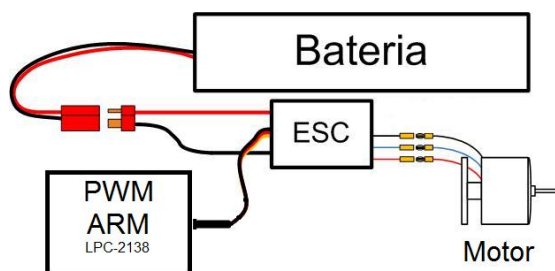


Figura 3: Esquema de ligação do ESC.

Para prover energia a todo o sistema (*motores, microcontrolador, ESCs, acelerômetros e giroscópios*) utilizamos uma bateria de LiPo de 4000mAh com três células, portanto 11.1 V e capacidade de descarga de 40C.

A capacidade da bateria é a medida de quanta energia pode ser retirada antes dela estar completamente descarregada. Uma célula de 1200mAh (1.2Ah) pode dar 1.2 ampéres durante 1 hora. A medida “C” é utilizada para definir quanta energia esta sendo consumida em relação a capacidade da bateria. Por exemplo: uma célula de 700mAh que esteja fornecendo 700mAh, é descarregada a 1C. Uma célula de 1200mAh que descarregue a 2400mAh, dizemos que ela fornece 2C.

Baterias de Lithium Polímero só devem ser carregadas em carregadores específicos para Lithium Polímero, por causa de suas características especiais que diferem completamente das demais baterias.

Esses carregadores inicialmente carregam a 4.2V/cel e a medida que a bateria vai carregando, a amperagem de carga é diminuída.



Figura 4: Bateria Lipo 4000maH.

Com o intuito de testar o controle de estabilidade, foi construída uma estrutura de madeira em forma de “U”, dotada de rolamentos nos pontos de apoio para a fixação do quadricóptero. Estes rolamentos foram colocados para minimizar o atrito físico na rotação do eixo, e esta melhoria foi fundamental para a fluidez no desenvolvimento do controle de estabilidade.

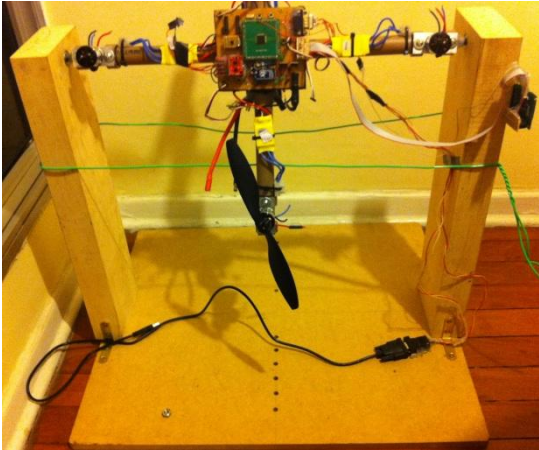


Figura 5: Suporte para o Quadricóptero.

Hardware

Visando explorar ao máximo os conhecimentos adquiridos ao longo do curso foi decidido desenvolver absolutamente todo o hardware necessário para o projeto, sem o uso de soluções prontas, como Arduino entre outros.

Placa Controladora do Quadricóptero

Trata-se da placa que contém todos os elementos que deverão ser embarcados no quadricóptero, Xbee, giroscópio, acelerômetro e o microcontrolador em si.

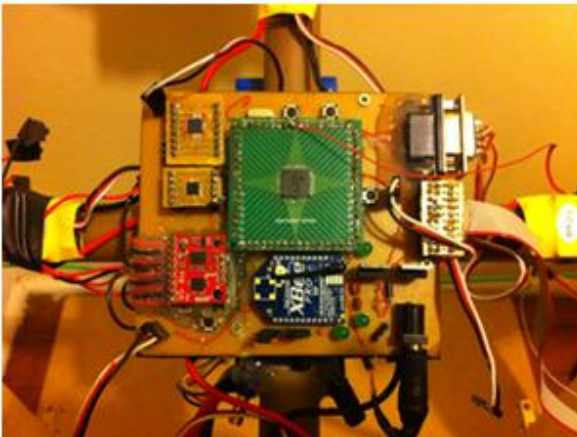


Figura 6: Placa controladora do quadricóptero.

O microcontrolador utilizado é um ARM7 (32 Bits), trabalhando a 60MIPS e com inúmeros periféricos internos ao Chip.

O LPC2138 possui 16 ADs de 10 Bits, 6 módulos de PWM (*Hardware*), 512Kb de memória Flash, e 32Kb de memória RAM além de diversos outros recursos e periféricos.

É nesse chip que esta embutido todo o intelecto de controle (*em forma de software*), dando assim as condições necessárias para que o quadricóptero consiga corrigir perturbações externas, mantendo-se assim, estável.

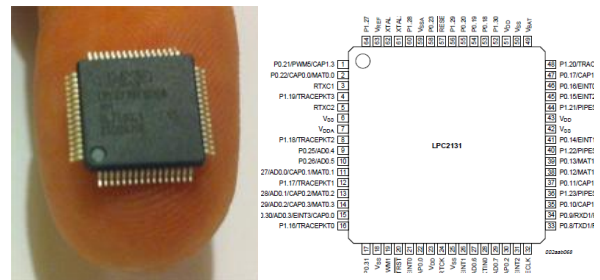


Figura 7: ARM7.

Na placa estão embutidos também os acelerômetros e giroscópios, são necessários para que o quadricóptero possa calcular seu ângulo atual.



Figura 8: Acelerômetros e giroscópios.

As placas adaptadoras assim como as soldagens foram feitas manualmente com os recursos do próprio grupo.

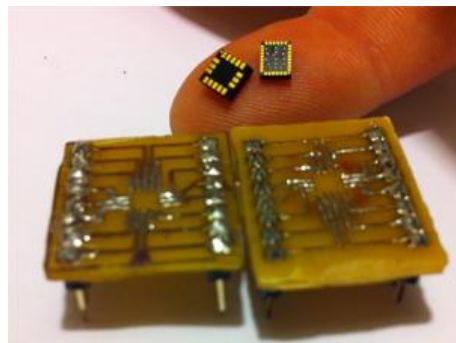


Figura 9: Adaptadores produzidos e chips soltos.

O rádio controle

O rádio controle foi desenvolvido com base em um microcontrolador básico (8 Bits), porém capaz de atender as necessidades de processamento destinadas a ele.

O controlador em questão é da família 8051 (At89S52/Atmel) a função deste controlador é basicamente interpretar os acionamentos dos botões do rádio controle (feitos pelo usuário) e enviar informações coerentes para o quadricóptero (Via RF) para que o mesmo possa atender aos comandos do usuário.

Foi necessário desenvolver um protocolo básico para troca de mensagens entre o 8051 e o ARM7.



Figura 10: Rádio controle.

Controle em malha fechada

Existem diversas técnicas destinadas para controle em malha fechada como PD, PID, FUZZY, LQR, entre outros. Foi necessário pesquisar e buscar conhecimento com pessoas que já tinham algum tipo de experiência em quadricópteros visando descobrir qual técnica se obtém melhores resultados.

Inúmeros projetos foram encontrados na internet e na maioria dos casos, os bons resultados fechavam malha utilizando o controlador PD, por isso decidiu-se pela implementação desse controlador.

O controle Proporcional é um controlador que aplica na saída um valor proporcional ao erro encontrado no sistema para corrigi-lo.

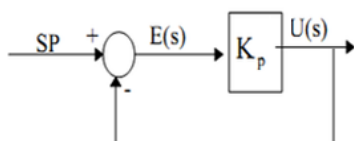


Figura 11: Diagrama do controlador proporcional

Quando utilizado individualmente em um sistema qualquer, não se consegue bons resultados, não havendo estabilização no Set Point desejado por existir erro estacionário ou entrando em oscilação, dependendo da constante K_p .

O controle derivativo não é, isoladamente, uma técnica de controle, pois, não pode ser empregado separado de uma ação proporcional. A ação derivativa consiste em uma resposta na saída do controlador que é proporcional a velocidade de variação do desvio. A ação derivativa tem o efeito de reduzir a velocidade das variações do sistema, evitando que eleve ou reduza muito rapidamente.

Pode-se dizer que é uma predição, possibilitando que o controlador aumente ou diminua sua saída em função do que irá acontecer.

O derivativo atua quando há variação no erro. Se o processo está estável seu efeito é nulo. Durante perturbações ou na partida do processo, quando o erro está variando, o derivativo sempre atua no sentido de atenuar as variações, sendo sua principal função, melhorar o desempenho do processo durante os transitórios.

De maneira bem simples, podemos dizer que se o derivativo fosse aplicado individualmente ele nada faria para corrigir um determinado erro, caso não sofresse variação.

Portanto a ação derivativa quando combinada com a ação proporcional tem a função de "antecipar" a ação de controle a fim de que o processo reaja mais rapidamente. Neste caso, o sinal de controle a ser aplicado é proporcional a uma predição da saída do processo.

A estrutura básica do controlador PD é dada por:

$$u(t) = K(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (1)$$

Considerando que $e(t + T_d)$ pode ser aproximado por:

$$e(t + T_d) \approx e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

Tem-se que $u(t) \approx K e(t + T_d)$ ou seja, o sinal de controle é proporcional a estimativa do erro de controle unidades de tempo a frente. Em outras palavras, a predição é feita extrapolando o valor do erro pela reta tangente a curva do erro no instante t :

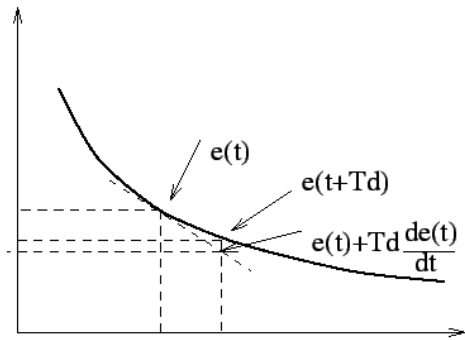


Figura 12: Características da interpretação do controlador proporcional-derivativo (PD).

Esta ação preditiva tende a aumentar a estabilidade relativa do sistema e a tornar a resposta transitória, mais rápida.

Variável de entrada para o Controlador PD

Apesar do projeto possuir diversos aspectos complexos, esse item é considerado o de maior complexidade. A variável de entrada para o controlador PD é o ângulo no eixo X, para que o PD atue de modo a efetuar as correções, em busca do Set Point, obtendo assim, a angulação desejada para o sistema.

O principal problema, é que não existem sensores sem vínculo físico com o plano terrestre que sejam capazes de informar a angulação de um determinado corpo.

Nesses casos, faz-se uso de sensores que medem outras grandezas para obter-se uma boa estimativa de ângulo.

O principal problema é que os sensores utilizados são sensíveis a grandezas físicas presentes no sistema, o que fornece medições incorretas.

Os sensores são os acelerômetros (X,Y,Z) e giroscópios (X,Y).

Independente das dificuldades dessa abordagem foi necessário seguir em frente por ser a única opção viável.

Foi pesquisado muito sobre o assunto e, quase invariavelmente, sempre que encontrado um projeto que efetuava leitura de ângulo de forma eficiente, a solução empregada, era o mesmo, **filtro de Kalman**, e a solução adotada foi uma simplificação do filtro de Kalman, dado o alto grau de complexidade matemático do filtro original. Essa simplificação será detalhada mais a frente.

Acelerômetro

Os acelerômetros são sensores que medem aceleração, e existem diversos tipos fabricantes e características relacionadas aos acelerômetros.

O acelerômetro utilizado no projeto foi de 3 Eixos (XYZ) com range de 2G (-G a +G) e saída analógica (0,99 a 2,31V)

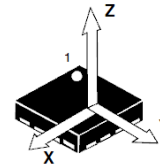


Figura 13: Eixos do acelerômetro.

Como mencionado, o acelerômetro mede aceleração, porém é possível obter informação de ângulo, **no caso particular**, em que o dispositivo está apenas sob a aceleração da gravidade, pois essa aceleração é conhecida ($\approx 9,8m/s^2$) e, nesse caso, pode-se calcular o ângulo com uma relação trigonométrica simples.

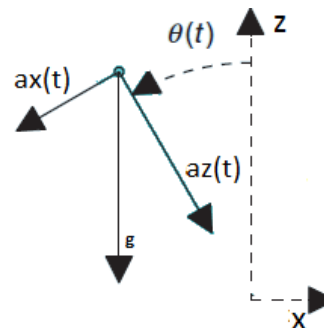


Figura 14: soma vetorial.

Onde:

$ax(t)$ = Acelerações sofridas no eixo X do acelerômetro ao longo do tempo.

$az(t)$ = Acelerações sofridas no eixo Z do acelerômetro ao longo do tempo.

Logo:

$$ax(t) = g \sin \theta \quad (3)$$

$$az(t) = g \cos \theta \quad (4)$$

Como:

$$\tan \theta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \quad (5)$$

Então:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{ax(t)}{az(t)} \quad (6)$$

Em que $ax(t)$ e $az(t)$ são as medidas obtidas do acelerômetro após os cálculos para conversões dos ADs para as medidas de aceleração.

Nesse **caso particular** necessariamente temos que:

$$\sqrt{(ax(t))^2 + (az(t))^2} = g \quad (7)$$

Lembrando que nesse contexto o dispositivo sofre aceleração apenas da gravidade.

Claro que essa situação particular não se enquadra nesse projeto, pois, o quadricóptero sofrerá outras acelerações continuamente além da gravidade.

Idealmente o acelerômetro, deve ser posicionado no centro do quadricóptero de modo que suas mudanças de ângulos não gerem acelerações no acelerômetro.

Outro ponto extremamente crítico são as vibrações, pois vibrações nada mais são do que grandes acelerações sofridas em diversas direções, e em diversas frequências distintas.

Essas acelerações são capturadas pelo acelerômetro, afinal, essa é a grandeza que ele mede.

Visando minimizar os erros vindo de vibrações, um filtro passa baixa (*FPB*) é fundamental para atenuar as altas frequências que nada dizem sobre as reais oscilações do sistema.

Percebe-se então que medir ângulo diretamente pelo acelerômetro certamente não trará bons resultados, no entanto, é uma estimativa inicial válida, desde que seja agregada a outras medições, que também ajudem a trazer uma melhor estimativa.

Giroscópio

O giroscópio utilizado é o IDG500, possui dois eixos (x e y). O giroscópio mede a velocidade angular e nesse caso retorna um sinal analógico proporcional a velocidade de rotação. O IDG500 tem uma sensibilidade de 2.0mV/°/s, significa que a saída muda 2.0mV para cada °/s de rotação.

Pode-se integrar o giroscópio lendo graus-
por-segundo para graus:

$$\theta_{n+1} = \theta_n + (\dot{\theta}_{gyro} \times dt) \quad (8)$$

Para cada iteração, a velocidade angular multiplicada pela duração de tempo resulta na

mudança incremental do ângulo. O ângulo total consiste na soma desses incrementos.

Há um problema entretanto. Se o sinal do giroscópio não for exatamente zero quando a plataforma não estiver em rotação (*e nunca será*) a integração irá acumular erro e sem referência, não há forma de corrigir o erro do giroscópio. Para períodos muito pequenos, o giroscópio provê um ângulo estimado bastante coerente e imune aceleração da planta.

Ou seja, o giroscópio provê uma excelente medida no curto prazo, enquanto o acelerômetro dá uma medida média confiável no longo prazo.

Filtro de Kalman

O filtro de Kalman, criado por Rudolf Kalman, é usado principalmente em aplicações onde os sinais provenientes dos sensores não são 100% confiáveis, o que engloba as situações onde as grandezas desejadas deverão ser adquiridas de forma indireta, que é o caso desse projeto.

De maneira muito simplificada, pode-se dizer que o filtro de Kalman baseia-se em 3 passos fundamentais.

- Leitura do ponto atual através de sensores;
- Estimativa do ponto atual;
- Execução de uma média ponderada das duas medidas.

Os pesos dado a cada uma das medidas são alteradas continuamente, com base nas análises de ruídos vindos do sensor.

Essa determinação de ruído dos sensores possibilita que o algoritmo dê mais peso ao valor estimado quando sabe-se que a leitura atual tem muito ruído, ou mais peso ao valor lido, quando sabe-se que a leitura atual tem pouco ruído.

Existem equações do filtro de Kalman que possibilitam essa análise de ruído por meio de um coeficiente, chamado de *coeficiente de ruído branco*, que pode ser determinado através de aquisição de dados do sistema.

A abordagem utilizada é uma simplificação do filtro de Kalman, que em muitas pesquisas, observou-se ser de fato eficiente e posteriormente constatado que se consegue uma boa estimativa de ângulo.

A diferença entre o Kalman original e a simplificação implementada é que o peso dado a cada uma das medidas (*lida e estimada*), não são atualizadas continuamente e sim valores fixos, encontrados experimentalmente.

De modo que o algoritmo não prevê análise contínua para determinação de níveis de ruídos no valor lido.

Como visto anteriormente, existem sérios problemas em ler ângulo diretamente do

acelerômetro, pelo fato desse sensor ser muito sensível a trepidações, além de medidas incorretas provenientes de acelerações externas.

Já o giroscópio não apresenta o problema de ser sensível a trepidação, porém possui um problema diferente, ele acumula erro, quando mede-se ângulos calculados através da velocidade angular.

Percebe-se que um complementa o outro, e uma boa solução é mesclá-los.

Nessa implementação, o giroscópio é o estimador e pode-se determinar qual a angulação atual do sistema com base no ângulo anterior.

$$\theta(t) = \theta(t - 1) + Rate_{Gyro} * T \quad (9)$$

Onde:

$Rate_{Gyro}$ = Velocidade angular lida.
 T = Tempo entre uma medição e outra.

A idéia é obter duas medidas de angulo, e executar uma média ponderada.

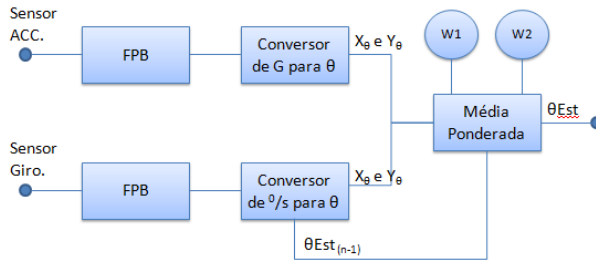


Figura 15: fusão dos sensores.

Alguns cálculos para interpretação dos sensores foram ocultados, visando o melhor entendimento da fusão dos sensores em si.

As principais equações dessa implementação são:

$$\theta_{AccYZ}(t) = \tan^{-1} \frac{ax(t)}{az(t)} \quad (10)$$

$$\theta_{GyroYZ}(t) = \theta_x(t - 1) + Rate_{GyroX} * T \quad (11)$$

$$\theta_{GyroXZ}(t) = \theta_y(t - 1) + Rate_{GyroY} * T \quad (12)$$

$$\theta_{GyroYZ}(t) = \theta_x(t - 1) + Rate_{GyroX} * T \quad (13)$$

Finalmente:

$$\theta_x(t) = [\theta_{AccYZ}(t) * w1] + [\theta_{GyroYZ} * w2] \quad (14)$$

$$\theta_y(t) = [\theta_{AccXZ}(t) * w1] + [\theta_{GyroXZ} * w2] \quad (15)$$

Onde:

$w1$ e $w2$ ditam o quanto acredita-se em cada uma das 2 medidas (*lida e estimada*). Na implementação original do filtro de Kalman, esses valores são atualizados continuamente, na abordagem simplificada esses valores são fixos, e foram encontrados experimentalmente.

$w1$ e $w2$ devem estar entre 0 e 1, de modo que a soma dos 2 seja 1. (*0 a 100%*)

Na equação abaixo:

$$\theta_{AccXZ}(t) = \tan^{-1} \frac{ay(t)}{az(t)} \quad (16)$$

Repare que a medida que θ se aproxima de 90° a medida $az(t)$ tende a zero e os valores extrapolam, tendendo ao infinito, de modo que o ARM não terá condições de calculá-los.

Existem algumas alternativas para essa situação, porém, não é o objetivo abordá-las aqui.

Comunicação

Para a comunicação entre o controle-remoto e o quadricóptero, foram pesquisadas inúmeras interfaces de comunicação via RF (*Radio Frequência*). Foi levada em consideração, o alcance das interfaces, a suscetibilidade a ruídos internos (*gerados pelo próprio circuito*) e externos (*fatores ambientais*), o custo de aquisição e a disponibilidade no mercado.

O XBee, fabricado pela Digi International, é a interface que melhor adequou-se a este projeto, por conta dos recursos fornecidos e pela facilidade em relação à busca de informações sobre configuração e operabilidade. A escolha pelo modelo XBee-PRO, deve-se unicamente pelo seu maior alcance em relação ao XBee.

Specification	XBee	XBee-PRO (S2)
Performance		
Indoor/Urban Range	up to 133 ft. (40 m)	Up to 300 ft. (90 m), up to 200 ft (60 m) international variant
Outdoor RF line-of-sight Range	up to 400 ft. (120 m)	Up to 2 miles (3200 m), up to 5000 ft (1500 m) international variant

Figura 16: Ilustração das especificações técnicas de alcance dos modelos do XBee.

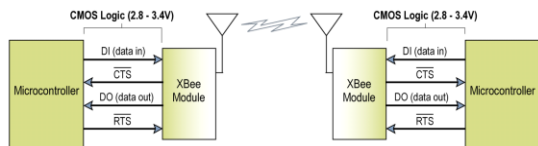


Figura 17: Representação visual da comunicação entre duas interfaces XBee.

Troca de mensagens radio controle x quadricóptero

Foi definido e implementado também um protocolo para troca de informação entre o rádio controle (8051) e a CPU do quadricóptero (ARM7). Consiste em mensagens de dois bytes, o primeiro indicando qual o tipo de informação ou solicitação, e o segundo indicando o valor da informação.

Resultados

Linearização dos motores

Um ponto essencial para que o controlador PD possa atuar de forma adequada é o motor ser linear, caso contrário, deveria ser linearizado via software.

Foram feitos ensaios com um sensor infravermelho apontado para a hélice e, com um programa implementado no ARM, fez-se a aquisição de dados a fim de se obter, para cada incremento de PWM, qual o RPM correspondente, visando o levantamento da curva do motor.

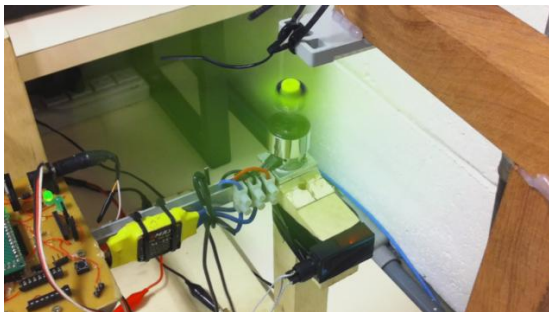


Figura 18: Aquisição de dados para a linearização do motor

O gráfico abaixo foi gerado com base nos dados capturados pelo ensaio com o sensor infravermelho:

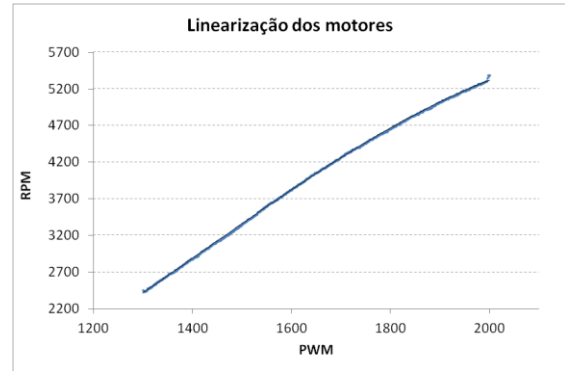


Figura 19: Gráfico com a curva do motor.

Conclui-se assim que a relação PWM versus RPM é praticamente linear e não há a necessidade de efetuar a linearização.

Filtro passa Baixa.

É de fundamental importância ter um FPB em todos os eixos dos sensores analógicos (Acelerômetro X,Y,Z, Giroscópio X,Y).

A frequência de amostragem do acelerômetro usado é de 1,8Khz, e do giroscópio é de 2Khz.

Uma vez que deseja-se medir ângulo do sistema, sabe-se que oscilações vindas acima de 20Hz (Ensaio demonstraram isso) nada dizem sobre oscilações reais do sistema.

Para minimizar os efeitos provenientes de ruídos, trepidações e etc., deve-se necessariamente implementar o FPB.

Foram feitos ensaios com o acelerômetro (que é muito sensível a trepidações) no sistema. O ensaio foi expor o acelerômetro a trepidações, sem alteração de ângulos, e medir-lo com um osciloscópio.

Percebeu-se nitidamente que, não apenas houve ruídos, como esses ruídos saturaram o acelerômetro, indo da menor medida $-G$ até sua maior medida $+G$.

Isso demonstra como é absolutamente impossível usar um acelerômetro visando medir ângulo sem, no mínimo, o uso de um FPB. Observou-se que esses ruídos “caminham” em frequência acima de 1Khz

Foi implementado um FPB ativo de 4º ordem com frequência de corte em 20hz.

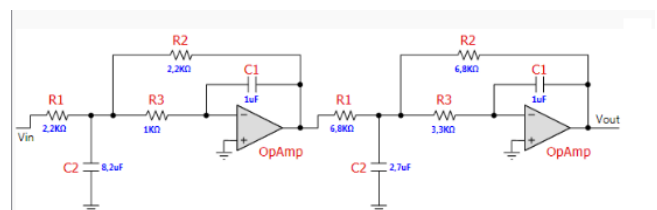


Figura 21: Circuito obtido pelo software Filter Pro

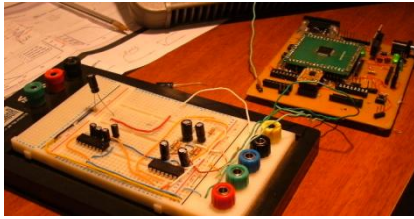


Figura 21: Filtro montado em protoboard para testes.

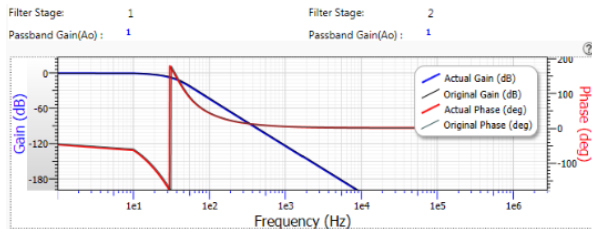


Figura 22: Curva do filtro passa baixa.

Os ensaios resultaram em resultados satisfatórios, como mostrado abaixo:

Na entrada do Filtro:

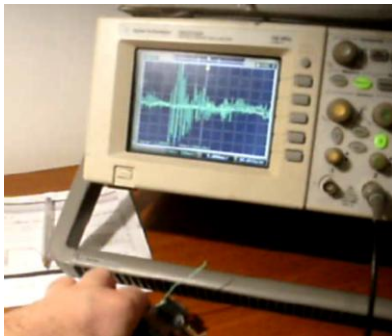


Figura 22: Medição na entrada do filtro.

Na Saída do Filtro:

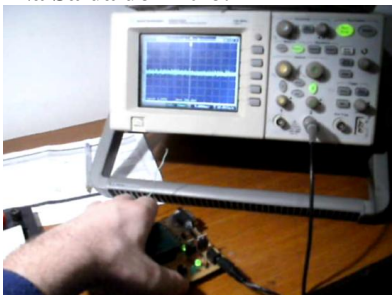


Figura 23: Medição na saída do filtro.

Como a essa altura a placa já havia sido montada, inserir o FPB de 4º ordem mudaria toda a nossa placa, e não havia tempo para isso, então, os mesmos testes foram efetuados, porem, com um FPB passivo de 1º ordem (Circuito RC) também com frequência de corte de 20Hz .

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (17)$$

Após testes, percebeu-se que ou haviam frequências altas provenientes de trepidações e ruídos, ou frequências baixas, de modo que, em um FPB com $f_c=20\text{Hz}$, as frequências vindas a 1 KHz, tinham amplitudes satisfatoriamente atenuadas, mesmo se tratando de um filtro de 1º ordem, pois estavam muito acima da frequência de corte.

Na entrada do Filtro de 1º ordem:



Figura 24: Medição na entrada do filtro de 1º ordem.

Na Saída do Filtro de 1º ordem:

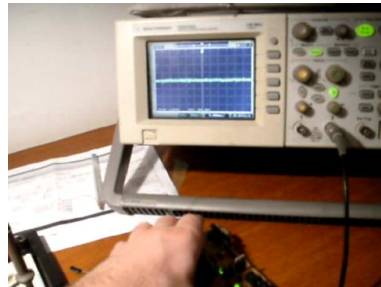


Figura 25: Medição na saída do filtro de 1º ordem.

Com isso, optou-se por usar filtro de 1º ordem em no projeto, dada a facilidade na adaptação.

Resposta do Controlador PD

Buscando visualizar o desempenho do controlador PD, foi feita uma aquisição de dados sobre a angulação, dado um determinado degrau.

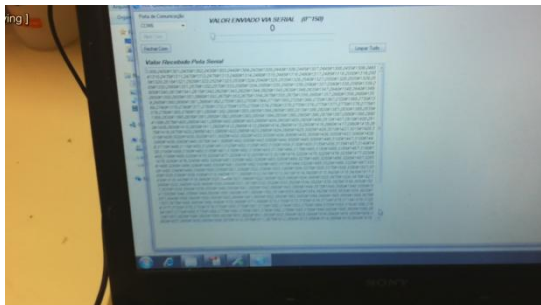
O sistema foi ligado, e manualmente o quadricoptero foi segurado em -60° , e depois de alguns segundo, o quadricoptero foi solto, e aguardando o quadricoptero estabilizar.

Vale resaltar que esse ensaio foi feito em um dado momento do projeto, porem muitas alterações desde então foram feitas (*Estrutura, Hardware e Software*), de modo que o gráfico não representa a resposta do sistema atual, depois de diversas alterações, ele esta mais eficiente.

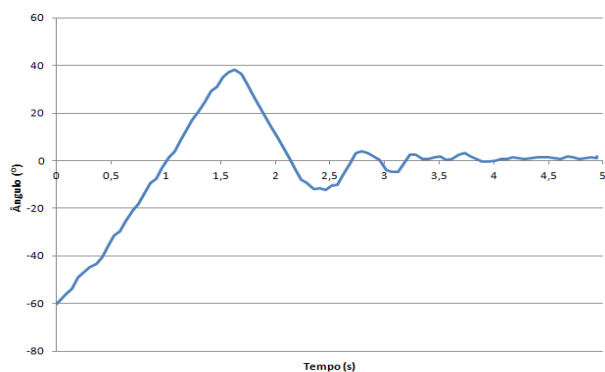
Figura 26: Aquisição de dados

Figura 27: Curva da resposta do sistema.

Discussão e Conclusões



Após alcançada uma boa estabilização no



eixo X, com o objetivo de viabilizar o controle de estabilização do quadricóptero, testes também no eixo Y foram efetuados, visando entender como seria a dinâmica do sistema, dado que haveria 2 controladores PDs trabalhando em paralelo.

Depois de inúmeros testes, foi observado que isso seria realmente possível, ou seja, haveria controle total sobre a estabilização do quadricóptero.

Indo além, seria ainda possível fechar malha de controle também no eixo Z (*Subir e Descer o quadricóptero*), de modo que a forma de atuação desse controlador seria no centro Z do controle dado pelos outros 2 controladores PDs encarregados da estabilização no eixo X e Y.

Toda essa implementação é possível sem alterações de hardware, pois já está previsto no projeto todos os itens necessários para o controle dos 4 motores, assim como a escolha de um processador que possui poder de processamento para tal.

Conclui-se então que uma vez que todos os itens necessários para que o quadricóptero possa de fato levantar voo, já estão previstos no projeto

como um todo, certamente uma evolução do projeto a ponto de colocá-lo no ar, é viável.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer a todos os professores que nos auxiliaram no decorrer do projeto, como o Renato Giacomini, Eduardo Pouzada, Júlio Lucchi, porém com um agradecimento especial ao professor **Alexandre Brincalpe Campo**, que foi quem mais de perto acompanhou nosso projeto.

Agradecemos também ao professor Vladimir Chvojka que foi quem possibilitou o início do TG em suas aulas de Sistemas Eletrônicos Digitais II, no segundo semestre do penúltimo ano.

Foi de fundamental importância o apoio, compreensão e incentivo de nossos pais, dados, não só ao longo do projeto, como ao longo de todo o curso.

Referências Bibliográficas

1. Daniel Rodrigues de Sousa (2007). “*Microcontroladores Arm 7 - O Poder Dos 32 Bits*”, Editora Érica.
2. Denys E.C Nicolosi (2008). “Laboratório de “Microcontroladores FAMILIA (8051)”, Editora Érica.
3. ARTIGO FILTRO DE KALMAN
Universidade Nova de Lisboa
Departamento de Engenharia Electrotécnica
4. Manual do Aeromodelista (Oficina Aerohobby),
<http://www.hobbys.com.br/manual.htm>.
5. XBee®/XBee-PRO® ZB RF Modules,
<http://www.digi.com>.
6. G. Graham, “*Practical design and stabilization control of a dynamic balancing and flipping robot*” Master’s thesis, Dept. Mechanical and Aerospace Engineering, Univ. California, San Diego, 2007.

Fusão de sensores Starlino
http://www.starlino.com/imu_guide.html

Forum E-Vôo
<http://www.e-voo.com/>

Dados Biográficos dos autores



Cyro Jose Soares

Nascimento:
22/09/1983
São Paulo – SP

Formação Técnica em
Eletrônica e Engenharia.

Área de Atuação Profissional:
CONTROL CHIP – Desenvolvimento de projetos
eletrônicos, Projetos microcontrolados em geral.



**Israel Cortez Franco
Pinto de Carvalho**

Nascimento:
05/10/1984
São Paulo – SP

Formação Técnica em
Eletrônica e Engenharia.

Área de Atuação Profissional:
CONTROL CHIP – Desenvolvimento de projetos
eletrônicos, Projetos microcontrolados em geral
(AVR, PIC ARM, 8051), levantamento e
implementação de projetos de Automação voltada
para máquinas seqüenciais e processos industriais
(CLPs IHMs CAD).