

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
Engenharia Elétrica

NEHEMIAS SOUSA FLORIANO

**INSTRUMENTO PARA VISUALIZAÇÃO DE ÁREAS DE
RISCO E MONITORAMENTO MÓVEL**

Itatiba
2012

Nehemias Sousa Floriano RA - 002200800665

INSTRUMENTO PARA VISUALIZAÇÃO DE ÁREAS DE RISCO E MONITORAMENTO MÓVEL

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade São Francisco sob a orientação do Profº André Renato Bakalereskis, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Itatiba
2012

NEHEMIAS SOUSA FLORIANO

**INSTRUMENTO PARA VISUALIZAÇÃO DE ÁREAS DE
RISCO E MONITORAMENTO MÓVEL**

Monografia aprovada pelo programa de graduação da Universidade São Francisco, como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Data de aprovação: ___ / ___ / ___

Banca Examinadora:

Prof. André Renato Bakalereskis (Orientador)
Universidade São Francisco

Prof. Me. Paulo Eduardo Silveira (Examinador)
Universidade São Francisco

Prof. João Alex Franciscan Vaz (Examinador)
Universidade São Francisco

FLORIANO, N. S. **Instrumento para Visualização de Áreas de Risco e Monitoramento Móvel**. 2012. 48f. Monografia. Curso de Engenharia Elétrica da Unidade Acadêmica da área de exatas da Universidade São Francisco, Itatiba.

RESUMO

Navegação em ambientes internos por robôs tem muitas aplicações, como exploração e visualização de prédios em ruínas ou áreas radioativas. O voo como locomoção nessas áreas é interessante porque não se torna restringido pela morfologia do terreno e se tornam muito mais velozes. O objetivo deste trabalho é a construção de um modelo voador com hélice protegida e de tamanho muito pequeno, equipado com sensores que proporcionem controle e estabilidade para a realização de uma filmagem. Foram utilizadas peças geralmente empregadas em aerodelismo e um controle eletrônico apoiado em um conjunto de sensores para a navegação. Além disso, foi prevista a instalação de uma micro câmera e um transmissor de rádio para visualização remota. Esperava-se que o robô navegasse com estabilidade e transmitisse as imagens de ambientes remotos com apenas auxílio de controle manual externo. Mas devido a problemas com propulsão e peso das peças, a meta não foi alcançada integralmente. Entretanto, foi verificado que esse projeto se revelou como uma plataforma para desenvolvimento, com possível aperfeiçoamento construtivo e de baixo custo.

Palavras-chave: AERODELISMO, ROBÓTICA, CFTV.

FLORIANO, N. S. **Instrumento para Visualização de Áreas de Risco e Monitoramento Móvel**. 2012. 48p. Monograph. Course of Electrical Engineering from the Academic Unit of Exact Sciences at the São Francisco University, Itatiba.

ABSTRACT

The navigation on indoors environments by robots has many applications, such as exploration and visualization of collapsed buildings or radioactive areas. The flight locomotion in these places is interesting because is not constrained by morphology of the terrain and is much faster. The objective of this work is to build a flying model with protected propellers and very small size, equipped with sensors that provide control and stability to carry out a shoot. Parts generally employed in aeromodelling and electronic controls, supported by a set of sensors are used for navigation. Moreover, it was proposed to fit a micro camera and a radio transmitter for remote viewing. It was hoped that the robot navigated with stability and transmit the images of remote environments with only the assistance of external manual control. But due to problems with propulsion and weight of the pieces, the goal was not fully achieved. However, it was found that this project is revealed as a platform for development, with possible constructive improvement and low cost.

Keywords: AEROMODELLING, ROBOTICS, CCTV

LISTA DE SIGLAS

A/D -	Analógico para Digital
BEC -	<i>Battery eliminator circuit</i> (Circuito Eliminador de Bateria)
CC -	Corrente Contínua
CI -	Circuito Integrado
D/A -	Digital para Analógico
EEPROM -	<i>Electrically Erasable Programmable Read Only Memory</i>
EMI -	<i>Electromagnetic Interference</i> (Interferencia Eletromagnética)
ESC -	<i>Electronic Speed Controller</i> (Controle Eletrônico de Velocidade)
F.E.M. -	Força Eletro Motriz
I2C -	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IDE -	<i>Integrated Development Environment</i> (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)
ISP -	<i>In-System Programming</i> (Programação no sistema)
MEMS -	<i>Micro Electro-Mechanical Systems</i>
MIPS -	Milhoes de instruções por segundo
MOSFET -	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PM -	<i>Permanent Magnet</i> (Ímã Permanente)
PVC -	Cloreto de Polivinila
PWM -	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
R/C -	Radiocontrolado
RF -	Radiofrequencia
RPM -	Rotações por Minuto
RTC -	<i>Real Time Clock</i> (Relógio de Tempo Real)
SPI -	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SR -	<i>Switched Reluctance</i>
SRAM -	<i>Static Random Access Memory</i>
ULA -	Unidade Lógica Aritmética
USART -	<i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i>

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: EFEITO CORIOLIS	10
FIGURA 2: ESTÁGIOS DO GIROSCÓPIO.....	11
FIGURA 3: EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DO GIROSCÓPIO ENC-03R.....	12
FIGURA 4: A HÉLICE: 1-BORDO DE ATAQUE 2-BORDO DE FUGA 3-PERFIL 4-BORDO MARGINAL...	14
FIGURA 5: PASSO DA HÉLICE	14
FIGURA 6: ÂNGULO DA SECÇÃO.....	15
FIGURA 7: VISTA EXPLODIDA DE UM SERVO.....	17
FIGURA 8: DUTY CYCLE	22
FIGURA 9: CIRCUITO CONTROLADOR COM CHAVEADOR SIMPLES.....	23
FIGURA 10: DIAGRAMA SIMPLIFICADO DO MOTOR BRUSHLESS CC.....	25
FIGURA 11: CIRCUITO CHAVEADOR	27
FIGURA 12: ESTRUTURA DE ALUMÍNIO COM MOTORES MONTADOS	31
FIGURA 13: HÉLICE E-PROP 9x4,7"	32
FIGURA 14: MOTOR <i>BRUSHLESS</i> EMAX FC 28-22 <i>OUTRUNNER</i>	32
FIGURA 15: ESC HOBBYKING SERIE SS	33
FIGURA 16: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO.....	34
FIGURA 17: MULTI-ROTOR CONTROL BOARD V2.1	34
FIGURA 18: DENOMINAÇÃO DOS EIXOS DE UMA AERONAVE.....	35
FIGURA 19: FLUXOGRAMA BÁSICO DO CONTROLADOR	36
FIGURA 20: PLATAFORMA PRONTA PARA TESTES	39
FIGURA 21: CÓDIGO PARA LEITURA DE SINAL DO RECEPTOR PARA A ROLAGEM.....	40
FIGURA 22: CÓDIGO PARA DESLIGAMENTO EM BAIXA ROTAÇÃO.....	41
FIGURA 23: CÓDIGO PARA O CONTROLE DOS LEMES DE ROLAGEM.....	41
FIGURA 24: CÓDIGO PARA CONTROLE DE GUINADA	42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVO	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 GIROSCÓPIO	9
2.1.1 Força Coriolis	9
2.1.2 Giroscópio MEMS	10
2.2 MICROCONTROLADOR	12
2.3 PROPULSOR/TRATOR – HÉLICE	13
2.4 SERVOMOTORES	15
2.4.1 CONSTRUÇÃO DE UM SERVOMOTOR	16
2.5 MOTORES <i>BRUSHLESS</i>	18
2.5.1 <i>Brushless</i> em Aeromodelismo	20
2.6 ESC – CONTROLADOR ELETRÔNICO DE VELOCIDADE	20
2.6.1 Controle de motor por PWM	22
2.6.2 Problemas relacionados ao controle PWM	23
2.6.3 Controlando o Motor <i>Brushless</i>	25
2.6.3.1 Comutação sensorizada	26
2.6.3.2 Comutação não sensorizada	27
2.6.4 Circuito Eliminator de Bateria (BEC)	28
2.7 BATERIA	28
3 METODOLOGIA	30
3.4 ESTRUTURA	30
3.1 PESO E PROPULSÃO	31
3.2 PLACA DE CONTROLE	33
3.3 CONTROLE	35
4 RESULTADOS	38
4.1 TESTES DE FUNCIONAMENTO	39
4.2 SOFTWARE	40
5 CONCLUSÃO	43
6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
ANEXOS	47
ANEXO A – FOLHA DE DADOS DO MOTOR	48

1 INTRODUÇÃO

A navegação em ambientes internos por robôs móveis podem ter muitas aplicações. O voo como locomoção nessas áreas é interessante porque não se torna restringido pela morfologia do terreno e, pode ser usado para navegar através de escadas ou mesmo o poço de um elevador, de modo muito mais veloz do que locomoções feitas através do terreno. Entretanto, essas plataformas de voo internas são geralmente restringidas por espaços pequenos e desordenados na qual requerem um tamanho reduzido, boa capacidade de manobras, baixa velocidade, e a detecção de obstáculos de forma a permanecer no ar.

Enquanto que para robôs aéreos feitos para ambientes externos há uma pequena preocupação com os obstáculos, em ambientes internos a colisão de uma hélice pode ser catastrófica. Até mesmo na natureza, observando os melhores voadores como os insetos, capazes de realizar manobras e voos impressionantes, ainda assim, frequentemente se chocam em obstáculos como janelas e paredes translúcidas [22].

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é a construção de um modelo voador com hélice protegida e de tamanho muito pequeno, equipado com sensores que proporcionem controle e estabilidade para a realização de uma filmagem.

O protótipo visa ser uma ferramenta para a aproximação em áreas de difícil acesso ou para uma abordagem segura dentro de uma área de risco. Espera-se que esse veículo aéreo não tripulado seja operado manualmente (uma vez que podem existir condições em que movimentos automatizados não respondam apropriadamente) e que também possa fazer movimentos automáticos através de um modo de auto aprendizado ou descoberta (*drone*).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão bibliográfica estão descritas as características funcionais das diversas peças e componentes utilizados neste trabalho de uma forma generalizada, mas tendo em vista o que pode ser aproveitado em uma obra dessa natureza.

2.1 Giroscópio

O giroscópio é um sensor eletrônico de estado sólido utilizado para captar o movimento e ou fazer medição de velocidade rotacional. Pode se afirmar que existem três gerações de giroscópios. A primeira é formada por dispositivos mecânicos e baseia se em um disco girante sendo utilizada principalmente em aplicações navais. São volumosos, mais caros, porém mais precisos. Os giroscópios ópticos pertencem à segunda geração e baseiam-se nas propriedades da luz. Com menor custo, volume e exatidão que os giroscópios mecânicos são utilizados principalmente em aplicações aeronáuticas. Finalmente a terceira geração é de sensores eletromecânicos baseados na tecnologia MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*) que se utilizam da força Coriolis e apresentam menor custo, volume e pior qualidade de medidas comparada às outras tecnologias [19].

2.1.1 Força Coriolis

Em um disco girante, para se movimentar de um ponto A para o B como indicado na figura 1-A, digamos que sem ter interação direta com o objeto (ou contato mecânico), é necessária uma compensação, pois uma vez partindo do ponto A, o ponto B já não se encontra na posição original (Fig. 1-B). Feito o ajuste, e determinado um trajeto retilíneo de A para B, pode se afirmar que no ponto de vista do objeto, é como se o trajeto sofresse uma deflexão- (Fig. 1-C), ou seja, um trajeto curvilíneo entre os dois pontos.

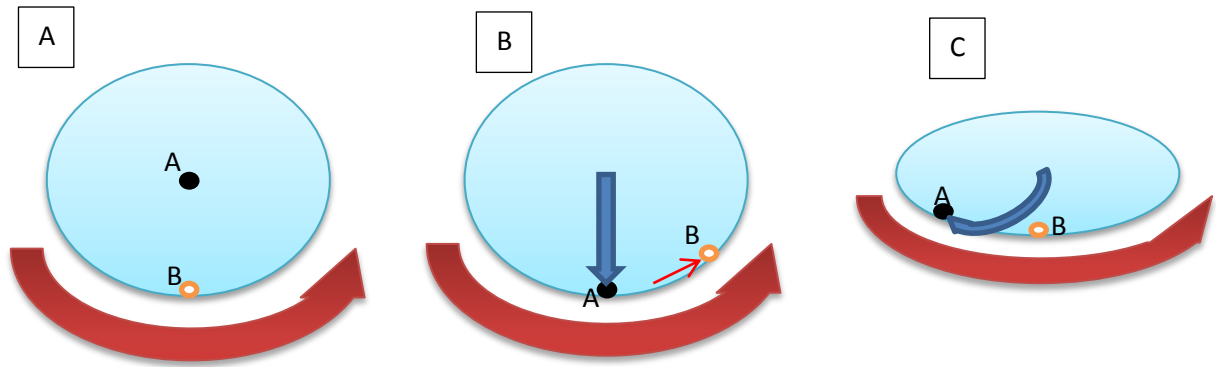


FIGURA 1: Efeito Coriolis - A: Instante inicial; B: Destino não se encontra na posição inicial; C: Deflexão tendo como referência o disco.
Fonte: Própria

Essa tendência à deflexão é chamada de efeito Coriolis. Supondo que seja feito o mesmo trajeto com alguma interação com o objeto, simplesmente pode-se deslocar de A para B com um percurso retilíneo no ponto de vista do objeto. Mas aquela tendência à deflexão permanece gerando uma força lateral ao viajante. Essa força lateral é conhecida como força Coriolis que pode ser constatada, por exemplo, pelo movimento dos ventos trazendo massas de ar polar através do globo terrestre ou os furacões devido ao movimento rotacional da Terra [3]. Essa força pode ser constatada também através do giroscópio MEMS, cujo princípio de funcionamento se baseia na força Coriolis.

2.1.2 Giroscópio MEMS

O giroscópio é construído pela combinação de um atuador e um acelerômetro integrado a uma micro estrutura e inclui um elemento sensível composto por massas de prova controláveis. Cada uma de suas duas estruturas sensíveis de silício policristalino contém uma tela de vibração, na qual é eletrostaticamente levada à ressonância. Esse movimento oscilatório produz o elemento de velocidade necessário para detectar a força Coriolis por toda a faixa angular. Nas duas extremidades externas de cada tela, ortogonal ao movimento de excitação, hastes móveis são colocados entre hastes externas para formar uma estrutura capacitiva que é sensível ao movimento produzido pelo efeito Coriolis. O sinal resultante alimenta uma série de estágios de ganho e demodulação que produzem uma faixa de sinal de saída. O projeto de sensores duplos rejeita forças gravitacionais externas e

vibrações. A fabricação do sensor com uma eletrônica de condicionamento preserva a integridade do sinal em ambientes ruidosos [1].

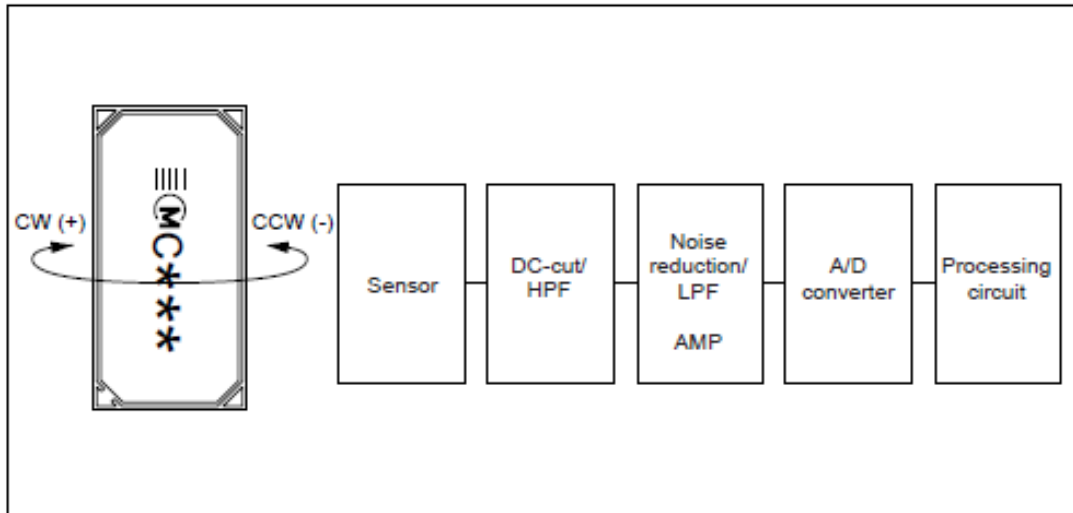


FIGURA 2: Estágios do giroscópio
Fonte: [21]

Para garantir um funcionamento estável, são recomendadas as seguintes medidas:

- Somente fontes usadas para alimentar circuitos analógicos são recomendadas para suprir os giroscópios. Ruído de alta frequência e transientes associados com fontes de circuitos digitais podem ter efeitos adversos na operação do dispositivo;
- O sensor pode detectar a rotação em apenas um eixo. No caso da necessidade de detectar mais eixos no mesmo equipamento, deve-se acoplar unidades sensoriais ao eixo de rotação desejado;
- Para reduzir o efeito da variação de temperatura ambiente, um filtro passa altas deve ser conectado à saída do sensor de modo a eliminar a componente CC;
- Para suprimir a componente de ruído na saída (frequência ressonante do elemento sensor), um filtro passa baixas que possui uma faixa de corte maior do que a própria frequência de ressonância também deve ser conectado ao circuito de saída [21].

Na figura 3 um exemplo de circuito com o giroscópio fabricado pela empresa Murata referente ao modelo ENC-03R.

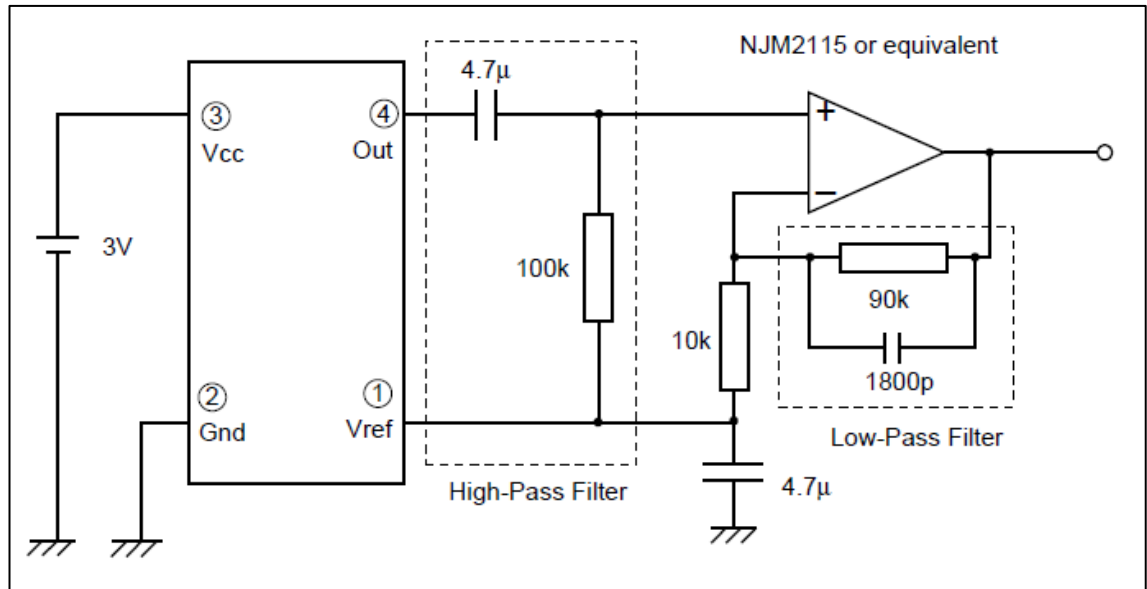


FIGURA 3: Exemplo de utilização do giroscópio ENC-03R.
Fonte: [21]

2.2 Microcontrolador

O microcontrolador pode ser definido como um componente eletrônico com capacidade tomar decisões lógicas programáveis, utilizado no controle de processos lógicos. Esses controles de processo podem ser entendidos como o controle de periféricos através de suas portas de entrada e saída. Assim, com a variação do estado desses periféricos (ex.: sensores) decisões lógicas são tomadas de forma a suprir as necessidades do projeto.

Para esse processamento, ele possui uma ULA (Unidade Lógica Aritmética) e um conjunto de instruções de forma a utilizar todos os recursos de processamento e outros necessários para o controle de entrada e saída como *Timers*, conversores A/D e D/A, PWMs, comunicação serial, etc. Esta é a principal característica que difere microcontroladores dos microprocessadores, pois os últimos apesar de possuírem uma ULA muito mais poderosa, não portam tantos recursos em uma única pastilha.

Abaixo a descrição de alguns recursos disponíveis em microcontroladores encontrados no mercado:

- *Timers*: São contadores internos incrementados automaticamente pelo clock da máquina ou por um sinal externo. Podem ser acessados diretamente na memória da

máquina e seu estouro (alcançar o valor máximo e voltar a zero) pode gerar uma interrupção.

- EEPROM: É uma memória eletricamente programável que pode ser acessada pelo programa de forma a armazenar dados (em geral do usuário) que não devem ser perdidos numa eventual queda de energia.

- Modulo USART (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*): Comunicação serial síncrona ou assíncrona. Possui um buffer interno possibilitando a leitura e a escrita de forma automática (sem ter que controlar um pino de saída diretamente).

- I²C e SPI: Interface serial útil para comunicar com outros periféricos ou microcontroladores. Os periféricos podem ser EEPROMs seriais, registradores de deslocamento, drivers de *display*, conversores A/D, RTC (*Real Rime Clock* – Relógio de Tempo Real), etc.

- PWM: Através de *timers* internos, esse módulo envia um trem de pulso a um determinado pino de saída sendo que o programa só precisa controlar a largura do pulso alterando dados de um registrador específico.

- Modulo A/D: Com essa entrada analógica pode-se fazer a aquisição de um sinal externo. Dependendo do CI, pode haver uma ou mais portas disponíveis para esse recurso [5].

2.3 Propulsor/Trator – Hélice

A hélice é o elemento que transforma a energia mecânica fornecida pelo motor em propulsão ou tração. Em conjunto com o motor é chamado de grupo motopropulsor. Pode ser constituído de uma ou mais lâminas confeccionadas com certa inclinação e denominam-se de monopás, bipás, tripás, etc.

Suas características aerodinâmicas são similar a de uma asa e, assim distinguem-se o bordo de ataque, o bordo de fuga, os bordos marginais, os perfis, etc.

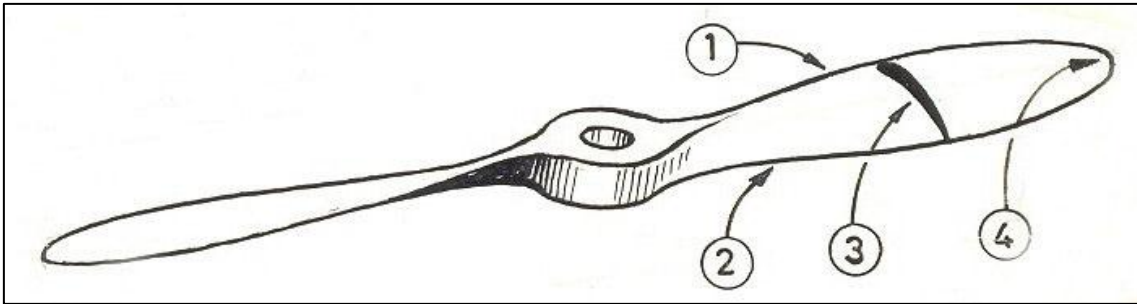


FIGURA 4: A Hélice: 1-bordo de ataque 2-bordo de fuga 3-perfil 4-bordo marginal
Fonte: [10]

As características principais que determinam o uso de uma hélice são o diâmetro, apresentado pela circunferência de sua rotação que pode ser medida através das extremidades de suas pás e o passo, que é o avanço ou distância percorrida pela hélice após uma rotação completa.

Pode-se fazer a analogia da hélice com um parafuso penetrando na madeira. Mas diferentemente da madeira, o ar é um meio muito mais compressível e elástico resultando perdas que ocasionam menor avanço. Assim sua rotação produz força de tração, mas com perdas em virtude da resistência do ar e suas propriedades. A diferença entre o passo teórico com o passo real ou prático é chamado de recuo e é exemplificado na figura 5.

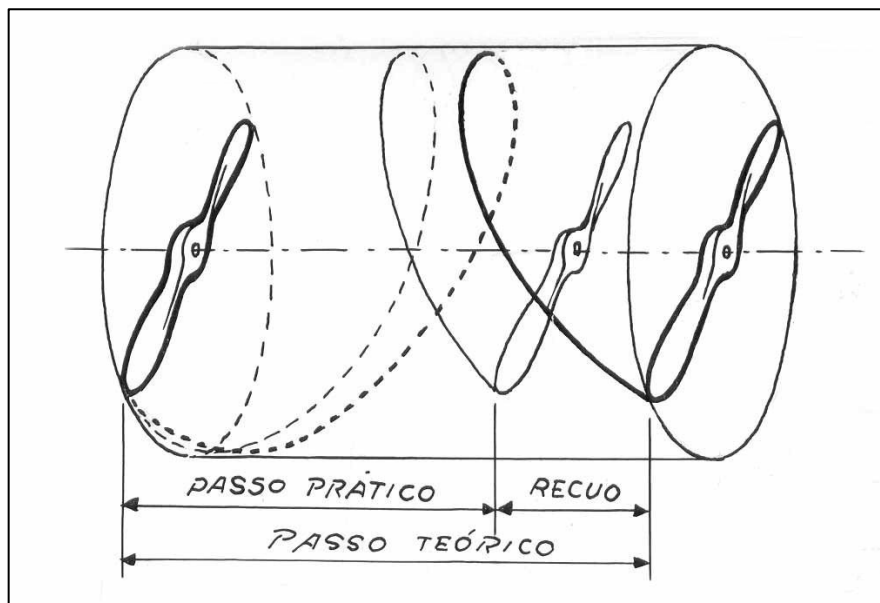


FIGURA 5: Passo da hélice
Fonte: [10]

Um bom rendimento de hélice significa um passo constante, ou seja, em todas as secções da pá o avanço é o mesmo. Quanto mais próximo ao eixo maior será a inclinação devido à diferença de velocidade de circulação nesses pontos em relação às secções mais

afastadas. Assim, em função da velocidade relativa dos diversos pontos, o ângulo de inclinação é diferente de forma a manter um avanço idêntico em todo seu diâmetro.

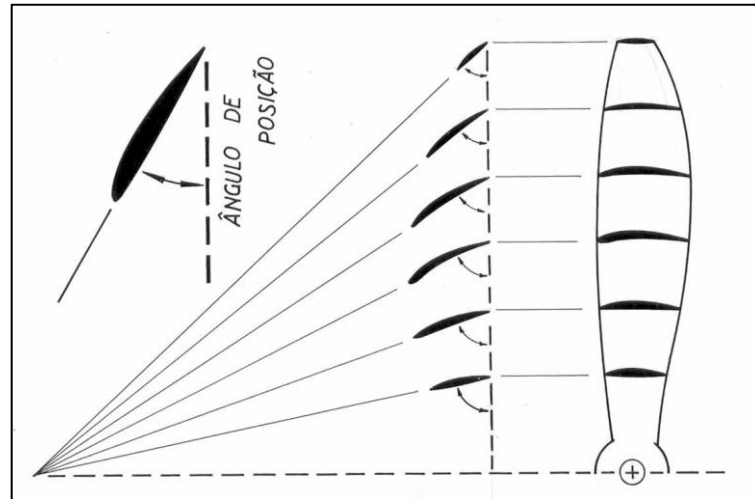


FIGURA 6: Ângulo da seção.
Fonte: [10]

Uma reação é criada pela força rotacional da hélice tendendo a fazer o aparelho rotacionar em sentido oposto ao deslocamento das pás. É chamado de efeito de “torque” e quanto maior for o diâmetro da hélice e a área das pás, mais ele se torna evidente. Em aviões a força é grandemente amortecida pela asa, mas mesmo assim produz algum efeito nocivo [10]. Em modelos de hélices diretos, como nos helicópteros, essa força tende a fazê-lo espiralar sendo necessária uma compensação que pode ser feita através de outra hélice acoplada em sua calda exercendo força contrária e provendo estabilização. Também pode se utilizar outro conjunto de hélices diretas rotacionando no sentido oposto, provocando o mesmo efeito de forma a uma anular a outra [20].

2.4 Servomotores

Um servomotor é um dispositivo a qual recebe sinais elétricos, e controla a velocidade ou um movimento através de um circuito controlador que opera em malha fechada.

Os tipos de servomotores apresentados nesse trabalho são conhecidos com servos de R/C (radiocontrolados) utilizados frequentemente para controle em modelos ou robôs.

Existem vários tamanhos padronizados dessas unidades com uma larga faixa de desempenho e características. A grande vantagem do uso destes servos é que são produzidos em massa para modelos de veículos, como resultado são relativamente baratos, além de serem muito leves. Por possuírem um sistema de redução, produzem movimento com torque razoável.

2.4.1 Construção de um servomotor

A grande maioria dos servos R/C são compostos pelos seguintes blocos:

- **Circuito de controle:** Esse circuito é responsável por ler a entrada de sinal e traduzir em movimento do motor de maneira que o eixo seja rotacionado na posição desejada.
- **Potenciômetro de realimentação:** O eixo do potenciômetro é acoplado ao eixo do servo. Quando o eixo do servo rotaciona, o mesmo acontece com o potenciômetro alterando sua resistência para cada ângulo do servo. Através da leitura desse parâmetro, o controlador é capaz de saber o ângulo exato do eixo do servo.
- **Motor:** Geralmente é usado um pequeno motor CC de alta velocidade controlado por uma ponte H acoplada ao controlador do servo.
- **Caixa de redução:** Responsável por transferir a rotação do motor para o eixo do servo. A rotação é bem reduzida com um bom ganho de torque que é a principal característica dos servos R/C.
- **Eixo do servo:** Quando todos os outros itens operam em perfeita harmonia, o eixo rotaciona com precisão de acordo com o ângulo requerido.

Cada servo tem sua própria especificação, entretanto, existem várias características comuns que permitem a possibilidade de ser substituídos por unidades diferentes. A vantagem com essa abordagem modular é que sistemas podem ser ajustados para condições ideais sem a necessidade de reprojeter por completo.

A maioria dos servos são projetados para receber uma alimentação por baterias. As tensões mais comuns ficam entre 4,8 e 6 V, embora alguns mais potentes utilizem tensões mais altas. A entrada de controle consiste de uma série de pulsos de onda quadrada com duração entre 1 e 2 ms, com uma frequência de 20 a 60 Hz enquanto que nos servos digitais a faixa está entre 300 e 400 Hz. A posição do eixo de saída é proporcional à largura

do pulso de entrada. Pode ser usado um circuito integrado para controle projetado especificamente para essa função. São inclusos no CI todo o circuito lógico de forma a minimizar o uso de componentes externos e com isso uma montagem com muita leveza, favorecendo o uso em aeromodelos [15].

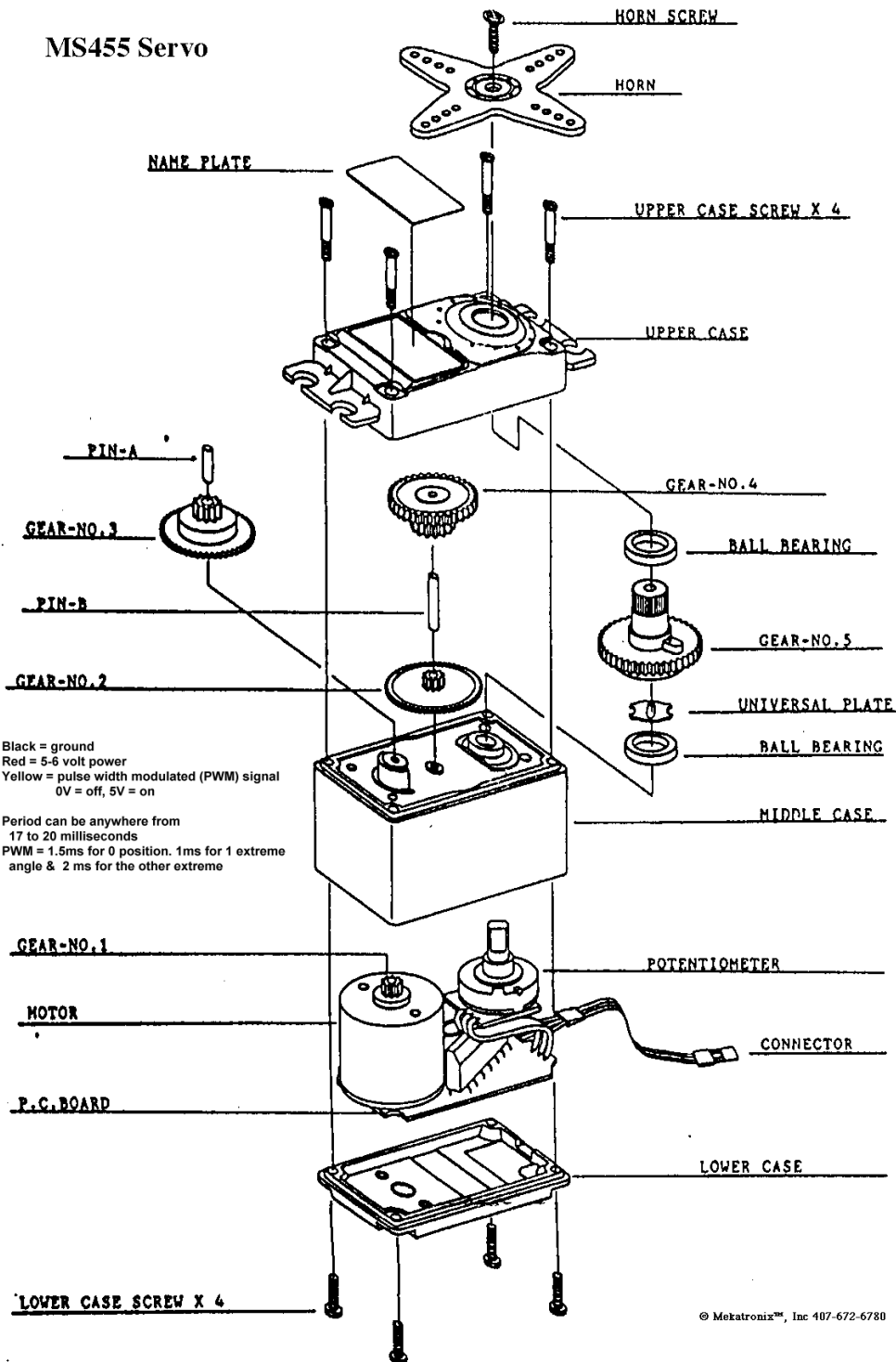


FIGURA 7: Vista explodida de um servo.
 Fonte: [25]

O motor interno CC é conectado a um eixo de saída através de engrenagens de redução. Essas engrenagens traduzem uma alta velocidade do motor para faixa de rotação de trabalho com um torque muito maior. A faixa normal de movimento é de 90°. Muitos servos podem se estender além desses limites e alguns chegam até 180°. De qualquer forma, não é garantido e pode variar de servo para servo. Exceder a faixa normal do servo pode causar danos às engrenagens internas [11].

2.5 Motores *Brushless*

O motor *brushless* (sem escova) consiste basicamente em um motor síncrono polifásico que possui um rotor com ímãs permanentes ou com laminações de polos salientes. Os enrolamentos do estator são alimentados com tensões de maneira a criar campos magnéticos girantes, o rotor por sua vez acompanha esse movimento apresentando rotação como resposta.

Em geral, os motores com rotores de ímãs permanentes são mais indicados para motores de passo ou em aplicações que necessitem de torque e controle. Estes podem ser alimentados com tensão CC ou senoidal dependendo da construção e aplicação.

Quanto menor o motor, mais razoável é o uso de ímãs permanentes para excitação. Não há um único quesito em que os motores *brushless* PM (*Permanent Magnets* – Ímãs Permanentes) fiquem abaixo quando comparados com motores de indução, mas isso só vale para a faixa de 1 a 10 kW. Acima dessa faixa, os motores de indução superam rapidamente, enquanto que o custo dos ímãs pesam negativamente em motores com essa tecnologia. Dentro de sua faixa, os motores PM tem melhor eficiência, torque por ampere, e efetivo fator de potência. Além disso, o enrolamento se localiza no estator, ao qual seu aquecimento pode ser removido mais facilmente, enquanto as perdas do motor são extremamente pequenas. Esses fatores combinam para manter a taxa de torque/inércia alto em pequenos motores.

Motores CC com rotor de laminações de polos salientes ou SR (*Switched Reluctance*) são exatamente iguais aos motores *brushless* PM (*Permanent Magnet*), mas diferentes dos motores de passo que não possuem realimentação do rotor, possuem um transdutor de posição do rotor para otimizar a operação em rotação contínua. Com isso, podem produzir

torque contínuo em qualquer posição do rotor e qualquer velocidade e são alimentados com uma forma de onda quadrada ou senoidal. Outra diferença é que os motores SR são projetados para uma conversão de energia mais eficiente em altas velocidades. Também são mais do que motores de passo de alta velocidade, eles combinam muitas das mais desejáveis qualidades de ambos os motores de indução e comutados em CC, assim como motores *brushless* PM de corrente contínua. Por outro lado, sofrem dos mesmos problemas de excitação que um motor de indução e não podem igualar sua eficiência ou densidade de potência à dos motores com ímãs permanentes em baixas velocidades [7].

A seguir as principais vantagens do uso de motores *brushless*:

- Requerem pouca ou nenhuma manutenção;
- Tem uma vida útil muito mais longa;
- Não há faiscamento, eliminando a possibilidade de explosão ou radiação em RF;
- Não produzem partículas das escovas ou do comutador, nem gases como subproduto da operação;
- Podem operar submersos em fluidos, gases combustíveis e podem até ser hermeticamente lacrados;
- São genericamente mais eficientes que motores CC convencionais ou os servomotores CC com escovas;
- Fornecem uma resposta mais rápida (menor constante de tempo de servo) e uma característica razoavelmente constante, do torque de saída versus a corrente de entrada, o que os recomenda para aplicações como servomotores.

A configuração *brushless* também possui desvantagens. As maiores desvantagens comparadas ao motor com escovas são:

- Superior complexidade do controlador que em alguns casos tem o custo maior do que o próprio motor;
- São inicialmente mais caros para a fabricação, na qual o torna mais afável para uma manufatura automatizada (mas com custo de manutenção reduzido);
- Necessidade de encomendas “especiais” para aplicações particularizadas devido à falta de abrangência no mercado [9].

2.5.1 *Brushless* em Aeromodelismo

Comumente designados como *inrunners* ou *outrunners* para modelos R/C (radiocontrolados), são conectados a um controlador de velocidade eletrônico - ESC a qual se traduz em uma interface frequentemente entre um receptor de rádio e o motor. Em geral, o índice mais observado para a utilização é a constante de tensão K_v , a qual se refere à quantidade de RPM por volt. Um valor baixo representa um motor mais robusto e com torque elevado, enquanto que um valor alto encontra-se em motores de alta rotação (20.000 RPM ou mais).

Com relação à montagem, nos *outrunners* a parte rotacional é o seu próprio corpo, enquanto que as partes internas são fixas. São geralmente de baixo K_v e são utilizados em modelos terrestres ou helicópteros em função de seu torque.

Já os *inrunners*, se comparam aos motores convencionais, nos quais a haste de seu eixo é que gira livremente enquanto que sua carcaça é fixa. São de altíssima rotação e aplicados a modelos acrobáticos e de alta velocidade como aviões a “jato” (apenas o modelo, pois o motor é elétrico). Também podem ser usados para voo vertical (helicópteros) com a instalação de um redutor. Por ter um consumo reduzido, por vezes é mais vantajoso do que um motor de baixo K_v que pode gerar um peso extra [8].

2.6 ESC – Controlador eletrônico de velocidade

O controlador eletrônico de velocidade (ESC – *Electronic Speed Controller*) é necessário para motores *brushless*, sendo fabricados especialmente para essa aplicação. Como não possuem comutador, necessitam de certa inteligência para realizar o controle do fluxo e orientar o giro do motor.

Em geral são constituídos por um circuito chaveador de forma a organizar o fluxo de corrente em suas bobinas, um microcontrolador que gera o sinal PWM (necessário para efetivamente controlar a velocidade do motor) e trata o sinal de entrada enviado pelo receptor ou placa controladora, e comumente um BEC (*Battery Eliminator Circuit* – Circuito Eliminador de Bateria).

Os transistores MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) modernos são desenvolvidos com baixa resistência de chaveamento e encapsulamentos de tamanho reduzido. Através do uso de um microcontrolador e alguns MOSFETs, controladores de velocidade de alta performance podem ser construídos para serem pequenos, leves e com recursos avançados.

Um ESC apropriado para aeronaves deve possuir as seguintes características:

- Assim como em todas as outras peças, deve ter peso baixo;
- Baixa resistência de chaveamento para que possa sofrer um aquecimento mínimo quando operando em alta potência, possibilitando ter um peso baixo e longa duração;
- Segurança na partida do motor (o motor não deve ser armado até que a aceleração esteja reduzida ao mínimo);
- Proteção ao redutor (em motores com redutor, não se deve acelerar bruscamente para que não ocorra uma quebra de engrenagens);
- Desligamento de segurança em caso de perda do sinal de controle;
- Circuito eliminador de bateria (BEC) permitindo que a bateria de voo alimente o equipamento de rádio;
- Desligamento em baixa tensão (desabilita o motor quando existe queda de tensão da bateria a um valor muito baixo permitindo que o rádio continue em funcionamento);
- PWM (*Pulse Width Modulation* – Modulação por largura de pulso) a mais alta possível.
- E se possível resposta em aceleração programável (permite o ajuste da aceleração de forma a otimizar sua resposta com a aeronave).

Os microcontroladores se tornaram a opção óbvia pela necessidade de atender a tantas características diferentes para as várias aplicações. Os controles de rádio para aeromodelismo tem um histórico longo e variado de muitos sistemas diferentes sendo usados através de anos. O sinal “padrão” atual trata-se de uma série de pulsos com uma largura nominal de 1 a 2 ms e um período de 20 ms. Esses valores não são impostos e na verdade atendem a uma faixa de largura de pulsos de 0,85 a 2,2 ms. A maioria dos equipamentos de rádio tem a habilidade de ajustar o pulso de saída para uma faixa mais estreita, mas seria prudente aceitar um largo grau de variação no sinal. Para acomodar essas variações, vários fabricantes de ESCs incluíram o modo de “treinamento” (originalmente chamado “*Training Mode*”) para calibrar o ESC a um sinal em particular antes de cada voo ou durante a instalação [16].

2.6.1 Controle de motor por PWM

A velocidade do motor (RPM) é diretamente proporcional à tensão aplicada em seus terminais. O torque do motor é diretamente proporcional ao fluxo corrente através do motor. A tensão do motor pode ser facilmente controlada através do uso de um chaveador PWM para recortar a corrente do motor proporcionalmente a uma aceleração desejada [16]. O processo é feito chaveando a alimentação para um dispositivo ligando e desligando em uma dada frequência, com a variação do tempo de permanência. Esse tempo é denominado como “*duty cycle*” (ciclo de trabalho). O diagrama da figura 8 exibe a forma de onda de 10%, 50% e 90% de *duty cycle*.

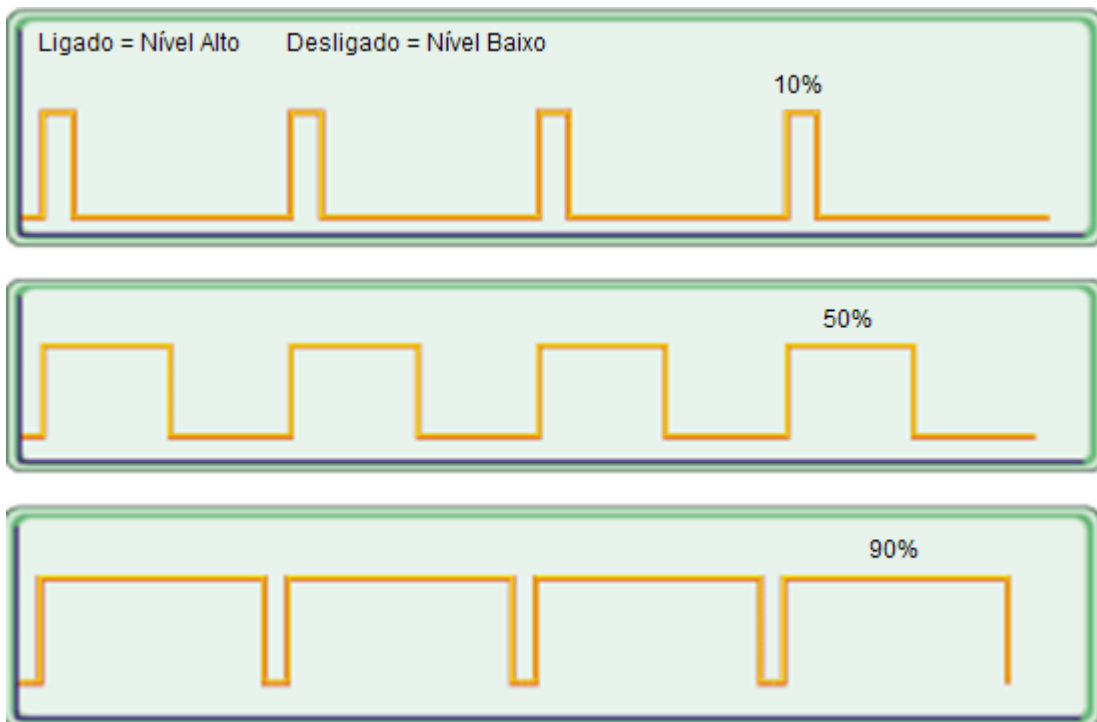


FIGURA 8: Duty Cycle
Fonte: [17]

Como pode se perceber a partir do diagrama, um *duty cycle* de 10% significa estar ligado em 10% do comprimento da onda e desligado 90%, enquanto que um *duty cycle* de 90% está ligado em 90% e desligado em 10% do tempo. O resultado do PWM é que a tensão enviada para o motor pode ser ajustado a partir de desligado (0% de *duty cycle*) a ligado (100% de *duty cycle*) com uma boa eficiência [17].

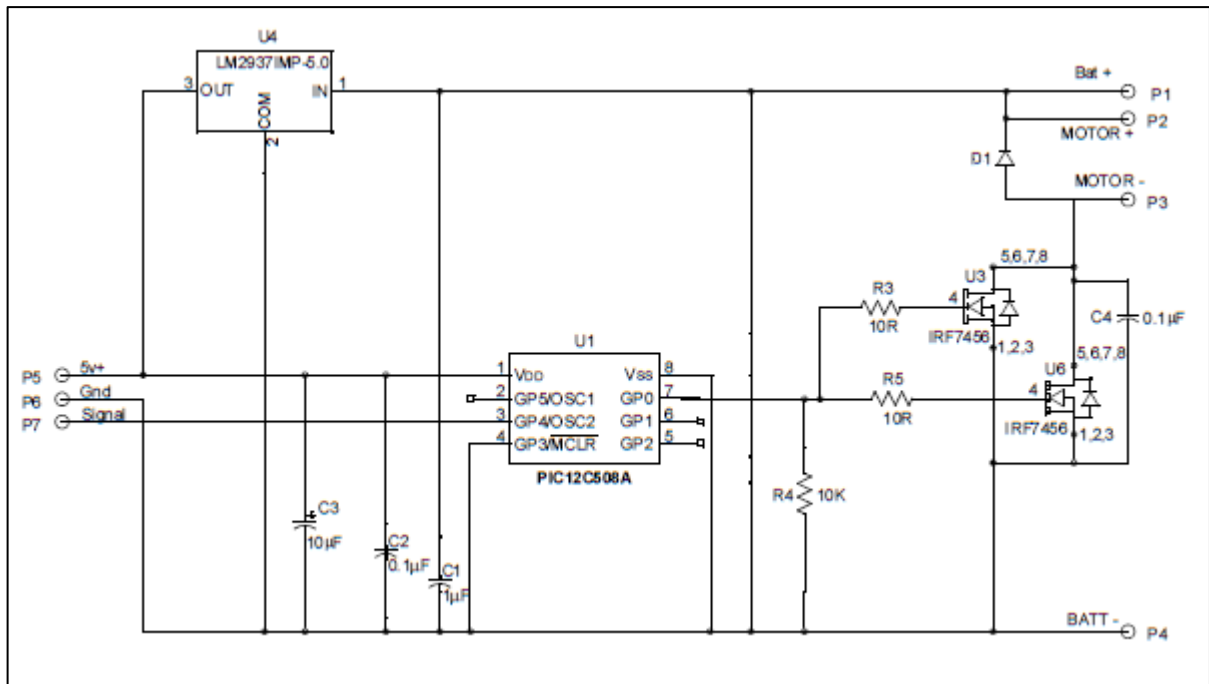


FIGURA 9: Circuito controlador com chaveador simples.
Fonte: [16]

2.6.2 Problemas relacionados ao controle PWM

Apesar de ser uma boa maneira de controle de velocidade, esse método tem alguns pontos negativos que devem ser considerados como perdas no chaveamento, interferência em radiofrequência (RF), controle do motor em baixa velocidade e ruído audível.

As perdas no chaveamento ocorrem porque em um chaveador ideal, a ação de ligar e desligar ocorrem instantaneamente, mas em um chaveador real, há um curto período de tempo em que o transistor MOSFET alcança uma linearidade tendo um tempo de subida e descida. Durante esse período de tempo o transistor começa a esquentar e, se a frequência do PWM e a corrente forem altos, esse aquecimento acontecerá muito rapidamente.

2.6.2.1 Interferências em frequências de rádio

A interferência em frequências de rádio surge a partir de transientes de chaveamento. Os picos extremos provenientes de um chaveador PWM pode causar uma larga faixa de interferência em rádio (*EMI-Electromagnetic Interference*). A interferência primária estará a partir da própria frequência de PWM seguida pelas suas harmônicas em todo o espectro com potencia reduzida gradativamente. A potencia aumenta de acordo com a quantidade de corrente que é chaveada. Além disso, os picos de corrente da frequência primária criam uma larga banda de ruído que, se for muito elevado, pode afetar o receptor do aeromodelo. A redução de frequência é especialmente importante para que se controle EMI quando se aplica uma alta corrente.

2.6.2.2 Controle de velocidade em baixas rotações

Em baixa velocidade, o motor elétrico não operará suavemente a não ser que a frequência PWM seja alta o suficiente para prever modos de operação descontínuos. A descontinuidade acontece quando a corrente através do motor alcança o valor de zero ampères e acontece quando o tempo de motor desligado é longo demais para permitir que a corrente decaia a zero. A simples solução para esse problema é elevar a frequência de PWM deixando a largura do pulso constante. Dessa maneira o tempo de motor desligado é reduzido mantendo o mesmo percentual de largura do pulso [16].

2.6.2.3 Ruído audível

Chavear a corrente no motor em 1 kHz faz com que o motor gere um zunido que pode ser bem alto na configuração de baixa aceleração. É proveniente da vibração da armadura

do motor de acordo com a energia que passa por ela e torna-se ainda mais audível quando a corrente do motor é descontínua. Mudando para uma frequência mais alta, o ruído pode ser eliminado porque assim o motor não trabalha de forma descontínua e a frequência torna-se muito alta para ser ouvida. Uma solução mais avançada com relação ao circuito controlador seria a mudança automática da frequência de PWM, sendo a mais alta quando o motor funciona em baixas rotações e quando necessárias altas rotações, o controlador reduz a frequência de modo a evitar os problemas descritos anteriormente (especialmente as perdas no chaveamento) [16].

2.6.3 Controlando o Motor *Brushless*

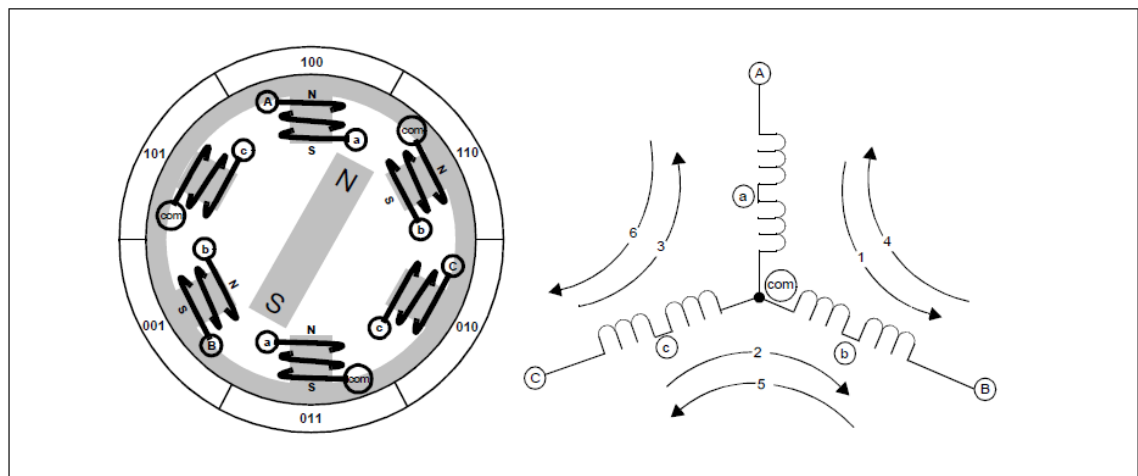


FIGURA 10: diagrama simplificado do motor Brushless CC
Fonte: [18]

No exemplo da figura 10 há três circuitos eletromagnéticos conectados em um ponto comum. Cada circuito eletromagnético é dividido no centro, permitindo o rotor magnético mover no meio do campo eletromagnético induzido. A maioria dos motores *brushless* CC possuem uma topologia de enrolamento de trifásico com conexão em estrela. Um motor com essa topologia é comutado de forma a energizar duas fases de cada vez. A chave para a comutação em um motor *brushless* é o verificar o posicionamento do rotor, e então energizar as fases que irão produzir a maior quantidade de torque. O motor gira 60 graus por passo de comutação. O caminho apropriado da corrente de estator é ativado quando o rotor está a 120 graus, a partir do alinhamento com o campo magnético correspondente do estator, e então desativado quando o rotor está a 60 graus do alinhamento, na qual será o

tempo de ativação do próximo circuito e então o processo se repete. No circuito simplificado da figura 10, uma rotação elétrica é o mesmo que uma rotação mecânica. Na prática, motores *brushless* possuem mais de um circuito elétrico com exibido, funcionando em paralelo um com o outro, e correspondendo a um rotor magnético multipolos. Para dois circuitos, existem duas rotações elétricas por rotação mecânica, sendo então que para um motor de dois circuitos, cada fase de comutação elétrica cobre 30 graus de rotação mecânica.

2.6.3.1 Comutação sensorizada

A maneira mais fácil de saber o momento correto de comutar a corrente em um enrolamento é através de um sensor de posicionamento. Muitos fabricantes disponibilizam motores *brushless* com três elementos sensores por efeito de campo. Cada elemento sensor tem uma saída digital de nível alto para 180 graus elétricos. Os três sensores são posicionados com 60 graus elétricos de um para o outro, sendo que cada sensor tem uma saída alinhada com um dos circuitos eletromagnéticos.

Cada fase do circuito chaveador consiste de um terminal do motor em nível lógico alto, um terminal e nível baixo e um terminal deixado em flutuação. Um circuito simplificado é exibido na figura 11. Cada conjunto de transistores canal P e N controla um terminal individualmente. A precaução que deve ser tomada com esse tipo de circuito é que ambos os transistores (para nível alto e baixo) não podem ser ativados ao mesmo tempo. Resistores para “*pull-up*” e “*pull-down*” devem ser instalados nas entradas para garantir que os transistores estejam desligados imediatamente depois de um reset do microcontrolador, quando suas saídas estão configuradas como alta impedância.

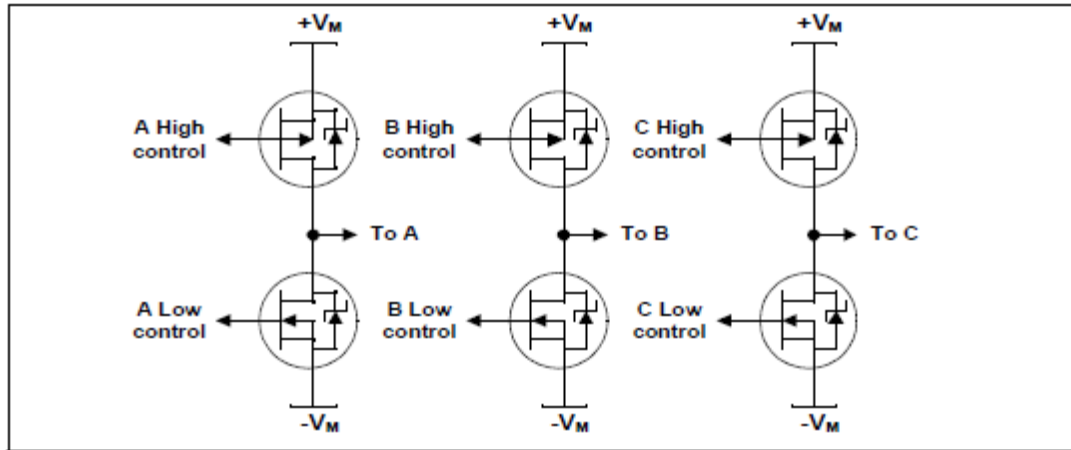


FIGURA 11: Circuito chaveador
Fonte: [18]

Outra precaução para que os transistores não sejam ativados ao mesmo tempo causando um curto circuito é o controle do tempo de transição. Para o transistor ligar ou desligar, é necessária determinada quantidade de tempo que é geralmente maior para o desligamento. Portanto, um tempo extra deve ser considerado para que não ocorra um curto circuito, mesmo que por um curtíssimo período de tempo [18].

2.6.3.2 Comutação não sensorizada

É possível determinar quando comutar tensão para a bobina do motor através da monitorização da tensão de retorno da força eletromotriz em um terminal do motor que não está energizado durante a energização de uma das fases. A vantagem óbvia no custo de um controle sem sensores está na própria eliminação dos sensores de campo. Entretanto existem várias desvantagens para esse tipo de controle:

- O motor deve ter uma rotação mínima para que possa gerar força eletromotriz suficiente para ser sensorizada;
- Mudanças abruptas na carga do motor podem fazer com que a F.E.M. cause um retorno indevido fazendo com que o controle se perca;
- A tensão de retorno só pode ser medida quando a velocidade do motor está dentro de uma faixa limitada de uma taxa de comutação para a tensão aplicada;
- Comutação em taxas mais altas do que a ideal resultam em resposta descontínua do motor.

Se baixo custo é o interesse primário, se a rotação em baixa velocidade do motor não é um requisito e se não é esperada uma mudança rápida na carga acoplada ao motor, então um motor sem sensores pode ser a melhor escolha para esta aplicação.

Uma propriedade interessante de motores *brushless* CC é que eles podem operar em sincronia até certa tolerância. Isso significa que para uma determinada carga, tensão aplicada e taxa de comutação, o motor irá se manter em um sistema de malha aberta com a taxa de comutação fornecida desde que essas três variáveis não desviem do ideal em uma quantidade significativa [18].

2.6.4 Circuito Eliminador de Bateria (BEC)

O BEC é um recurso que fornece alimentação para o receptor e servos a partir da bateria do motor. É discutível o risco de ruídos elétricos serem captados pelo receptor diminuindo sua capacidade de recepção e, que a bateria do motor diminua sua carga ao ponto em que o BEC não possa mais suprir alimentação ao receptor [12].

2.7 Bateria

As baterias são os depósitos de energia que alimentam todos os sistemas R/C. São caracterizadas pela sua capacidade, medida em amperes/hora (Ah) e os fabricantes as especificam através de sua corrente de descarga sobre geralmente um quinto da sua capacidade. Sua capacidade (C) e suas correntes de carga e descarga são determinadas por suas características de construção. Para aumentar sua capacidade, é possível a ligação em paralelo.

Nas baterias de Lítio é utilizada uma nomenclatura de forma a identificar como ela é constituída. Para o número de células em série, é utilizada a letra "S" seguido do número de células em paralelo representado pela letra "P". Por exemplo, uma bateria com três células

em série é identificada como 3S1P e se em sua montagem houver um conjunto igual em paralelo, então ela passa a ser 3S2P.

A tensão nominal em células de Níquel-Cádmio ou Níquel-Metal-Hidreto é de 1,2 volts e a tensão de montagem (*pack*) é a soma de suas células sendo que a capacidade se mantém e é a mesma de uma única célula. Suportam até 1,6 volts de carga rápida podendo ser descarregadas em até 0,9 volts sem serem danificadas. Em baterias de Ion-Lítio, essa tensão é de 3,6 volts e nas células de Polímero de Lítio é de 3,7 volts, significando uma tensão maior para um número reduzido de células e com a vantagem de que uma única célula pode substituir três de Níquel-Cádmio ou Níquel-Metal-Hidreto, com o peso muito reduzido. Mas como desvantagem, são sensíveis a certos parâmetros de tensão, pois podem ser danificadas permanentemente se carregadas acima de 4,25 volts ou descarregadas abaixo de 2,7 volts mesmo que em armazenamento. Também não devem ultrapassar os 45°C durante a carga e devem ser armazenadas cuidadosamente.

Para o processo de descarga, as baterias devem suportar grandes correntes conforme o seu tipo. Nas de Níquel-Cádmio e de Níquel-Metal-Hidreto, é usada uma nomenclatura ou recomendação do fabricante. Para uma demanda de 30 A, é recomendável utilizar as de carga rápida (tipo AR, SCR, CR e RC) e as do tipo AE para até no máximo 15 A. Nas baterias de lítio, a nomenclatura é diferente, sendo designada como um multiplicador de sua capacidade. Por exemplo, uma bateria de 30C e 2200 mA/h representa uma corrente máxima de 30 x 2200 mA que é igual a 66 A sendo uma grande vantagem comparado a outros tipos de bateria para aplicações que devem ser leves. Esse valor não deve ser mantido constantemente, mas sim em curtos períodos e se extrapolado, pode ser perigoso, pois certamente irá danificar a bateria e, excedendo os 60°C, ela pode explodir [23].

3 METODOLOGIA

Em casos de desastres, acidentes ambientais e até mesmo em situações de conflito, a qual a aproximação em ambientes hostis seria totalmente inviável, é de grande ajuda uma tecnologia capaz de trazer informações úteis, facilitando a tomada de decisões para que se possa controlar a situação. Um exemplo seria na busca de sobreviventes em um prédio que está para desabar ou embaixo de escombros. Também pode ser utilizado para monitoramento de áreas controladas, proporcionando imagens com mobilidade e praticamente sem limite de alcance.

Para o monitoramento em ambientes perigosos, podem ser recomendadas medidas de segurança como o uso de peças que não gerem centelhas capazes de provocar uma explosão, visando a proteção do ambiente ou mesmo do próprio equipamento e o confinamento de componentes sensíveis às condições do ambiente.

De forma a atender essa necessidade, durante a construção do dispositivo é necessário considerar uma série de fatores como peso total, tipo de motor, tamanho da hélice, material a ser usado na estrutura, construção de placa controladora (ou adaptação de alguma já existente no mercado), tamanho da bateria e capacidade, espaço e tolerância do sistema para a instalação de outros dispositivos.

Assim foram estabelecidas três etapas para o desenvolvimento do projeto. A primeira trata-se da máquina aérea a qual engloba o básico para o funcionamento e estabilidade para filmagens. A segunda é a filmagem propriamente dita, por obtenção e instalação de hardware e ajuste para uma qualidade aceitável para visualização em primeira pessoa. E por último a automatização do sistema e de preferência com uma interface amigável para o usuário.

3.4 Estrutura

Foram considerados testes de resistência, leveza e maleabilidade para determinar qual o material ideal para o projeto. A princípio, foi muito desejado o uso de fibra de vidro, mas devido à facilidade de manuseio, leveza e rigidez, a estrutura para os conjuntos motopropulsores também poderia ser montada com laminas de alumínio com espessura de

1 mm e largura de 30 mm. Estas serviriam com um chassi sendo fixados todos os outros componentes do projeto.

Para o invólucro, varetas de fibra de vidro são razoavelmente flexíveis e suportam impactos sem quebrar. Também tem um peso desprezível representando uma opção bem atraente para aeromodelos.

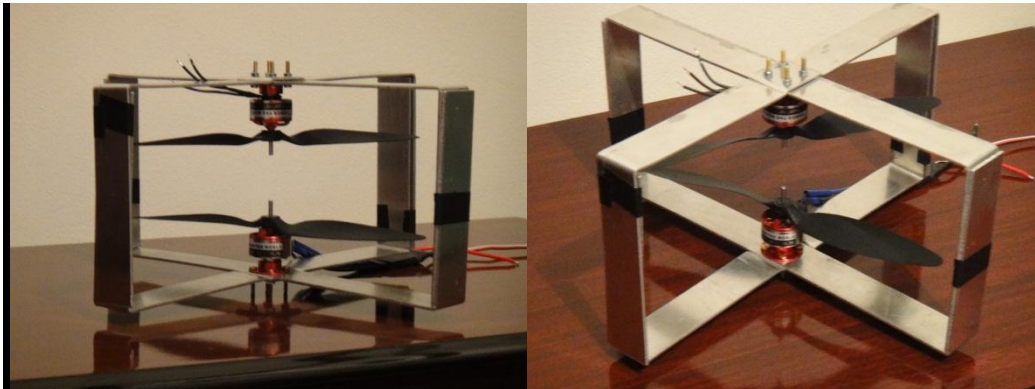


FIGURA 12: Estrutura de alumínio com motores montados
Fonte: Foto do Autor

A fixação dos servomotores pode ser feita através de uma base de isopor em função de sua leveza, sendo apoiada no suporte de alumínio e presa por cinta plástica. Esse conjunto de isopor pode se tornar mais estável amparado pelos lemes, feitos de plástico (PVC) pressionados por um anel do mesmo material fixado ao suporte de alumínio.

É esperado que todo esse conjunto mecânico não exceda à capacidade de empuxo do conjunto de hélices e motores.

3.1 Peso e propulsão

Para que o mesmo possa ser no mínimo funcional, foi estipulado que a carga máxima (equipamentos e peças) não exceda a 50% da capacidade de empuxo do grupo motopropulsor. O ideal é que não exceda 1/3 de sua capacidade, permitindo a realização de manobras evasivas.

Visando alcançar esse objetivo, foi adquirido um conjunto de motores Brushless Emax FC 28-22 *Outrunner* com K_v de 1200 e hélices com as medidas que variam de 9x4,7" a 10x4,5" (228,6 x 114,3 mm e peso aproximado de 59 g).



FIGURA 13: Hélice E-Prop 9x4,7"
Fonte: [14]

O motor pesa 39 g, alcança até 7100 RPM com uma corrente de 14,5 A em 11,1 V acoplado a uma hélice de 10 x 4,5" e segundo testes realizados, pode-se alcançar uma força de empuxo de 710 g. Entretanto, outros testes devem ser realizados de forma a garantir essa informação e, no caso de uma montagem de dois conjuntos, espera-se alcançar um empuxo de aproximadamente 1,4 kg.



FIGURA 14: Motor *Brushless* Emax FC 28-22 Outrunner
Fonte: [14]

Para os motores *brushless*, foi adquirido um conjunto de ESCs *Hobbyking* serie SS HK-HW30A a qual suporta uma carga de 25 A chegando a um pico máximo de 30 A. Pesa por volta de 24 g e passível de usar seu BEC que supre uma carga de até 3 A.

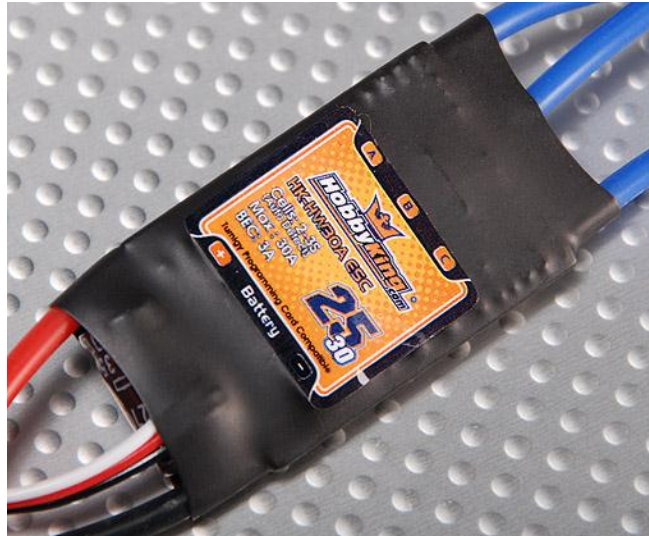


FIGURA 15: ESC Hobbyking Serie SS
Fonte [14]

3.2 Placa de controle

Com o intuito de controlar o conjunto, poderia ser desenvolvida uma interface microcontrolada com acelerômetros e giroscópios para a estabilização, que além dos motores de tração, controlaria os servomotores montados de forma a movimentar um conjunto de lemes para deslocamento horizontal. Entretanto, para agilizar o processo, foi adquirido uma placa controladora “*Multi-Rotor Control Board V2.1*”. Essa interface é baseada no microcontrolador de alta performance e baixo consumo Atmel 8-bit AVR baseado em RISC, a qual combina 16 kB de memória *flash* que pode ser gravada no próprio circuito final (ISP - *In-System Programming*). Possui 1 kB de SRAM, 512 B EEPROM, um conversor A/D de 8 canais/10bit, e *debugWIRE* (protocolo de comunicação serial desenvolvido pela ATMEL para ajudar na resolução de erros de programação) no próprio *chip*. O dispositivo suporta uma taxa média de processamento de 20 MIPS com um *clock* de 20 MHz e opera entre 2,7 a 5,5 volts. Por executar poderosas instruções em um único ciclo de *clock*, o dispositivo alcança taxas médias de processamento de 1 MIPS por MHz, equilibrando consumo de energia e velocidade de processamento [6].

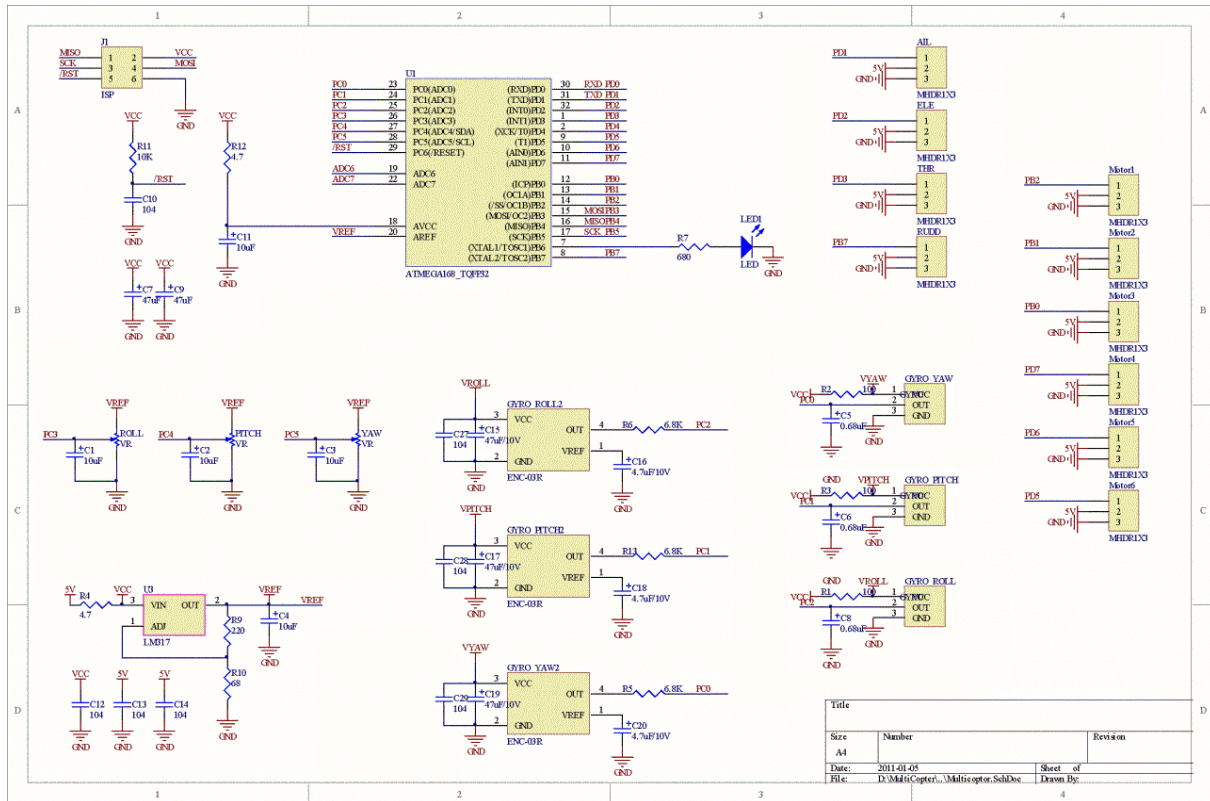


FIGURA 16: Diagrama esquemático. Fonte Própria.

Em geral, a placa controladora de voo é inicialmente dedicada a 6 motores (hexacóptero) e seu propósito é estabilizar a aeronave durante um voo. Para isso, o CI Atmega 168PA deve fazer a leitura de três giroscópios que capturam o deslocamento em seus três eixos de rotação. Então ele processa o sinal de acordo com o *software* instalado e envia o sinal de controle para os ESCs. Esses sinais instruem os ESCs a fazer ajustes finos na velocidade de rotação do motor de forma a estabilizar a aeronave. Ela pesa por volta de 14,5 g.

A placa também tem entradas para usar o sinal de um sistema de rádio (Rx) e, através delas, o microcontrolador varia o sinal ao ESC para induzir um controle de voo manual. Possui três giroscópios para rolagem, arfagem e guinada (também conhecidos por *roll*, *pitch* e *yaw* respectivamente [19]) além de seus controles de sensibilidade.



FIGURA 17: Multi-Rotor Control Board V2.1 Fonte: Foto do Autor

Como o a placa possui a tecnologia ISP, através de um programador que pode ser facilmente adquirido através da Internet, é possível gravar um *firmware* de forma a atender as necessidades do projeto indiferente se estas necessidades foram consideradas em sua idealização.

Os servos adotados foram os Hextronik HTX500 por pesarem por volta de 5 g, produzirem um torque 0,8 kg-cm e velocidade razoável.



FIGURA 18: Denominação dos eixos de uma aeronave.
Fonte: [24]

3.3 Controle

Considerando o risco de que apenas uma hélice pode não ser suficiente para manter a aeronave em voo, a montagem com dois conjuntos de motopropulsores pode ser cômoda. Isso se justifica tanto pela sustentação como para o controle. Utilizando-se do “efeito torque”, é possível fazer o controle da guinada através do movimento de hélices invertidas, ou seja, uma girando em sentido horário e outra em anti-horário proporcionando rotação do eixo z por diferença de giro das hélices e economizando ou simplificando o uso dos lemes.

O firmware deve ser desenvolvido através da plataforma IDE (*Integrated Development Environment* – ambiente de desenvolvimento integrado) AVR Studio 5.0 que suporta estrutura de códigos em formato *Assembly* e *C/C++* disponibilizando ainda ferramenta de simulação e correção de erros.

O programa deverá ser escrito em linguagem C e possuir uma série de rotinas básicas exibidas no fluxograma abaixo.

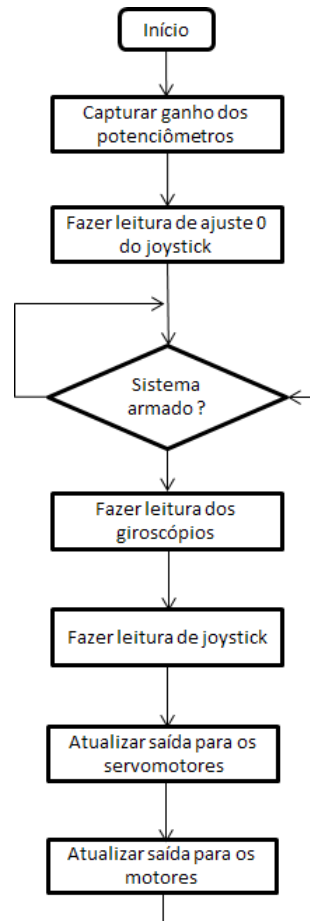


FIGURA 19: Fluxograma básico do controlador
Fonte: Própria

Após um setup inicial, o programa faz a leitura de ganho K_p dos potenciômetros de ajuste através das entradas analógicas do microcontrolador. Então ele determina o ponto centralizado ou ponto zero do manche de controle manual que, na modulação PWM, fica em torno de 1,5 ms. Um led vermelho pisca duas vezes indicando a finalização dessa inicialização.

A princípio o sistema fica em espera (desarmado) se tornando efetivo apenas quando o acelerador é reduzido a menos que 3% e o controle de guinada totalmente virado á direita

por três segundos. O sistema desarma semelhantemente com a guinada à esquerda pelo mesmo período.

Em ciclo infinito, é feita a leitura dos giroscópios amplificada de acordo com a indicação dos potenciômetros para estabilizar o voo, a posição dos manches, então a atualização de movimento dos servos e aceleração/desaceleração dos motores.

O sistema automático é bem simples, com uma combinação predefinida dos manches, o modo aprendido é iniciado guardando o tempo e o estado da posição dos manches até uma finalização também feita por combinações ou um limite de gravação. Então o controlador executa os movimentos repetidamente até uma intervenção do usuário por movimento manual. Também existe a opção da utilização de sensores para a distância (por exemplo, sensores ultrassônicos) para que o robô se locomova como em um labirinto considerando as distâncias para as paredes laterais e frontais, se direcionando para o lado em que o espaço é maior. Dessa maneira o robô pode ficar perambulando em uma área confinada até encontrar uma saída, fazendo as filmagens como uma câmera de segurança.

4 RESULTADOS

O fator principal, considerado em toda a metodologia, certamente é o peso de todo o conjunto que, em sua fase de desenvolvimento torna-se uma verdadeira incógnita. Entretanto, ajustes puderam ser feitos para se aproximar do resultado esperado. Primeiramente as lâminas de alumínio que em sua totalidade, alcançaram mais de 450 g, foram redimensionadas e até mesmo eliminadas ficando por volta de 220 g.

A base de isopor para os servos foi a solução antes prevista para um possível excesso de peso e se mostrou muito eficiente, uma vez que seu peso comparado à estrutura de alumínio se mostrou desprezível. Como desvantagem, não é possível fazer tudo com esse material, sua fragilidade e difícil fixação das diversas peças móveis limitou muito seu uso.

O anel de suporte para os lemes acrescentou por volta de 76 g, totalizando com o conjunto de lemes 165,6 g, resultado esse devido ao uso relativamente inevitável do plástico por sua resistência a movimentos repetitivos. Na tabela 1 é exposto o peso dos elementos do projeto e quantidade.

Tabela 1: Peso das peças e custo do projeto.

Peça	Quantidade	Peso Unitário	Peso Total (gramas)	Valor econômico
Porcas e parafusos	28	1,28	35,84	1,12
Leme menor	2	19,9	39,8	0 ¹
Leme maior	2	24,96	49,92	0 ¹
Anel suporte dos lemes	1	76	76	0 ¹
Suporte de alumínio	1	220	220	0 ¹
Motor	2	39	78	28,24
Helice 10x4,5	2	8,5	17	12,12
Helice 9x4,7	2	0	0	10,87
ESC	2	24	48	36,44
Servomotor	4	5	20	28,20
Placa controladora	1	14,5	14,5	26,24
Receptor Rx	1	13	13	18,14
Transmissor Tx	1	0	0	46,44
Programador AVR	1	0	0	10,00
Bateria	1	200	200	57,55
Fixação da hélice	2	6	12	4,40
Total			824,06	R\$ 278,68 ²

¹ Valor não computado devido a doações de pessoas que apoiaram o projeto.

² A grande maioria dos componentes são importados sendo o dolar cotado a R\$ 2,02 em out. 2012

A união dessas peças por parafusos e porcas somaram 36 g extras resultando em 497,6 g que por si só já é um valor alto considerando a meta de 1/3 de empuxo do conjunto de motores e hélices.

Na tabela foram omitidos a câmera e o circuito controlador de carga da bateria. O motivo dessa ausência se deve à não finalização da etapa de voo e estabilização, essencial para a continuidade do desenvolvimento.

4.1 Testes de funcionamento

Para o motor adotado E-Max 2822, deveria ser esperado um empuxo de 710 g quando acoplado a uma hélice de 10x4,5" mas, nos testes realizados foi alcançado um pico de 500g. Esse índice foi alcançado tendo por referência a mesma corrente de 14,5 A indicada na folha de dados do motor, indicando que a potência dissipada seria a mesma apontada pelo fabricante para seus resultados. Com relação aos servomotores HEXTRONIC, diferentemente dos testes realizados com os motores *brushless*, apresentaram ótima performance com resposta rápida e torque constante. São muito sensíveis, ao ponto de transmitir vibrações mecânicas quando alimentados por um sinal instável ou ruidoso.

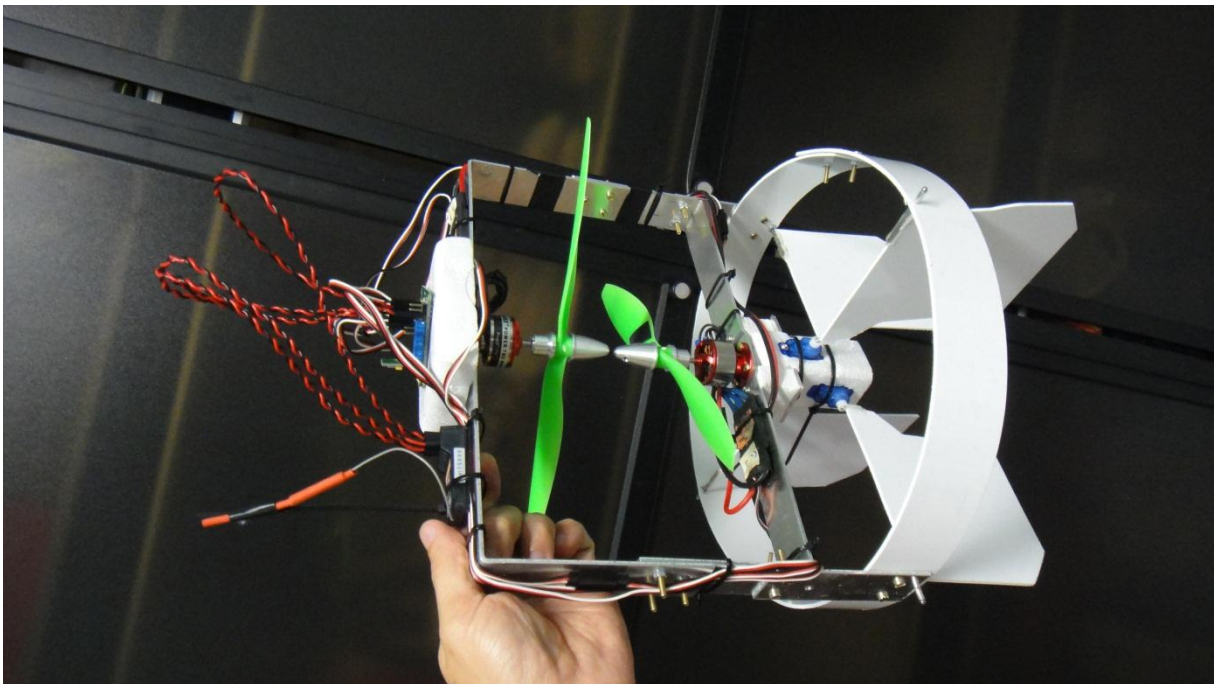


FIGURA 20: Plataforma pronta para testes

Fonte: Própria

4.2 Software

O software foi escrito com uma série de parâmetros de inicialização. Entre eles, a leitura dos sinais de controle remotos providos do receptor montado próximo à placa controladora. Como exposto na seção 2.4.1, o sinal tem uma largura de pulso que varia de 1 a 2 ms. Assim cada pino de entrada foi configurado como interrupção por mudança de estado. Considerando pouca variação final, foi determinado o centro do manche a 1520 ms sendo que, ao início da interrupção, é acionado o temporizador interno que disparará uma nova interrupção em 1 ms. Então uma contagem é feita para se determinar a largura do pulso deste sinal de controle. A diferença entre o valor de centro é adequadamente convertida e enviada para as saídas. Esse procedimento é feito constantemente para todas as quatro entradas de controle.

```

// RX_PITCH
ISR(INT0_vect)
{
    if (RX_PITCH) // rampa de subida
    {
        RxChannel2Start = TCNT1;
    } else {
        // rampa de descida
        if (TIFR1 & (1 << TOV1)){ // correção em caso de estouro de timer
            RxChannel2 = TCNT1 + ~ RxChannel2Start;
            TIFR1 |= (1 << TOV1);
        } else {
            RxChannel2 = TCNT1 - RxChannel2Start;
        }
    }
}

```

FIGURA 21: Código para leitura de sinal do receptor para a rolagem.

Fonte: Própria

Após a inicialização, considerando o comprometimento com a segurança, todo o sistema permanece em repouso até que o manche referente à guinada seja mantido acima de 70% á direita e com a aceleração em menos de 3% por 3 segundos armando o dispositivo. Isso visa evitar uma aceleração abrupta por um erro de posicionamento dos manches durante o ligamento. Ainda que protegidas, se de alguma maneira as hélices entrarem em contato com a pele em média rotação, as mesmas podem provocar fortes ferimentos.

Quando armado, as hélices somente saem de repouso quando o acelerador estiver acima de 10 % de sua capacidade total. Em baixas rotações, os motores ligados não produzem empuxo algum e ainda consomem energia da bateria que poderia ser aproveitada em pleno funcionamento.

```

//--- Limita a baixa rotação ---
if ( ESC_out1 < 10 )   ESC_out1 = 10;           // esse é o nível de idle do motor
if ( ESC_out2 < 10 )   ESC_out2 = 10;

//--- Saída para os ESCs ---
if (RxInColetivo < 1 || !Armed || !GirosCalibrated) // desliga os motores se o acelerador (Coletivo) estiver abaixo de 1%
{
    // ou se os giros não estiverem calibrados
    ESC_out1 = 0;
    ESC_out2 = 0;
    SERVO_out3 = 84;
    SERVO_out4 = 84;
    SERVO_out5 = 84;
    SERVO_out6 = 84;
}

```

FIGURA 22: Código para desligamento em baixa rotação.
Fonte: Própria

Quando armado, o software trata o sistema de malha fechada como se fosse um simples controlador proporcional deixando o controle derivativo próprio pelos giroscópios a cargo deles mesmos, controlando apenas o ganho de suas entradas. Assim é feita a leitura dos ganhos dos giroscópios determinados pela conversão A/D dos níveis de tensão ajustados nos potenciômetros previamente à inicialização, então é amostrado o sinal emitido pelo próprio giroscópio (emitindo 0,67 mV/grau/s para o amostrador de 10 bits com tensão de referência de 1,6 V permitindo um degrau de variação de 1,5 mV) e então todas essas variáveis são multiplicadas por uma constante K prevista no próprio código. Feitas as devidas conversões, o produto é somado ao movimento do manche e então enviado à rotina de controle do motor para atualizar a saída.

```

//--- (Add) Ajusta a saída do giros_ de rolagem para os servos
if (Config.Roll_Giros_Direction == GIROS_NORMAL) {
    RxInRoll += giros_ADC[ROLL];
} else {
    RxInRoll -= giros_ADC[ROLL];
}
RxInRoll -= SaidaServoEmBaixa[ROLL];
RxInRoll = (RxInRoll >> 3);
SaidaServoEmBaixa[ROLL] += RxInRoll;

SERVO_out4 += SaidaServoEmBaixa[ROLL];
SERVO_out6 -= SaidaServoEmBaixa[ROLL];

```

FIGURA 23: Código para o controle dos lemes de rolagem.
Fonte: Própria

Esse procedimento é feito para os eixos de rolagem e arfagem e atualizado no movimento dos servomotores. Para a guinada, a compensação e controle são feitos através do acréscimo ou decréscimo da velocidade de um dos motores que giram em sentidos diferentes. Assim, através da diferença de efeito torque de cada motor, é possível o controle de direção e também a estabilização da aeronave.

```

//--- Calcula a saída de guinada (yaw) do giros_ ---
giros_ADC[YAW] = (giros_ADC[YAW] * Ganho_em[YAW] * MULTIPLIER_YAW_GAIN);
giros_ADC[YAW] /= DIVIDER_ADC_GAIN;
RxInYaw = (RxInYaw * Manche_Yaw_Ganho / 100); // Controle através do Manche_ %

if (Config.Yaw_Giros_Direction == GIROS_NORMAL) {
    RxInYaw += giros_ADC[YAW];
} else {
    RxInYaw -= giros_ADC[YAW];
}

//--- (Add) Ajusta saída do giros_ de guinada aos motores
ESC_out1 -= RxInYaw;
ESC_out2 += RxInYaw;

```

FIGURA 24: Código para controle de guinada
Fonte: Própria

Os controles automatizados não foram implementados no código devido a não haver total conhecimento de como todo mecanismo e o seu controle eletrônico iriam interagir. Assim, em caso de um acionamento automático em um sistema que não se alcançou uma robustez no nível de ser confiável para abandonar o controle manual, além da grande chance de se obter resultados ruins, pode se revelar uma complicação ao ter que reescrever em meio a um código extenso ou mesmo representar simples perda de tempo.

Simulações feitas com a aeronave apoiada manualmente serviram para a verificação da eficácia do programa e teste de variações com os parâmetros de controle, preparando o sistema para voo de forma bastante satisfatória.

5 CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi a construção de um modelo voador estável o suficiente para a captação de imagens. Entretanto, devido a problemas essencialmente mecânicos, a primeira etapa do projeto que serviria de pilar para todas as outras ficou severamente comprometida. Esses problemas, ligados ao peso total e aliado à possível falha na especificação fornecida pelo fabricante ou mesmo um defeito de fabricação, determinaram a impossibilidade de a aeronave decolar e, ainda que conseguisse levantar voo, seria esperado que dessa maneira sua estabilidade ou habilidade para o controle estaria comprometida. Todavia, aspectos positivos podem ser retirados da complicação encontrada.

Um deles é que mesmo sem a demonstração clara de funcionamento, é ainda possível realizar uma boa quantidade de testes relacionados ao comportamento do circuito de controle e inferir se valores e estruturas do código são adequados para esse tipo de aeronave, de forma a servir de plataforma para novos investimentos.

Outro aspecto positivo é o conhecimento de montagem e aplicação dos materiais adotados direcionando a uma utilização mais eficiente, tendo em vista que o formato e a quantidade dos mesmos já se mostraram ineficientes sendo evitados em futuras reestruturações.

O custo final do projeto, exposto na tabela 1, ficou relativamente baixo devido à importação direta de peças do mercado chinês, que é o principal fabricante de componentes para aeromodelismo na atualidade. O valor total em dólares americanos ficou em \$137,94 que deve ser considerado para novos protótipos em caso de variações de câmbio.

Finalmente, ficando em aberto para futuras melhorias, a substituição do alumínio, que ainda conforme a Tabela 1 é o material mais pesado e que pode ser trocado por outros como o balsa ou ainda a fibra de vidro. A substituição do conjunto de motopropulsão por acoplamento direto por um feito por redução e se utilizando de hélices de maior passo, possibilitando a utilização de motores menores e que consumam menos, assim reduzindo a bateria e seu peso, e por último a etapa de filmagem que não ficou concluída neste protótipo.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ANALOG DEVICES **ADXRS150 Datasheet**. Disponível em: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXRS150.pdf Acesso em: 23 mar. 2012.

[2] STMICROELECTRONICS **LPY510AL** Disponível em: http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00237200.pdf Acesso em 23 mar. 2012

[3] GEOMUNDO **A Força de Coriolis – O Efeito de Coriolis no planeta Terra** Disponível em: <http://www.geomundo.com.br/meio-ambiente-40137.htm> Acesso em 23 mar. 2012.

[4] REBOUL, J.M.Q. **Evaluación de un Giróscopo MEMS en un Péndulo: Microsistemas**. Departamento de Engenharia Eletrônica – Universidade de Sevilha 2010-2011 Disponível em: http://www.gte.us.es/ASIGN/SEA/pracs/eval_giro_sea_2010-2011.pdf Acesso em: 01 abr. 2012

[5] SOUSA, D.J. **Desbravando o Pic** 12ª edição São Paulo: Érica 2011 267 p

[6] ATMEL ATmega168. Disponível em: http://www.atmel.com/devices/atmega_168.aspx Acesso em 06 maio 2012

[7] MILLER, T.J.E. **Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives** Glasgow-UK: Clarendon Press - Oxford 1989 p. 17-19 e 149-150

[8] ScratchRC **RC Electronics & Correct Propeller Selection Explained**. Disponível em: <http://www.scratchrc.com/RC-Electronics-Explained.html> Acesso em 26 maio 2012

[9] KOSOW, I. L. Máquinas Elétricas e Transformadores Vol. 1 tradução de Felipe Luiz Ribeiro Daiello e Percy Antônio Pinto Soares 4ª Edição. Rio de Janeiro: Globo p. 445

[10] RODRIGUES, J.C. Aeromodelismo Teórico e Prático - Hélices 2004/2005, Clube de Aeromodelismo de Lisboa versão digital. Disponível em: http://club_eaerolisboa.no.sapo.pt Acesso em 03 jun. 2012.

[11] PCBheaven **How Rc Servos Works** Disponível em: http://pcbheaven.com/wikispages/How_RC_Servos_Works/ Acesso em: 26 maio 2012

[12] Stefanv.com **An Electronic Speed Control Primer** Disponível em: <http://www.stefanv.com/electronics/escprimer.html> Acesso em: 03 jun. 2012

[13] Robots Speed Controllers Disponível em : [http://homepages.which.net/~paul.hills/Speed Control/SpeedControllersBody.html](http://homepages.which.net/~paul.hills/Speed%20Control/SpeedControllersBody.html) Acesso em: 26 maio 2012.

[14] Hobbyking Multi-Rotors & Parts Disponível em: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_listCategoriesAndProducts.asp?idCategory=501&pc= Acesso em: 02 jun. 2012.

[15] JRC NJM2611 Servo Motor Controller Disponível em: http://semicon.njr.co.jp/eng/product/motor_ic/dc_brush/NJM2611.html Acesso em: 07 jun. 2012

[16] Microchip RC Model Aircraft Motor Control – AN847 Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00847a.pdf> Acesso em: 06 jun. 2012

[17] Dallas Personal Robotics Group A SIMPLE PWM CIRCUIT BASED ON THE 555 TIMER. Disponível em: <http://www.dprg.org/tutorials/2005-11a/index.html>. Acesso em 31 mar. 2012

[18] Microchip Brushless DC Motor Control Made Easy – AN857 Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00857a.pdf> Acesso em: 06 jun. 2012

[19] JUNIOR, J.A.F. **Simulação e Implementação em Tempo Real de Sistemas de Navegação Inercial Integrados INS/GPS** Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2009, p. 24-26

[20] JOHNSON, W. **Helicopter Theory - Helicopter Configuration** New York: Dover Publications Inc. 1994 p. 9

[21] Murata **Angular Rate Sensors (ENC Series)**. Disponível em: <http://www.murata.com/products/catalog/pdf/s42e.pdf> Acesso em: 08 jun. 2012

[22] KLAPTOCZ, Adam et al. **An Indoor Flying Platform With Collision Robustness And Self-Recovery**. Disponível em: <http://infoscience.epfl.ch/record/142983> Acesso em: 14 ago. 2012.

[23] FEDERAÇÃO PORTUGUESA DE AEROMODELISMO Curso de Técnicos de Nível 1 - **7. Motores Eléctricos e Baterias** Disponível em: <http://www.fpam.pt/Nacional/Formacao/TecNiv1/tn1007MotoresElectricosBaterias.pdf> Acesso em: 03 nov. 2012.

[24] GLINDA.MULTIPLY **Partes da Aeronave** Disponível em: <http://glinda.multiply.com/journal/item/39/39> Acesso em: 13 jun. 2012.

[25] MR.ROBOT.COM **Exploded diagram of a servo & connection** info. Disponível em: <http://www.mrrobot.com/images/ms455dgm.gif> Acesso em: 13 jun. 2012.

ANEXOS

ANEXO A – folha de dados do motor

EMAX Brushless Motors

See – www.emax.motordiy.com

Product Range and Specifications-



EMAX BL1812 / BL1806

Very Lightweight - Ideal for Indoor Foams :-

BL1812 – Weight: 28g (Including the firewall), KV=1800				
Battery (LiPo)	Current	Prop	Thrust	rpm
7.4V	10A	9 x 4.5	220 g	
11.1V	13A	10 X 4.7	380 g	

BL1806 – Weight: 18g (Including the firewall), KV=1650				
Battery (LiPo)	Current	Prop	Thrust	rpm
7.4V	6.0 A	7x 5	180 g	6750
11.1V	10 A	7 X 5	240 g	7550



EMAX CF2822 / 2212

Very high power delivered by these small and robust, light weight (39g) brushless motors with rotating case suitable for all models of 300-400 size . the EMAX CF2822/CF2812 motors offer extremely high efficiency and high load capability for their weight. EMAX motors with the high quality of manufacturing, reliability and performance are the best outrunners available in the market.



Model	Cell Count	RPM/V Prop	RPM	Current	Thrust
CF2822	3S	10X5	7100	14.5A	710g/1.5lb.
		10X4.7(SLOW)	6100	14.5A	745g/1.64
CF2212	3S	7X4	12250	10.5A	580g/1.27lb
		7X6	11000	15.5A	730g/1.61lb

Specification	
No. Of cells	2-3 Li-Poly
RPM/V	1200/1534 RMP/V
±Max. efficiency	82%
Max. efficiency current	7 -16 A (>75%)
No load current / 10 V	0.9 A
Current capacity	16 A/60 s
Internal Resistance	150 mohm
Stator Dimensions	22x10 mm
Shaft diameter	3 mm
Weight	39 g
Recommended model weight	200 -600 g
Recommended prop without gearbox	APC 7X4 APC 8X3.8 APC 9X4.5 APC 10X5