

Bruno Pinho, Danilo Luvizotto & Pedro Nariyoshi

***Hipérion - Plataforma Versátil de Desenvolvimento
Multirrotor***

São Paulo - SP, Brasil

30 de setembro de 2011

Bruno Pinho, Danilo Luvizotto & Pedro Nariyoshi

***Hipérion - Plataforma Versátil de Desenvolvimento
Multirrotor***

Orientador:
Marcelo Knörich Zuffo

Co-orientador:
Sérgio Takeo Kofuji

DEPARTAMENTO DE SISTEMAS ELETRÔNICOS
ESCOLA POLITÉCNICA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

São Paulo - SP, Brasil

30 de setembro de 2011

Resumo

Este projeto tem como objetivo propor e implementar uma plataforma de desenvolvimento voadora. O intuito é criar uma base de conhecimento para que projetos posteriores possam se beneficiar do conhecimento adquirido. O projeto será implementado em camadas hierárquicas, tal como o modelo OSI. Esta abstração torna o projeto mais versátil e expansível.

Palavras chave: *modular, abstração, voo, brushless, multirrotores, plataformas embarcadas, sistemas sem fio, telemetria, controle não linear, autônomo, li-po, sistemas eletrônicos*

Lista de Termos

A lista a seguir contém as abreviaturas e termos utilizados nesta monografia. As abreviaturas podem, no entanto, apresentar outros significados em outros contextos.

API (*Application Programming Interface*): Interface de Programação de Aplicativo, um conjunto de normas que permite uma interface entre dois aplicativos ou um aplicativo e um plugin.

ARM (*Advanced Risc Machine*): é uma arquitetura de processadores de 32-bits RISC.

Brushless, Motor : um motor que não utiliza uma escova para a comutação. Esses motores necessitam de um controlador eletrônico para gerar a comutação.

ESC (*Electronic Speed Controller*): Controlador de Velocidade Eletrônico, é um dispositivo que faz a comutação das fases num motor sem escova.

GNU/Linux: é um sistema operacional que utiliza as ferramentas do projeto GNU e o núcleo Linux.

GPS (*Global Positioning System*) : sistema utilizado para obter informações sobre tempo e posição de um objeto, utilizando 4 ou mais satélites.

Inrunner: um motor cujo estator se encontra no exterior, e o rotor do lado interior.

LSI: Laboratório de Sistemas Integráveis, parte da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MVA: Micro-Veículo Aéreo, é uma classe de VANTs de tamanho reduzido.

Multirrotor: um objeto voador dotado de duas ou mais hélices e que se utiliza do empuxo causado por essas para o voo.

OSI, Modelo: uma arquitetura que divide redes de computadores em diversas camadas, utilizada para modelar e abstrair as redes.

Outrunner: um motor cujo estator se encontra no exterior, e o rotor no interior.

PID, Controlador: um controlador que emprega um algoritmo proporcional, integrativo e diferencial ao erro para controle de processos.

RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) : é uma estratégia para desenvolvimento de processadores que se restringe as instruções a um grupo reduzido de instruções simples.

RTOS (*Real-Time Operating System*) : Sistema operacional de Tempo-Real.

SDK (*Software Development Kit*): Kit de Desenvolvimento de Software é um conjunto de aplicativos, documentação e exemplos para auxiliar e/ou permitir o desenvolvimento de softwares

para determinada plataforma.

VANT: Veículo Aéreo Não-Tripulado, controlado remotamente ou autônomo.

Lista de Figuras

2.1	Modelo de abstração	p. 14
3.1	Funcionamento do método <i>sensorless</i>	p. 21
3.2	Máquina de estados do laço principal do programa do ESC	p. 21
3.3	Fluxograma de interrupções	p. 22
3.4	Condicionador de sinais	p. 24
3.5	Modelo da Bateria	p. 25
5.1	Carta de Gantt do 1o. Semestre	p. 34
5.2	Carta de Gantt do 2o. Semestre	p. 34
9.1	Arquitetura simplificada	p. 43
9.2	Funcionamento do ESC	p. 44
9.3	Funcionamento da camada de estabilização	p. 46
9.4	Funcionamento da camada de navegação	p. 48

Sumário

I	Primeira parte - Relatório do projeto	
1	Introdução	p. 10
1.1	Contextualização e Motivação	p. 11
1.2	Objetivos	p. 11
1.3	Organização do Trabalho	p. 12
2	Modelo da Arquitetura	p. 14
2.1	Considerações Iniciais	p. 14
2.2	Camada Motores	p. 15
2.3	Camada Periféricos e Controle de Vôo	p. 15
2.4	Camada Controle de Navegação	p. 15
2.5	Camada Periféricos de Navegação	p. 16
3	Referencial Teórico	p. 18
3.1	Considerações Iniciais	p. 18
3.2	Motores <i>Brushless</i>	p. 18
3.3	Controlador de Velocidade Eletrônico	p. 19
3.3.1	Sincronização <i>sensorless</i>	p. 20
3.3.2	Máquina de estados	p. 20
3.3.3	Partida	p. 23
3.3.4	Condicionamento dos sinais	p. 23

3.4	Bateria de lítio-polímero	p. 24
3.4.1	Química	p. 25
3.4.2	Modelo	p. 25
3.4.3	Valores de referência	p. 26
3.5	Controle	p. 27
3.6	Considerações finais	p. 27
4	Desenvolvimento do Trabalho	p. 28
4.1	Considerações Iniciais	p. 28
4.2	Sobre a equipe	p. 28
4.3	Problema a ser resolvido	p. 29
4.4	Motivações e Justificativas Técnicas	p. 29
4.5	Descrição das Atividades a serem Realizadas	p. 30
4.6	Metas	p. 32
4.7	Dificuldades e Limitações	p. 33
5	Cronograma	p. 34
6	Análise de Risco	p. 35
7	Conclusões e trabalhos futuros	p. 36
7.1	Fase do projeto	p. 36
7.2	Considerações sobre o Curso de Graduação	p. 37
	Referências	p. 38
8	Apêndice A - Comparativos entre outros multirrotores	p. 40

9	Arquitetura	p. 42
9.1	Camada de excitação dos motores	p. 42
9.1.1	Descrição	p. 42
9.1.2	Componentes	p. 43
9.1.3	Parâmetros de entrada e saída	p. 43
9.1.4	Comportamento	p. 44
9.2	Camada de estabilização do vôo	p. 44
9.2.1	Descrição	p. 44
9.2.2	Componentes	p. 45
9.2.3	Parâmetros de entrada e saída	p. 45
9.2.4	Comportamento	p. 45
9.3	Camada de navegação	p. 46
9.3.1	Descrição	p. 46
9.3.2	Componentes	p. 46
9.3.3	Parâmetros de entrada e saída	p. 46
9.4	Camada de periféricos	p. 47
9.4.1	Descrição	p. 47
9.4.2	Componentes	p. 48
9.4.3	Parâmetros de entrada e saída	p. 48
9.4.4	Comportamento	p. 49

Parte I

Primeira parte - Relatório do projeto

1 Introdução

*“Sobre hipérion, nos é dito que foi o primeiro a entender,
através de atenção diligente e observação,
os movimentos da lua e de outros corpos celestes, (...)
foi ele também aquele que tornou esses fatos conhecidos;
e por esta razão ele foi chamado de pai desses corpos(...)”*

Diodoro da Sicília (5.67.1)

1.1 Contextualização e Motivação

A evolução da tecnologia ao longo da história permitiu ao homem desenvolver as mais diversas ferramentas, desde as que o auxiliam no trabalho até os dispositivos dedicados ao lazer. A depender do tamanho desses objetos, seus transportes podem ser feitos de diversas maneiras; pequenos objetos podem ser carregados, mas, para objetos um pouco maiores, isso já pode não ser possível ou conveniente, de forma que pode ser necessário incorporar a eles partes dedicadas a facilitar a sua movimentação.

Dentre as possíveis soluções para a movimentação de ferramentas de pequeno porte, uma solução recente é o uso de Micro-Veículos Aéreos (MVAs). Um MVA possui algumas vantagens em relação aos outros meios, dentre as quais pode-se destacar a versatilidade, já que o movimento não depende do terreno e, por isso, ele passa por cima de obstáculos que são de difícil transposição para pernas ou rodas. Além disso, os MVAs tem um grau de liberdade adicional, já que podem variar a sua altura, conseguindo chegar a posições impossíveis para veículos terrestres ou aquáticos.

Essa última característica torna o MVA ótimo para uma grande variedade de usos nos quais são desejadas agilidade e mobilidade. É o caso de câmeras de vídeo controladas à distância, que podem ser usadas, por exemplo, para a filmagem de eventos esportivos ou para a imersão em realidade aumentada.

O desenvolvimento científico tem possibilitado sistemas embarcados cada vez mais potentes, e isto tem aumentado o interesse em MVAs, tanto para pesquisas, quanto para aplicações profissionais. No entanto, não há uma plataforma de desenvolvimento, apenas produtos comerciais com objetivos específicos. Dessa forma que é necessário primeiro o desenvolvimento de um sistema multirrotor para que então seja iniciada a pesquisa.

1.2 Objetivos

O projeto visa a implementação de um multirrotor modular expansível para uso como uma plataforma de desenvolvimento para aplicações futuras e implementação de uma aplicação que demonstre o potencial do protótipo gerado. A ênfase do projeto é a arquitetura modular e discreta do multirrotor, que permitirá que aplicações e sensores sejam adicionados ou removidos com o mínimo de alterações tanto no software quanto no hardware desenvolvidos. Para que isso seja possível, serão definidos os requisitos dos módulos de aplicação, seus protocolos de comunicação e o barramento onde eles serão ligados, dentre outros, além das APIs a serem

geradas. Será necessária, também, uma documentação apropriada que permita que o usuário compreenda e utilize todos os recursos sem dificuldades.

O sistema será construído em camadas, semelhante ao modelo OSI de camadas. Um diagrama do sistema pode ser encontrado no anexo 1. O módulo de controle cuidará dos algoritmos de voo como estabilidade, PID, ele recebe o sinal dos sensores mais essenciais ao voo e recebe também comandos vindos do módulo de navegação.

O módulo de navegação se encarrega de utilizar os sensores disponíveis para decidir qual rota tomar, ele recebe sinais do controle remoto, além de estar ligado aos sensores não essenciais através do barramento, esses sensores são utilizados para fazer correções na rota.

É possível ainda expandir o projeto através de um módulo de aplicações. Este seria ligado ao barramento como um periférico comum, mas possuiria um processador mais poderoso e lidaria com sinais de som e vídeo. Ele também poderia ser responsável pelos cálculos mais custosos e por carregar o programa que o multirrotor executará no modo autônomo. Por estar ligado no barramento, ele também é capaz de se comunicar com os outros periféricos para processar estes dados também.

O protótipo final deverá possuir capacidades suficientes para o seu uso como uma plataforma de desenvolvimento. Essas capacidades incluem, mas não se limitam a:

- Capacidade de voo estável;
- movimentação em 3 eixos e rotação em torno do eixo vertical;
- aferição e envio de dados dos sensores.

A navegação poderá ser de duas formas. O modo manual, onde o multirrotor é controlado remotamente pelo usuário. E o modo semi-autônomo, que utiliza rotas pré-definidas, guiando-se pelo GPS, incluindo a funcionalidade de voltar ao ponto de origem caso seja perdida a conexão com o controle manual.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho possui mais 8 capítulos, além dos anexos, referências e bibliografias. Nos capítulos 2 e 3 serão apresentados os principais elementos tecnológicos e teóricos do projeto. O desenvolvimento do trabalho será apresentado no capítulo 4, no qual serão mostrados as competências e habilidades do grupo, metodologia e objetivos do projeto, descrição das atividades,

dificuldades e limitações encontradas. Nos capítulos 5, 6, 7 e 8 serão apresentados os tópicos relacionados ao orçamento do projeto, cronogramas, riscos e gerência de projeto. Para finalizar, o capítulo 9 concluirá o trabalho, apresentado uma síntese de tudo que foi visto e, neste capítulo, também serão mostrados os resultados obtidos. Nas referências, bibliografias e nos anexos serão apresentados complementos e fontes de informações relevantes ao projeto.

2 Modelo da Arquitetura

2.1 Considerações Iniciais

Uma parte importante do projeto Hipérion é a sua arquitetura de hardware e software. Foi escolhido uma arquitetura modular para hardware e para software. A idéia será separar fisicamente e funcionalmente os dispositivos eletrônicos que irão compor o sistema embarcado da VANT em vários módulos eletrônicos inteligentes independentes. Os módulos serão inteligentes porque eles deverão processar as informações obtidas do meio externo (no caso dos sensores) e também processar as informações internas (passagem de parâmetros e mensagens de *feedback*). Tais módulos eletrônicos se comunicarão através de interfaces pré-definidas, seguindo uma hierarquia também pré-definida.

A figura 2.1 mostra de forma simplificada a arquitetura de hardware do VANT.

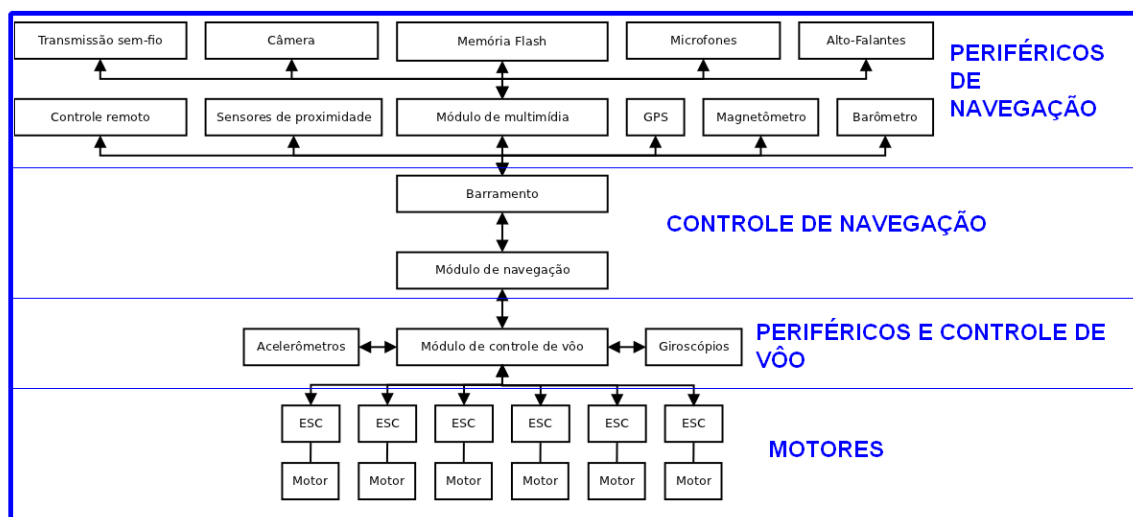


Figura 2.1: Diagrama relacionando as camadas de abstração com o Hardware

As camadas principais são:

1. Motores;

2. periféricos e Controle de Vôo;
3. controle de Navegação;
4. periféricos de Navegação.

2.2 Camada Motores

A camada Motores será composta pelos motores *brushless*, que serão responsáveis pelas manobras da aeronave, e pelos ESCs, que serão responsáveis pelo controle dos motores *brushless*. Tal camada receberá comandos da camada superior (Periféricos e Controle de Vôo), tais como: aumentar/diminuir rotação dos motores, desligar motores ou ligar motores. Além disso, esta camada também deverá enviar mensagens de feedback para sua camada superior.

2.3 Camada Periféricos e Controle de Vôo

A camada Periféricos e Controle de Vôo será composta pelos módulos: acelerômetros, giroscópio e controle de vôo. Os módulos desta camada serão responsáveis pela estabilidade da aeronave durante as manobras de vôo (subir, descer, girar, parar, etc) e durante o repouso também.

O módulo Controle de Vôo receberá comandos de navegação do módulo superior (Navegação) e deverá executar a manobra definida pelo respectivo comando. Para isso, um algoritmo de controle, inserido no módulo controle de vôo, deverá ler os valores das variáveis de vôo oriundas dos módulos acelerômetros e giroscópio e atuar nos motores de vôo, através do envio de comandos para a camada inferior (Motores de Vôo). A camada também deverá manter a estabilidade da aeronave nas situações de ausência de comandos, que poderá corresponder a uma situação de repouso ou de emergência. Além disso, mensagens de feedback também serão enviadas para sua camada superior (Controle de Navegação).

2.4 Camada Controle de Navegação

A camada Controle de Navegação será composta por um único módulo: módulo de Navegação. Neste módulo estarão presentes as várias rotinas de navegação que dependerão das aplicações pretendidas para a aeronave, como por exemplo: navegação manual, navegação por

GPS, etc. Esta camada receberá comandos, valores e parâmetros dos periféricos da camada superior (Periféricos de Navegação), que poderão ser:

- Altura, através do módulo barômetro;
- posição geográfica, através do módulo GPS;
- posição em relação a um alv,; através do módulo multimídia;
- comandos manuais de navegação, através do módulo controle remoto.

2.5 Camada Periféricos de Navegação

A camada Periféricos de Navegação será composta por módulos que auxiliarão um determinado tipo de navegação. Para este projeto, pretende-se criar os seguintes tipos de navegação:

- Navegação manual;
- navegação por GPS;

A navegação manual consistirá em pilotar a aeronave através de um rádio controle. Para tanto, um módulo de controle remoto será inserido e irá criar um link de comunicação remoto entre a aeronave e o usuário que a está pilotando.

A navegação por GPS consistirá em fazer a aeronave seguir um trajeto determinado, usando informações oriundas do módulo GPS e processadas pelo módulo de navegação. Além disso, o módulo GPS também servirá como um instrumento de localização para a aeronave.

A comunicação entre os módulos será realizada através de interfaces I^2C e SPI. A interface SPI será utilizada para ligar os módulos acelerômetros e giroscópio ao módulo controle de vôo. Apesar desta interface ser destinada a topologia ponto a ponto, é possível ligar mais de dois periféricos através desta interface (SIEMEINTCOSKI; WACKERHAGEN, 2008).

A interface I^2C ligará os módulos ESC ao módulo controle de vôo. Este tipo de interface funcionará ligando vários módulos através de um único barramento (ELETRÔNICA, 2009). , ligará os módulos da camada Periféricos de Navegação ao módulo de Navegação da camada Controle de Navegação. De forma semelhante à interface I^2C , a interface CAN também ligará os módulos através de um barramento. As especificações desta interface encontram-se em Inc. (2002).

Nos módulos Controle de Vôo e controle de Navegação serão utilizados os microcontroladores ARM, devido a sua boa relação custo-benefício em termos de periféricos presentes, processamento e memória de programa.

Assim como o hardware, o software também será modular. As rotinas do software embarcado do VANT também estarão fisicamente separadas, pois estarão contidas em seus respectivos módulos e seguiram uma hierarquia pré-definida. Dessa forma, o desenvolvimento do software embarcado do VANT seguirá uma metodologia de programação semelhante à programação orientada a objetos.

Um sistema operacional de tempo real (RTOS) será embarcado nos módulos controle de vôo e no módulo controle de navegação. Optou-se pelo uso de um RTOS, porque pretende-se criar uma camada de software que separe as rotinas de controle e navegação das rotinas de acesso ao hardware, como proposto em Cunha (2008) .

3 *Referencial Teórico*

“Navegar é preciso, viver não é preciso.”

Luís de Camões

3.1 **Considerações Iniciais**

Neste capítulo serão apresentados os conceitos e a terminologia básicos da área do projeto e a bibliografia do trabalho. O conteúdo deste relatório é suficiente para o entendimento do funcionamento deste projeto. Para uma visão mais detalhada sobre os diferentes temas abordados neste capítulo, recomenda-se a leitura da bibliografia citada.

3.2 **Motores *Brushless***

A escolha dos motores é essencial para o projeto, pois fornecem a propulsão necessária para o voo. Há diversos tipos de motores disponíveis no mercado, síncronos ou assíncronos, de corrente contínua ou alternada etc.

Como o veículo armazena sua energia em uma bateria, foram escolhidos motores de de corrente contínua, já que isto elimina a necessidade de inversores complexos, permitindo o uso de circuitos chaveadores mais simples.

A maioria dos motores de corrente contínua utilizam um dispositivo denominado escova para chavear seus enrolamentos. Este é composto por fios dispostos de forma fazer contato com os enrolamentos do rotor, enquanto este gira. Apesar de ser uma solução efetiva para diversas aplicações, a escova impõe diversas limitações como:

- faiscamento;
- ruído acústico;

- ruído elétrico;
- desgaste mecânico devido ao atrito;
- menor eficiência;
- menor relação potência \times tamanho;
- maior velocidade angular.

Há motores de corrente contínua que não utilizam escovar para fazer o chaveamento, estes são denominados *brushless* (“sem escova” em inglês). Estes motores são semelhantes em construção síncronos trifásicos com ímãs permanentes, mas otimizados para operação em corrente contínua.

Por não possuir a escova para fazer o chaveamento entre os enrolamentos, é necessário um circuito eletrônico que execute a mesma função. Apesar de aumentar a complexidade do sistema, multirrotores necessitam de motores com rotações elevadas, o que impossibilita o uso da escova. Além disto, como os multirrotores são alimentados por uma bateria, é interessante que o sistema seja o mais eficiente o possível, para aumentar o tempo de vôo.

Estes motores geralmente possuem 3 enrolamentos que controlam o campo no estator, enquanto o rotor utiliza ímãs permanentes. Isto elimina a necessidade da escova para gerar o campo no rotor.

Hoje em dia, eles são utilizados em uma grande variedade de aplicações. Desde pequenos motores encontrados em ventoinhas de computador, a motores maiores encontrados em veículos, como o Segway (Segway Inc., 2001).

Para mais informações, consultar (ATMEL CORPORATION, 2005a).

3.3 Controlador de Velocidade Eletrônico

O controlador de velocidade, também chamado de *ESC* é um circuito eletrônico utilizado para substituir os comutadores mecânicos. Seu papel é chavear os enrolamentos de forma síncrona com o motor até que este atinja a velocidade desejada.

3.3.1 Sincronização *sensorless*

Como é necessário que o controlador saiba a posição do rotor para poder chaveá-lo, é necessário que haja algum tipo de realimentação entre o motor e o ESC. Alguns motores empregam sensores de posição Hall ou codificadores rotatórios como forma de realimentação. No entanto isto aumenta ainda mais o custo e a complexidade do sistema. Há uma maneira de se obter a informação sobre a posição do motor sem a necessidade de sensores externos que utiliza as tensões no próprio enrolamento para definir as posições.

Controladores que utilizam esta técnica são chamados de *sensorless* (do inglês sem sensor), apesar do nome, é de fato um sistema dotado de elementos sensores. O funcionamento deles é análogo ao funcionamento de um gerador síncrono. Ao passar pelos enrolamentos, o campo magnético do rotor induz tensões nos enrolamentos. A tensão induzida é proporcional à frequência angular e sua fase indica a posição do rotor. Durante o chaveamento, apenas 2 enrolamentos estão conectados (um ao V_{SS} e outro ao V_{DD} , enquanto um deles está “flutuando”, a tensão neste enrolamento é utilizada para indicar a fase do rotor.

Diferentemente das máquinas síncronas comuns, os motores brushless são projetados para que a tensão induzida tenha formato trapezoidal, isto facilita a detecção da posição do rotor. Quando o motor atinge $(V_{DD} + V_{SS})/2$ sabe-se que o campo magnético do rotor está alinhado com o campo magnético do enrolamento sendo analisado. Este evento é denominado cruzamento de zero (CZ), pois caso a fonte seja simétrica $V_{DD} = -V_{SS}$. Após o cruzamento deste ponto, o ESC inicia um *timer* que, quando expira, chaveia o circuito.

A figura 3.1 demonstra o funcionamento do método:

3.3.2 Máquina de estados

Para descrever o funcionamento do programa (baseado em (ATMEL CORPORATION, 2005b)) pode-se utilizar a máquina de estados representada na figura 3.2.

Na inicialização dos periféricos, inicia-se os conversores A/D, a comunicação I^2C , os *timers*, as portas e comparadores.

A partida do motor é constituída pelo carregamento da sequência de chaveamento, do chaveamento em malha aberta e da inicialização do *timer Watchdog*. Este *timer* é utilizado para detectar travamentos no motor. Se nenhuma comutação é executada dentro de um intervalo pré-determinado, o controlador entende que o motor está parado e tenta dar a partida novamente.

As tarefas não relacionadas às interrupções envolvem principalmente a comunicação e ou-

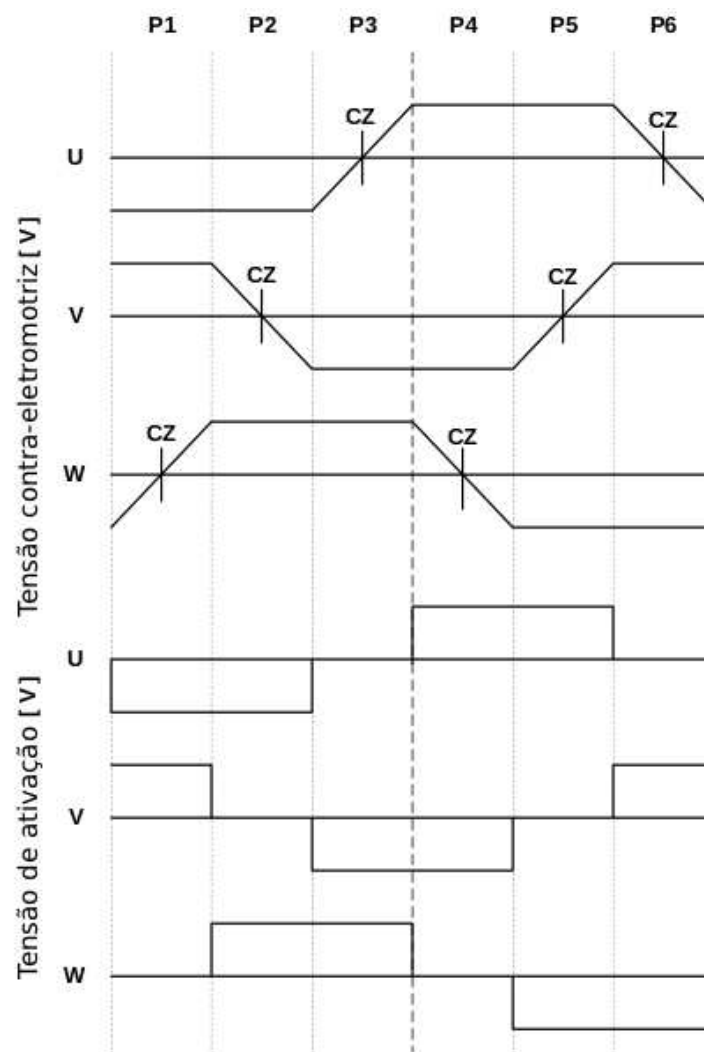
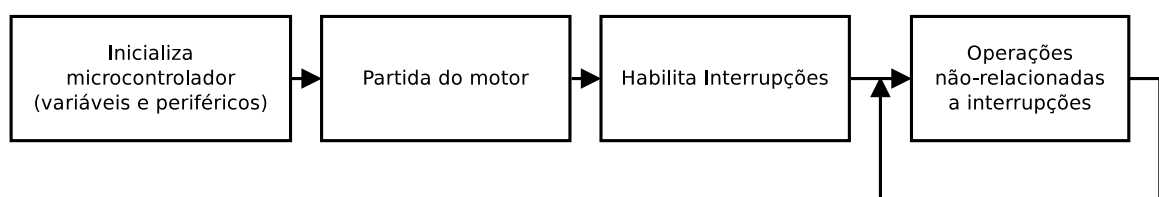
Figura 3.1: Funcionamento do método *sensorless*.

Figura 3.2: Máquina de estados do laço principal do programa do ESC

tras funções que se podem ser adicionadas ao código.

As tarefas de chaveamento serão tratadas por interrupções, para que o chaveamento ocorra sincronizadamente com a movimentação do rotor.

Durante a comutação, o sinal lido pelo conversor A/D é muito ruidoso, o que aumenta substancialmente a chance de alarme de CZ falso. Adiciona-se um *timer de Hold-Off* para que a leitura do conversor A/D só ocorra após o ruído de comutação desvanecer. Após a interrupção

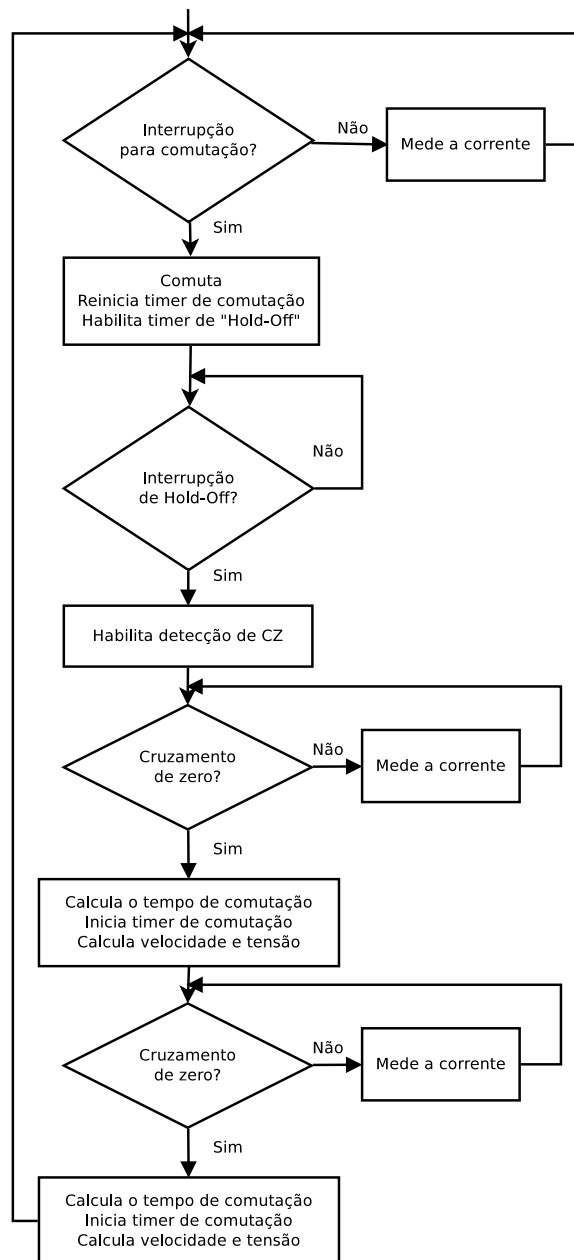


Figura 3.3: Fluxograma de interrupções

de *Hold-Off*, a leitura do conversor A/D é ativada.

As leituras de corrente e da tensão contra-eletromotriz são feitas quando há transbordo no timer do PWM, também para evitar interferência nas medidas.

Além destas medidas, é aplicado um filtro IIR passa-baixas digital na medida da tensão contra-eletromotriz, para evitar o chaveamento espúrio. O filtro possui esta forma:

$$y_n = \frac{ax_n + by_{n-1}}{a + b}. \quad (3.1)$$

Este filtro possui resposta em frequência:

$$H(e^{j\omega}) = \frac{a}{a + b(1 - e^{-j\omega})}. \quad (3.2)$$

Pode-se notar que ele possui ganho ≈ 1 para baixas frequências e o ganho cai para $\frac{a}{a+2b}$ para altas frequências.

Para reduzir a complexidade da divisão e melhorar a estabilidade, $a + b$ devem ser uma potência de 2, para que a divisão possa ser convertida em um deslocamento de bits. O manual (ATMEL CORPORATION, 2005b) sugere o uso de $a = 1$ e $b = 3$.

3.3.3 Partida

Como os ímãs geram uma tensão alternada de amplitude proporcional à velocidade angular entre o rotor e o estator, não é possível utilizar esta técnica durante a partida ou em baixas rotações. Isto é especialmente crítico para sistemas em que a carga é variável ou imprevisível. Quando a carga é conhecida ou está numa faixa previsível, o problema se torna mais tratável, mas mesmo assim não há uma técnica universal para a partida do motor (ATMEL CORPORATION, 2005b).

Este mesmo manual sugere a partida em malha aberta, que é o mais utilizado para este tipo de aplicação. Para isto, o controlador espera um período pré-determinado antes de chavear o circuito. Após obter velocidade angular suficiente o controlar habilita a realimentação.

A carga deve estar numa faixa conhecida. Se a carga estiver muito abaixo do esperado, o motor poderá não chavear rápido o suficiente, colocando o enrolamento em curto e possivelmente danificando o motor. Se a carga estiver muito acima do esperado, o motor não se moverá e a partida do motor irá falhar.

3.3.4 Condicionamento dos sinais

Os sinais de realimentação contém ruído, principalmente devido ao chaveamento dos transistores. Além disso, o nível do sinal pode não estar na faixa correta. Para que os sinais representem corretamente as informações de interesse, se utiliza de circuitos condicionadores de sinal.

Nesta aplicação, a maior parte deles é composta por um circuito divisor de tensão passa-baixas. Este circuito é bastante simples, podendo ser montado com apenas 3 componentes

passivos:

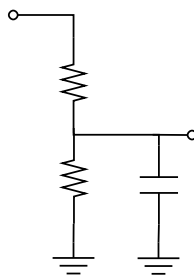


Figura 3.4: Condicionador de sinais

Regulando os resistores e o capacitor pode-se escolher a faixa de tensão e resposta em frequência do circuito. Não é desejável que o filtro seja de banda estreita, pois ele se torna “lento” e deforma o sinal de interesse.

Foram pesquisados diferentes combinações e decidiu-se por resistores de $4,7k\Omega$ e um capacitor de $100nF$. Estes valores proporcionam ganho de 0,5 para baixas frequências e frequência de corte próxima a 2kHz, que equivale a 120000RPM, o que é uma ordem de grandeza maior que as rotações que espera-se do motor.

3.4 Bateria de lítio-polímero

A bateria é o elemento que provê a energia necessária ao funcionamento eletromecânico e eletrônico do multirrotor. É desejável que sua massa seja baixa, já que um peso maior significará mais empuxo nos motores e uma maior corrente drenada. Ao mesmo tempo, é desejável uma carga elétrica alta, para se ter mais autonomia.

O lítio é o mais leve dentre os metais e com o maior potencial eletroquímico, o que o torna uma escolha bastante atraente para o uso em baterias. Devido à sua grande reatividade, porém, seu uso na forma metálica não é conveniente, sendo mais usados os compostos que provêm íons de lítio sem sofrer grandes modificações estruturais (KIM; TREDEAU; SALAMEH, 2008; RIEZENMAN, 1995).

A bateria de lítio-polímero é ideal para uso em veículos elétricos por conseguir armazenar uma grande quantidade de energia por unidade de massa (energia específica) e por unidade de volume (densidade de energia), além de fornecer uma grande quantidade de potência por unidade de volume (densidade de potência), por ter alta eficiência energética, alta capacidade de corrente e vida útil longa (KIM; TREDEAU; SALAMEH, 2008).

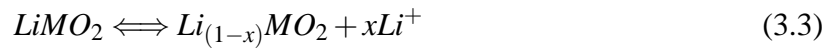
Essas características justificam seu uso mesmo apesar das dificuldades que ela introduz, já

que as células são extremamente inflamáveis, tensões maiores que 4,5V causam a dissociação do eletrólito - danificando a célula e podendo causar explosão - e tensões abaixo de 1V causam dissociação do eletrodo negativo (BARONTI et al., 2010).

3.4.1 Química

A bateria de lítio-polímero normalmente usa um óxido de lítio com outro metal como eletrodo positivo e um composto de carbono como eletrodo negativo (SALAMEH; KIM, 2009). As reações químicas envolvidas no funcionamento da bateria são (BLOMGREN, 2000; KIM; TREDEAU; SALAMEH, 2008):

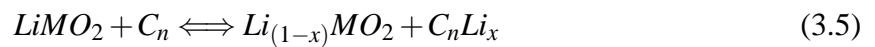
Eletrodo positivo:



Eletrodo negativo:



Reação completa:



Em geral, o metal “M” associado ao lítio no óxido do eletrodo positivo é o cobalto (BLOMGREN, 2000; KIM; TREDEAU; SALAMEH, 2008).

3.4.2 Modelo

Em (BARONTI et al., 2010) foi desenvolvido um modelo para as baterias de lítio-polímero considerando o efeito da variação da temperatura nas características elétricas. O esquema pode ser visto abaixo:

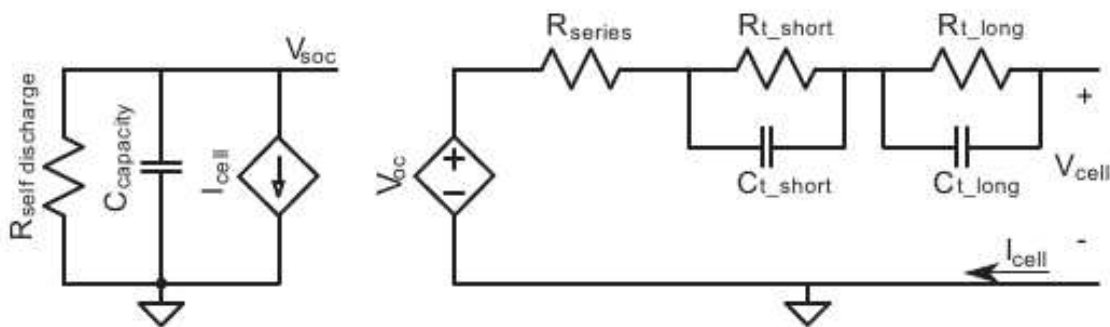


Figura 3.5: Esquema elétrico do modelo desenvolvido em (BARONTI et al., 2010)

No lado esquerdo do diagrama, o capacitor, o resistor e a fonte de corrente controlada por corrente modelam a capacidade, a auto-descarga e o estado de carga (SOC) da bateria. A capacidade da bateria é uma função do número de ciclos de carga e descarga, mas esse efeito é desprezível para baterias de lítio-polímero. No lado direito do esquema, a fonte de tensão controlada por tensão é usada para simular a relação não linear entre o estado de carga e a tensão de circuito aberto (OCV). R_{series} modela a resistência ômica interna da célula, e as redes RC consideram o comportamento transitório. Cada parâmetro usado para modelar V_{cell} é função do estado de carga e da temperatura. A tensão medida nos contatos da célula podem ser expressadas no domínio s como Baronti et al. (2010) sugere:

$$V_{cell} = V_{OC}(SOC, T) - I_{cell}R_{series}(SOC, T) - I_{cell}Z_{t_{long}}(SOC, T) - I_{cell}Z_{t_{short}}(SOC, T) \quad (3.6)$$

onde $Z_{t_{long}}$ e $Z_{t_{short}}$ são as impedâncias dos dois grupos RC. As duas constantes de tempo $\tau_{t_{long}}$ e $\tau_{t_{short}}$ estão na magnitude dos segundos e dos minutos respectivamente (BARONTI et al., 2010).

O método para obtenção dos parâmetros acima citados está descrito em Baronti et al. (2010).

3.4.3 Valores de referência

Seguem alguns valores de referência, extraídos de Kim, Tredeau e Salameh (2008), onde é estudada uma bateria de lítio-polímero de 3,7V e 100Ah:

- Energia específica : 146 Wh/kg
- Densidade de energia: 373 Wh/l
- Auto-descarga: < 5% por mês
- Eficiência energética > 95% entre 20 e 40 °C
- Temperatura de operação: entre -20 e 60 °C
- Vida útil (perda de 20% da capacidade original): 1200 ciclos de carga / descarga

3.5 Controle

O tema sobre controle de multirrotores voltou a ser estudado, graças a tecnologias novas e o grande interesse em VANTs. Há diversas pesquisas já publicadas e os métodos desenvolvidos obtêm resultados satisfatório, apesar de não haver o estabelecimento de uma teoria clássica especificamente para multirrotores. Abaixo são relatados alguns trabalhos desenvolvidos com esse tema que propõem diferentes abordagens para essa tarefa.

Salih et al. (2010) apresenta um modelo para um quadrirotor e é desenvolvido um método de controle proporcional-integral-derivativo (PID) clássico, com quatro forças de entrada que são os empuxos gerados pelos quatro rotores.

Em (GONZÁLEZ-VÁAZQUEZ; MORENO-VALENZUELA, 2010) é projetado um controlador não linear baseado no esquema clássico de controle proporcional-integral-derivativo (PID) para controlar um quadrirotor com seis graus de liberdade. A posição horizontal do quadrirotor é controlada por ações PI, enquanto a orientação e a posição vertical são controladas por algoritmos PID. A performance é verificada por testes numéricos, embora apenas os efeitos da força gravitacional sejam compensados.

Minh e Ha (2010) revê o modelo matemático de um quadrirotor usando a equação de Lagrange. Então é proposto um método de controle linear baseado em imagens de duas câmeras, uma no quadrirotor e outro no solo.

Santos, López e Morata (2010) formula um sistema de controle inteligente de quadrotores baseado na lógica fuzzy. As entradas para o sistema são os valores desejados para altura e os ângulos em relação aos três eixos de referência que passam pelo centro de massa, e as saídas são as potências de cada um dos quatro rotores para se atender à especificação. Por fim, são feitas simulações para validar a eficiência da estratégia de controle.

3.6 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados aspectos técnicos do projeto, como motores e controladores. No capítulo a seguir, serão tratados assuntos relativos à motivação e execução do projeto.

4 *Desenvolvimento do Trabalho*

4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo trata de assuntos não relacionados às técnicas apresentadas no capítulo anterior. Serão discutidos aspectos sobre a equipe e como será executado o projeto.

4.2 Sobre a equipe

O grupo é composto por três alunos: Bruno Pinho, Danilo Luvizotto e Pedro Nariyoshi.

Bruno já teve contato com aquisição de dados de GPS e tem experiência com transceptores, irá trabalhar no hardware do módulo de controle e módulo de comunicação e nos algoritmos de navegação autônoma. Até o momento trabalhou estudando como será implementado a utilização do GPS e demais sensores para permitir a navegabilidade autônoma e também na aquisição dos parâmetros para estabilização e navegabilidade do sistema. Assim como também foi observado uma maneira da utilização do controle a distância.

Danilo tem conhecimentos sobre sistemas operacionais e programação. Irá trabalhar na implementação do sistema operacional no módulo multimídia, além de trabalhar na transmissão de dados. Até o momento, pesquisou sobre o funcionamento de motores *brushless*, contribuiu para a elaboração da arquitetura e para a divisão das funcionalidades entre os módulos, pesquisou as famílias de microcontroladores e processadores ARM disponíveis e adequadas para o projeto, dos sistemas GNU/Linux existentes para esses processadores e os ambientes de desenvolvimentos disponibilizados pelos seus fabricantes.

Pedro já trabalhou com cancelamento de ruído com áudio e tem interesse em algoritmos adaptativos, controle e acústica. Neste projeto irá trabalhar no controle e redução de vibrações durante o voo. Tem se dedicado no desenvolvimento e estudo dos controladores de velocidade dos motores, tem trabalhado coordenando e checando cada seção do projeto. Contribuiu para a definição final da arquitetura e para a escolha dos processadores e sensores a serem utilizados.

Na etapa de planejamento, a equipe contava com mais um integrante, Marcos Tortólio, que não está mais participando devido a um programa de intercâmbio na Espanha, como previsto. Suas atividades no projeto foram relacionadas à pesquisa sobre a arquitetura de hardware e software do veículo.

4.3 Problema a ser resolvido

Apesar da existência produtos no mercado que utilizam sistemas multirrotores, não há nenhuma plataforma de desenvolvimento para aplicações diversas. Para fins de aprendizado e pesquisa, é comum que se desenvolvam sistemas de maneira independente e os utilizem para apenas um propósito. Nosso projeto busca criar uma plataforma de desenvolvimento versátil, disponibilizando abertamente o software, o hardware, os conhecimentos e a documentação gerados, de forma a criar uma base de conhecimento para o desenvolvimento do projeto e para seu uso como ferramenta.

A Escola Politécnica da Universidade de São Paulo possui diversos laboratórios que poderiam utilizar o dispositivo para pesquisa, como reconstrução 3D de objetos, algoritmos de controle, aprendizado de máquina etc. O foco não é pesquisar nenhuma dessas áreas a fundo, mas sim criar uma ferramenta capaz de ser utilizada facilmente nessas aplicações.

Pode-se comparar esse projeto a um SDK ou a uma API, ele permite ao desenvolvedor trabalhar sobre uma camada de abstração. Um desenvolvedor poderia por exemplo implementar técnicas de detecção de imagens para fazer busca de objetos sem a necessidade de compreender os motores trifásicos. Ao mesmo passo, um outro desenvolvedor poderia trabalhar no algoritmo de controle, sem se preocupar com os outros módulos do sistema.

4.4 Motivações e Justificativas Técnicas

Um multirrotor com um número par de rotores tem vantagens substanciais sobre helicópteros convencionais. Se cada par adjacente de hélices girar em sentido oposto, é possível controlar o momento angular controlando a razão entre a rotação das hélices. Assim, um multirrotor é capaz de reduzir o problema eletromecânico de voar a um problema de controle eletrônico.

O projeto implementa conhecimentos diversos da Engenharia Elétrica, como controle, programação, processamento de sinais, redes de computadores, circuitos elétricos, e é, portanto, é adequado e representativo à meta generalista do curso.

Além de colocar em prática conceitos aprendidos durante o curso, também nos aprofundaremos nas áreas de controle multivariável, processamento de imagens e sistemas eletrônicos embarcados.

Por fim, a plataforma desenvolvida poderá ser utilizada por projetos posteriores, já que a área de veículos aéreos não-tripulados (VANTs) possui diversas vertentes de pesquisa em andamento.

4.5 Descrição das Atividades a serem Realizadas

As etapas do projeto serão: Estudo Preliminar, Definições, Construção da Plataforma de Desenvolvimento, Estudo de Algoritmos de Controle, Construção do Protótipo, Controle Avançado, Desenvolvimento das Aplicações e Montagem Final. A seguir estão descritas as atividades e suas respectivas subatividades.

1. Estudo Preliminar

Nesta etapa, os objetivos serão:

- pesquisar sobre a construção de MVAs;
- pesquisar sobre as possíveis plataformas de desenvolvimento.

2. Definições

Nesta etapa, os objetivos serão:

- definir os módulos básicos do veículo;
- definir uma arquitetura de hardware e software para implementar os controles e aplicações do veículo;
- definir alguns componentes básicos, tais como: tipos de motor e drivers;
- definir o número de hélices.

3. Estudo de um multirrotor comercial:

- escolha de um modelo comparando com outros existentes no mercado;
- compra e estudo teórico do multirrotor escolhido;
- montagem e estudo da parte estrutural;
- avaliação dos pontos fortes e fracos;

- utilizar a experiência e o conhecimento adquirido para auxiliar na construção do protótipo.

4. Construção da Plataforma de Desenvolvimento

Nesta etapa, os objetivos serão:

- comprar componentes;
- construção do hardware básico: microcontroladores e barramentos de dados;
- desenvolver bibliotecas básicas de interface do microcontrolador;
- estudar o comportamento dos motores.

5. Estudo de Algoritmos de Controle

Nesta etapa, os objetivos serão:

- estudar a construção de um multirroto comercial;
- pesquisar possíveis algoritmos de controle.

6. Construção do Protótipo

Nesta etapa, os objetivos serão:

- construir os módulos sensores básicos;
- construir o módulo central;
- conectar os módulos ao barramento da plataforma de desenvolvimento;
- ligar motores, módulo central e módulos sensores;
- testar sensores, comandos de voo e estabilidade.

7. Controle Avançado

Nesta etapa, os objetivos serão:

- implementar o módulo e sistema de navegação manual;
- implementar o módulo e sistema de navegação autônoma ;
- testar os sistemas anteriores.

8. Desenvolvimento das Aplicações

Nesta etapa, os objetivos serão:

- construção do módulo GPS;
- implementar sistema de navegação por GPS;

9. Montagem Final

Nesta etapa, os objetivos serão:

- Interligar todos os módulos;
- testar todos os sistemas e aplicações.

4.6 Metas

O projeto resultará em quatro produtos, descritos abaixo:

1. Curvas que relacionem as seguintes variáveis de interesse do multirrotor:

- massa total das baterias;
- autonomia;
- alcance;
- velocidade;
- carga útil.

As curvas trarão as demais variáveis em função da massa total das baterias para, pelo menos, 3 diferentes massas de baterias.

2. Softwares dos micro-controladores que realizem, controlem ou possibilitem as seguintes tarefas:

- excitação dos motores;
- controle de voo e estabilização;
- navegação manual ou por GPS;
- comunicação entre os módulos;
- comunicação sem fio.

3. Protótipo funcional de multirrotor que com as seguintes capacidades:

- receber dados de um controlador manual;
- voar pelo menos 10 minutos;
- levantar uma carga útil de pelo menos 1kg;
- realizar um percurso arbitrário em um raio de até 50m ao ar livre;

- percorrer uma rota através do módulo GPS entre dois pontos distantes de até 50m;
 - possuir expansibilidade para módulos extras.
4. Manual de projeto e construção de multirrotores, contendo:
- guia para a construção de um multirrotor;
 - explicação sobre o uso das curvas geradas;
 - descrição da arquitetura;
 - detalhamento do hardware suficiente para o uso e modificação por um iniciante;
 - documentação do software e dos dados trocados entre as camadas;
 - explicação sucinta das teorias por trás dos algoritmos.

4.7 Dificuldades e Limitações

Um problema encontrado foi a falta de documentação. Esta dificuldade se dá por dois motivos majoritários. O uso de motores *brushless* e controladores é algo razoavelmente recente e pois o *design* dispositivos se dá geralmente de maneira industrial ou amadora, portanto não há literatura bem estabelecida sobre o assunto.

A capacidade de escrita e comunicação também é um fator limitante. O estudante politécnico geralmente não utiliza essas habilidades e elas atrofiam com o tempo. Muitas vezes é difícil e demorado para transmitir uma ideia ou organizar os pensamentos da equipe.

No entanto, a disciplina foi capaz de expor estas deficiências da equipe e exercitar as habilidades de comunicação dos membros.

5 Cronograma

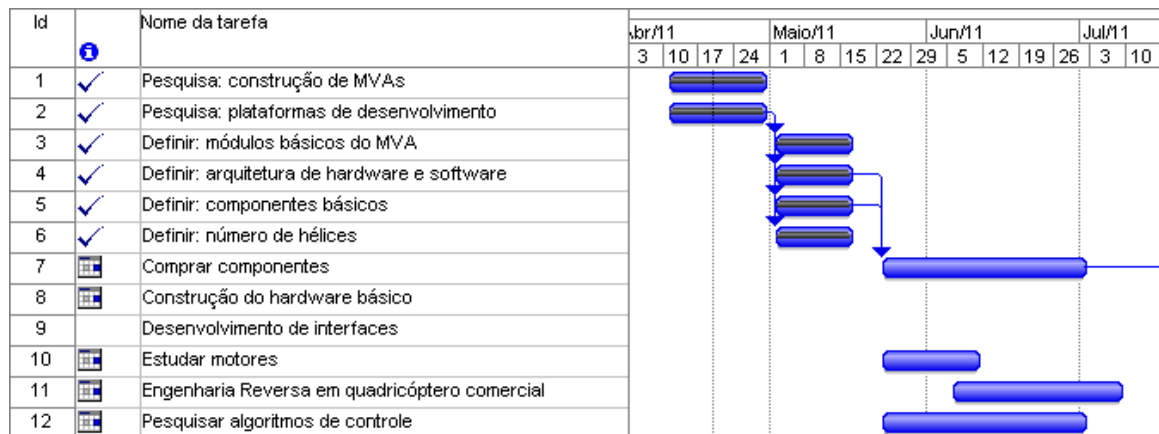


Figura 5.1: Carta de Gantt do 1o. Semestre

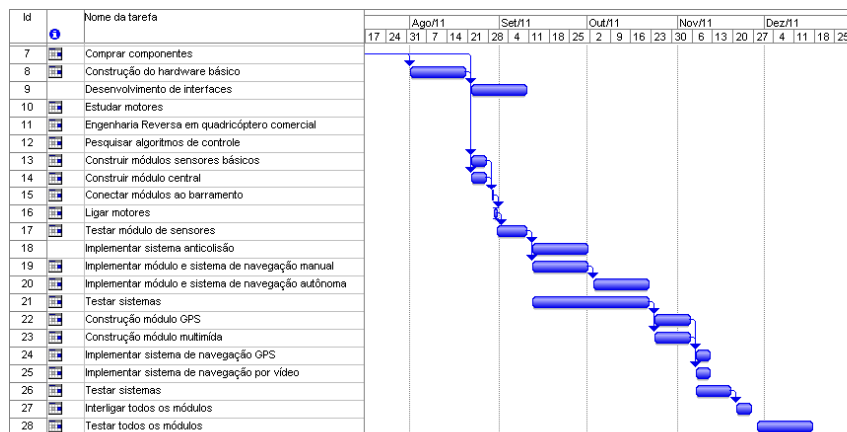


Figura 5.2: Carta de Gantt do 2o. Semestre

6 *Análise de Risco*

O projeto envolve aspectos que nunca foram discutidos em sala de aula e que equipe não possui familiaridade, como controle de voo. Estas etapas criam incerteza e é impossível afirmar o tempo que será gasto para o desenvolvimento desses módulos. Para minimizar esse problema, o projeto foi separado em blocos independentes e cada bloco será um *milestone*.

Um problema encontrado foi a falta de documentação. Esta dificuldade se dá por dois motivos majoritários. O uso de motores *brushless* e controladores é algo razoavelmente recente

Existe também os riscos associados a realização do projeto. Para montagem do hardware é necessário a importação de grande parte de componentes, como sensores e motores. A importação acarreta em outros riscos, como o atraso ou eventual extravio de encomendas. Para evitar imprevistos, uma lista preliminar de componentes foi elaborada e os componentes já foram encomendados.

7 *Conclusões e trabalhos futuros*

“Nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.”

Lavousier

Plataformas de desenvolvimento de veículos voadores autônomos são interessantes por permitirem a implementação de algoritmos e aplicativos de forma simples e rápida. Consegue-se isto isolando a aplicação dos outros módulos envolvidos no desenvolvimento de um multirrotor.

7.1 Fase do projeto

O projeto encontra-se na fase de desenvolvimento do protótipo. Todo o material teórico foi coletado e os componentes foram comprados. Os ESCs estão em fase final de prototipagem. Toda a teoria necessária foi abordada e o ESC está em fase de teste. Após validar a teoria o circuito impresso será feito de modo que possa ser utilizado no multirrotor. A parte do controle está em fase inicial de desenvolvimento. O algoritmo está sendo construído. A placa que será utilizada no módulo de controle já foi devidamente estudada esperando apenas a efetivação do algoritmo teórico para transportá-lo para a placa. A comunicação I2c que será utilizada entre os ESCs e o módulo de controle já foi devidamente testada e em parte está implementada. Faltando apenas a construção dos dois módulos para efetuar o último teste. A estrutura ainda não está pronta devido ao fato de que alguns componentes ainda não foram entregues. Porém uma estrutura de suporte já está montada para caso necessário de algum teste. As demais partes do projeto ainda estão em desenvolvimento inicial e a maior parte dos componentes ainda não chegaram, o que acarretará em um pequeno atraso no planejamento.

7.2 Considerações sobre o Curso de Graduação

A ênfase de Sistemas Eletrônicos tem por objetivo ser uma ênfase generalista, oferecendo tanto uma base sólida de conhecimentos fundamentais quanto um leque de opções para a especialização em uma área específica da Engenharia Elétrica. Neste projeto utiliza-se conceitos de dessas áreas aprendidos em diversas disciplinas.

Para a levitação e movimentação do multirroto, utiliza-se conhecimentos aprendidos nas matérias do núcleo de controle, PTC2412 (Controle I) e PTC2512 (Laboratório de Controle). Além destas, a disciplina PSI2662 (Sensores e Atuadores) complementa este conjunto com metodologia de implementação de projetos embarcados e sensores para evitar colisões, e a disciplina PSI2661 (Transceptores) viabiliza a transmissão dos dados por radiofrequência.

A implementação do módulo de controle envolve as matérias de circuitos integrados PSI2451, PSI2452 e PSI2553 e de programação MAC2166 (Introdução à programação), MAC0122 (Algoritmos) e PCS2478 (Tópicos em Programação). Além disto, a construção dos circuitos de interface entre o controle e os motores e entre o controle e os sensores, utiliza-se conceitos aprendidos nos módulos de eletrônica, como PSI2223 (Introdução à eletrônica), PSI2324 (Eletrônica I) e PSI2326 (Eletrônica II).

Esta seção procura sumarizar e evidenciar as mais importantes, no entanto reconhece-se que há disciplinas que apesar de não mencionadas compõem os conhecimentos que serão utilizados neste projeto.

Referências

- AEROQUAD. *AeroQuad*: Site. 1999. URL: <http://aeroquad.com/>. Acesso em: 15 jun. 2011.
- ATMEL CORPORATION. *AVR443: Sensor-based control of three phase Brushless DC motor*. [S.l.], 2005.
- ATMEL CORPORATION. *AVR444: Sensorless control of 3-phase brushless DC motors*. [S.l.], 2005.
- BARONTI, F. et al. Enhanced model for lithium-polymer cells including temperature effects. In: *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 2329 –2333. ISSN 1553-572X.
- BLOMGREN, G. Current status of lithium ion and lithium polymer secondary batteries. In: *Battery Conference on Applications and Advances, 2000. The Fifteenth Annual*. [S.l.: s.n.], 2000. p. 97 –100.
- CUNHA, R. Sistemas operacionais real-time para aplicações embedded e controle. *Saber Eletrônica*, 2008.
- ELETRÔNICA, S. Protocolo de comunicação i2c este. *Saber Eletrônica*, Jun. 2009.
- GONZÁLEZ-VÁAZQUEZ, S.; MORENO-VALENZUELA, J. A new nonlinear pi/pid controller for quadrotor posture regulation. In: *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA), 2010*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 642 –647.
- INC., K. P. M. T. *Controller Area Network (CAN) Basics*. 2002.
- KIM, B.; TREDEAU, F.; SALAMEH, Z. Performance evaluation of lithium polymer batteries for use in electric vehicles. In: *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1 –5.
- MICRODRONES. *Microdrones RC UAV*: Site. 1999. URL: <http://www.microdrones.com/index-en.php>. Acesso em: 15 jun. 2011.
- MIKROKOPTER.DE. *MikroKopter*: Site. 1999. URL: <http://www.mikrokopter.de>. Acesso em: 10 mar. 2011.
- MINH, L. D.; HA, C. Modeling and control of quadrotor mav using vision-based measurement. In: *Strategic Technology (IFOST), 2010 International Forum on*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 70 –75.
- PARROT. *AR.Drone Parrot*: Site. 1999. URL: <http://ardrone.parrot.com/parrot-ar-drone/usa/>. Acesso em: 15 jun. 2011.
- RIEZENMAN, M. The search for better batteries. *Spectrum, IEEE*, v. 32, n. 5, p. 51 –56, may 1995. ISSN 0018-9235.

SALAMEH, Z.; KIM, B. Advanced lithium polymer batteries. In: *Power Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1 –5. ISSN 1944-9925.

SALIH, A. et al. Modelling and pid controller design for a quadrotor unmanned air vehicle. In: *Automation Quality and Testing Robotics (AQTR), 2010 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2010. v. 1, p. 1 –5.

SANTOS, M.; LÓPEZ, V.; MORATA, F. Intelligent fuzzy controller of a quadrotor. In: *Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE), 2010 International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 141 –146.

Segway Inc. *About Segway - Press Release*: Site. 2001. URL: http://www.segway.com/about-segway/media-center/press_releases/pr_030105c.php. Acesso em: 20 jun. 2011.

SIEMEINTCOSKI, M. E.; WACKERHAGEN, G. Comunicação serial: Protocolo spi e periférico usart para microcontroladores - parte 2. *Saber Eletrônica*, Jan. 2008.

8 *Apêndice A - Comparativos entre outros multirrotores*

Existem diversas plataformas de multirrotores no mercado. A maioria composta por quadrirrotores. Entre estes, são notáveis: Aeroquad Aeroquad (1999), ArdroneParrot (1999), MicrodronesMicrodrones (1999), MikrokopterMikroKopter.de (1999).

O AeroQuad é um projeto de software e hardware livre dedicado à construção de helicópteros de quatro rotores de controle remoto. O hardware do AeroQuad consiste tipicamente em um microcontrolador Arduino (Mega-2560 ou Uno) que funciona como o controlador de vôo, juntamente com vários sensores, como acelerômetros e giroscópios. O software, é escrito principalmente em C e enviado ao micro-controlador Arduino através do IDE, atualmente suporta o modo "Acrobatic", que usa apenas o giroscópio para auxiliar o vôo, e um modo "Estável" que usa tanto o giroscópio e acelerômetro para ajudar no vôo.

ARDrone pertence à empresa Norte-Americana Parrot que atua na área de desenvolvimento de dispositivos sem fios para celular. O ARDrone é um quadcóptero comercial que se difere dos outros pelo fato que seu controle remoto é um celular ou Ipod.

Microdrones é uma empresa alemã cujo foco é o desenvolvimento de pequenas aeronaves, principalmente quadrirrotores. Possui hoje dois modelos comerciais à venda.

Mikrokopter, é uma *empresa* alemã dedicada a projetos de multirrotores, dentre as empresas pesquisadas, esta apresenta a maior quantidade de combinações. Há modelos com quatro, seis e oito hélices. Há documentação de muitos componentes, inclusive uma descrição detalhada sobre o tempo de vôo para diferentes configurações. Para mais informações, conferir (MIKROKOPTER.DE, 1999).

Parte II

Segunda Parte - Manual de Construção de um Multirroto

9 *Arquitetura*

A arquitetura proposta foi pensada de forma a permitir ao multirrotoz fácil adaptabilidade a projetos de pesquisa futuros e a outras finalidades não previstas ou não implementadas no protótipo inicial. Por isso, o software e o hardware foram divididos em quatro camadas de abstração, cada qual com uma parcela bem definida das tarefas que, em conjunto, são responsáveis pelo funcionamento do sistema.

Dessa maneira, é possível modificar o software ou o hardware pertencente a uma ou mais camadas de abstração sem se preocupar com as outras, desde que se observe a especificação das mensagens trocadas entre elas.

Essas camadas ou domínios de tarefas são:

1. Camada de excitação dos motores, responsável por controlar a rotação dos rotores;
2. Camada de estabilização do vôo, responsável por garantir a estabilidade do vôo;
3. Camada de navegação, responsável pela velocidade e pela direção do sistema;
4. Camada de periféricos, que comporta os sensores de navegação e o receptor de rádio-controle e onde é possível acrescentar módulos personalizados.

A figura 9.1 dá uma visão geral da arquitetura, que será detalhada mais adiante.

9.1 **Camada de excitação dos motores**

9.1.1 **Descrição**

Essa é a primeira camada, abaixo da camada de estabilização de vôo. Responsável por garantir que a rotação dos motores esteja de acordo com o determinado, por detectar e proteger os motores de sobrecorrentes e por fornecer a potência que eles necessitam para funcionar.

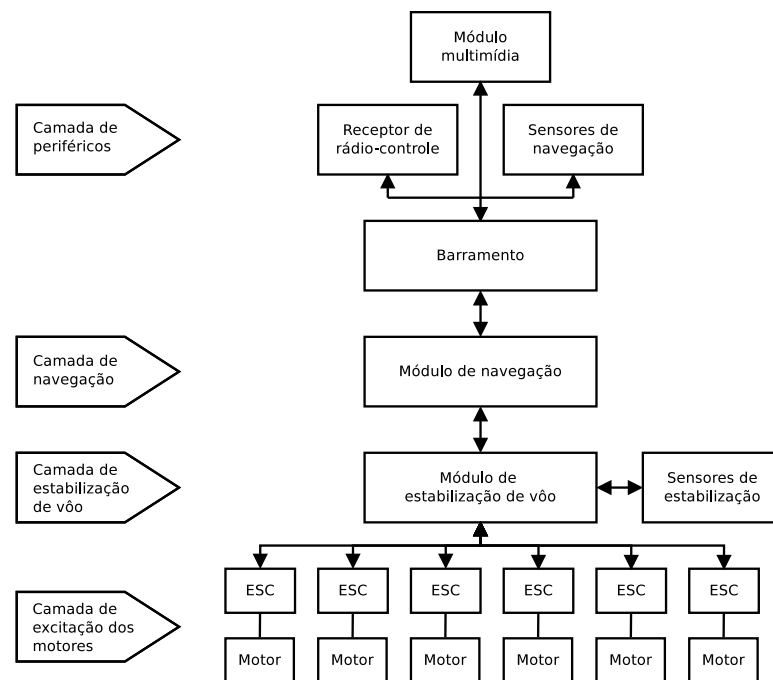


Figura 9.1: visão geral da arquitetura do multirrotores

Deve impedir que os motores queimem caso os rotores fiquem presos ou girem em aberto (sem hélices).

9.1.2 Componentes

É constituída pelos n motores, hélices e controladores eletrônicos de velocidade (eletronic speed controllers - ESCs), sendo n o número de rotores do multirrotores. Os ESCs, por sua vez, são constituídos por duas placas de circuito, sendo uma responsável pela lógica e a outra pelo fornecimento de potência aos motores.

As hélices são presas nos eixos dos motores de forma que girem com ele. Cada motor é ligado à placa do circuito de potência do ESC correspondente, pela qual é alimentado. A placa de potência do ESC é ligada à sua placa de lógica e à bateria, a qual fornece a tensão e a corrente necessárias para o acionamento dos motores.

9.1.3 Parâmetros de entrada e saída

Entrada:

- da camada de estabilização de voo:

– rotação do motor (para cada ESC + rotor)

Saída:

- para a camada de estabilização de vôo
 - status dos motores

9.1.4 Comportamento

O controlador eletrônico de velocidade (ESC) lê o parâmetro de rotação enviado pelo microcontrolador da camada de estabilização e aguarda um sinal do motor que indica que o enrolamento está alinhado com o campo do rotor. Quando isso ocorre, o ESC calcula o tempo ideal para o chavear a excitação do motor, espera esse tempo e realiza o chaveamento, depois do qual o ciclo recomeça.

Para maiores detalhes sobre funcionamento do ESC, ver a seção 3.3.

Abaixo, um diagrama que representa esse comportamento:

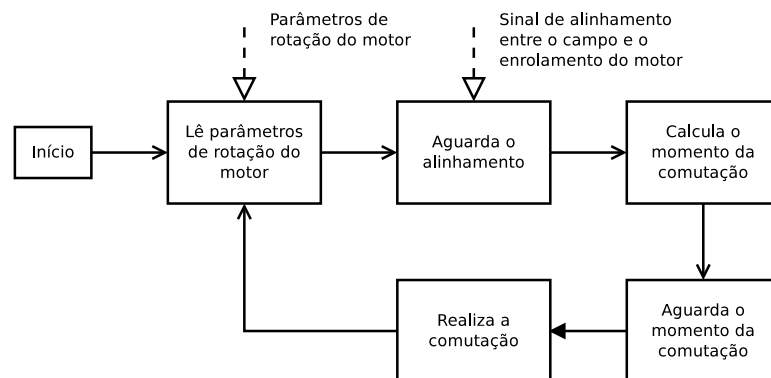


Figura 9.2: visão geral do funcionamento do ESC

9.2 Camada de estabilização do vôo

9.2.1 Descrição

Responsável por processar os sinais dos sensores de estabilização (acelerômetros e giroscópios) e os parâmetros de navegação (ângulos de Euler e potência total dos motores) e gerar os parâmetros de rotação de cada motor de forma a manter a estabilidade do vôo e controlar a velocidade de deslocamento e a velocidade angular do multirroto.

9.2.2 Componentes

Camada constituída por um microcontrolador ARM (Cortex-M0 modelo LPC1114 da NXP, família ARMv6-M, arquitetura Cortex-M) e por uma unidade de medida inercial (IMU - inertial measurement unit), que é um circuito que contém o acelerômetro e o giroscópio tridimensionais. O microcontrolador está ligado ao microcontrolador da camada de navegação por SPI e à IMU por I^2C .

9.2.3 Parâmetros de entrada e saída

Entrada:

- da camada de navegação:
 - ângulos de Euler e potência total dos motores (parâmetros de navegação)

Saídas:

- para a camada de excitação dos motores
 - rotação de cada motor
- para a camada de navegação
 - status dos motores
 - dados dos sensores de estabilização - acelerômetro e giroscópio

9.2.4 Comportamento

A camada de estabilização age através de um laço que começa com a leitura dos parâmetros de navegação obtidos do microcontrolador daquela camada e segue com a leitura dos sinais dos sensores de estabilização, ou seja, dos acelerômetros e dos giroscópios. O próximo passo é a execução dos algoritmos PID que geram os parâmetros de rotação dos motores, parâmetros os quais são enviados aos ESCs da camada de excitação.

Os algoritmos que controlam a estabilidade são PIDs não-lineares, ver a seção 3.5 para mais detalhes. A figura 9.3 representa esse comportamento.

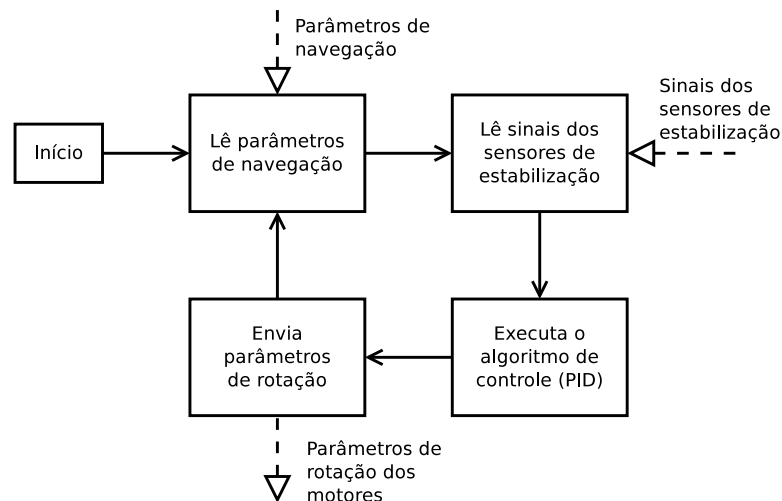


Figura 9.3: visão geral do funcionamento da camada de estabilização

9.3 Camada de navegação

9.3.1 Descrição

Responsável por processar os sinais dos sensores de navegação (GPS e magnetômetro) e os parâmetros de direção, velocidade e rotação e por gerar os parâmetros de navegação (ângulos de Euler e potência total dos motores) do multirrotor, de forma a fazê-lo mover-se com a direção e a velocidade pretendidas e/ou girar em torno de seu eixo vertical.

9.3.2 Componentes

Camada constituída por um microcontrolador ARM (Cortex-M0 modelo LPC1114 da NXP, família ARMv6-M, arquitetura Cortex-M), pelo GPS, pelo magnetômetro e pelo receptor do rádio-controle. Esses sensores e o receptor são implementados como módulos e estão ligados ao microcontrolador pelo mesmo barramento SPI que o conecta aos módulos inteligentes da camada de aplicação. A ligação ao microcontrolador da camada de estabilização de voo se dá por SPI.

9.3.3 Parâmetros de entrada e saída

Entradas:

- da camada de periféricos

– sinais dos sensores de navegação (GPS e magnetômetro)

- parâmetros de direção, velocidade e rotação do multirrotor
- da camada de estabilização de vôo
 - status dos motores
 - dados dos sensores de estabilização (acelerômetro e giroscópio)

Saída:

- para a camada de estabilização de vôo
 - ângulos de Euler e potência total dos motores (parâmetros de navegação)
- para a camada de periféricos
 - status dos motores (caso solicitado por algum módulo periférico)
 - dados dos sensores de estabilização - acelerômetro e giroscópio (caso solicitado por algum módulo periférico)

Comportamento

A camada de navegação possui um laço principal que tem início com a leitura dos parâmetros de direção, velocidade e rotação, os quais são obtidos do módulo de recepção do rádio-controle e/ou podem ser também gerados na camada de periféricos. Isso abre a possibilidade de que aplicações personalizadas determinem a direção, a velocidade de translação e a rotação do multirrotor.

Em seguida ocorre a leitura dos sinais dos sensores de navegação (GPS e magnetômetro). A partir desses parâmetros e sinais é realizado o processamento que gera os parâmetros de navegação (ângulos de Euler e potência total dos motores) que são enviados para o microcontrolador da camada de estabilização. A figura 9.4 representa esse comportamento.

9.4 Camada de periféricos

9.4.1 Descrição

A camada de periféricos abriga originalmente os módulos dos sensores de navegação e o módulo receptor do rádio-controle, que estão ligados entre si e ao microcontrolador da camada de navegação por um barramento I^2C . Essa arquitetura foi concebida para que seja possível que

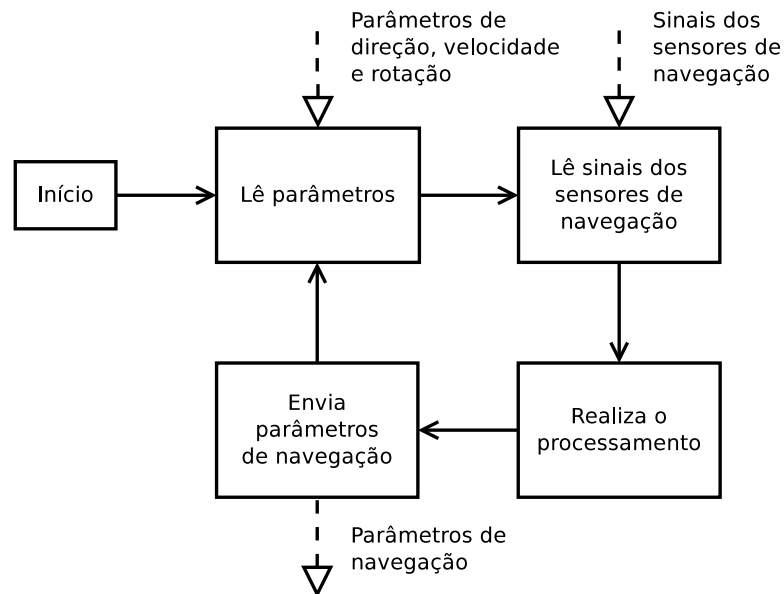


Figura 9.4: visão geral do funcionamento da camada de navegação

qualquer pessoa com o conhecimento técnico necessário crie e adicione periféricos personalizados.

Esses módulos periféricos podem, inclusive, assumir a qualquer momento a tarefa de gerar os parâmetros de direção, velocidade e rotação ao lado do receptor de rádio-controle, o que abre um leque de possibilidades de projetos futuros, dentre os quais citamos: controle de altura através de sensores como barômetro ou sensor de distância ultrassônico ou a laser, evasão de colisão usando sensores de distância, rastreamento e perseguição de objeto através de um módulo multimídia inteligente e transmissão de vídeo e áudio.

9.4.2 Componentes

Camada expansível constituída por módulos capazes de se comunicar por I^2C . Os módulos implementados originalmente são os sensores de navegação, que contém o GPS e o magnetômetro, e o módulo receptor de rádio-controle.

9.4.3 Parâmetros de entrada e saída

Entrada:

- sinal do rádio-controle

Saída:

- para a camada de navegação
 - sinais dos sensores de navegação (GPS e magnetômetro);
 - parâmetros de direção, velocidade e rotação do multirroto.

9.4.4 Comportamento

Os sensores da camada de periféricos apenas esperam o pedido de leitura do microcontrolador da camada de navegação e/ou de algum outro módulo da própria camada. Quando isso acontece, eles provêem seus dados mais recentes.

Módulos personalizados desta camada possuem comportamento que varia de acordo com suas funcionalidades. Mais detalhes devem ser obtidos da documentação dos próprios módulos.