



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CEC AU**



PEDRO HENRIQUE DE OLIVEIRA GOMES

CONCEPÇÃO DE SISTEMA DE TELEMETRIA PARA AERONAVES REMOTAMENTE CONTROLADAS

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

Ouro Preto, 2016

PEDRO HENRIQUE DE OLIVEIRA GOMES

**CONCEPÇÃO DE SISTEMA DE TELEMETRIA PARA
AERONAVES REMOTAMENTE CONTROLADAS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro

Ouro Preto

Escola de Minas – UFOP

Agosto / 2016

G633c Gomes, Pedro Henrique de Oliveira.
Concepção de sistema de telemetria para aeronaves remotamente controladas
[manuscrito] / Pedro Henrique de Oliveira Gomes. - 2016.

46f.: il.: color; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Aeronave não tripulada. 2. Microcontroladores - Xbee. 3. Microcontroladores - ZigBee 802.15.4. 4. Aviação -- Modelos. I. Monteiro, Paulo Marcos de Barros. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

Monografia defendida e aprovada, em 09 de agosto de 2016, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro - Orientador



Prof. Dr. Luiz Fernando Rispoli Alves – Professor Convidado



Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo – Professor Convidado

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado saúde e sabedoria para que pudesse concluir com sucesso mais uma etapa em minha vida. Aos meus Pais, José Silva e Emília, por todo carinho e dedicação, por nunca medir esforços para realizar meus sonhos! Amo vocês! Ao meu irmão, Dé, por todo exemplo que me passa durante toda a vida. Aos meus avós Chico e Maria por sempre fazerem de tudo por mim e aos meus avós Zé Rosa e Mariquinha por olharem por mim lá de cima.

Agradeço à UFOP pelos mestres e todos ensinamentos que pude adquirir. Agradeço especialmente ao professor Paulo Monteiro por todas as conversas e orientações. Agradeço também as oportunidades que tive, na QUT e no QCAT/CSIRO, que tornaram minha graduação uma experiência ainda mais produtiva. Agradeço a Equipe 12 Bis, pela experiência e por despertar em mim o interesse pela área de aeronáutica.

Agradeço aos amigos da TropaFly e a todos os outros que me ajudaram nessa trajetória, desde o Pequeno Mundo até agora, incluindo amigos que construí na faculdade e que levarei para toda vida, em especial o Jonathan, que estava sempre ali para me ajudar no quesito estudo.

Agradeço à Juliana, por estar comigo nessa reta final e não medir esforços para me ajudar, seja qual atividade eu estivesse fazendo, mesmo que fosse fora do seu escopo. Obrigado pela atenção e carinho. Te Amo!

RESUMO

As redes de comunicação wireless tem ganhado cada vez mais lugar em aplicações industriais e científicas. O baixo consumo de alguns tipos dessas redes torna possível a utilização delas em diversas aplicações, principalmente quando utilizadas em conjunto com sensores. O uso crescente dessa ferramenta vem acompanhado de pesquisas e utilização de novas tecnologias. Neste trabalho é mostrado o processo de desenvolvimento de sistemas de telemetria para aeronaves rádio controladas. Um sistema de telemetria é basicamente um sistema que consegue mostrar informações de um objeto que se encontra longe de onde as informações estão disponíveis. Neste estudo, o sistema foi baseado no protocolo ZigBee 802.15.4. Cada aeronave é embarcada com um sistema que consegue medir velocidade, temperatura, pressão e corrente elétrica do sistema, podendo assim determinar outras características do voo da aeronave. O objetivo deste trabalho é ajudar as equipes de aerodesign e aeromodelistas a saberem as reais características das suas aeronaves, e assim poder melhorar seus projetos. Além disso, buscou-se chegar a esse objetivo com custo reduzido quando comparada as soluções já existentes no mercado.

Palavras-chave: XBee, ZigBee 802.15.4, Aerodesign, Aeromodelos, Veículos aéreos não tripulados.

ABSTRACT

The use of Wireless networks is constantly increasing in both industrial and scientific applications, and with this, the study of this area is increasing as well. The great number of wireless networks systems is due to low power consumption of these networks. In this paper, is shown the modelling of a Telemetry System for unmanned aerial vehicles. A Telemetry System is basically a system to show information about remote objects. For the current system, the protocol ZigBee 802.15.4 was used to do the wireless communication. Each airplane contains an embedded system which can measure velocity, temperature, pressure and electrical current, and so, determine other flight characteristics. The aim of this project is to help the teams of SAE Brazil Aerodesign Competition and model airplanes pilots to get the real flight characteristics and with this, improve their projects. Furthermore, other aim of the project is design a low cost telemetry system.

Keywords: XBee, ZigBee 802.15.4, Telemetry Systems, Aerodesign, Model Airplane, Unmanned Aerial Vehicles.

SIGLAS

A – Área de Referência

API – *Application Programming Interface*

CD – Coeficiente de Arrasto

CL – Coeficiente de Sustentação

COBRA – Confederação Brasileira de Aeromodelismo

F_d – Força de Arrasto

F_L – Força de Sustentação

IEEE – *Institute of Electrical and Eletronic Engineers*

LDO – *Low Dropout*

QoS – Qualidade de Serviços

RPA – Aeronave Remotamente Pilotada

RPA – Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas

SAE – *Society of Automotive Engineers*

v – Velocidade do Objeto Relativa ao Fluido

VANTS – Veículos Aéreos Não-Tripulados

WLAN – *Wireless Local Area Network*

WMAN – *Wireless Metropolitan Area Network*

WPAN – *Wireless Personal Area Network*

WWAN – *Wireless Wide Area Network*

ρ – Densidade de Massa de um Fluido

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Esquema de um Sistema de Telemetria.....	6
FIGURA 2 – Topologias de Rede ZigBee	12
FIGURA 3 – Tipos de Antena para módulos Xbee	14
FIGURA 4 – Estrutura Geral de um Quadro (frame) API	15
FIGURA 5 – Inserindo um módulo XBee RPSMA ao adaptador CON-USBBEE XPlus ...	21
FIGURA 6 – Diagrama de Pinos do Módulo XBee Pro Series 2	22
FIGURA 7 – Tela Principal do Sistema de Telemetria	28
FIGURA 8 – Tela para Informações Detalhadas sobre a Velocidade	29
FIGURA 9 – Tela para Informações de Voos Passados	29

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Comparativo entre Wi-fi, Bluetooth e Zigbee	11
TABELA 2 – Fórmulas para cálculo de CL e CD	18
TABELA 3 – Características do Módulo Xbee PRO Series 2	23
TABELA 4 – Características do Microcontrolador PIC 18LF4620	26

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	3
1.2	Estruturação do Trabalho	4
1.3	Objetivos	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Sistemas de Telemetria	5
2.2	Comunicação Wireless.....	7
2.2.1	Wi-fi.....	9
2.2.2	Bluetooth	9
2.2.3	ZigBee.....	10
2.3	Utilização do Padrão ZigBee	11
2.4	Módulos XBee.....	13
2.5	Modos de Operação.....	14
3	METODOLOGIA	16
3.1	Percurso para aquisição de dados.....	16
3.2	Variáveis Monitoradas.....	16
3.2.1	Temperatura	16
3.2.2	Corrente	17
3.2.3	Velocidade	17
3.2.4	Pressão.....	18
3.3	Sistema Supervisório.....	19
4	MECANISMOS DE AQUISIÇÃO E RECEPÇÃO DE DADOS	20
4.1	Hardware	20
4.1.1	Estação Coordenadora.....	21
4.1.2	Estações Móveis	21
4.2	Software	27
4.2.1	Sistema Supervisório.....	27

4.2.2	Montagem e Gerenciamento de Pacotes da Rede.....	30
5	CONCLUSÕES	31
5.1	Trabalhos Futuros.....	31
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1 INTRODUÇÃO

A utilização de Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANTS) é um fato cada vez mais crescente ao redor do mundo. Isso não é diferente no Brasil, onde normas e regras já foram estabelecidas para tratar deste assunto. Porém, por enquanto a legislação brasileira só diz respeito às aeronaves remotamente pilotadas, ou seja, que sofrem ação direta de um piloto em todas as fases do voo, excluindo assim as aeronaves autônomas, em que os parâmetros estabelecidos antes do voo não podem ser alterados ou gerenciados. As aeronaves autônomas não possuem autorização para circular no espaço aéreo brasileiro em nenhuma condição.

Pelas normas e regras Brasileiras, existem dois tipos de aeronaves remotamente pilotadas: os aeromodelos e as RPA (*Remotely Piloted Aircraft*, em português: Aeronave Remotamente Pilotada). A diferença básica entre esses dois termos é a utilização: aeromodelos são as aeronaves utilizadas apenas para fins exclusivamente recreativos ou de competição, já os RPA são aquelas aeronaves utilizadas para fins não recreativos (MARINHO, 2015).

Os aeromodelos são reconhecidos como aeronaves, de acordo com as definições presentes na Lei 7.565 (Código Brasileiro de Aeronáutica). No Brasil, segundo a Confederação Brasileira de Aeromodelismo (COBRA), existem 123 clubes de aeromodelismo registrados, espalhados por 22 estados brasileiros, incluindo o Distrito Federal. Esses clubes são mantidos pelos cerca de 2600 aeromodelistas associados à COBRA. Em sua grande parte, os aeromodelos são pequenas miniaturas dos grandes aviões que circulam mundo afora, sejam eles monomotores, cargueiros, jatos ou aviões para o transporte de passageiros (COBRA, 2016).

As RPA estão sendo utilizadas para filmagens, fotografias, atividades agrícolas e militares, mapeamento de imagens 3D, monitoramento meteorológico, missões de busca, usos como robôs industriais, combate a incêndios, distribuição de remédios e alimentos em ambientes hostis, dentre muitos outros usos que já existem ou ainda estão por vir. Ao se falar desse tipo de aeronave, é comum também ver o termo RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*), que é o conjunto de fatores envolvidos no voo de uma RPA (estação de pilotagem remota, equipamento de apoio, link de comando, sistema de telemetria e outros componentes).

Assim como as aeronaves tripuladas, as aeronaves remotamente controladas necessitam de um projeto aeronáutico para que tudo dê certo durante o voo. Esse foi um dos fatores que levou a criação da Competição SAE Aerodesign, em 1986, nos EUA, em que estudantes são desafiados a projetar uma aeronave remotamente controlada, utilizando-se de técnicas e conhecimento de Engenharia Aeronáutica, desde o projeto até o voo em si. Em 1999, iniciou-se a Competição SAE Brasil de AeroDesign. A competição brasileira, como o próprio nome indica, é organizada pela SAE Brasil, “ [...] uma associação sem fins lucrativos que congrega pessoas físicas (engenheiros, técnicos e executivos) unidas pela missão comum de disseminar técnicas e conhecimentos relativos à tecnologia da mobilidade em suas variadas formas: terrestre, marítima e aeroespacial.” (SAE BRASIL, 2015).

A cada ano novas regras são impostas no regulamento da competição, obrigando as equipes a aperfeiçoarem cada vez mais os projetos, que por consequência apresentam cada vez maior qualidade, com melhorias construtivas e o uso de ferramentas sofisticadas para melhorar a nota do projeto como um todo. Outro fator crescente é a participação cada vez maior de equipes na competição. Na edição de 2016, já estão inscritas 93 equipes, que são divididas em três categorias: aberta, na qual as aeronaves são geralmente maiores, micro, em que as aeronaves são menores, e a regular, que é a categoria que apresenta o maior número de restrições (SAE BRASIL, 2016).

Ao contrário do que se imagina o projeto de uma aeronave do porte das aeronaves remotamente controladas utilizada no aerodesign não é simples. Diferentemente do que acontece com os aviões de dimensões maiores e, conseqüentemente, velocidades maiores, o material de estudo ainda não é tão vasto, faltando, muitas vezes, testes e experimentos específicos que podem ser aplicados aos pequenos aviões. Outra dificuldade encontrada, é que os equipamentos utilizados para ter se noção das reais condições de voo de uma grande aeronave não são facilmente aplicáveis à uma pequeno avião, que possui espaço físico muito mais restrito para a instalação dos sistemas.

Tratando-se de Aerodesign, um fator que dificulta ainda mais, é o fato de a eficiência estrutural (razão entre a carga carregada e a massa da aeronave) ser uma questão que vale muitos pontos para a equipe, sendo assim, quanto mais leve o avião, melhor para a equipe. Por essa razão, várias equipes abrem mão da utilização dos sistemas de telemetria e trabalham mais na busca de matérias que possam reduzir o peso do avião. Porém, a telemetria em testes pode ajudar a

desvendar erros durante o projeto de concepção da aeronave, o que pode ser corrigido e assim ajudar a somar mais pontos para a equipe.

1.1 Motivação

A telemetria, embora descartada muitas vezes por agregar peso a aeronave, pode ajudar a fundamentar o projeto teórico da mesma, bem como fazer registros de voo que permitam à equipe reconstruir as condições à qual a aeronave foi exposta. Porém, a utilização da telemetria esbarra em outro fator limitante: o alto custo. Atualmente, os sistemas de telemetria disponíveis no mercado precisam todos eles de ser importados. Além do preço já ser multiplicado, uma vez que lá fora os sistemas são vendidos em dólar, a compra de um sistema desses ainda esbarra no alto índice de impostos do Governo Brasileiro sobre importação de produtos eletrônico.

Além disso, os sistemas de telemetria existentes no mercado esbarram em outro problema: interface gráfica confusa. Muitas vezes esses sistemas são utilizados para mais de um tipo de aplicação: aeromodelos, carros de controle remoto, barcos de controle remoto, entre outras aplicações, tornando a utilização deles não tão usual e os resultados nem sempre são aqueles que são desejados.

Esses três fatores, tamanho, custo e facilidade de utilização, são os grandes pontos negativos dos sistemas de telemetria existentes no mercado brasileiro hoje em dia. Sendo assim, a criação de um sistema que corrigisse, ou ao menos amenizasse, esses três fatores seria algo de extrema utilidade para as equipes de aerodesign brasileiras.

Para o trabalho em questão, após a pesquisa das comunicações wireless que poderiam ser utilizadas para desempenhar a função de envio de dados, teve-se a ideia de utilizar o conjunto de especificações para a comunicação sem fio ZigBee, devido basicamente ao baixo custo, consumo energético, tempo de latência e por possuir uma boa segurança. Apesar de ser uma tecnologia em crescente ascendência, com mais de 600 projetos certificados, mais de 400 empresas que o utilizam e milhões de aplicações ao redor do mundo (ZIGBEE,2014), ainda não vem sendo utilizada nesse tipo de projeto.

1.2 Estruturação do Trabalho

O primeiro capítulo do trabalho trata-se da introdução do assunto e da motivação que levou a tratá-lo como o tema de uma monografia, além de mostrar os objetivos da mesma.

O segundo capítulo perpassa a revisão bibliográfica realizada para se encontrar o melhor tipo de comunicação wireless para ser aplicada no sistema de telemetria para o aerodesign, bem como expõe estudos realizados quando à utilização de um sistema de telemetria em si. Finaliza-se o capítulo com uma maior explicação sobre o padrão de comunicação adotado.

A metodologia utilizada no trabalho, mostrando o método adotado no desenvolvimento do sistema, é mostrada no capítulo terceiro. O quarto capítulo mostra a integração entre a leitura de dados pelos sensores na aeronave, a distribuição dos dados pela rede sem fio, uma descrição detalhada dos componentes a serem utilizados e, então, o monitoramento ou o tratamento de dados pela interface gráfica.

O último capítulo, o quinto, apresenta as conclusões do trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

1.3 Objetivos

O objetivo principal do presente trabalho é apresentar a proposta de projeto de um sistema de telemetria que possa ajudar estudantes e aeromodelistas a identificar as reais condições às quais suas aeronaves estão submetidas, de um modo simples, autoexplicativo e com baixo custo. Assim, a partir dos dados mostrados pelo sistema, melhorias poderão ser propostas para as aeronaves.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As pesquisas referentes ao trabalho basearam-se basicamente em duas frentes: nos sistemas e técnicas de monitoramento já existentes e nas tecnologias de comunicação *Wireless*, com foco no padrão Zigbee e nos Módulos Xbee.

2.1 Sistemas de Telemetria

A palavra telemetria é derivada da junção de duas palavras gregas: *tele*, que significa longe e *metron*, que significa medida, ou seja, um Sistema de Telemetria é algo que faz medições a distância (DIAS, 1992). O propósito desses sistemas é transmitir dados, que sejam confiáveis e com informações importantes, de um sistema remoto para uma base, que se encontra fora do sistema, onde os dados poderão ser estudados (CCSDSC, 1987). A utilização destes sistemas começou com a necessidade de realizarem-se medições em lugares inacessíveis ao homem, a exemplo da medição de temperatura em alto forno que oferece riscos até mesmo para os sensores instalados nos mesmos, uma vez que alguma alteração poderia danificar os mesmos (MATTOS, 2004).

As aplicações de telemetria permeiam diversas áreas do conhecimento, alguns exemplos são indústria aeronáutica, aeroespacial, usinas nucleares e medicina. Na aeronáutica, tanto nos veículos não tripulados quanto nos tripulados, a telemetria é importante, uma vez que o sistema pode mostrar o que se passa com os mesmos durante o voo e medir parâmetros que não são visíveis a olho nu, como a fadiga da asa. Na indústria aeroespacial, esses sistemas além de enviarem informações do equipamento, auxiliam também no envio de imagens. Em usinas nucleares, eles realizam a medição em ambientes insalubres para o homem. E na medicina, a telemetria é importante para monitoramento de diversas pessoas com saúde debilitada (MATTOS, 2004).

Basicamente, um sistema de telemetria é composto por ao menos um sensor, ou um grupo deles, uma interface entre os sensores e a rede de comunicação, um conjunto de comunicação transmissor / receptor e um mostrador ou qualquer outro tipo interface gráfica, para

monitoramento dos dados obtidos (PIOVESAN, 2008). A Figura 1 representa o modelo básico de um sistema de telemetria. Os sistemas de telemetria são considerados sistemas de tempo real, isto é, o atraso no processamento de dados é suficientemente pequeno para que as pessoas possam interagir com os eventos que estão acontecendo. Porém, existe uma parte do processamento do sistema de telemetria que ocorre sem ser em tempo real, que faz o armazenamento parte de uma análise posterior (DIAS, 2010).

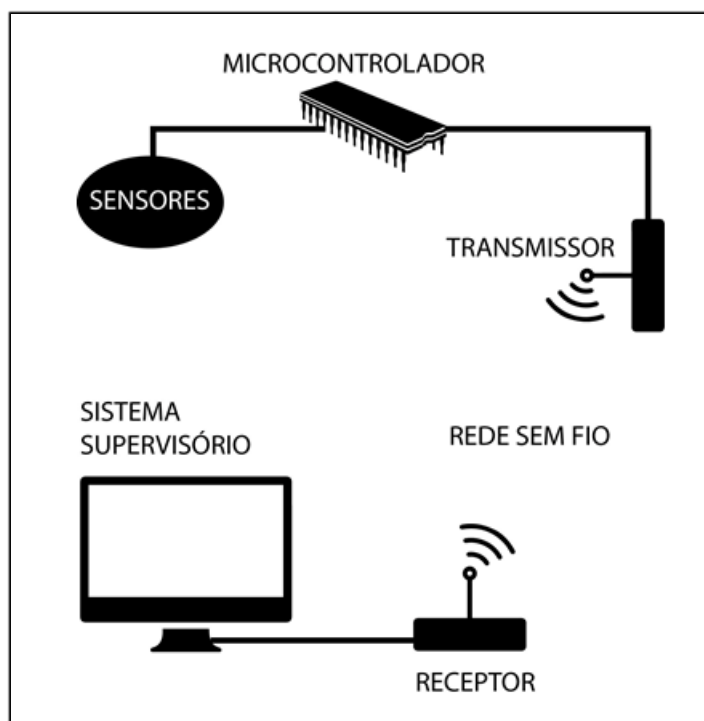


FIGURA 1 – Esquema de um Sistema de Telemetria.

Em um projeto aeronáutico, como o tratado nesta monografia, a utilização do processamento em tempo real é importante para analisar os parâmetros que influenciam diretamente no voo e, que em muitas vezes, são fatores essenciais para o êxito de um voo. Para um aerodesign, características que podem ser analisadas durante o voo são a tensão da bateria, o funcionamento do motor e o funcionamento dos servos, que comandam os ailerons, lemes e profundores.

Uma gama de outros parâmetros pode ser analisada após o voo ter sido completo, como o funcionamento do trem de pouso, os esforços nos servos motores e a velocidade da aeronave. A vantagem da telemetria é que, mesmo ocorrendo algum acidente com a aeronave, como os

sensores possuem comunicação com uma base, os dados obtidos por eles antes do acidente podem ser analisados e, assim, podem-se analisar as possíveis causas do acidente.

Adaptando o que foi proposto por Mattos (2004) para o aerodesign, podem-se listar cinco atividades principais nas quais os dados obtidos na telemetria seriam úteis. São elas: reconstrução do voo, melhor trajetória estimada, correlação de eventos, investigação de anomalias e comparação com simulações. A primeira atividade seria integrar os dados obtidos para reconstruir o cenário que ocorreu durante um determinado voo. A segunda consiste em definir o trajeto percorrido pela aeronave. A correlação de eventos consiste em associar determinadas características de voo à algum parâmetro medido. Quanto às anomalias, os dados servem para entendimento do que houve de errado durante o voo. E por último, talvez sendo a característica mais importante para o aerodesign, a telemetria ajuda a comparar o que ocorreu em um teste com o que foi calculado e projetado para ocorrer. Dessa maneira, cálculos estruturais podem ser alterados, bem como o valor de determinadas variáveis.

2.2 Comunicação Wireless

A palavra *wireless*, junção das palavras *wire*, que significa fio, e *less*, que significa sem, é quase alto explicativa. Sendo assim, a comunicação wireless nada mais é do que uma comunicação entre dispositivos sem o uso de nenhum tipo de cabo. As redes sem fio permeiam diversas aplicações no dia a dia das pessoas, como o uso da internet por wi-fi, o uso de celulares, mouse sem fio, entre outras.

É notável a crescente aplicação da comunicação wireless, porém esse crescimento vem acompanhado também de avanços tecnológicos, que por sua vez, não podem se esquecer da competitividade que existe no mercado e assim, devem-se focar cada vez mais na redução de custos dessas aplicações, seja no preço de entrada do produto ou no custo de manutenção do mesmo (AZEVEDO, 2010). Os avanços são demonstrados pelo número de protocolos diferentes que vem sendo desenvolvidos pelas empresas do ramo, visando sempre a redução de custos, que muitas vezes estão relacionados ao consumo de cada tipo de comunicação.

Em primeira instância, o foco desse tipo de comunicação era a transmissão de dados e voz, com elevadas taxas de transferência. Essa ênfase fazia com que os equipamentos possuísem preços elevados e, assim, esse tipo de comunicação era descartado para aplicações mais simples. A utilização de protocolos para a comunicação wireless na transmissão de dados de sensores ou comandos de dispositivos como botoeiras e relés eram então deixados de lado, uma vez que essas aplicações não requeriam uma elevada taxa de transferência, e sim baixa latência e consumo de energia reduzido.

Até então, os fabricantes que utilizavam estes equipamentos adotavam soluções próprias, que causavam grandes problemas de compatibilidade. Focando nessas aplicações, é que se começou a desenvolver uma nova linha de protocolos para comunicação sem fio, focando num baixo consumo energético e, por consequência, na diminuição dos módulos de comunicação, que por sua vez passaram a ser vistos como elementos acessórios do sistema (SILVA, 2007).

Com todo o estudo sobre as redes sem fio, elas constituem hoje um vasto conjunto, o que motiva a abordagem das tecnologias wireless em grupos diferentes. Segundo Wilamowski e Irwin (2016) a classificação mais comum, aceita inclusive pelo o IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), leva em conta o propósito e o alcance das redes, dividindo-as em quatro grupos diferentes:

WPAN – *Wireless Personal Area Network*: redes wireless de baixo alcance, alcançando até 100 metros, que geralmente são presentes em celulares e computadores. O padrão utilizado por essas redes é o IEEE 802.15.1, baseado nas especificações Bluetooth. Além disso, vem sendo desenvolvido, desde 2004, o padrão IEEE 802.15.4 (ZigBee), que tem como ênfase um baixo consumo energético e, assim, torna-se um padrão importante para ser utilizado em aplicações que utilizam sensores alimentados por bateria.

WLAN – *Wireless Local Area Network*: redes sem fio com alcance entre os 100 e 300 metros, frequentemente utilizadas como extensão ou alternativa às redes com cabeamento. Nesse grupo, enquadram-se as redes Wi-fi, que seguem o padrão IEEE 802.11.

WMAN – *Wireless Metropolitan Area Network*: grupo que enquadra redes banda larga de âmbito metropolitano, cujo alcance pode chegar a 6 km, e basicamente é um conjunto de várias WLANs. Fazem parte desse grupo as rede WiMAX que são baseadas no protocolo IEEE 802.16d/802.16e.

WWAN – *Wireless Wide Area Network*: é o grupo que apresenta maior alcance, destinado para serviços de telecomunicações (voz e dados) com longas distâncias de transmissão.

Conhecidos estes tipos de redes, foram analisados três tipos que poderia ser utilizados no desenvolvimento do sistema de telemetria proposto, são elas: Wi-fi, Bluetooth e ZigBee. Esses três tipos de comunicação wireless são descritos nas subseções a seguir.

2.2.1 Wi-fi

O primeiro tipo de comunicação wireless a ser analisada é regida pelas especificações da norma IEEE 802.11b,g: o Wi-fi. Dispositivos com esse tipo de comunicação operam na frequência de 2,4 GHz, sendo assim, podem sofrer interferência de outros dispositivos com mesma comunicação, bem como de outros elementos, como satélites, fornos micro-ondas e celulares. O protocolo Wi-fi é destinado principalmente a atividades que necessitam de uma elevada taxa de transferência, tais como transferência de arquivo ou acesso à Internet e a conteúdos multimídia, uma vez que apresenta velocidade que podem chegar a 11 Mbps em ambientes fechados com menos de 30 metros, ou mesmo 54 Mbps em ambientes abertos, num raio de até 90 metros (AZEVEDO, 2010).

Devido a sua finalidade, a pilha protocolar desse padrão de comunicação, em termos de hardware, pode assumir um tamanho elevado. Outro ponto negativo do Wi-fi é o consumo de energia superior ao Bluetooth e Zigbee, especialmente quando em *standby* (SILVA, 2007).

2.2.2 Bluetooth

O Bluetooth trata-se de um protocolo baseado no padrão IEEE 802.15.1. Na versão Bluetooth 2.0 são suportadas velocidades de até 2,1 Mbps e esse padrão é geralmente utilizado em aplicações de baixo consumo com raio máximo de 10 metros, nas classes de potência mais elevada do padrão. Assim como o Wi-fi, esse padrão atua na banda de 2,4 GHz. O consumo energético do padrão Bluetooth é muito menor do que o do Wi-fi, porém a área de cobertura é bem menor. Apesar de contraditório, esse baixo alcance pode ser considerado uma boa característica, uma vez

que a mesma frequência pode ser utilizada em áreas próximas (CARDEIRA, COLOMBO, SCHOOP, 2014).

Outras características dessa tecnologia são a possibilidade de implementação mesmo em pequenos microcontroladores, uma vez que não é necessário nenhum tipo de sistema operacional; a codificação aberta; o *duty cycle* moderado, com consumo idêntico para qualquer dispositivo conectado à rede; elevada qualidade de serviços (QoS); e suporte a redes com topologia estrela, podendo agregar 7 clientes. Um ponto negativo é a dificuldade de criação de redes extensas sem elevados custos em termos de sincronização (SILVA, 2007).

2.2.3 ZigBee

O ZigBee trata-se de um protocolo de rede sem fio de baixa taxa de transmissão de dados, que possui como principais vantagens a baixa complexidade, baixo custo, baixo consumo energético e a alta segurança. O seu conjunto de especificações é definido pelo padrão IEEE 802.15.4 e o objetivo principal é o de interligar unidades de coletas de dados e controle por meio de sinais de radiofrequência não licenciados, permitindo uma comunicação global e confiável (DUAN; LI, 2008). A faixa de operação inclui a banda não licenciada dos 2,4 GHz, usada na maioria dos dispositivos Wi-fi e Bluetooth, que concede um alcance de aproximadamente 100 metros, porém uma baixa taxa de transmissão de dados, alcançando os 250 Kbps (AZEVEDO, 2010).

A principal vantagem deste protocolo em relação aos outros dois tipos de rede wireless apresentado (Wi-fi e Bluetooth) é o baixo consumo, principalmente quando considerados os períodos de inatividade do mesmo, em que o consumo do padrão ZigBee chega a ser 100 vezes mais baixo se comparado ao Bluetooth. Essa característica deve-se à característica que esses dispositivos têm de permanecerem longos períodos sem comunicação (SILVA, 2007).

Outra característica importante é o fato do protocolo ZigBee suportar diferentes topologias de rede Wireless, sendo uma boa alternativa em aplicações de baixo consumo energético e baixo alcance. (AZEVEDO, 2010). Além disso, o ZigBee suporta tanto topologias de rede estáticas quanto dinâmicas, sejam elas em estrela ou em malha (SILVA, 2007).

Este protocolo pode ser comparado às redes Bluetooth e Wi-fi, diferenciando-se principalmente pelo consumo; alcance reduzido, porém possui a possibilidade de comunicação entre duas unidades ser repetida pelas unidades existentes na rede até o destino final, sendo assim, todos os pontos podem funcionar como retransmissores. Devido a essas características, uma malha com módulos ZigBee pode realizar atividades numa extensão maior (LEE; SU; SHEN, 2007).

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre os três tipos de comunicação expostos anteriormente.

TABELA 1 – Comparativo entre Wi-fi, Bluetooth e Zigbee.

Característica	Wi-fi	Bluetooth	Zigbee
Consumo de Energia	Alto	Alto	Baixo
Taxas de Transferência	Até 54 Mbps	Até 2,1 Mbps	Até 250 Kbps
Alcance	Até 100 m	Até 10 m	Até 100 m
Segurança	Baixa	Alta	Alta
Dispositivos por Rede	2007	7	> 65000
Topologia	Ponto a Ponto, Estrela	Ponto a ponto, Estrela	Estrela, Árvore, Malha
Frequência dos Protocolos	2,4 GHz; 5GHz	2,4 GHz	868 MHz; 915 MHz; 2,4GHz

2.3 Utilização do Padrão ZigBee

Ante o exposto na seção anterior, é possível constatar que o Zigbee torna-se uma opção de baixo consumo energético e alcance relativamente aceitáveis, o que faz com que este padrão seja o mais indicado para o presente trabalho, uma vez que o sistema exige um bom alcance e consumo baixo, uma vez que deverá ser alimentado por bateria, já que ele vai embarcado na aeronave. Além disso, a estrutura dos protocolos é menos complexa, exigindo assim menos recurso dos dispositivos que venham a utilizá-la.

O padrão ZigBee é desenvolvido pela ZigBee Alliance, e hoje possui mais de 400 empresas associadas, que variam de desenvolvedores da indústria de semicondutores e software à fabricantes de equipamentos. A ZigBee Alliance surgiu 2002, com apenas 25 membros, como uma organização sem fins lucrativos, aberta a todos aqueles que desejam participar (FARAHANI, 2008).

O estabelecimento de uma rede sem fio Zigbee se dá por meio da utilização de hardwares compactos e específicos, denominados módulos, e de um microcontrolador embarcado com o protocolo. Os módulos podem exercer funções de roteamento, coordenação ou dispositivos finais. Os módulos roteadores estabelecem o trajeto do fluxo de dados que passam pela rede. Os coordenadores assumem a função de ordenar o funcionamento dos outros módulos durante a transmissão, podendo também realizar a função de transmitir dados obtidos para o dispositivo de armazenamento. Já os dispositivos finais, são os responsáveis por realizar medidas de sinais elétricos, analógicos ou digitais, dos sensores ou equipamentos e por se comunicar com os microcontroladores.

Os arranjos de uma rede Zigbee podem ser em Estrela, Malha ou Árvore. Na configuração Estrela o coordenador é responsável por iniciar a rede e manter os dispositivos conectados, sendo assim, todos os outros dispositivos estão conectados a ele. Na configuração Malha, o coordenador inicia a rede, escolhe alguns parâmetros, mas os terminais podem conecta-se na rede através de roteadores. Já o arranjo árvore, é parecido com o arranjo em malha, porém neste os roteadores podem comunicar-se entre si, sem passar pelo coordenador. Os tipos de módulos descritos e um esquema das topologias de rede podem ser visualizados na representação mostrada na Figura 2.

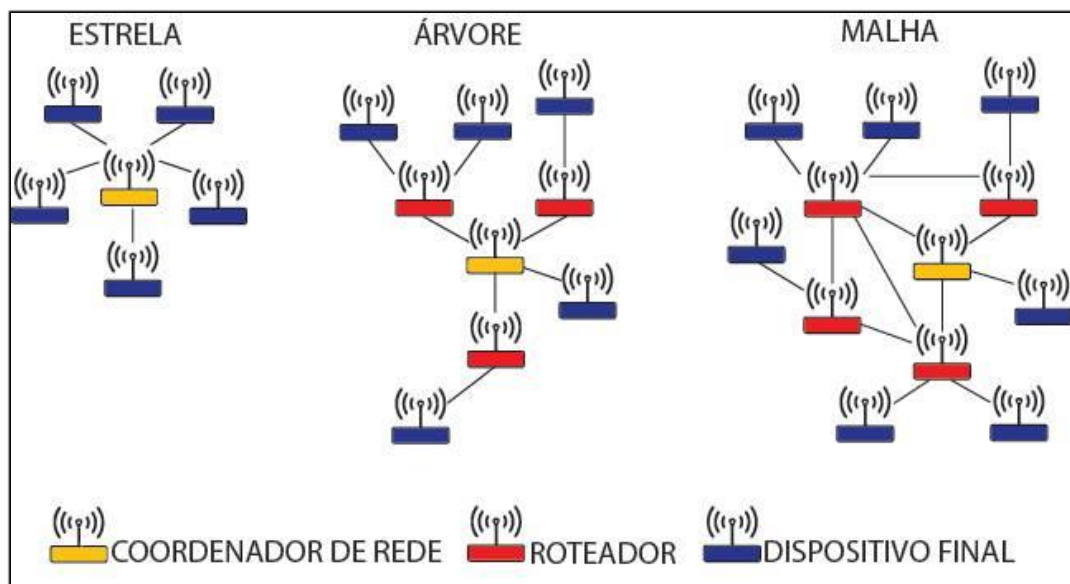


FIGURA 2 – Topologias de Rede ZigBee

Várias empresas trabalham com o desenvolvimento de módulos que utilizam o padrão ZigBee. Na próxima seção, analisaremos um conjunto de módulo bastante utilizado, fabricado pela Digi International: os módulos Xbee.

2.4 Módulos XBee

Os módulos desenvolvidos pela Digi International, que são classificados pela potência de transmissão em Xbee e Xbee-PRO, são plataformas de radiofrequência que utilizam a mesma configuração física de pinos para diferentes séries de arquitetura de software e hardware. No mercado, existem atualmente seis séries de Módulos Xbee.

Como visto em Soares (2012), o que diferencia as séries são a frequência de operação, taxa de transmissão, alcance e consumo energético. Sendo assim, todas essas características devem ser analisadas para escolher o módulo mais indicado para cada aplicação.

A frequência de operação dos módulos implica diretamente na taxa de transmissão. Os modelos que operam com 2,4GHz apresentam taxas de transmissão superiores aos de 900 e 868 MHz e alcance inferior. O alcance reduzido, por sua vez, pode ser corrigido com a utilização de antenas.

Os módulos Xbee apresentam três tipos de antenas: *on chip*, que proporcionam baixo alcance, porém ocupam pouco espaço físico; externas, que proporcionam alcance maior, mas ocupam grande espaço físico; e *whip*, que apresentam alcance e tamanhos intermediários. Junto com as antenas externas vem o fator custo, uma vez que as antenas e conectores devem ser adquiridos separadamente. Estes estilos de antenas são mostrados na Figura 3.

Conforme já citado, quanto a potência de transmissão, os módulos são do tipo Xbee ou Xbee-PRO, com os modelos PRO apresentando uma potência de transmissão bem maior, proporcionando maior alcance. O ponto negativo é que o Xbee-PRO consome uma quantidade de energia consideravelmente superior ao Xbee.



FIGURA 3 – Tipos de Antena para módulos Xbee.
Fonte: DIGI, 2011. Adaptado pelo autor.

2.5 Modos de Operação

Existem dois modos de operação para o padrão ZigBee: Transparente e API (*Application Programming Interface*). No primeiro, os dados recebidos pelo rádio são diretamente encaminhados para o pino TX da saída digital. Já os dados recebidos pelo pino RX da entrada serial são adicionados à fila de transmissão via rádio. Ou seja, o módulo faz o papel da comunicação serial (OLIVEIRA, PORTEZANI, 2014).

O modo API nada mais é do que uma alternativa mais elaborada do modo transparente, pois tem os *baseframes* interpretados pelos dispositivos. As informações aqui são transmitidas em pacotes que interagem com as funções da rede, permitindo maior interação. Com este módulo é possível transmitir informações para múltiplos destinos sem alteração nos parâmetros, receber mensagem de sucesso ou falha para cada pacote transmitido e identificar o endereço de origem de cada pacote recebido. Um pacote de dados API é constituído de 4 campos: *Start Delimiter*, byte que indica o início do pacote; *Lenght*, 2 bytes que indicam o tamanho do campo de dados; *Frame Data*, que possui as informações necessárias para a transferência; e *Checksum*, que verifica a integridade da mensagem enviada. (LITJENS, 2009). A estrutura de um pacote API é mostrada na Figura 4, em que pode se observar também a divisão existente no *Frame Data*, em que o *API Identifier* indica qual mensagem está contida no segundo campo e *Identifier-Specific Data*, o qual possui os dados específicos da mensagem.

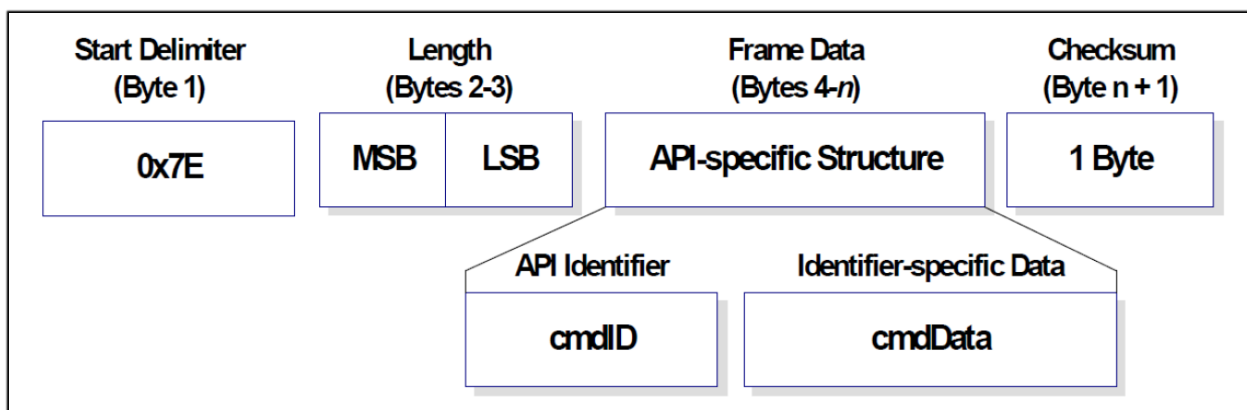


FIGURA 4 – Estrutura Geral de um Quadro (frame) API.

Fonte: DIGI, 2011.

As configurações e atualizações dos Módulos Xbee podem ser feitas por meio de um software disponibilizado pela própria Digi International, o XCTU. Já a leitura dos sensores para monitoramento das variáveis deve ser feita por algum software desenvolvido especificamente para tal aplicação, ou seja, uma espécie de sistema supervisorio.

O sistema supervisorio, ou qualquer outro software criado, deve conter uma função de transferência para converter os níveis de tensão adquiridos e transmitidos por um Módulo Xbee para um valor que possa ser interpretado. É valido ressaltar que os dados contidos nos frames API encontram-se no sistema hexadecimal, necessitando ser convertidos para o decimal e na sequência para um nível de tensão em milivolts, que depois será relacionado à um tipo de variável.

Sabendo dessas características dos módulos Xbee, a sequência do trabalho voltou-se para o entendimento da utilização dos mesmos, demonstrando a montagem teórica de um sistema de telemetria baseado nesses módulos.

3 METODOLOGIA

Nesta seção do trabalho é apresentada a metodologia a ser utilizada para o estudo e os componentes básicos a serem utilizados. Apresenta-se a aeronave e o percurso no qual os estudos foram realizados, as variáveis a monitoradas e a função do sistema supervisor a ser desenvolvido.

3.1 Percurso para aquisição de dados

Na Competição SAE Brasil de Aerodesign, para obter-se um voo que possa ser validado, a aeronave deve decolar dentro de um limite máximo, ganhar altura, realizar um voo de cruzeiro, realizar um voo de planeio e pousar dentro de uma área específica. Não existe limitação quanto à distância da aeronave, mas na prática, a distância máxima entre piloto e aeronave é estimada em torno de 1,2 km. Quanto a altura da aeronave em relação ao solo, a mesma não pode ultrapassar a distância de 400 pés, o que é equivalente a 121,92 metros de altura. (BRASIL, 1999) Além disso, para ter o voo validado a aeronave não pode soltar nenhum tipo de componente durante o mesmo, caso contrário, o voo é invalidado.

3.2 Variáveis Monitoradas

Baseando-se nos relatórios de projeto realizados pela Equipe 12 Bis entre os anos de 2011 a 2016, pode-se chegar a um conjunto de quatro variáveis cujo monitoramento pode ajudar na melhoria dos projetos e na correção de possíveis erros. As variáveis selecionadas para serem analisadas são descritas a seguir, bem como sua importância para o projeto de um aerodesign.

3.2.1 Temperatura

A temperatura é uma importante variável a ser mensurada durante o vôo, pois ela pode identificar possíveis problemas de superaquecimento em partes importantes da aeronave, como no motor e

na bateria. Além disso, determinando a temperatura, pode-se determinar a Densidade do Ar, para ver se está de acordo com aquela que foi utilizada nos cálculos de aerodinâmica. Caso apresente grande diferença, o projeto pode ser melhorado.

3.2.2 Corrente

A medição de corrente é um item de extrema valia para o projeto da aeronave. Além de mostrar o funcionamento dos servos e da bateria, a medição ajuda a confirmar se os torques obtidos nos cálculos de estabilidade e controle são realmente os que ocorrem na prática, e assim, pode determinar uma possível troca de servo motor, para algum outro que possa trazer mais vantagem para o projeto, como redução de peso ou, às vezes, aumento do torque.

A mensuração da corrente também pode ser utilizada para o correto dimensionamento da bateria e dos condutores utilizado na aeronave, uma vez que o superdimensionamento pode agregar muito peso à mesma. E ainda é possível determinar a carga da bateria principal da aeronave, para ver se ela encontra-se em condições de uso.

3.2.3 Velocidade

A variável que possui maior número de variáveis relacionadas num projeto de aeronave é a velocidade. Ela é utilizada nos projetos de aerodinâmica, estabilidade, controle, cargas, estruturas e desempenho de um aerodesign.

Na aerodinâmica, o valor da velocidade influencia na análise dos perfis, asas e empenagens a serem escolhidos, uma vez que interfere diretamente no número de Reynolds e nos Coeficientes de Arrasto (CD) e Sustentação (CL), que por sua vez influem diretamente na Eficiência Aerodinâmica (CL/CD).

O coeficiente de sustentação (CD) representa a eficiência do perfil em gerar a força de sustentação. Quanto maior o valor desse coeficiente, mais eficiente é a geração de sustentação. Já o Coeficiente de arrasto representa a medida da eficiência do perfil em gerar a força de arrasto. Enquanto maiores coeficientes de sustentação são requeridos para um perfil ser considerado

eficiente, menores coeficientes de arrasto devem ser obtidos. Ou seja, um perfil somente será considerado aerodinamicamente eficiente quando produzir pequenos coeficientes de arrasto aliados a grandes coeficientes de sustentação. Essa relação é a Eficiência Aerodinâmica, dada por CL/CD (RODRIGUES, 2014). Os coeficientes são dados pelas fórmulas mostradas na Tabela 1.

TABELA 1 – Fórmulas para cálculo de CL e CD

Coeficiente de Sustentação	Coeficiente de Arrasto
$CL = \frac{F_L}{0,5\rho v^2 A}$	$CD = \frac{F_d}{0,5\rho v^2 A}$

Para o Desempenho, a velocidade é importante na definição do grupo motopropulsor, uma vez que a tração e a eficiência de uma hélice possuem relação com a velocidade de cruzeiro da aeronave. Essa variável também influencia na elaboração do gráfico de Carga Paga de uma aeronave, uma vez que este leva em consideração os coeficientes de arrasto (CD) e sustentação (CL), que já foram explicados anteriormente, e também a velocidade de decolagem da aeronave. Além disso, a velocidade também pode ser utilizada para a previsão de alcance e autonomia da aeronave, no cálculo da Polar de Velocidades, potência do motor na subida e também no cálculo do Envelope de Voo.

No campo de estabilidade e controle, a velocidade tem relação com o cálculo dos torques nos servos das superfícies de controle, que são os ailerons, o leme e o profundor. Por fim, a velocidade é importante também no projeto de Cargas e Estruturas, uma vez que as velocidades de Mergulho, Cruzeiro, Manobra e Estol são consideradas para o cálculo dos esforços que são aplicados na aeronave.

3.2.4 Pressão

Por fim, outra variável a ser analisada é a pressão. Por meio dela pode-se determinar a altitude e a densidade do ar no ponto em que a aeronave se encontra. Como já mencionado anteriormente, a densidade do ar ajuda a monitorar se os cálculos de aerodinâmica condizem com a realidade. Já a

altitude, assim como a velocidade, influencia diretamente na construção do gráfico de carga paga da aeronave.

3.3 Sistema Supervisório

Para que os dados coletados durante o voo da aeronave possam ser coletados e analisados, foi desenvolvido um sistema supervisório, utilizando-se o Visual Studio 2015. Nesse sistema, o usuário pode visualizar os dados coletados através indicadores, gráficos e tabelas. Além disso, podem-se gravar os dados para uma análise posterior, para que possam ser comparados os resultados práticos com os desejáveis e de certa forma, reconstruir o voo ou identificar possíveis anomalias.

Uma das características desse supervisório é a existência de uma aba contendo todas as informações coletadas e ao menos uma aba destinada a cada tipo de medição, com informações mais detalhadas sobre as mesmas.

No supervisório, é possível também acompanhar os dados de mais de uma aeronave ao mesmo tempo, o que é uma característica muito boa para as universidades que possuem mais de uma equipe na competição, ou mesmo para equipes parceiras. Este fato também pode ser uma boa característica para aeromodelistas que possuem mais de uma aeronave ou mesmo para os clubes.

4 MECANISMOS DE AQUISIÇÃO E RECEPÇÃO DE DADOS

Nesta seção, realiza-se uma descrição de todos os componentes a serem utilizados no sistema de telemetria proposto. Apesar de ter ocorrido uma pesquisa para então saber quais os melhores instrumentos a serem utilizados, neste capítulo o foco será nas características dos componentes escolhidos e nas características de software. Para melhor entendimento, o capítulo foi dividido em duas seções principais: Hardware e Software.

4.1 Hardware

Esta subseção compreende o projeto e o desenvolvimento da parte física do sistema, com explicação dos circuitos utilizados para a aquisição de dados e também a codificação do firmware utilizado nas diferentes partes do sistema. A rede do sistema baseia-se na topologia em estrela com dois tipos de estações: Estação Coordenadora, que fica ligada a um notebook com sistema supervisorio, e Estações Móveis, que ficam dentro das aeronaves.

Outra Estação, que assumiria o papel de Estação de Referência, poderia ser adicionada ao sistema. Porém, como um dos objetivos é a redução de custos do sistema de telemetria, ela foi desconsiderada, e assim, apenas as duas citadas anteriormente conseguem realizar a atividade de medição de dados. Essa estação, que entraria entre as duas acima, poderia ajudar na logística do sistema, uma vez que o computador poderia ser utilizado a uma distância considerável da pista, porém, como praticamente todas as equipes possuem um computador portátil durante os testes, essa estação foi suprimida deste projeto.

Devido as características já apresentadas na Revisão Bibliográfica, escolheu-se o Módulo Xbee PRO Series 2 para ser o componente principal de todas as estações do sistema. Além disso, escolheu-se o modelo com antena *whip*, pois permite um alcance de cerca de 3,2 km em linha visível.

4.1.1 Estação Coordenadora

Esta parte do sistema é a responsável por receber os dados provenientes dos sensores e repassá-los ao sistema supervisor, que mostrará os dados para o usuário, bem como os armazenará para análises posteriores. A conexão entre a estação coordenadora e o computador portátil, que terá o sistema supervisor instalado será feita através de um adaptador fabricado pela Rogercom, o CONUSBEE XPlus.

Com a utilização do adaptador é possível estabelecer uma espécie de comunicação serial USB/RS232, através de um programa C# ou similar, uma vez que ao instalar o driver USB no computador, uma porta COMx será criada. Além disso, o adaptador CONUSBEE XPlus é compatível pino a pino com o módulo Xbee-Pro; possui regulador de tensão LDO, para baixa queda de tensão; possui comparador de tensão conectado aos LEDs (RSSI), para indicar a força do sinal RF; possui LEDs indicadores de transmissão e recepção (TX e RX); módulo associados a Rede e um botão para *reset* do módulo acoplado. (ROGERCOM, 2012). Alguns desses componentes podem ser identificados na Figura 5, que mostra a inserção de um módulo XBee ao adaptador em questão.

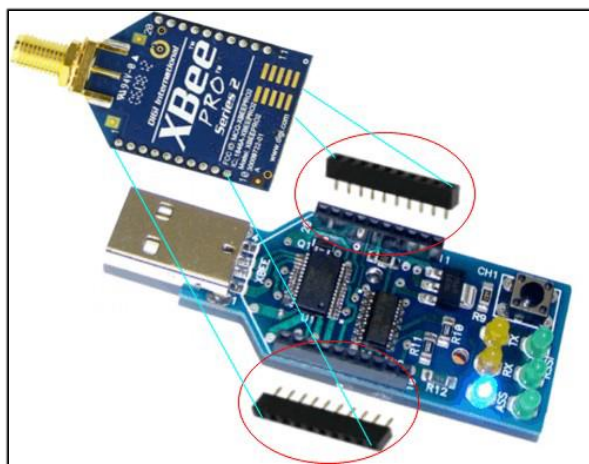


FIGURA 5 – Inserindo um módulo XBee RPSMA ao adaptador CON-USBEE XPlus.
Fonte: ROGERCOM, 2012.

4.1.2 Estações Móveis

As estações móveis constituem a parte principal do sistema de telemetria, uma vez que é onde são realizadas as medições que são objeto de análise. Apesar de cada aeronave possuir apenas uma

estação, aqui elas são tratadas no plural, pois uma mesma equipe, ou aeromodelista, pode possuir mais de uma aeronave, utilizando a mesma estação coordenadora descrita na subseção anterior.

Cada estação móvel é composta por Módulo transceptor Xbee-Pro, Sensor de Temperatura, Sensor de Corrente, Sensor de Vazão, Sensor de Pressão Diferencial e um Tubo de Pitot. Além disso, ainda compõem essa estação: bateria recarregável, circuitos reguladores de tensão, microcontrolador e fiação para ligação dos sensores.

Os materiais utilizados nas estações móveis são todos descritos nas próximas subseções. Os componentes eletrônicos adotados são todos de baixa potência, de modo a diminuir o consumo de energia, o que pode fazer com que o tamanho da bateria seja reduzido, e, ainda, para manter o padrão de tensão dos módulos XBee utilizados, que é de 3,3 V, para se ter compatibilidade entre os níveis de tensão dos componentes.

4.1.2.1 Módulos XBee PRO Series 2

O módulo Xbee PRO Series 2, já citado anteriormente foi o escolhido tanto para as estações móveis como a estação coordenadora. Basicamente, para o módulo funcionar é necessária a conexão dos pinos VCC (Tensão), GND (Terra), DOUT (pino de saída) e DIN (pino de entrada). Os demais pinos possuem mais de uma função e o seu uso deve ser determinado através do software XCTU.

Os pinos do módulo Xbee-PRO Series 2 são mostrados na Figura 7 e a Tabela 2 apresenta suas principais características.

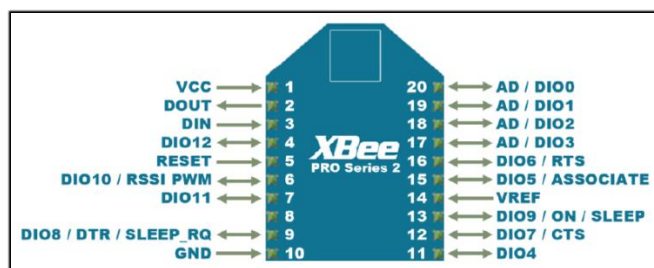


FIGURA 6 – Diagrama de Pinos do Módulo XBee Pro Series 2.
Fonte: SOARES, 2012.

TABELA 3 - Características do Módulo Xbee PRO Series 2

Alcance (Externo)	3200 m
Alcance (Interno)	90 m
Potência de Transmissão	+17 dBm
Frequência de Operação	2,4 GHz
Taxa de Transmissão	250 Kbps
Tensão de Alimentação	3,3 V
Tipo de modulação	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
Conversores AD	4 (10 bits)
Entradas e Saídas Digitais	15

Fonte: DIGI, 2011.

4.1.2.2 Sensor de Temperatura LM35

Para a medição da temperatura, foi-se escolhido o sensor LM35, muito utilizado em aplicações com essa finalidade, principalmente devido à seu baixo custo. O LM35 é um sensor de precisão em que a saída de tensão é linearmente proporcional à temperatura em graus Celsius. Essa característica é uma grande vantagem sobre os outros sensores de temperatura, uma vez que a maioria deles é calibrada em Kelvin e necessitam passar por uma conversão para se ter o valor em escala Celsius, o que pode aumentar o erro de medição. Sem nenhum tipo de calibração, esse tipo de sensor pode oferecer uma precisão de $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$ em ambientes fechados e $\pm 0,75^{\circ}\text{C}$ em ambientes externos, que é o caso em que será aplicado nesse projeto. A faixa de operação do LM35 é de -55 a 150°C , sendo mais que suficiente para a aplicação desejada. Outra vantagem é que como ele necessita apenas de uma corrente de $60\text{ }\mu\text{A}$. Além disso, esse tipo de sensor quase não apresenta aquecimento que interfira na medição, sendo esse menor do que $0,1^{\circ}\text{C}$ (TEXAS, 2016).

O microcontrolador PIC 18LF4620, que foi utilizado e é mais detalhado à frente, lê apenas valores inteiros entre 0 e 1023, sendo assim, é necessária uma expressão para deduzir a

temperatura em função do valor lido. Como a faixa de operação do LM35 é de -50 a 150°C e tensão é de 0 a 3.3V, tem-se a seguinte expressão:

$$Tensão = \left(Valor\ Lido * \left(\frac{3,3}{1023} \right) \right)$$
$$Temperatura = \frac{200 * Tensão}{3,3} - 50$$
$$Temperatura = \frac{200}{1023} * Valor\ Lido - 50.$$

4.1.2.3 Sensor de Corrente ACS712

O sensor de corrente ACS712 é um dispositivo, com funcionamento baseado no Efeito Hall, que consegue medir correntes entre -30 e +30 A. O Efeito Hall detecta o campo magnético gerado pela passagem de corrente, gerando na saída do módulo (pino OUT) uma tensão analógica proporcional a 66mV/A. Outras características apresentadas por este módulo é o fato dos bornes de ligação serem completamente isolados da saída do microcontrolador, funcionar com alimentação de 5,0 V e possuir tempo de resposta de 5μs (ALLEGRO, 2012).

O sensor ACS712 é do tipo invasivo, sendo necessária a interrupção do circuito para realizar a medição de corrente, diferente de alguns tipos de sensores que realizam a medição apenas envolvendo um dos fios do circuito. Essa característica torna este sensor uma ótima opção para instalações permanentes, como nos projetos de monitoramento à distância. Porém, com este modelo não é possível determinar a carga demandada por cada servo, apenas pode-se medir o consumo para determinar o quanto de bateria ainda tem-se disponível.

4.1.2.4 Tubo de Pitot e Sensor de Pressão Diferencial MS4525DO

Para a aquisição da velocidade e da pressão foi-se utilizado um conjunto composto por um Tubo de Pitot e o sensor MS4525DO, fabricado pela Measurement Specialties. O tubo de Pitot é um

modo indireto de medir a velocidade de uma aeronave e é o mais utilizado, mesmo nas grandes aeronaves.

O tubo de Pitot trata-se de dois tubos idênticos acoplados. O interno é o verdadeiro tubo de Pitot, mas usualmente usa-se essa denominação para toda a montagem. O tubo interno é um cilindro aberto na direção do movimento e com a parte traseira conectada a um medidor de pressão diferencial. O outro tubo é o tubo estático, fechado na posição frontal, alinhado tangencialmente com o fluxo do ar e com a parte traseira também conectada ao medidor de pressão diferencial. Quando a aeronave não se encontra em movimento, as pressões são as mesmas e o medidor de pressão diferencial indica zero. Quando a velocidade aumenta, a pressão do tubo aberto excede a pressão no tubo estático e assim pode-se calibrar o medidor de pressão diferencial para mostrar a diferença de pressão como velocidade (MATTOS, 2004).

Para o papel de medidor de pressão diferencial foi escolhido o sensor MS4525DO, que tem uma faixa de medição de 1 psi, podendo chegar a pressões equivalentes a velocidade de 100m/s. Sua resolução é de 0.84 Pa, possui saída digital de 14 bits para a pressão e alimentação entre 3,3 e 5,0V (MEASUREMENT, 2015). Deve ser realizada uma calibração na conversão da voltagem lida para o valor de pressão, e a partir daí, utilizar as pressões encontradas para então encontrar a velocidade a partir da seguinte fórmula:

$$v = \sqrt{\frac{2(P_{estática} - P_{dinâmica})}{\rho}},$$

onde ρ é a densidade do ar, calculada a partir dos valores obtidos pelos sensores de pressão diferencial e temperatura.

4.1.2.5 Microcontrolador PIC 18LF4620

O microcontrolador é a parte principal do sistema embarcado na aeronave. Basicamente, ele realiza as tarefas de calcular a distância do nó móvel até a estação coordenadora e realiza a leitura dos sensores de temperatura, corrente, velocidade e pressão.

Para esta função, foi escolhido o microcontrolador PIC 18LF4620, fabricado pela Microchip. A principal característica dos microcontroladores PIC do modelo LF é uma ampla faixa de tensão elétrica de alimentação. Para o modelo escolhido, a alimentação varia de 2 a 5,5V. Outras características importantes desse modelo são a presença de interface de comunicação RS232, entradas analógicas e interrupções externas (MICROCHIP, 2008). A Tabela 3 apresenta mais características do modelo adotado.

TABELA 4 – Características do Microcontrolador PIC 18LF4620.

Memória de Programa	64 K (32K words)
Memória de Dados	SRAM 3968
Memória não volátil EEPROM	1024 bytes
Entradas / Saídas	36
Entradas Analógicas	13 (A/D 10 bits)
CCP – Capture / Compare / PWM	1
ECCP – Enhanced Capture / Compare / PWM	1
MSSP	SPI e Master I ² C
EUSART (RS232, RS485 e LIN/J2602)	1
Timer 8 bits	1
Timer 16 bits	1

Fonte: MICROCHIP, 2008.

A leitura dos sensores é realizada utilizando-se as entradas analógicas presentes no PIC, uma vez que os sensores fornecem saída de tensão proporcional que, ao passar pelos conversores de tensão, enquadram-se na faixa de 0 a 3,3 Volts, suportada pelos módulos Xbee.

Após o microcontrolador realizar as atividades a ele destinadas, um pacote de dados é transmitido da estação móvel para a estação coordenador, que passa os mesmos para o computador e, assim, os dados são armazenados pelo software responsável.

4.1.2.6 Outros Componentes

Além dos componentes descritos é necessária para o funcionamento do sistema de telemetria a utilização de um notebook com o software do sistema supervisorio instalado; fiação para conexão dos sensores ao microcontrolador; circuitos reguladores de tensão, uma vez que o sistema opera com 5.0V, mas alguns componentes utilizados possuem voltagem de operação diferente, e uma bateria de 5.0V para alimentação do Sistema.

A bateria da própria aeronave pode ser utilizada para alimentar o sistema de telemetria, porém é aconselhável que se utilize uma outra para esta função, de modo a não sobrecarregar o sistema elétrico da aeronave e manter a segurança da aplicação. Aconselha-se também a utilização de bateria de LiFePo4, que geralmente são mais leves e oferecem maior segurança.

4.2 Software

A subseção software compreende o conjunto de ferramentas e programas que interagem entre si com o objetivo de gerenciar a rede sem fio proposta, compreendendo a análise e o armazenamento dos valores medidos. No caso deste trabalho, esta parte compreende o sistema supervisorio, que realiza o tratamento e processamento dos dados obtidos, para que sejam transformados em informações uteis ao usuário, bem como o armazenamento. Esta parte também realiza o gerenciamento dos pacotes da rede e a comunicação serial.

4.2.1 Sistema Supervisorio

O software criado para a análise e armazenamento dos dados teve como linguagem de programação o C#, devido a sua robustez e suporte a orientação a objetos. O supervisorio foi desenvolvido utilizando a ferramenta Visual Studio 2015, disponibilizada pela Microsoft. O principal objetivo desse sistema é fornecer, de maneira clara e intuitiva, as informações que são coletadas pelos sensores embarcados na aeronave e, baseado nessas informações, fornecer informações sobre as características do voo.

A Figura 7 mostra a imagem da tela principal do sistema supervisor, onde é visto os valores medidos pelos sensores, e a Figura 8 mostra uma das telas de Informações Detalhadas, exibindo algumas variáveis relacionadas à variável que está sendo medida.

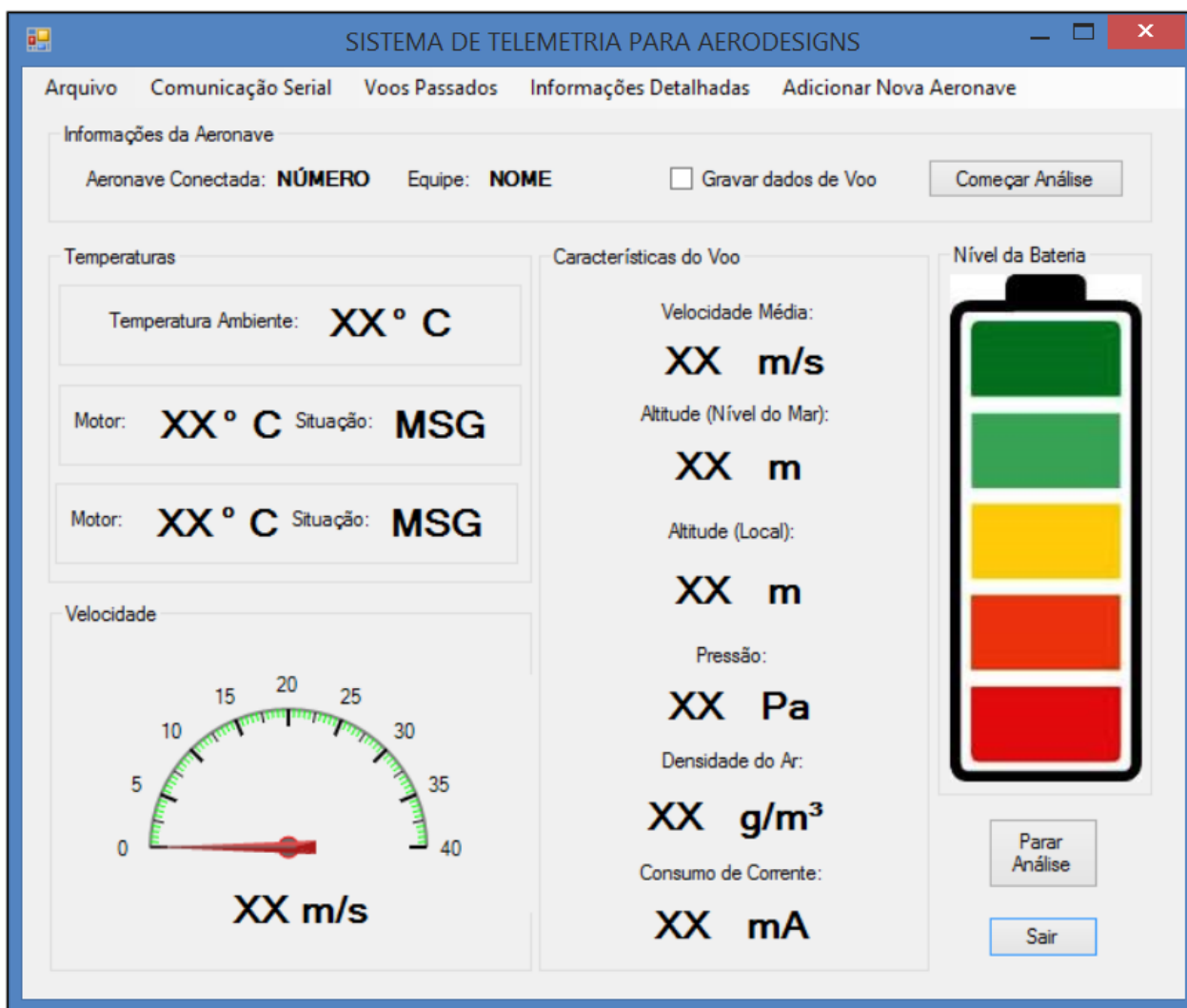


FIGURA 7 – Tela Principal do Sistema de Telemetria

Além de ver os dados durante o voo, o usuário tem a opção de carregar dados de voos antigos, para poder fazer comparação entre eles. A Figura 9 mostra a representação da aba onde podem ser plotadas as características de voos passados, mostrando como foi o comportamento das variáveis ao longo do voo.

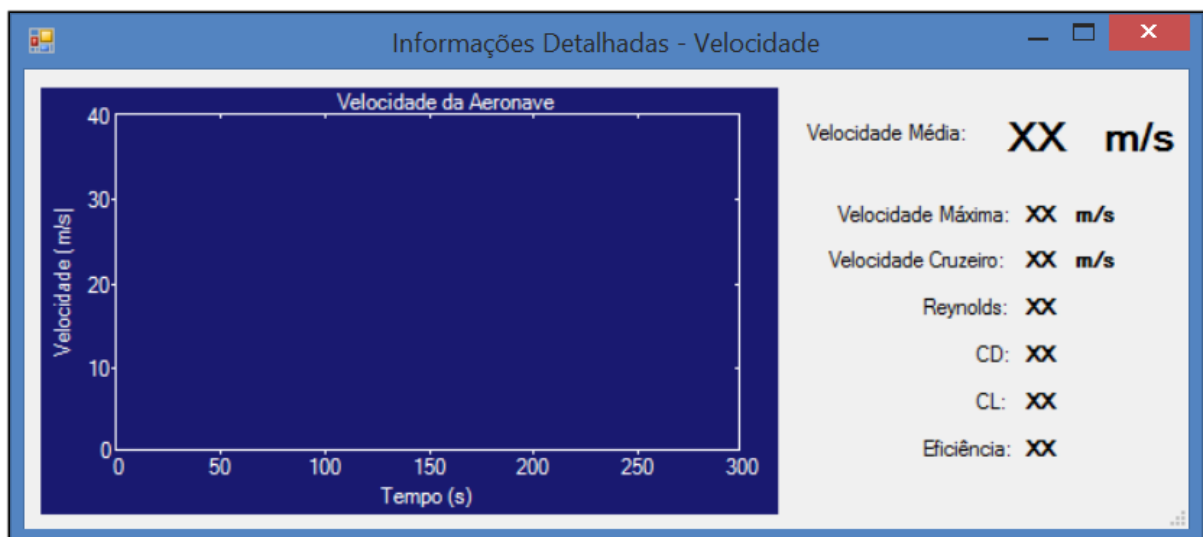


FIGURA 8 – Tela para Informações Detalhadas sobre a Velocidade

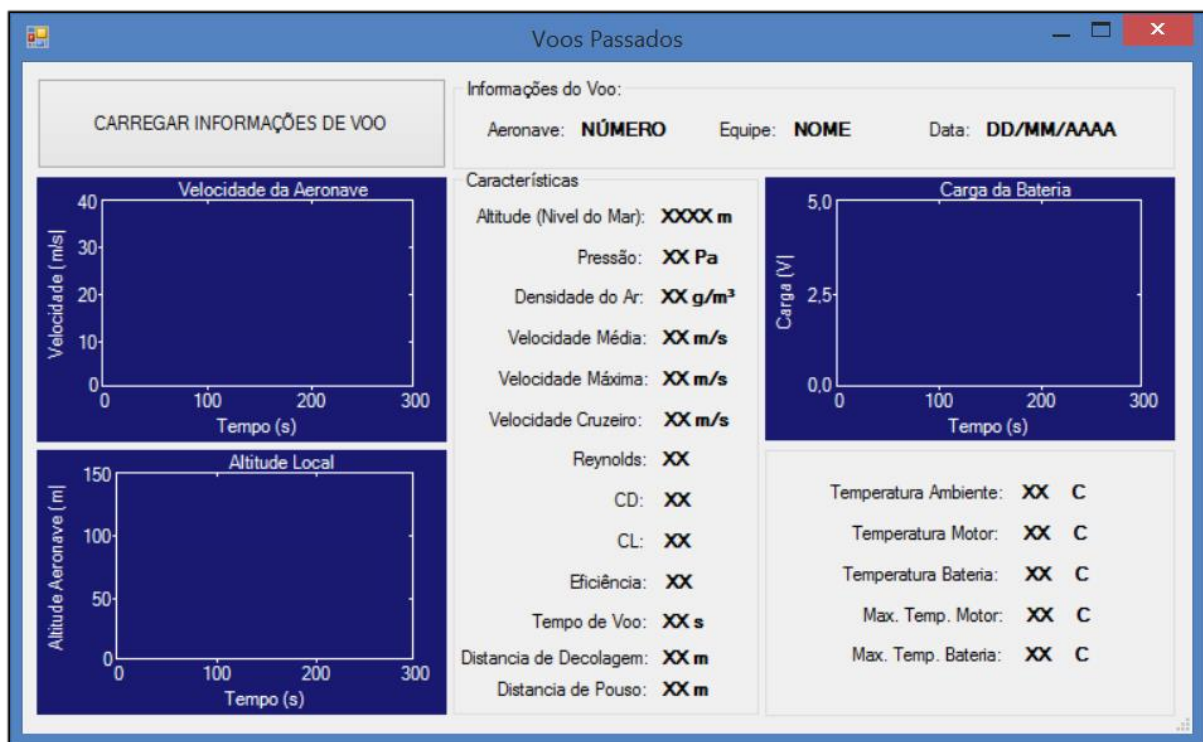


FIGURA 9 – Tela para Informações de Voos Passados

Para interpretar os dados, armazená-los e exibi-los na aba de monitoramento, existe uma camada de processamento de dados, que intermedia troca de informações entre os pacotes da rede, a interface gráfica e os dados armazenados.

Os valores lidos pelos sensores são armazenados em arquivos “.csv”, que podem ser acessados em qualquer ferramenta para edição de planilhas, como o Microsoft Excel. Junto dos valores fica registrada a data e hora em que foram lidos, para que seja possível realizar uma reconstrução do voo pelo usuário.

4.2.2 Montagem e Gerenciamento de Pacotes da Rede

O modo de operação API foi o escolhido para a montagem e gerenciamento dos pacotes de dados uma vez que os módulos devem enviar informações coletadas por diversos dispositivos diferentes para o sistema supervisor. Um software embarcado tem uma camada que é responsável pela montagem e desmontagem de pacotes API. Essa camada tem por objetivo facilitar o gerenciamento dos pacotes, construindo, enfileirando e verificando possíveis erros de comunicação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As redes de comunicação wireless tem ganhado cada vez mais lugar em aplicações industriais e científicas. Seu baixo consumo de energia torna interessante a utilização dessas redes em diversas aplicações, principalmente quando com utilização de sensores. O crescente vem acompanhado de pesquisas e utilização de novas tecnologias.

Neste trabalho foi mostrado o processo de desenvolvimento de sistemas de telemetria para um aerodesign, mas que pode ser estendido a qualquer tipo de aeronave não tripulada. Um sistema de telemetria é basicamente um sistema que consegue mostrar informações de um objeto que se encontra longe de onde as informações estão disponíveis. Neste estudo, este sistema foi baseado no protocolo ZigBee 802.15.4.

Acredita-se ter chegado ao objetivo, uma vez que todas as características necessárias para a montagem de um sistema de telemetria para aeronaves foram expostas, desde o hardware às funções de software, possibilitando a construção de um sistema através do exposto.

5.1 Trabalhos Futuros

Em trabalhos futuros pretende-se realizar a implementação do projeto, para se obter dados referentes ao mesmo em testes de campo, com o objetivo de validar o sistema de monitoramento, avaliando a precisão dos sensores utilizados.

Pretende-se avaliar a inserção de novos sensores para medir outras variáveis, as quais a medição possa trazer benefícios para o projeto das aeronaves ou mesmo para as pessoas que comandam as aeronaves via rádio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEGRO MICROSYSTEMS. **Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor**. ACS712 Datasheet, Massachusetts, 2008 [revisado em novembro de 2012].

AZEVEDO, C. M. O. **Comando e monitorização de sistemas de actuação via redes wireless: ZigBee**. 2010. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.

BRASIL. **Departamento de Aviação Civil**. Estabelece as Regras para a operação do Aeromodelismo no Brasil. Portaria n. 207, de 7 de abril de 1999.

CARDEIRA, C.; COLOMBO, A. W.; SCHOOP, R. **Wireless solutions for automation requirements**. Portugal: IDMEC, Instituto Superior Técnico, Alemanha: Schneider Electric GmbH, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/242308616_Wireless_solutions_for_automation_requirements>. Acesso em: Jun. de 2016.

CARVALHO, A. R. T. P. **Sistema móvel de telemetria para automóveis**. 2013. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Politécnico do Porto, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.

COBRA. **A Confederação** – Confederação Brasileira de Aeromodelismo. Limeira. Disponível em: <<http://www.cobra.org.br/confederacao.asp>>. Acesso em: Jun. 2016.

CONSULTATIVE COMMITTEE FOR SPACE DATA SYSTEMS (CCSDS). **Telemetry**: summary of concept and rationale. Green Book, Issue I. Frascati, Italy: CCSDS Plenary Meeting, 1986.

COOK, M. V. **Flight dynamics principles**. 2. ed. Boston: Elsevier, 2007.

DAC – DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. **Voos de RPAS (drones)**: entenda a nova legislação do DECEA. Assessoria de Comunicação Social do DECEA. 2015. Disponível em: <<http://www.decea.gov.br/voos-de-rpas-drones-entenda-a-nova-legislacao-do-decea/>>. Acesso em: Jun. 2016.

DIAS, J. E. A. **Eletrônica, instrumentação e telemetria do veículo UFVBAJA**. 2010. Monografia (Conclusão do Curso de Licenciatura em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2010.

DIGI International. **XBee® ZigBee** Embedded ZigBee modules provide OEMs with a simple way to integrate mesh technology into their application. 2011. Disponível em: < <http://www.digi.com/products/xbec-rf-solutions/rf-modules/xbec-zigbee#overview> > Acesso em: Jun. 2016.

FEDERAL AVATION ADMINISTRATION. **Pilot's handbook of aeronautical knowledge**. Washington: U.S. Department of Transportation, 2009.

LITJENS, O. J. **Automação de estufas agrícolas utilizando sensoramento remoto e o protocolo ZigBee**. 2009. Monografia (Conclusão do Curso de Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

MATTOS, A. N. **Telemetria e conceitos relacionados** – Uma visão geral dos sistemas de telemetria com ênfase em aplicações aeroespaciais. São José dos Campos: Edição do Autor, 2004.

MEASUREMENT SPECIALTIES. **MS4525DO**. MS4525DO Datasheet. 2015. Disponível em: <<https://www.cdiweb.com/datasheets/meas-spec/MS4525DO.pdf> > Acesso em: Jun. 2016.

MICROCHIP. **28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers with 10-Bit A/D and nanoWatt Technology** . PIC18FL2525/2620/4525/4620 Datasheet, USA, 2008.

NELSON, R. C. **Flight stability and automatic control**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1998.

OLIVEIRA, A. C.; PORTEZANI, C. H. **Transmissão de parâmetros ambientais através da tecnologia sem fio ZigBee**. Trabalho apresentado no Encontro de Ensino Pesquisa e Extensão (8º ENEPE UFGD e 5º EPEX UEMS), promovido pela Universidade Federal da Grande Dourado e pela Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul. Dourados. 2014.

PIOVESAN, F. C. **Telemetria aplicada na mecanização agrícola utilizando o Datalogger CR 1000**. 2008. Monografia (Conclusão do Curso de Ciência da Computação) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

QUEIRÓS, J. M. R. **Sistema de sensorização e telemetria de um VEC (veículo eléctrico de competição)**. 2011. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores: Major Automação) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

RAMOS, J. D. S. B. **Instrumentação eletrônica sem fio: transmitindo dados com módulos XBee ZigBee e PIC16F877A**. São Paulo: Érica, 2012. 238 p.

RODRIGUES, L. E. M. J. **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica com Aplicações ao Projeto SAE-AeroDesign: Aerodinâmica e Desempenho**. 1. ed. Salto: edição do autor, 2014. Disponível em: <<http://www.engbrasil.eng.br/livros/v1.pdf>>. Acesso em: Jun. de 2016.

ROGERCOM. **Manual do adaptador CON-USBBEE XPlus**. 2012. Disponível em: <<http://www.rogercom.com/ManualUsbBeeXPlus.pdf>>. Acesso em: Jun. de 2016.

SAE BRASIL. **Quem somos:** Sociedade de Engenheiros da Mobilidade. São Paulo. Disponível em: <<http://www.saebrasil.org.br/revista/somos.html>>. Acesso em: Jun. 2016.

SILVA, A. T. **Módulos de comunicação wireless para sensores.** 2007. Monografia (Conclusão do Curso de Licenciatura em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.

SOARES, S. A. F. **Rede de sensores sem fio para localização e monitoramento de pequenos ruminantes.** 2012. Monografia (Conclusão do Curso de Engenharia da Computação) – Universidade Federal Vale do São Francisco, Juazeiro.

TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. **LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors.** LM35 Datasheet, 1999 (revisado em janeiro de 2016). Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>>. Acesso em: Jun. de 2016.

WILAMOWSKI, B. M.; IRWIN, J. D. **Industrial communications systems.** 2. ed. CRC, Florida: Boca Raton, 2016.