

INFRAESTRUTURA DE HARDWARE, SOFTWARE E COMUNICAÇÃO PARA A ROBOTIZAÇÃO DE PLATAFORMAS RÁDIO-CONTROLADAS: APLICAÇÃO A UM DIRIGÍVEL ROBÓTICO

MIGUEL A. C. RUEDA*, LUIZ G. B. MIRISOLA[†], LUCAS A. C. O. NOGUEIRA*,[¶], GUSTAVO A.
FONSECA*, JOSUÉ JR. G. RAMOS*, MAURO F. KOYAMA*, JOSÉ RAUL AZINHEIRA[‡], JOSÉ
REGINALDO H. CARVALHO[§], ELY CARNEIRO DE PAIVA[¶], SAMUEL S. BUENO*

*CTI Renato Archer; Rod. D. Pedro I (SP-65) km.143.6
13069-901 Campinas, SP, Brasil

[†]IEC/ITA, Praça Marechal Eduardo Gomes 50
12228-900 São José dos Campos, SP, Brasil

[‡]IDMEC/LAETA- IST, Universidade de Lisboa, Pav. Mecânica 3, Av. Rovisco Pais
1049-001 Lisboa, Portugal

[§]ICOMP/UFAM, Av. Rodrigo Otávio, 6200
69077-000 Manaus, AM, Brasil

[¶]FEM/UNICAMP; Rua Mendeleev, 200 - Cidade Universitária
13083-860 Campinas, SP, Brasil

Emails: miguel.rueda@cti.gov.br, lgm@ita.br, lucas.nogueira@fem.unicamp.com,
g.aur.fonseca@gmail.com, josue.ramos@cti.gov.br, mauro.koyama@cti.gov.br,
jraz@dem.ist.utl.pt, reginaldo@icomp.ufam.edu.br, elypaiva@fem.unicamp.br,
samuel.bueno@cti.gov.br

Abstract— This article describes a hardware and software infrastructure for the transformation of conventional PWM radio-controlled platforms into robotic vehicles. Capable of supporting the original (radio controlled), teleoperated and autonomous operation modes, and based on Linux and ROS, this infrastructure includes sensors and embedded processors, ground control station and communication system. Details of the architecture applied to a robotic airship, and first results are presented, showing the acquisition of sensorial variables.

Keywords— robotic infrastructure, embedded systems, robotic vehicles, robotic airship

Resumo— Este artigo descreve uma infraestrutura de hardware e software destinada à transformação de plataformas comandadas por rádio controle convencional, no padrão PWM, em veículos robóticos. Capaz de suportar as modalidades de operação original (rádio controlada), tele-operada e autônoma, e baseada em Linux e ROS, a infraestrutura compreende sensores e processadores embarcados, estação de operação e sistema de comunicação. São apresentados detalhes da arquitetura aplicada a um dirigível robótico e resultados iniciais que ilustram a aquisição de variáveis sensoriais.

Palavras-chave— infraestrutura robótica, sistemas embarcados, veículos robóticos, dirigível robótico

1 Introdução

As diferentes classes de veículos robóticos que operam em ambiente externo (aéreos, terrestres, aquáticos de superfície e subaquáticos) abrangem desde protótipos simples, de baixo custo e desempenho limitado, destinados ao aprendizado de conceitos básicos em robótica, até sistemas profissionais altamente sofisticados dedicados ao uso civil e militar, além de uma vasta gama de protótipos de pesquisa que se encontram entre ambos extremos. No conjunto dos protótipos, muitas vezes o ponto de partida é uma plataforma comandada por rádio controle (RC) convencional no padrão PWM (*Pulse Width Modulation*).

A robotização de uma plataforma RC/PWM, isto é, a sua transformação gerando um protótipo robótico funcional, surge assim como interessante solução experimental para a pesquisa, a criação de demonstradores tecnológicos e a realização de aplicações piloto. Exemplos são arquiteturas para

uma aeronave de asa fixa (Coopmans and Han, 2009) e para veículos terrestres em escala (Hart et al., 2014).

Na modalidade mais simples de utilização desses protótipos, eles permanecem operados via rádio controle convencional, sob total controle do operador. Neste primeiro cenário, a robotização necessária pode se restringir à inserção de sensores e processadores embarcados para registro de informação a ser usada posteriormente em análises cinemáticas, dinâmicas, do ambiente em que o veículo se encontra, etc. Num nível de complexidade acima, esses protótipos ainda permanecem sob total controle do operador, mas passam a ser tele-operados a partir de uma estação de operação. Neste cenário, a robotização acrescenta, ao caso precedente: a comunicação entre o sistema embarcado e a estação de operação, bem como ferramentas de imersão do operador no ambiente onde o veículo se desloca – por exemplo, através de imagens fornecidas por uma câmera embarcada. Num

terceiro e mais complexo cenário, busca-se agregar a esses protótipos capacidades de funcionamento substancialmente autônomo. Neste caso, cabe ao operador especificar a missão e acompanhar sua execução, enquanto que algoritmos de percepção, controle e guiamento, executados no processador embarcado a partir das informações sensoriais, determinam e enviam comandos aos atuadores para a locomoção do veículo. O operador pode também comandar diretamente o veículo em determinadas fases da missão ou assumir o seu controle em casos emergenciais.

Embora a robotização de plataformas RC/PWM possa ser realizada por soluções como *Ardupilot* e *Pixhawk*, estes sistemas não suportam a execução de algoritmos computacionalmente complexos de percepção e controle.

Este artigo apresenta uma infraestrutura robótica com capacidade de processamento capaz de suportar os cenários e requisitos anteriormente descritos. A infraestrutura é formada por três componentes, segundo o conceito anteriormente proposto para o dirigível robótico do Projeto AURORA - *Autonomous Unmanned Remote Monitoring Robotic Airship* (Ramos, 2002):

- O sistema embarcado, composto por conjunto sensorial, processadores e hardware dedicado para a comutação entre os modos de operação automático (i.e. autônomo, com os comandos computados no processador embarcado) e manual (comandado pelo operador, via RC convencional ou tele-operação);
- A estação de operação instanciada em um computador portátil, com sua interface humano-robô e facilidades de programação e acompanhamento de missão, seleção de algoritmos e seus parâmetros de ajuste, e registro de variáveis;
- O sistema de comunicação entre a estação de operação e o sistema embarcado.

O arcabouço de software adotado congrega o sistema operacional Linux e, como *middleware*, o software robótico ROS - *Robot Operating System* (OSRF, 2009).

Embora a infraestrutura possa ser usada para a robotização de diferentes veículos de RC/PWM, ela foi desenvolvida primordialmente para o Dirigível Robótico de Concepção Inovadora (projeto DRONI), ilustrado na Figura 1. Dotado de quatro propulsores elétricos vetorizáveis e quatro superfícies aerodinâmicas de atuação de cauda, a aeronave constitui uma plataforma experimental para o desenvolvimento e validação de técnicas de controle e de navegação autônoma de dirigíveis (Azinheira et al., 2015) e também à realização de aplicações piloto a observação aérea e aquisição de informações ambientais a baixa altitude, com foco inicial na região Amazônica (Carvalho et al., 2014). É neste contexto que o restante do artigo é apresentado.

Após essa 1ª seção introdutória, a 2ª seção descreve a infraestrutura robótica desenvolvida; a

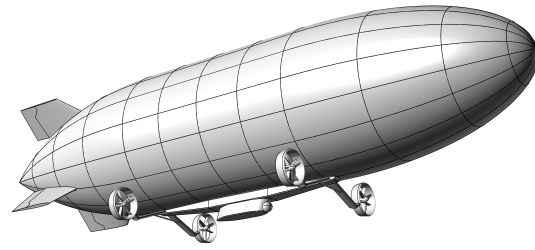


Figura 1: Dirigível não tripulado.

3ª seção apresenta resultados de uso e análise de desempenho desta infraestrutura; e a 4ª seção conclui o artigo e aponta os trabalhos futuros.

2 A infraestrutura robótica

A infraestrutura robótica, instanciada para o dirigível do projeto DRONI, possui a arquitetura ilustrada na Figura 2, detalhada a seguir.

2.1 Sistema embarcado

O sistema embarcado integra produtos de prateleira (*off-the-shelf*) e se sobrepõe a uma solução de rádio controle convencional com comandos PWM. Além de sua principal funcionalidade - assegurar os comandos de controle dos atuadores calculados no computador de bordo para o modo automático de operação, uma característica adicional do sistema é a aquisição de todos os comandos enviados aos atuadores da aeronave também no modo de operação manual. Essa peculiaridade é útil principalmente na fase de desenvolvimento, por exemplo, quando da execução de manobras específicas para auferir o comportamento dinâmico do dirigível e coletar dados para identificação de parâmetros de seu modelo matemático dinâmico.

O sistema embarcado é composto por um computador no formato Intel NUC e um conjunto de sensores a ele integrados por interfaces USB, ethernet e serial (RS-232). Este computador opera com Linux Ubuntu 14.04 e o arcabouço de software robótico ROS, versão Indigo, como *middleware*. Módulos de aquisição sensorial, seu processamento, cálculo de controle e envio de comandos são empacotados como “nós” do ROS – desenvolvidos no projeto ou disponibilizados pela comunidade de pesquisa. Esses nós ROS, podem ser configurados para operar a taxas de amostragem distintas, permitindo a coexistência de malhas de sensoriamento e de controle mais rápidas e/ou mais lentas, segundo as necessidades das estratégias de controle e navegação. Com escalonamento prioritário, os nós podem ser executados no mesmo processo que utiliza os seus resultados em mais alto nível, reduzindo atrasos de comunicação.

Os componentes físicos da infraestrutura robótica da Figura 2 foram selecionados considerando características tais como desempenho, peso, consumo de energia e capacidade de interfaceamento. Os sensores adotados são:

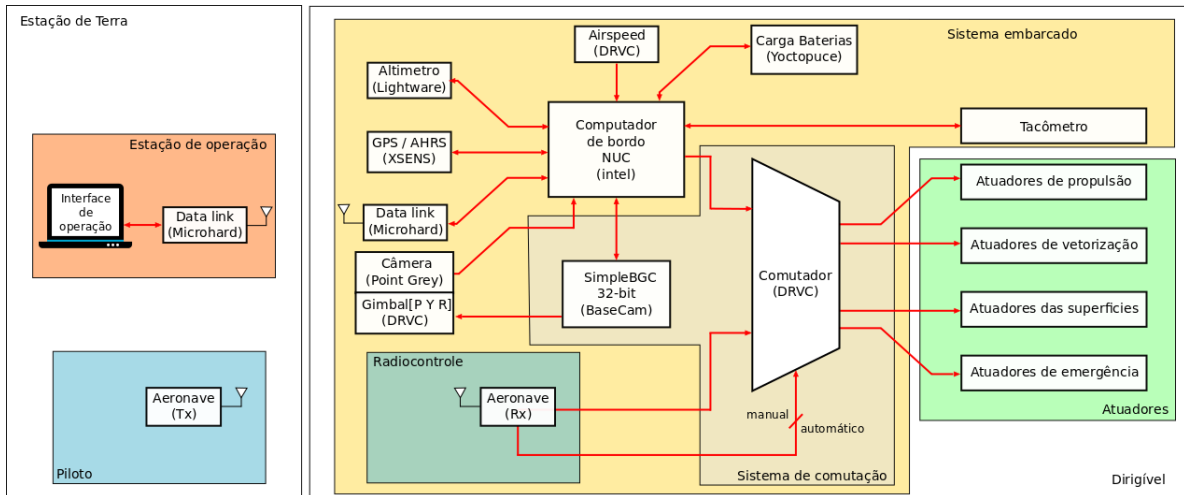


Figura 2: Arquitetura geral do sistema embarcado.

- GPS/AHRS Mti-G-700 (Xsens, 2015)
- Altimetro Lightware Laser SF11/C (Lightware, 2015)
- Câmera Point Grey CMOS Flea 3 (Point-Grey, 2015)
- Cargas das baterias embarcadas na aeronave (Yoctopuce, 2015)
- Velocidade relativa ao ar (*airspeed*)

Os sensores GPS/AHRS, altímetro, câmera e carga de bateria comunicam-se com o computador de bordo via interface no padrão USB.

O medidor de velocidade relativa ao ar (*airspeed*), desenvolvido internamente, é instalado no nariz da aeronave. Ele utiliza um tubo de pitôt de 60 cm fabricado pela (Winter-Instruments, 2015), acoplado a um sensor diferencial de baixa pressão SDP-510 da (Sensirion, 2015), na faixa dos 0 a 500 Pa, que provê uma saída digital. Uma placa (Arduino, 2015) interfaceia o sensor com um dispositivo Xbee (Digi-International, 2015) para a comunicação via rádio, a 2.4GHz, com o computador de bordo.

Os quatro sensores de carga para as baterias, usam a placa Yocto-Volt (Yoctopuce, 2015), substituída por um sensor de tensão.

A câmera está montada em um dispositivo *gimbal*, comandado pela placa Simple BGC 32-bit (Basecam-Electronics, 2015) que se comunica via USB com o computador de bordo. Na configuração atual, no modo manual de operação do dirigível a placa estabiliza a câmera em uma *pose* pré-especificada; no modo automático de operação a placa atua no *gimbal* segundo os ângulos de guinada, arfagem e rolagem recebidos do computador de bordo.

Ainda em relação aos sensores na Figura 2, considera-se conhecida a relação entre a velocidade de rotação das hélices e o comando de acionamento enviado aos motores elétricos via ESCs (*Electronic Speed Control*), não existindo tacômetros físicos na presente implementação.

Os atuadores da aeronave compreendem os três graus de liberdade do gimbal (por exemplo, para estratégias de controle baseado em visão), mais o conjunto que recebe comandos PWM e é diretamente responsável pelo guiamento da aeronave: quatro motores sem escovas para propulsão, quatro servo-atuadores para vetorização dos propulsores e quatro servo-atuadores para a deflexão das superfícies aerodinâmicas que atuam como leme, profundor e aileron. Há também, para emergência, uma eletroválvula para liberar o gás Hélio do envelope e um dispositivo que desprende uma garateia presa a um cabo.

Como foi mencionado, a aeronave possui dois modos de operação que determinam a forma de envio de comandos aos atuadores: modo manual (via receptor do rádio-controle convencional) e modo automático (tele-operado ou autônomo, via computador de bordo). No modo manual o rádio-controle convencional comanda uma mesma velocidade e um mesmo ângulo de vetorização para os quatro propulsores, e duas variáveis para as superfícies aerodinâmicas. Já no modo automático, os doze atuadores PWM podem ser comandados independentemente pelo computador de bordo; essa maior flexibilidade de atuação permite às estratégias de controle uma maior capacidade de estabilização e guiamento da aeronave que é, intrinsecamente, subatuada (Azinheira et al., 2015). A fim de prover a comutação entre esses dois modos de operação, e alocar adequadamente os canais de controle, foi projetado um hardware específico, calcado em soluções comerciais, cujo diagrama é apresentado na Figura 3.

Na placa de comutação, há três interfaces:

- Interface de geração PWM *Servo Maestro* (Pololu): No modo automático de operação, ela recebe variáveis de controle do computador de bordo e gera os sinais de comando enviados aos atuadores.
- Interface de leitura PWM Rx (Yoctopuce): Encarrega-se de ler os sinais de comando,

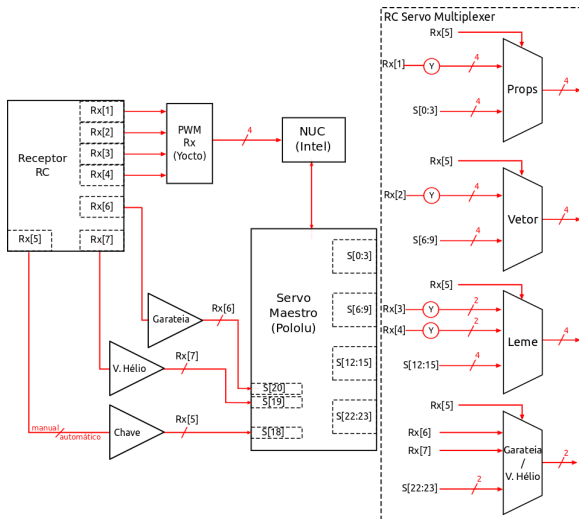


Figura 3: Arquitetura do sistema de comutação.

tanto no modo manual quanto no modo automático de operação, de maneira que o computador embarcado receba o tempo todo essas informações.

- Interface multiplexadora *RC Servo Multiplexer* (Pololu): Ativa o modo de operação (automático ou manual), dependendo da seleção estabelecida pelo operador em terra.

2.2 Estação de operação

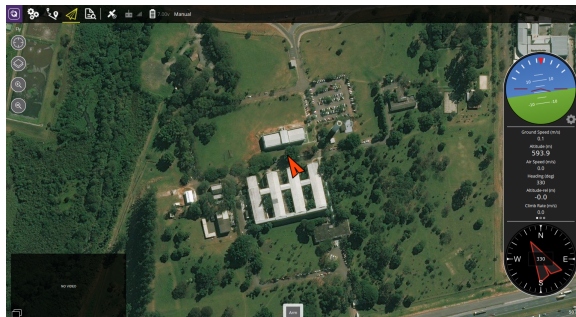


Figura 4: Estação de Operação.

A Estação de Operação é baseada na comunicação remota com o computador de bordo no veículo, para o que foi utilizado o protocolo MAVLink (Meier et al., 2014) - concebido para atuar em comunicações cabeadas e sem-fio, com UART, UDP e TCP/IP, sendo computacionalmente leve o suficiente para ser executado em microcontroladores de baixa performance. Todas essas qualidades o fizeram ser amplamente adotado nos últimos anos pela comunidade de desenvolvimento e pesquisa em veículos robóticos aéreos, especialmente de pequeno porte (Meier et al., 2011). Já na estação de operação, optou-se por utilizar o programa QGroundControl (Meier et al., 2010). O QGroundControl é o primeiro programa do tipo estação de operação que implementa o protocolo MAVLink, tendo sido concebido em sinergia com

a equipe de desenvolvimento do protocolo em si. Com a adoção do MAVLink e QGroundControl, foram desenvolvidos módulos de software para realizar a comunicação entre o sistema ROS embarcado no veículo e o protocolo MAVLink e inseridos mostradores específicos na interface de usuário.

Esta interface com o usuário, mostrada na Figura 4, permite:

- Prévio ao voo, e para a modalidade autônoma de operação, a programação da missão em termos de pontos de passagem (coordenadas de latitude e longitude e perfil de altitude) e atributos de voo (decolagem ou aterrissagem verticais, voo pairado ou voo cruzeiro);
- Durante o voo, a supervisão da operação rádio controlada da aeronave (por piloto e rádio-controle convencional) ou a teleoperação direta da aeronave, ou a supervisão em modo autônomo de operação;
- Durante o voo, o recebimento e exibição de dados de telemetria (informações sensoriais, de status da aeronave, dos sistemas de suprimento de energia, etc.), bem como de imagens provenientes de câmera embarcada;

Uma funcionalidade adicional para a modalidade autônoma de operação, instanciada fora desta interface, permite a seleção de algoritmos de controle e navegação e a definição de seus parâmetros de ajuste.

2.3 Sistema de comunicação

O sistema de comunicação congrega dois módulos. Um rádio-controle convencional (Hitec, 2015) de 2.4 GHz é destinado à pilotagem manual da aeronave. O segundo e principal módulo provê a comunicação entre a Estação de Operação e o Sistema Embarcado na aeronave. Ele utiliza um enlace de rádio IPnDDL2450 (Microhard-Systems-INC., 2015), com um arranjo de antenas omnidirecionais de 8 dBi montado na aeronave e, junto à Estação de Operação, uma antena direcional yagi de 17 dBi orientada por um pan-tilt D48-E (FLIR, 2015). O arranjo tem um alcance nominal máximo de 15 km, com uma largura de banda de 12 MBps em dois canais, um de dados e outro de comando e controle.

3 Resultados e análise de desempenho

Afim de validar, analisar e aprimorar o comportamento da infraestrutura descrita na seção precedente, experimentos foram realizados no campus do CTI Renato Archer, tanto em bancada quanto com o conjunto embarcado em um automóvel. Comandos RC e de comutação automático-manual eram enviados via RC e os dados do sistema embarcado recebidos, exibidos e registrados na estação de operação. Um conjunto de servos emulava os atuadores do dirigível.

A Figura 5 mostra um dos testes funcionais para as transições manual – automático – manual. Nesse teste, realizado em bancada, um dos sinais de vetorização é enviado pelo RC no modo manual, intercalando-se a comutação para uma fase automática que repassa ao atuador um sinal senoidal pré-programado no computador de bordo. Os sinais de vetorização variam entre os extremos normalizados de 1 e -1 , equivalentes aos ângulos máximo e mínimo de vetorização do sistema mecânico.

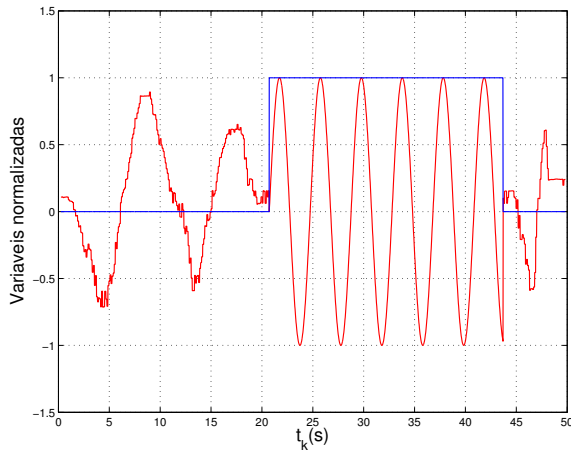


Figura 5: Exemplo de sequência de comutação para vetorização: comandos de atuação normalizado (Vermelho) e comando de comutação (Azul) entre os modos manual (nível zero) e automático (nível um).

Para averiguar o comportamento das aquisições sensoriais bem como das diferentes taxas de amostragem oriundas do *framework* ROS, foram realizados percursos com o sistema embarcado montado num automóvel, cobrindo de 3 a 10 minutos de operação.

A Figura 6 apresenta a velocidade do veículo determinada por três métodos, usando dois sensores: i) medidor de velocidade relativa ao ar (*airspeed*), a uma taxa de amostragem de 18Hz; ii) módulo da velocidade no referencial *North East Down* (*groundspeed*) a partir dos dados brutos do GPS do Xsens, que possui uma taxa de amostragem de 4Hz embora fornecido a 100Hz; iii) mesma velocidade (*groundspeed*) resultante da fusão, interna ao Xsens, entre dados de GPS e informações inerciais, a 100Hz. Verifica-se a concordância entre as três velocidades.

Com o intuito de analisar o comportamento da amostragem para um determinado vetor de dados, foram computados os incrementos $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$ onde t_k e t_{k-1} são os instantes de tempo consecutivos entre duas aquisições, e as seguintes métricas: a média $\Delta t_{med} = mean(\Delta t_k)$ e o valor máximo normalizado $\Delta t_{max} = \frac{max(\Delta t_k)}{\Delta t_{med}}$; este último, caso superior a dois, indica perda de informação.

Para os dados inerciais e de GPS do Xsens, adquiridos a 100Hz – a mais elevada taxa de amos-

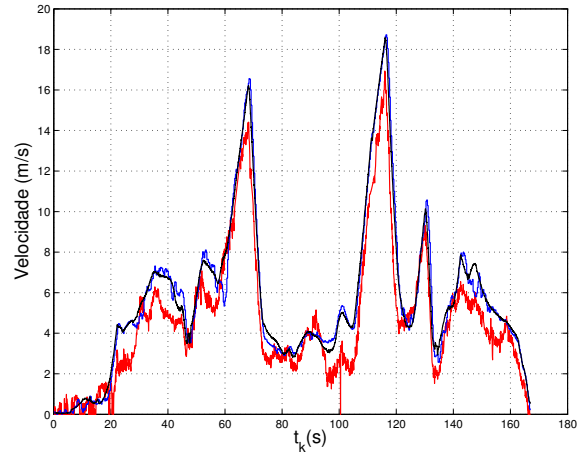


Figura 6: Velocidades: relativa ao ar (vermelho), por dados brutos de GPS (azul) e por fusão GPS-inercial (preto).

tagem utilizada nesta implementação, obteve-se: $\frac{1}{\Delta t_{med}} = 107.33$ Hz, $\Delta t_{max} = 1.88$. Percebe-se uma uniformidade na aquisição, sem perda de informação e próximo à frequência de amostragem especificada.

A Figura 7 apresenta o comportamento da razão $\frac{\Delta t_k}{\Delta t_{med}}$ para o medidor de velocidade relativa ao ar (*airspeed*) a uma taxa de 18Hz. Obteve-se: $\frac{1}{\Delta t_{med}} = 17.93$ Hz, $\Delta t_{max} = 1.03$, indicando um bom desempenho mesmo o sensor utilizando comunicação sem fio (via Xbee). Para o mesmo sensor, a 20Hz atingiu-se $\Delta t_{max} = 1.5$.

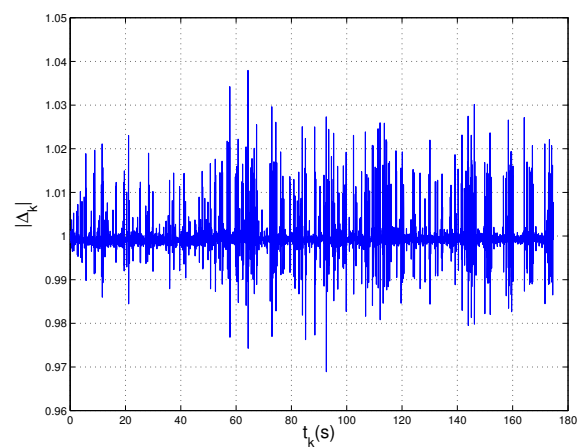


Figura 7: Análises dos tempos de amostragem do medidor de *airspeed*.

4 Conclusão

Este artigo apresentou uma infraestrutura de hardware e software para a robotização de veículos rádio controlados no padrão PWM. Congregando sistema embarcado, estação de operação e sistema de comunicação, essa infraestrutura robótica configura uma solução versátil e de baixo custo para a concepção de plataformas experimentais aptas às

atividades de P&D, criação demonstradores e realização de aplicações piloto. Ela possibilita processar e registrar diferentes classes de variáveis sensoriais (incluindo imagens), permitindo o comando de atuadores nos modos manual e automático de operação, promovendo também a transição entre ambos.

Foram apresentados resultados de bancada e em ambiente externo que revelam a aquisição de variáveis sensoriais com pequena dispersão dos diferentes tempos de amostragem especificados. Esta infraestrutura será integrada à aeronave e validada experimentalmente, suportando missões de observação ambiental bem como a implementação de estratégias de percepção e de controle e navegação autônomos.

Agradecimentos

Os autores agradecem os financiamentos do projeto DRONI (proc. CNPq 402112/2013-0) e do InSAC – Sistemas Autônomos Colaborativos (proc. CNPq 465755/2014-3 e FAPESP 2014/50851-0).

Referências

- Arduino (2015). Arduino micro, www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMicro. [Acessado 08/04/2016].
- Azinheira, J., Moutinho, A. and Carvalho, J. (2015). Lateral control of airship with uncertain dynamics using incremental nonlinear dynamics inversion, *11th IFAC Symposium on Robot Control SYROCO* 48(19): 69 – 74.
- Basecam-Electronics (2015). Basecam simplebgc 32-bit, www.basecamelectronics.com/simplebgc32bit/. [Acessado 08/04/2016].
- Carvalho, J., Bueno, S. and Modesto, J. (2014). Sistemas aéreos não-tripulados para o monitoramento e gestão de risco do bioma amazônico, *Revista Computação Brasil* pp. 145–154. Porto Alegre, RS.
- Coopmans, C. and Han, Y. (2009). Aggieair: An integrated and effective small multi-uav command, control and data collection architecture.
- Digi-International (2015). Xb24cz7pis-004 module, www.digi.com/products/digi-xbee-rf-solutions/embedded-rf-modules-modems/digi-xbee-zigbee. [Acessado 08/04/2016].
- FLIR (2015). Pan-tilt unit-d48, www.flir.com/mcs/view/?id=53666. [Acessado 08/04/2016].
- Hart, K., Montella, C., Petitpas, G., Schweisinger, D., Shariati, A., Sourbeer, B., Trephan, T. and Spletzer, J. (2014). Roscar: Robot stock car autonomous racing, *in the MobiSys Workshop for Mobile Augmented Reality and Robotics-based Technology Systems (MARS)*, Bretton Woods, United States.
- Hitec (2015). Aurora 9 - 9 channel 2.4ghz aircraft computer radio, <http://hitecrad.com/products/aircraft-radios-receivers-and-accessories/aircraft-radio-systems/aurora-9-9-channel-2.4ghz-aircraft-computer-radio/product>. [Acessado 08/04/2016].
- Lightware (2015). Sf10/c, www.lightware.co.za/shop/en/drone-altimeters/34-sf10c.html. [Acessado 08/04/2016].
- Meier, L., Tanskanen, P. and Heng, L. (2010). Qgroundcontrol: Ground control station for small air-land-water autonomous unmanned systems, www.qgroundcontrol.org. [Acessado 07/06/2015].
- Meier, L., Tanskanen, P., Heng, L., Lee, G. H., Fraundorfer, F. and Pollefeys, M. (2011). The pixhawk open-source computer vision framework for mavs, www.pixhawk.org. [Acessado 07/06/2015].
- Meier, L., Tridgell, A. and Grobler, P. (2014). Mavlink common message set specifications, www.pixhawk.ethz.ch/mavlink/. [Acessado 07/06/2015].
- Microhard-Systems-INC. (2015). Cots digital data link, www.microhardcorp.com/IPnDDL.php. [Acessado 08/04/2016].
- OSRF, O. S. R. F. (2009). ROS - Robot Operating System, www.ros.org. [Acessado 07/06/2015].
- Point-Grey (2015). Flea3 3.2 mp mono usb3, www.ptgrey.com. [Acessado 08/04/2016].
- Ramos, J. J. G. (2002). *Contribuição ao Desenvolvimento de Dirigíveis Robóticos*, PhD thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Sensirion (2015). Sdp510, www.sensirion.com/products/differential-pressure-sensor/. [Acessado 08/04/2016].
- Winter-Instruments (2015). 6 srg pitot tube, www.winter-instruments.de/zubehr---accessories. [Acessado 08/04/2016].
- Xsens (2015). Mti-g-700, www.xsens.com/products/mti-g-700/. [Acessado 08/04/2016].
- Yoctopuce (2015). Yocto-pwm-rx, www.yoctopuce.com/EN/products/usb-electrical-interfaces/yocto-pwm-rx. [Acessado 08/04/2016].