

Computador de Bordo para Nanossatélites em Órbita Baixa no Padrão CubeSat

Camila Barbosa * Samaherni Dias * Kurios Queiroz *

* *Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN,*
(e-mails: *camila.barbosa.095@ufrn.edu.br*
sama@laci.ufrn.br
kurios@laci.ufrn.br)

Abstract: In recent decades, CubeSat nanosatellites have made it possible for universities and small companies to study these technologies and go to space. In this context, the National Institute of Spatial Research (INPE) proposed the CONASAT project, which has as its goal to update the Brazilian Environmental Data Collection System (BDCS), replacing the old satellites with a new CubeSat constellation. The BDCS, beyond satellites, is also composed of ground stations and Data Collection Platforms (DCPs) spread across the Brazilian territory. This paper presents the design of an onboard computer (OBC), made of components off-the-shelf (COTS), for low-orbit CubeSat satellites. Aiming to obtain the requisites for digital systems in low-orbit, it proposes the electronic schematic and the printed circuit board (PCB) of an onboard computer compatible with the architecture and with all subsystems of the first satellite in the BDCS constellation, the CONASAT-01, as well as the software and operating system required for the mission. The developed board embeds FreeRTOS on an STM32 microcontroller to manage and execute the missions' tasks, such as housekeeping, supervising telecommand & telemetry, and sending and receiving data from ground stations. All the communications drivers were also developed. The nationalization of the OBC compatible with the scheduled mission and with the global market is one of the main contributions of this paper: it strengthens Brazilian satellite research as it helps to develop the next CONASAT CubeSats.

Resumo: Nas últimas décadas, nanossatélites no padrão CubeSat tornaram acessível para universidades e pequenas empresas chegarem ao espaço e estudarem tais tecnologias. Nesse contexto, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) propôs o projeto CONASAT, que objetiva atualizar o Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais (SBCD), substituindo os antigos satélites por uma nova constelação de nanossatélites no padrão CubeSat. Além dos satélites, o SBCD também é composto por estações terrestres e Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) espalhadas por todo o território brasileiro. Este artigo apresenta o projeto de um computador de bordo (OBC, do inglês *Onboard computer*), composto por componentes de prateleira (COTS), para satélites CubeSat de órbita baixa. Visando obter os requisitos para sistemas digitais em órbita baixa, este trabalho propõe o esquema eletrônico e a placa de circuito impresso (PCB) de um computador de bordo compatível com a arquitetura e subsistemas do primeiro satélite da constelação SBCD, o CONASAT-01, bem como o software e o sistema operacional necessários para a missão. A placa desenvolvida embarcará o sistema operacional FreeRTOS em um microcontrolador STM32 para gerenciar e executar as tarefas das missões. Todos os drivers de comunicação também serão desenvolvidos. A nacionalização do OBC compatível com a missão programada e com o mercado global é uma das principais contribuições desse artigo: fortalece a pesquisa de satélites no Brasil enquanto ajuda a desenvolver o próximo CubeSat do projeto CONASAT.

Keywords: OBC; Nanosatellite; CubeSat; PCB; FreeRTOS;

Palavras-chaves: Computador de bordo; Nanossatélite; CubeSat; PCB; FreeRTOS;

1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, a indústria aeroespacial necessita de um extenso time de engenheiros, com produtos sofisticados de grande dimensão e é historicamente financiada por agências governamentais (Batista et al., 2019). Os altos custos das missões espaciais baseadas em satélites, desencadearam uma corrida por melhorias na confiabilidade desses artefatos. Todavia, o aumento da confiabilidade acarreta em custos e tempos de desenvolvimento ainda maiores, por exigir que tais sistemas sejam submetidos a rigorosos testes para garantir o seu funcionamento em órbita (CGEE, 2018).

Na última década, contudo, avanços em tecnologias de miniaturização, permitiram a construção de veículos espaciais menores com componentes comerciais comuns (COTS, do inglês, *Commercial-off-the-shelf*) compactos, de baixo custo e consumo (Poghosyan and Golkar, 2017; Toorian et al., 2008).

Os nanosatélites tornaram-se uma oportunidade acessível para se chegar ao espaço - e estudar tecnologias espaciais. Proposto em 1999 por Jordi Puig-Suari, da Universidade Politécnica da Califórnia e Robert Twiggs, da Universidade de Stanford, o padrão CubeSat permite que pesquisadores participem de um projeto espacial completo: construção, testes e operação de um artefato com características similares aos primeiros satélites lançados (Heidt et al., 2020; CGEE, 2018).

Por ter dimensões, custo e tempo de desenvolvimento consideravelmente menores do que satélites tradicionais (Toorian et al., 2008), o padrão CubeSat se popularizou e passou a ser desenvolvido para missões não somente por estudantes e pesquisadores, mas também por empresas privadas e organizações governamentais (ISIS, 2021a).

Nesse contexto, o INPE propôs o projeto CONASAT. O CONASAT tem como proposta o lançamento uma constelação de nanosatélites ambientais. A ideia é que a constelação possa exercer a função dos atuais SCDs para receber, tratar e retransmitir os dados enviados pelas PCDs (Queiroz et al., 2018). A princípio, o INPE está desenvolvendo o primeiro satélite da constelação, o CONASAT-01, um CubeSat com plataforma 1U da empresa búlgara EnduroSat.

Nanosatélites com o padrão CubeSat são comumente organizados em módulos empilhados. Cada módulo representa um subsistema do satélite: energia (EPS, do inglês *Electrical Power System*), determinação e controle de atitude (ADCS, do inglês *Attitude Determination and Control System*), telemetria e telecomando (TT&C, do inglês, *Telemetry, Tracking & Command*), o computador de bordo (OBC, do inglês *On-Board Computer*) e a carga útil, que pode variar de acordo com a missão espacial (Razzaghi, 2012).

Cada um desses subsistemas desempenha um papel importante no funcionamento e na aplicação do satélite. Nesse trabalho, destaca-se o subsistema de controle de bordo, que tem como elemento principal o OBC. Responsável pelo processamento de informações transmitidas para o satélite, o OBC oferece uma plataforma para o gerenciamento e controle de dados entre os subsistemas do nanosatélite

(Razzaghi, 2012). Funciona como uma ponte que conecta os outros sistemas entre si.

Para desempenhar essas funções, computadores de bordo de CubeSats necessitam de resposta computacional em tempo real, em diferentes níveis de prioridade. Para isso, podem embarcar sistemas operacionais de tempo real (RTOS, do inglês *Real-time operating system*). Um dos mais utilizados é o *FreeRTOS*, desenvolvido em licença de código aberto (Barry, 2016). Os trabalhos de Gonzalez et al. (2019), Chronas (2017) e Latachi et al. (2020) apresentam OBCs embarcados com FreeRTOS e que possuem herança de voo. Em computadores de bordo comerciais (ISIS, 2021b; EnduroSat, 2021b; GomSpace, 2021), também é comum a utilização do FreeRTOS nos softwares de desenvolvimento disponibilizados pelas empresas.

Assim, esse trabalho apresenta o projeto de um OBC, composto por componentes de prateleira (COTS), para satélites CubeSat de órbita baixa. Visando obter os requisitos para sistemas digitais em órbita baixa, os autores propõem o esquema eletrônico e a placa de circuito impresso (PCB) de um computador de bordo compatível com a arquitetura do primeiro satélite da nova constelação SBCD, o CONASAT-01, bem como a elaboração dos *drivers* e a adequação do sistema operacional, necessários para a missão. A placa desenvolvida embarcará o FreeRTOS em um microcontrolador STM32 para gerenciar e executar as tarefas da missão, como por exemplo, *housekeeping*, supervisão de telecomando & telemetria e o envio e recebimento de dados de estações terrestres. A nacionalização do OBC compatível com a missão programada e com o mercado global será uma das principais contribuições do artigo, que além disso, fortalece a pesquisa aeroespacial no Brasil e ajuda a desenvolver o próximo CubeSat do projeto CONASAT.

2. COMPUTADORES DE BORDO EM CUBESATS

Nanosatélites são constituídos por diversos subsistemas, cada um realizando uma atividade específica. A representação da organização interna dos nanosatélites, normalmente incluem os seguintes subsistemas:

- o subsistema de energia elétrica (EPS) suprido por painéis solares;
- o subsistema para acomodar a carga útil (em inglês, *Payload*);
- o subsistema do controle de atitude (ADCS);
- o subsistema de telemetria e telecomando (TT&C);
- o módulo de memória geralmente associado com o OBC; e,
- o subsistema do computador de bordo (OBC);

O OBC de um nanosatélite é o subsistema responsável pelo gerenciamento e controle dos dados. Além de permitir a comunicação entre os diferentes subsistemas, ele é responsável pelo processamento das informações transmitidas para o satélite (Razzaghi, 2012). Um OBC consiste, essencialmente, em um processador conectado aos subsistemas através de um barramento de dados e a periféricos adicionais (Lumbwe, 2013).

A escolha do processador influencia diretamente no projeto do OBC e do nanosatélite como um todo. Na literatura, são citados CubeSats com diferentes unidades

como processador, incluindo FPGAs, um ou múltiplos microcontroladores (Bostan et al., 2020; Nagarajan et al., 2014; Razzaghi, 2012), MPSoC (Vasudevan, 2020) e até plataformas *open source* como Arduino, Raspberry Pi e BeagleBone (Poghosyan and Golkar, 2017; Buckner et al., 2020).

Segundo Lumbwe (2013), entre as características que um OBC deve possuir estão:

- baixo consumo de energia;
- robustez mecânica, para suportar as vibrações no momento de lançamento;
- resistência às condições eletromagnéticas;
- resistência às condições de temperatura;
- resistência à radiação.

No desenvolvimento de um OBC para CubeSat, sobretudo na escolha dos componentes, deve-se atentar as especificações que influenciam nos pontos acima descritos. Também levando em consideração o custo, é importante o uso de COTS eficientes energeticamente, que estejam dentro da faixa de variação de temperatura da órbita terrestre baixa (LEO, do inglês *Low Earth Orbit*) e utilizar de técnicas para mitigar a radiação.

Além disso, computadores de bordo necessitam de resposta computacional em tempo real, em diferentes níveis de prioridade. A utilização de RTOS (do inglês, *Real-time operational system*) em OBCs de CubeSats pode ser atribuída à natureza das tarefas do computador de bordo: tarefas diferentes com *timings* distintos e uma mistura de eventos síncronos e assíncronos em comparação. Um exemplo que pode ser citado é o ADCS, que possui tarefas lineares síncronas que seriam mais fáceis e simples de implementar quando usado um RTOS. Um dos RTOS mais utilizados é o *FreeRTOS*, desenvolvido em licença de código aberto Barry (2016). O FreeRTOS foi portado em mais de 35 microcontroladores e tem como parceiros todas as principais empresas de microcontroladores. Ele já foi usado em muitas missões CubeSat Gonzalez et al. (2019); Chronas (2017); Latachi et al. (2020) e está disponível na maioria dos fornecedores de COTS para uso em seus processadores.

Esse artigo propõe um computador de bordo para nanossatélite no padrão CubeSat. O projeto contará apenas com componentes COTS e terá como unidade central de processamento um microcontrolador ARM com *FreeRTOS* embarcado.

3. SBCD E O CONASAT-01

O Sistema Brasileiro de Coleta de Dados (SBCD) é responsável por coletar e retransmitir informações de fundamental importância para aplicações como previsão meteorológica, monitoramento de recursos hídricos, agricultura de precisão e prevenção de desastres naturais no Brasil. O SBCD coleta os dados ambientais (como temperatura e umidade, por exemplo) a partir de Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) espalhadas pelo território nacional, as quais são sistemas embarcados com a capacidade de coletar dados e enviá-los diretamente a um dos satélites do SBCD. Os satélites são responsáveis por coletar os dados das PCDs e retransmiti-los para estações de recepção, as quais

agrupam todas as informações e as enviam para o centro da missão (Queiroz et al., 2018; Yamaguti et al., 2009).

Atualmente, o SBCD conta com os satélites SCD-1, SCD-2 e CBERS 4A. Os dois primeiros, embora em funcionamento, podem ficar inoperantes a qualquer momento, pois já ultrapassaram o tempo de vida útil inicialmente previsto em vários anos. Nesse contexto, o INPE propôs o projeto CONASAT. O projeto CONASAT, desenvolvido pelo INPE junto a UFRN e a Agência Espacial Brasileira (AEB), propõe o lançamento de uma constelação de nanossatélites para integrar o SBCD.

O primeiro satélite da constelação será o CONASAT-01. Ele está sendo desenvolvido para que tenha como carga útil o EDC (do inglês, *Environmental Data Collector*). Esse subsistema será o responsável por receber dados das PCDs de todo território nacional. Tais dados devem ser então transmitidos por telemetria para a estação solo (Gomes, 2021).



Figura 1. CONASAT-01 em bancada de testes no INPE

Tanto a plataforma, como boa parte dos subsistemas do CONASAT-01 foram adquiridos da empresa búlgara EnduroSat. A plataforma 1U da EnduroSat (Figura 1), projetada para usos diversos, traz para o primeiro nanossatélite da constelação a robustez de uma plataforma com herança de voo. Ela fornece 500g de massa, 0,5U de volume para carga útil EnduroSat (2021a).

O computador de bordo do CONASAT-01, também da EnduroSat, é baseado em um microcontrolador ARM EnduroSat (2021b). O projeto do computador de bordo apresentado nesse artigo foi desenvolvido para ser compatível com a estrutura do primeiro nanossatélite da constelação.

4. PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO OBC

O primeiro CubeSat da constelação do projeto CONASAT tem como requisitos:

- (1) Padrão CubeSat 1U;
- (2) Não possuir propulsão;
- (3) Possuir carga útil única, o EDC do INPE;
- (4) Antenas omnidirecionais;
- (5) Monitoramento de seus parâmetros e da carga útil;
- (6) Órbita baixa de até 700km;

O primeiro CubeSat da constelação do projeto CONASAT foi adquirido de uma empresa búlgara, conta com três subsistemas (EPS, OBC, TT&C) interconectados por um barramento no padrão PC/104 e espaço para acomodar a carga útil do INPE (EDC), também conectada ao OBC através do barramento no padrão PC/104.

Com o objetivo de substituir o OBC da empresa búlgara por um OBC próprio, este trabalho apresenta o projeto de um computador de bordo (OBC) com os seguintes requisitos:

- (1) Ser totalmente compatível com o Hardware e os Softwares desenvolvidos para o CubeSat do projeto CONASAT;
- (2) Ser produzido apenas com componentes COTS;
- (3) Ser robusto aos efeitos da radiação em órbita baixa;
- (4) Estar preparado para futuras atualizações;
- (5) Ter capacidade de processamento para inclusão de módulo de controle de atitude (ADCS) e filtragem de sensores;

4.1 Arquitetura e Design do Hardware

De acordo com os requisitos apresentados, o diagrama de blocos da arquitetura do OBC proposto é exibido na Figura 2.

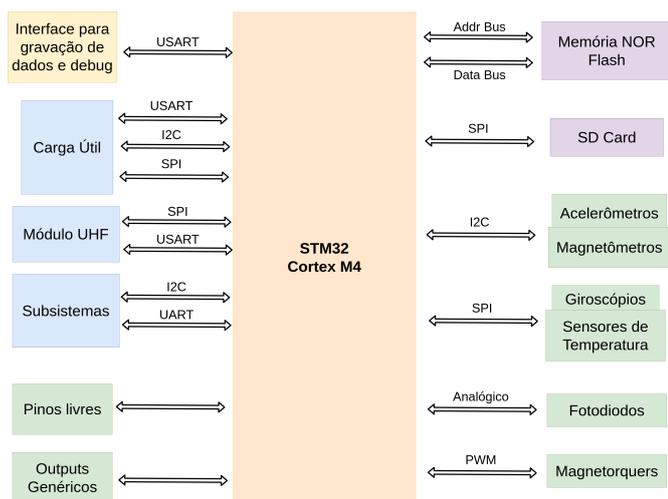


Figura 2. Arquitetura do OBC

Como pode ser observado na arquitetura do OBC (Figura 2), o mesmo utiliza como unidade de processamento central um microcontrolador de 32 bits baseado no ARM Cortex M4 da família STM32. Essa escolha se deu para garantir o aproveitamento de algumas rotinas de *software* e bibliotecas desenvolvidas para missão do CONASAT-01. O modelo escolhido foi o STM32F427 para manter a compatibilidade com relação aos periféricos utilizados do microcontrolador, os quais são descritos a seguir:

- 4 canais USART;
- 3 canais I2C;
- 4 canais SPI;
- 6 canais de entrada analógica;
- 6 canais de saída PWM;
- 5 canais de entrada/saída digitais;

Além da compatibilidade do microcontrolador, também se faz necessário a compatibilidade física de alguns conectores

e do posicionamento do barramento PC/104, como pode ser visto na Figura 3.

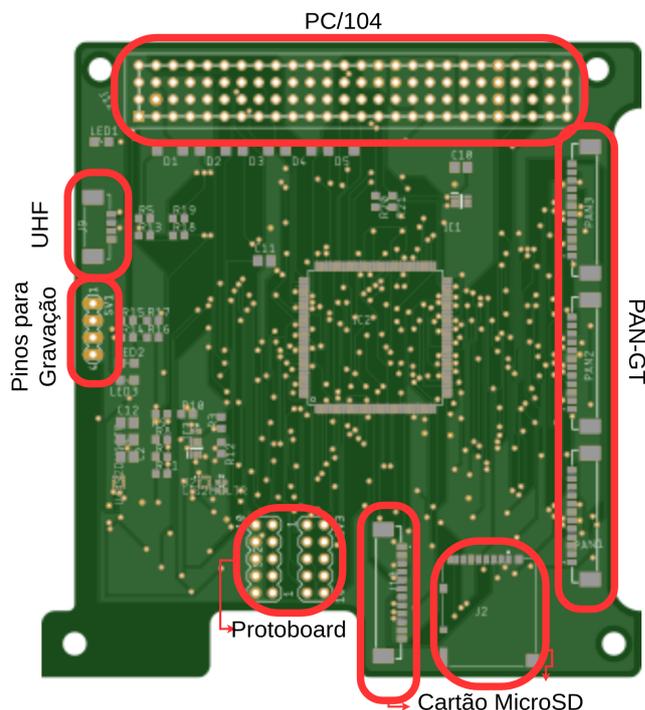


Figura 3. Placa com conectores especificados

Como pode ser observado na Figura 3, a PCB do OBC possui 6 conectores PAN-GT do tipo MOLEX 53398-1271 para conectar o OBC aos fotodiodos e magnetorques instalados nos 6 painéis solares do CubeSat. Além disso, a PCB possui um barramento PC/104, um outro conector do tipo MOLEX 53398-1271 para permitir a leitura do cartão SD por outros módulos do CubeSat, um conector do tipo MOLEX 53398-0471 para se conectar ao módulo UHF, um *slot* Micro SD e pinos jumpers para gravação e testes.

Adicionalmente, a PCB do OBC conta com um conjunto de componentes, são eles: uma memória *flash* de 1GB (modelo MT28EW01GABA), um par de acelerômetros (modelo AIS328DQ), um par de magnetômetros (modelo LIS2MDL), reguladores de tensão de 3,3V e 5V, e um conjunto de mosfets para garantir a seletividade de componentes das placas.

Entre os componentes embarcados citados, vale destacar os acelerômetros e magnetômetros. Eles compõem o sensoriamento destinado ao ADCS, parte do subsistema de controle de atitude vinculado ao OBC. Embarcados na placa, os acelerômetros e magnetômetros possuem redundância fria, ou seja, estão duplicados no OBC, garantindo robustez em caso de danificações causadas pela radiação na LEO.

O projeto foi idealizado de forma que apenas um dos componentes redundantes possa estar ativo por vez, assim, o consumo de energia não tende a aumentar devido a duplicidade dos componentes. O circuito para seleção do elemento redundante consistiu em dois transistores MOSFET, um de canal N e outro de canal P que atuaram

como chaves para alimentação tanto dos acelerômetros quanto dos magnetômetros.

O acelerômetro AIS328DQ é um circuito integrado *ultra-low-power*, suporta um range de temperatura de -40°C até 105°C , pode ser configurado para medir até $\pm 8\text{g}$, possui saída de dados de 16 bits e é fabricado pela STMicroelectronics. O magnetômetro LIS3MDL, também da STM, é um circuito integrado *ultra-low-power*, suporta um range de temperatura de -40°C até 85°C , pode ser configurado para medir até ± 16 gauss e tem saída digital de 16 bits.

Na escolha de componentes do OBC foram levados em consideração alguns fatores, entre os principais, a compatibilidade com o CONASAT-01, o consumo de energia, o custo, as interfaces de comunicação utilizadas (caso necessário), o intervalo de temperatura de funcionamento do componente, e quando possível, herança de voo. Além disso, é importante destacar que todos os componentes definidos são COTS.

Um modelo 3D da PCB do OBC é apresentado na Figura 4.

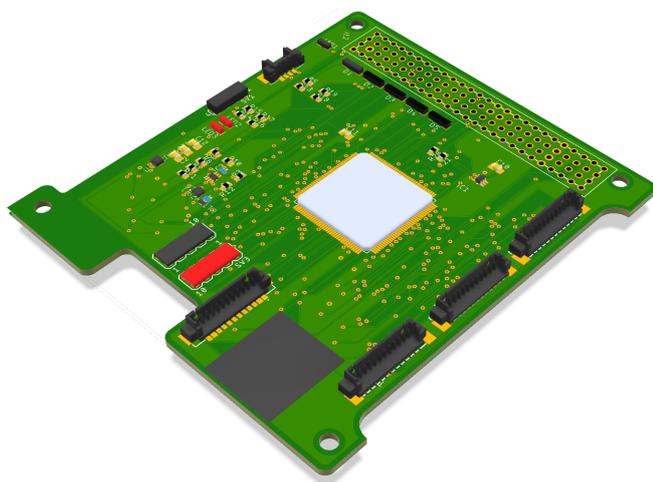


Figura 4. Modelo 3D da Placa v1

4.2 Projeto do Software

Seguindo o objetivo de manter a compatibilidade com o OBC da empresa búlgara e aproveitar os softwares desenvolvidos para o CONASAT-01, o OBC desenvolvido aqui contará com um sistema operacional em tempo real (FreeRTOS) e uma camada de abstração de Hardware (HAL) semelhantes ao do CubeSat do CONASAT-01. Tanto o FreeRTOS quanto o HAL são fornecidos pelo fabricante do microcontrolador (STMicroelectronics). O HAL segue o padrão CMSIS (*Cortex Microcontroller Software Interface Standard*) criado pela ARM que define uma camada de abstração de acesso ao hardware para processadores da linha Cortex-M.

Para completar o desenvolvimento do software do OBC projetado, são desenvolvidos os *drivers*, *middleware* e alguns serviços. Os *drivers* desenvolvidos servem para abstrair a configuração e uso de diversos periféricos do CubeSat, são estes: cartão SD, acelerômetros, magnetômetros,

magnetorques, giroscópios, sensores de temperatura e painéis solares. Já o *middleware* é o responsável pelas rotinas e processamento de entrada e saída de dados do CubeSat, sendo as mais importantes o gerenciamento dos comandos da estação base e o gerenciamento do sistema de arquivos. Por fim, os serviços são utilizados para abrigar as tarefas de manutenção do OBC e tarefas relacionadas com a missão, sendo destaque as tarefas de telemetria e gerenciamento da carga útil.

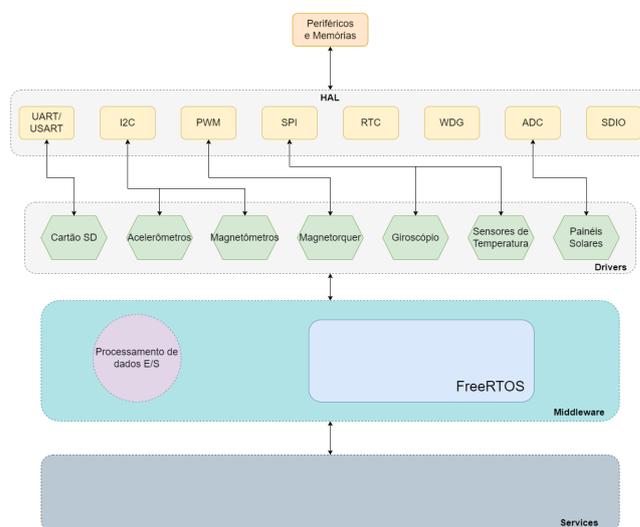


Figura 5. Arquitetura do *firmware* proposto para o OBC

5. CONCLUSÕES

Nesse artigo foi apresentado o projeto de um Computador de Bordo para Nanosatélites em Baixa Órbita no Padrão CubeSat. O OBC, que tinha como um de seus requisitos ser compatível com o CubeSat CONASAT-01, foi modelado visando obter os requisitos para sistemas digitais em órbita baixa.

Foram propostos o esquema eletrônico e a placa de circuito impresso (PCB) de um computador de bordo para CubeSat, bem como a elaboração dos *drivers*, abstração de hardware e a adequação do sistema operacional, necessários para a missão. A placa desenvolvida embarcará o FreeRTOS em um microcontrolador STM32 para gerenciar e executar as tarefas da missão.

Os próximos passos para o desenvolvimento do trabalho consistem na manufatura da placa com fabricante externo e os testes do software.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- Barry, R. (2016). *Mastering the FreeRTOS™ Real Time Kernel*. Real Time Engineers Ltd.
- Batista, C.L.G., Weller, A.C., Martins, E., and Mattiello-Francisco, F. (2019). Towards increasing nanosatellite

- subsystem robustness. *Acta Astronautica*, 156, 187–196. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.11.011>. URL <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.11.011>.
- Bostan, V., Secieru, N., Ilco, V., Melnic, V., Martiniuc, A., and Varzaru, V. (2020). Tumnanosat nanosatellite and kibocube program. In *Proceedings of 13th International Conference on Communications, COMM 2020*, 503–508. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi:10.1109/COMM48946.2020.9142025.
- Buckner, S., Carrasquillo, C., Elosegui, M., and Bevilacqua, R. (2020). A novel approach to cubesat flight software development using robot operating system (ros). *Small Satellite Conference*. URL <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2020/all2020/241>.
- CGEE (2018). *Cubesats, Resumo executivo*. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Brasília, DF, Brasil.
- Chronas, N. (2017). *UPSAT: a nanosatellite*. Master's thesis, University of Patras.
- EnduroSat (2021a). *1U CubeSat Platform - User Manual*. EnduroSat, 1.0 edition.
- EnduroSat (2021b). *Onboard Computer Type I - User Manual*. EnduroSat, 1.0 edition.
- Gomes, M.S.H. (2021). *Desenvolvimento de software para sistema de controle de bordo aplicado a nanossatélites de baixa órbita*. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Brasil.
- GomSpace (2021). Gomspace | nanomind a3200. URL <https://gomspace.com/shop/subsystems/command-and-data-handling/nanomind-a3200.aspx>.
- Gonzalez, C.E., Rojas, C.J., Bergel, A., and Diaz, M.A. (2019). An architecture-tracking approach to evaluate a modular and extensible flight software for cubesat nanosatellites. *IEEE Access*, 7, 126409–126429. doi:10.1109/ACCESS.2019.2927931.
- Heidt, M., Puig-suari, P., Augustus, P., Moore, S., Nakasuka, P., Robert, P., and Twigg, J. (2020). Cubesat: A new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation. In *Proceedings of 14th Annual/USU Conference on Small Satellites*.
- ISIS (2021a). Cubesat information. URL <https://www.isispace.nl/cubesat-information/>.
- ISIS (2021b). Isis on board computer. URL <https://www.isispace.nl/product/on-board-computer/>.
- Latachi, I., Rachidi, T., Karim, M., and Hanafi, A. (2020). Reusable and reliable flight-control software for a fail-safe and cost-efficient cubesat mission: Design and implementation. *Aerospace*, 7(10). doi:10.3390/aerospace7100146. URL <https://www.mdpi.com/2226-4310/7/10/146>.
- Lumbwe, L.T. (2013). *Development of an onboard computer (OBC) for a CubeSat*. Master's thesis, Cape Peninsula University of Technology, Cidade do Cabo, África do Sul.
- Nagarajan, C., D'souza, R.G., Karumuri, S., and Kinger, K. (2014). Design of a cubesat computer architecture using cots hardware for terrestrial thermal imaging. In *2014 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology*, 67–76. doi:10.1109/ICARES.2014.7024379.
- Poghosyan, A. and Golkar, A. (2017). Cubesat evolution: Analyzing cubesat capabilities for conducting science missions. *Progress in Aerospace Sciences*, 88, 59–83. doi:<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.11.002>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042116300951>.
- Queiroz, K.P., Dias, S.M., Duarte, J.M., and Carvalho, M.M. (2018). Uma solução para o sistema brasileiro de coleta de dados ambientais baseada em nanossatélites. *HOLOS*, 7, 132–142.
- Razzaghi, E. (2012). *Design and Qualification of On-Board Computer for Aalto-1 CubeSat*. Master's thesis, Luleå University of Technology.
- Toorian, A., Diaz, K., and Lee, S. (2008). The cubesat approach to space access. In *2008 IEEE Aerospace Conference*, 1–14. doi:10.1109/AERO.2008.4526293.
- Vasudevan, S. (2020). *Design and Development of a CubeSat Hardware Architecture with COTS MPSoC using Radiation Mitigation Techniques*. Master's thesis, KTH, School of Electrical Engineering and Computer Science (EECS).
- Yamaguti, W., Orlando, V., De, S., and Pereira, P. (2009). Sistema brasileiro de coleta de dados ambientais: status e planos futuros. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, p. 1633–1640.