



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

PREVENÇÃO DE FALHAS NA INTERAÇÃO DE CARGAS ÚTEIS DE CUBESATS

Marcos Vinícius Barbosa

Relatório de Iniciação Científica do
Programa PIBIC, orientado pela
Dra. Maria de Fátima Mattiello-
Francisco e coorientado pelo Dr.
Carlos Augusto Paiva Lameirinhas
da Conceição.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/>](http://urlib.net/)

INPE
São José dos Campos
2024

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

PREVENÇÃO DE FALHAS NA INTERAÇÃO DE CARGAS ÚTEIS DE CUBESATS

Marcos Vinícius Barbosa

Relatório de Iniciação Científica do
Programa PIBIC, orientado pela
Dra. Maria de Fátima Mattiello-
Francisco e coorientado pelo Dr.
Carlos Augusto Paiva Lameirinhas
da Conceição.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/>](http://urlib.net/)

INPE
São José dos Campos
2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Barbosa, Marcos Vinícius.

Cutter Prevenção de Falhas na Interação de Cargas Úteis de Cube-Sats / . – São José dos Campos : INPE, 2024.

xv + 11 p. ; ()

Relatório (Iniciação Científica do Programa PIBIC) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2024.

Orientadores : Dra. Maria de Fátima Mattiello-Francisco e Dr. Carlos Augusto Paiva Lameirinhas da Conceição.

1. CONASAT. 2. Interoperabilidade 3. Comunicação Embarcada. 4. Nanossatélite. 5. Testes

CDU 000.000



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).

O presente trabalho foi realizado com apoio do Programa de Iniciação Científica (PIBIC).

**ATENÇÃO! A FOLHA DE
APROVAÇÃO SERÁ IN-
CLUIDA POSTERIORMENTE.**

Iniciação Científica do Programa
PIBIC

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão à Dra. Maria de Fátima Mattiello-Francisco, minha orientadora, e ao Dr. Carlos Augusto Paiva Lameirinhas da Conceição, meu coorientador, pela orientação, apoio e valiosas contribuições ao longo deste projeto. Seus conhecimentos e dedicação foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também à equipe do CONASAT, cuja colaboração e fornecimento de dados foram essenciais para a realização da pesquisa.

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados da aplicação da abordagem sistemática de testes de software embarcado no nanossatélite CONASAT, com o propósito de mitigar falhas de interoperabilidade entre a carga útil do satélite e o computador de gestão de bordo da missão. O estudo envolveu o aprendizado de técnicas de Teste Baseado em Modelos (MBT) que permitem gerar casos de testes, a partir de modelos comportamentais dos subsistemas comunicantes, e de ferramentas de Engenharia Baseada em Modelos (MDE) que permitem construir modelos e gerar códigos computacionais de forma automatizada. A metodologia de pesquisa adotada incluiu a reprodução de estudos de caso existentes na literatura e a construção de modelos específicos para o CONASAT, utilizando as ferramentas UPPAAL e YAKINDU. Os casos de testes gerados com a execução dos modelos permitiram validar o comportamento esperado dos subsistemas modelados. Os códigos gerados automaticamente a partir dos modelos validados foram embarcados em placas Arduino, interconectadas pelo canal de comunicação real do Cubesat, por meio do qual a interação dos subsistemas modelados ocorre. Os resultados demonstraram o potencial da abordagem de teste estudada para prevenção de falhas de comunicação entre os subsistemas carga útil e computador de bordo do CONASAT. As conclusões ressaltam a importância desta pesquisa para o avanço das abordagens de testes automatizados para satélites que adotam o padrão Cubesat. Os CubeSats surgiram como uma solução inovadora para viabilizar missões espaciais de baixo custo e rápida implementação. Esses pequenos satélites padronizados, geralmente com 10 cm de lado e até 1.33 kg, são amplamente utilizados para pesquisas espaciais devido à sua eficiência e acessibilidade. A padronização dos CubeSats permite uma integração mais fácil com veículos de lançamento, tornando o processo de envio de pequenos satélites ao espaço mais econômico. Este trabalho realiza um estudo de caso para o projeto Constelação de Nano Satélites para Coleta de Dados Ambientais (CONASAT), uma aplicação prática dos CubeSats, que visa desenvolver e lançar nanossatélites para coleta e transmissão de dados, contribuindo significativamente para pesquisas científicas e monitoramento ambiental.

Palavras-chave: CONASAT. Interoperabilidade. Comunicação Embarcada. Nanossatélite. Testes.

PREVENTION OF FAILURES IN THE INTERACTION OF CUBESAT PAYLOADS

ABSTRACT

This work presents the results of applying a systematic approach to embedded software testing on the CONASAT nanosatellite, aimed at mitigating interoperability failures between the satellite's payload and the onboard management computer. The study involved learning Model-Based Testing (MBT) techniques that generate test cases from behavioral models of the communicating subsystems, along with Model-Driven Engineering (MDE) tools that facilitate model construction and automated code generation. The research methodology included reproducing existing case studies from the literature and developing specific models for CONASAT using UPPAAL and YAKINDU tools. The test cases generated through model execution validated the expected behavior of the modeled subsystems. Automatically generated codes from validated models were embedded in Arduino boards, interconnected via the actual CubeSat communication channel, allowing for interaction among the modeled subsystems. The results demonstrated the potential of the studied testing approach in preventing communication failures between the payload subsystems and the onboard computer of CONASAT. The conclusions highlight the significance of this research in advancing automated testing approaches for satellites adhering to the CubeSat standard. CubeSats have emerged as an innovative solution for enabling low-cost, rapidly implemented space missions. These standardized small satellites, typically measuring 10 cm on each side and weighing up to 1.33 kg, are widely used for space research due to their efficiency and accessibility. The standardization of CubeSats facilitates easier integration with launch vehicles, making the process of sending small satellites into space more economical. This work conducts a case study for the Environmental Data Collection Nanosatellite Constellation (CONASAT) project, a practical application of CubeSats aimed at developing and launching nanosatellites for data collection and transmission, significantly contributing to scientific research and environmental monitoring.

Palavras-chave: CONASAT. Interoperability. Embedded Communication. Nanosatellite. Testing.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Dimensões de um CubeSat.	5
3.2 Interface do UPPAAL para modelagem.	6
3.3 Exemplo de modelagem em YAKINDU.	7
3.4 Exemplo de comunicação I2C.	8
3.5 Bancada de Teste	8

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONASAT	–	Constelação de Nano Satélites para Coleta de Dados Ambientais
I2C	–	Circuito Inter-Integrado (Inter-Integrated Circuit)
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MBT	–	Teste Baseado em Modelos
MDE	–	Engenharia Baseada em Modelos
PIBIC	–	Programa de Iniciação Científica
V&V	–	Verificação e Validação

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo Geral	2
1.1.2 Objetivos Específicos	2
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Satélites de Pequeno Porte e CubeSats	3
2.2 Desafios de Integração e Interoperabilidade de Subsistemas	3
2.3 Testes de Software Embarcado em CubeSats	3
2.4 Ferramentas para Testes Automatizados: UPPAAL e YAKINDU	3
2.5 Avanços na Testagem de CubeSats	4
3 Materiais e Métodos	5
3.1 CubeSats	5
3.2 Descrição do Projeto CONASAT	5
3.3 Desenvolvimento de Modelos	6
3.3.1 UPPAAL	6
3.3.2 YAKINDU	6
3.4 Teste Baseado em Modelos (MBT)	7
3.5 Implementação do Sistema de Teste	7
3.6 Execução e Validação dos Testes	7
4 CONCLUSÕES	9
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	11

1 INTRODUÇÃO

Satélites de pequeno porte, conhecidos como nanosatélites, têm ganhado destaque como uma alternativa viável para a realização de missões espaciais de baixo custo e rápida execução. Esses dispositivos são fabricados com um orçamento significativamente menor em comparação aos satélites tradicionais e são amplamente utilizados para experimentos e desenvolvimento de novas tecnologias. No entanto, as missões desses nanosatélites costumam ter uma duração mais curta, e as limitações orçamentárias, somadas aos ciclos acelerados de desenvolvimento, frequentemente levam à negligência de testes fundamentais sugeridos pelas normas espaciais, o que pode comprometer o sucesso da missão devido a falhas operacionais (HELVAJIAN; JANSON, 2008).

Uma das principais causas de problemas em nanosatélites está na ausência de testes funcionais durante as primeiras etapas do desenvolvimento, especialmente na comunicação entre subsistemas. Muitos desses subsistemas, como o de controle e gerenciamento a bordo, são fortemente dependentes de software embarcado, o que torna a realização de testes rigorosos de verificação e validação essencial para garantir o desempenho adequado (ASUNDI; FITZ-COZY, 2013; HERPEL et al., 2016).

Nos CubeSats, a integração entre os subsistemas, que geralmente são desenvolvidos por diferentes equipes, é uma fase crítica para assegurar que todos os componentes funcionem de maneira integrada e confiável. Abordagens como o Teste Baseado em Modelos (MBT) e a Engenharia Baseada em Modelos (MDE) têm se mostrado eficientes na automação da geração de casos de teste e na criação de código a partir de modelos comportamentais dos subsistemas.

Este trabalho implementa uma metodologia sistemática para minimizar falhas na comunicação entre os subsistemas de nanosatélites, com foco específico no projeto CONASAT, uma constelação de CubeSats projetada para monitoramento ambiental. As ferramentas UPPAAL e YAKINDU foram aplicadas para validar o comportamento dos subsistemas e prevenir falhas. Além disso, foram incorporados princípios de dependabilidade e robustez, com o objetivo de aumentar a confiabilidade da missão.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Aplicar uma abordagem sistemática de testes de software embarcado no nanossatélite CONASAT, com o propósito de mitigar falhas de interoperabilidade entre a carga útil do satélite e o computador de gestão de bordo, utilizando técnicas de Teste Baseado em Modelos (MBT) e ferramentas de Engenharia Baseada em Modelos (MDE).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Implementar a técnica de Teste Baseado em Modelos (MBT) para gerar casos de testes a partir de modelos comportamentais dos subsistemas do CONASAT.
- Utilizar ferramentas de Engenharia Baseada em Modelos (MDE), como UPPAAL e YAKINDU, para automatizar a construção de modelos e a geração de códigos computacionais.
- Validar o comportamento esperado dos subsistemas modelados através dos casos de testes gerados, simulando a comunicação entre os subsistemas.
- Contribuir para o avanço das técnicas de testes automatizados para satélites CubeSats, aumentando a eficiência e a acessibilidade para missões de baixo custo e rápida implementação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Satélites de Pequeno Porte e CubeSats

Os CubeSats, um padrão de nanosatélite, são amplamente utilizados em experimentos de novas tecnologias e em pesquisas espaciais inovadoras. Essas pequenas plataformas de satélites oferecem um ciclo de desenvolvimento rápido e uma abordagem econômica para missões espaciais, permitindo que uma variedade de instituições explorem a utilização do espaço.

2.2 Desafios de Integração e Interoperabilidade de Subsistemas

Durante as missões com CubeSats, o subsistema de gestão de bordo desempenha um papel fundamental na interação com os subsistemas da carga útil, facilitando a coleta e o processamento dos dados obtidos na missão. Entretanto, como os subsistemas frequentemente são desenvolvidos por diferentes equipes, isso pode ocasionar incompatibilidades e falhas na comunicação entre eles (RABASA, 2015). A ausência de testes funcionais de integração nas fases iniciais do desenvolvimento é uma das principais razões para os problemas de interoperabilidade que surgem (LANGER; COLLEAGUES, 2016). Portanto, a fase de integração é essencial para assegurar a confiabilidade das operações da missão (HERPEL et al., 2016)

2.3 Testes de Software Embarcado em CubeSats

As abordagens de Teste Baseado em Modelos (MBT) e Engenharia Baseada em Modelos (MDE) têm se revelado eficazes para a verificação de subsistemas que dependem intensivamente de software, como aqueles empregados em CubeSats. O MBT facilita a geração de casos de teste a partir de modelos comportamentais, enquanto a MDE permite a automação da construção de modelos e da geração de código. Essas metodologias são valiosas para identificar falhas de comunicação antes que ocorra a fase de integração, evitando, assim, problemas de interoperabilidade.

2.4 Ferramentas para Testes Automatizados: UPPAAL e YAKINDU

As ferramentas UPPAAL e YAKINDU são reconhecidas pela sua aplicação em testes baseados em modelos para sistemas embarcados. UPPAAL é uma ferramenta destinada à verificação de modelos temporizados, capaz de gerar casos de teste a partir de autômatos temporizados. Por outro lado, YAKINDU é uma plataforma que se concentra na modelagem de máquinas de estado, permitindo a geração automática de código e a simulação do comportamento dos subsistemas. A combinação

dessas ferramentas tem mostrado resultados promissores na identificação de falhas e na validação de sistemas embarcados em CubeSats.

2.5 Avanços na Testagem de CubeSats

A evolução das abordagens sistemáticas para testes de CubeSats tem sido impulsionada pela implementação de técnicas de simulação e testes automatizados. Exemplos práticos, como o projeto NanosatC-BR, demonstram que a antecipação na realização de testes de comunicação e integração pode resultar em uma redução significativa nos custos e no retrabalho. Além disso, o uso de emuladores de falhas tem contribuído para aumentar a robustez e a confiabilidade dos sistemas embarcados.

3 Materiais e Métodos

A metodologia deste trabalho foi dividida em etapas estruturadas para a aplicação de uma abordagem sistemática de testes de software embarcado no nanossatélite CONASAT.

3.1 CubeSats

Os CubeSats possuem um formato padronizado, geralmente de 10 cm de lado, eles oferecem uma solução acessível para universidades e instituições de pesquisa. Devido ao seu custo reduzido e facilidade de integração, os CubeSats são amplamente utilizados para experimentação e testes de novas tecnologias espaciais. A Figura 3.1 ilustra as dimensões típicas de um CubeSat.

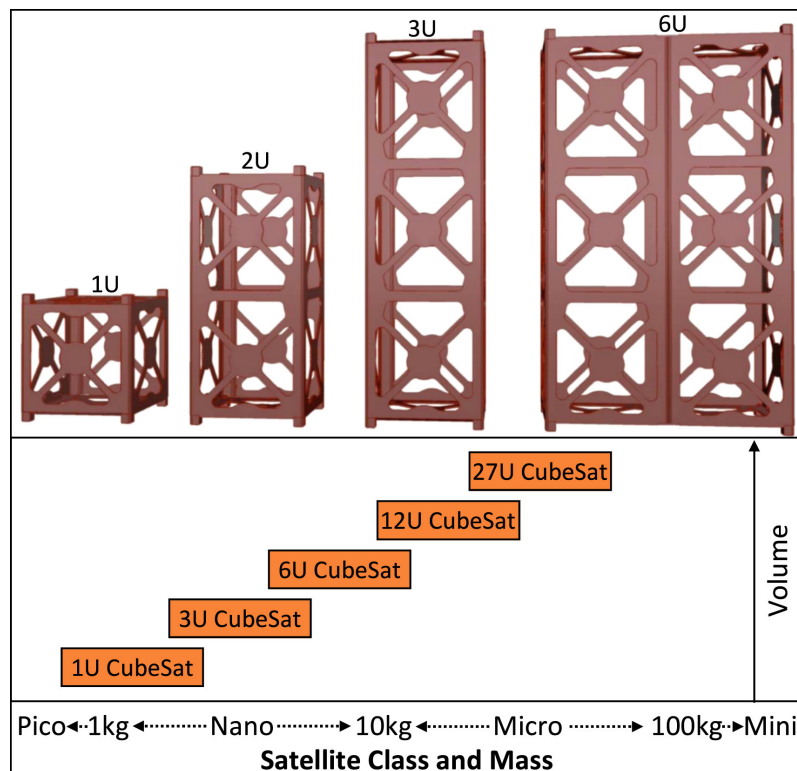


Figura 3.1 - Dimensões de um CubeSat.

3.2 Descrição do Projeto CONASAT

O projeto Constelação de Nano Satélites para Coleta de Dados Ambientais (CONASAT) visa desenvolver e lançar uma série de nanossatélites com o objetivo de coletar e transmitir dados ambientais. Através da utilização de CubeSats, o projeto

busca não apenas a inovação tecnológica, mas também a contribuição significativa para pesquisas científicas e o monitoramento ambiental.

3.3 Desenvolvimento de Modelos

Para iniciar, foram criados modelos comportamentais dos subsistemas do CubeSat utilizando as ferramentas UPPAAL e YAKINDU. Esses modelos permitem simular os comportamentos esperados dos subsistemas e identificar requisitos essenciais para o funcionamento adequado, além de gerar casos de teste automatizados.

3.3.1 UPPAAL

UPPAAL é uma ferramenta poderosa para a verificação de sistemas temporizados, que possibilita a modelagem de sistemas em tempo real e a realização de simulações. Através da definição de autômatos temporizados, é possível validar a lógica de operação dos subsistemas e identificar possíveis inconsistências antes da implementação física. A Figura 3.2 exemplifica a interface do UPPAAL.

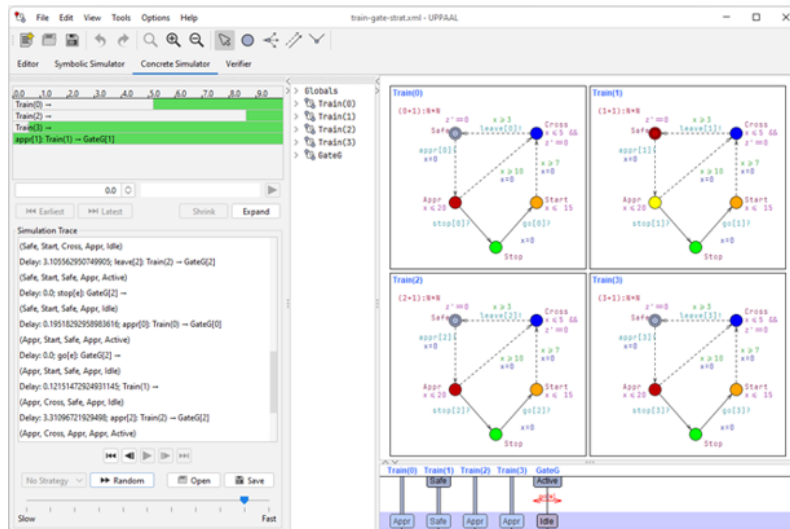


Figura 3.2 - Interface do UPPAAL para modelagem.

3.3.2 YAKINDU

YAKINDU é uma plataforma de modelagem que foca na criação de máquinas de estado, facilitando a geração automática de código e a simulação do comportamento dos subsistemas. Essa ferramenta é essencial para a implementação de lógica complexa nos subsistemas do CubeSat, garantindo que a interação entre eles ocorra

de maneira eficiente. A Figura 3.3 apresenta um exemplo de modelagem com YAKINDU.

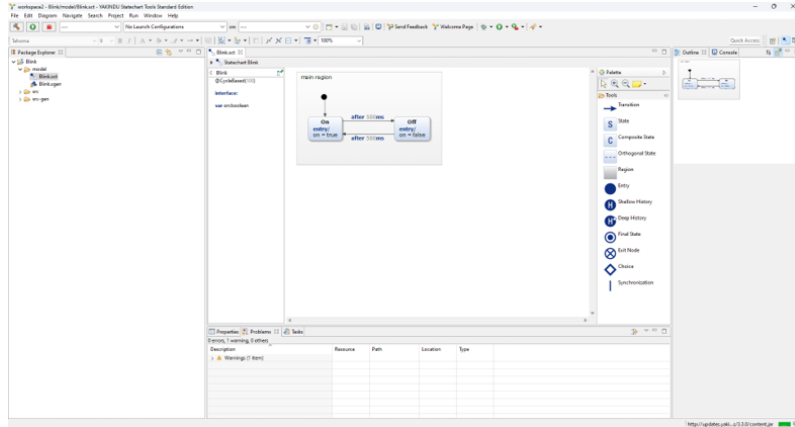


Figura 3.3 - Exemplo de modelagem em YAKINDU.

3.4 Teste Baseado em Modelos (MBT)

A técnica de *Model-Based Testing* (MBT) foi aplicada para gerar casos de teste diretamente dos modelos comportamentais desenvolvidos. Esses testes focaram na validação da comunicação entre a carga útil e o sistema de controle de bordo, com o objetivo de garantir a interoperabilidade entre os subsistemas.

3.5 Implementação do Sistema de Teste

Os códigos de teste gerados automaticamente a partir dos modelos foram implementados em placas Arduino, simulando o comportamento dos subsistemas de forma embarcada. As placas foram interligadas utilizando o canal de comunicação I2C, simulando o CubeSat, permitindo testar a interação real dos subsistemas dentro do sistema embarcado. A Figura 3.4 apresenta um exemplo de comunicação I2C utilizado no Arduino.

3.6 Execução e Validação dos Testes

Os testes gerados foram executados para validar a conformidade do comportamento dos subsistemas com o esperado. Os resultados foram analisados detalhadamente, possibilitando a identificação precoce de falhas de comunicação e outros problemas de interoperabilidade entre os componentes. A Figura 3.5 apresenta a bancada de testes utilizada.

```

C++ OBC.cpp
C:\Users\marco\Documents\INPE\codigos>C++ OBC.cpp
1  #include "Wire.h"; // inclui biblioteca I2C
2
3  char c;           // define variável c tipo caractere
4  char read_I2C;    // define variável read_I2C tipo caractere
5
6  void OBC::init()  // inicia função
7  {
8      Wire.begin(0x3C); // inicia comunicação com endereço do escravo(PL)
9  }
10
11 void Artigo_OBC::runCycle() // executa função
12 {
13     Wire.beginTransmission(0x3C); // inicia transmissão
14     Wire.write(ifaceOBC.TC);       // envia informação
15     Wire.endTransmission();        // termina transmissão
16     Wire.begin(0x3C);              // inicia transmissão
17     Wire.requestFrom(0x3C, 5);     // solicita leitura de informação
18     while (Wire.available()) // avalia comunicação
19     {
20         char c = Wire.read(); // lê informação
21         read_I2C = c;         // armazena informação lida na variável c
22     }
23     Wire.endTransmission(); // termina da transmissão
24 }
25
26 void OBC::enact_OBC_I2C_Connection_r1_Read_from_Slave() // executa função
27 {
28     ifaceOBC.Read = read_I2C; // transfere a informação lida para variável de leitura do OBC
29 }
30

```

Figura 3.4 - Exemplo de comunicação I2C.

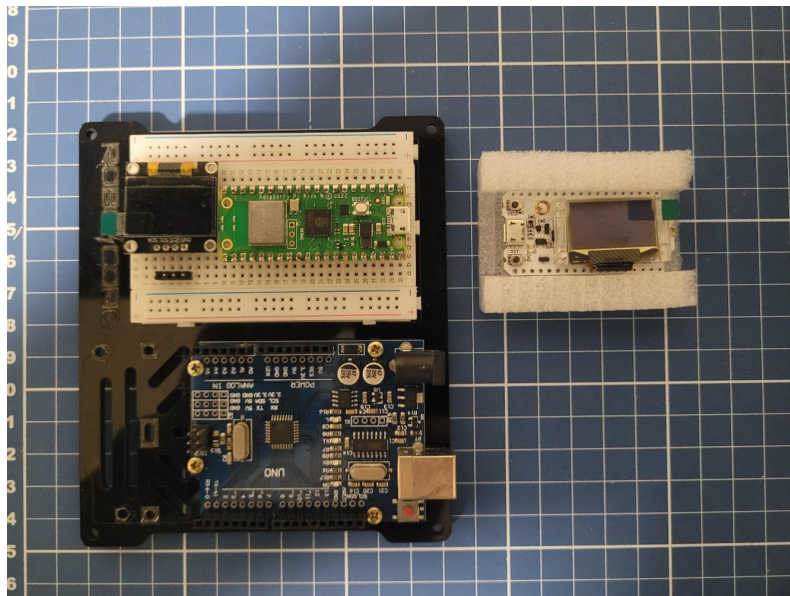


Figura 3.5 - Bancada de Teste

4 CONCLUSÕES

A aplicação da abordagem sistemática de testes de software embarcado no nanossatélite CONASAT demonstrou ser eficaz na mitigação de falhas de interoperabilidade entre a carga útil e o computador de gestão de bordo. A utilização de técnicas de Teste Baseado em Modelos (MBT) e Engenharia Baseada em Modelos (MDE) permitiu a geração automatizada de casos de teste a partir de modelos comportamentais, validando assim o comportamento esperado dos subsistemas. Os resultados obtidos reforçam a importância dessas metodologias para o desenvolvimento de satélites que seguem o padrão CubeSat, evidenciando a necessidade de uma abordagem rigorosa para garantir a confiabilidade e a eficiência das missões espaciais. Além disso, este trabalho contribui para o avanço das técnicas de teste automatizado, promovendo um entendimento mais aprofundado das interações entre subsistemas e aumentando a robustez das operações dos CubeSats, com potencial significativo para aplicações em pesquisa científica e monitoramento ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASUNDI, S.; FITZ-COZY, L. Cubesat mission design based on asystems engineering approach. **2013 IEEE Aerospace Conference**, 2013. 1

HELVAJIAN, H.; JANSON, S. **Small Satellites: Past, Present, and Future**. [S.l.]: Springer, 2008. 1

HERPEL, C. et al. Model based testing of satellite on-board software — an industrial use case. **2016 IEEE Aerospace Conference**, 2016. 1, 3

LANGER, B.; COLLEAGUES. Reliability of cubesats – statistical data, developers’ beliefs and the way forward. **ANNUAL AIAA/USU CONFERENCE ON SMALL SATELLITES**, 2016. 3

RABASA, A. Methods for dependability analysis of small satellite missions. **Archivio Istituzionale della Ricerca**, 2015. 3