

Universidade de Brasília – Faculdade Gama

Trabalho de Conclusão de Curso 1

Engenharia Aeroespacial

On-Board Computer

Projeto de um Computador de Bordo para Pequenos Satélites

Guilherme Silva Lionço

Orientador: Prof. Dr. Giancarlo Santilli

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Aguayo



Brasília,
Julho de 2018

Sumário



1. Introdução

1.1. Contexto e Justificativa

1.2. Objetivos

1.3. Metodologia

2. Referencial Bibliográfico

3. Hardware do OBC

4. Software do OBC

5. Resultados Preliminares

6. Trabalhos Futuros

Referências



Introdução



Contexto

- Parceria tecnológica com o Instituto de Aviação Polonês – ILOT.



- Proposta de criação de um CubeSat 3U.
 - Demonstrador Tecnológico
 - Uso de Câmera para monitoramento das calotas Polares;
 - Uso de um *Pulsed Plasma Thruster* (PPT) para controle orbital;
 - Uso de um acelerômetro para mapeamento do campo gravitacional terrestre.

Justificativa

- Um projeto desse porte abrirá várias oportunidades de pesquisa na área de subsistemas satelitais, sensoriamento remoto, controle orbital, entre outros. Alguns estudos já estão sendo realizados, com o intuito de oferecer soluções para essa futura missão.



Objetivos

- Desenvolvimento de um OBC para o controle e gerenciamento de um CubeSat.
 - Controle de uma Câmera CMOS;
 - Controle de um PPT;
 - Garantir uma subsistema com um alto nível de confiança, mesmo não utilizando dispositivos resistentes à radiação;
 - Divulgação da pesquisa na plataforma GitHub.

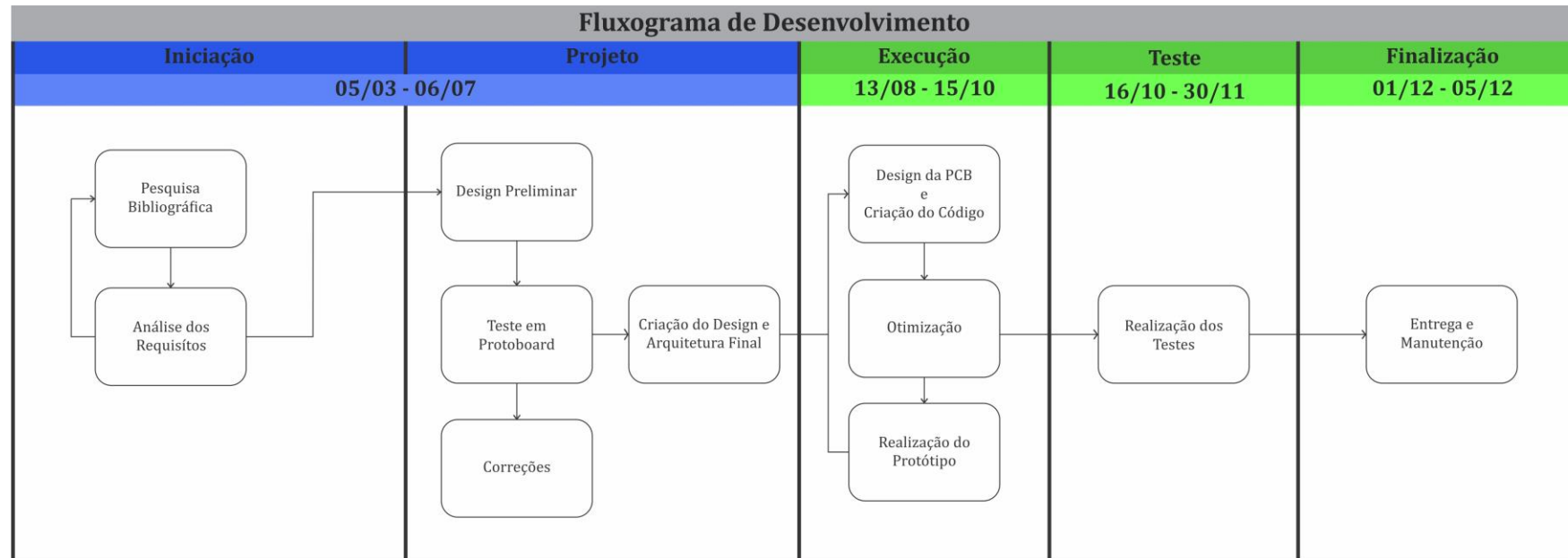


Figura 1 – Cronograma e Fluxograma do Projeto.



Referencial Bibliográfico



Pequenos Satélites

- Terminologia estabelecida pelo *Small Space Technology Program* (SSTP);
- Satélites que possuem massa úmida inferior a 500kg;

Fonte:(BARNHART, 2008, pág.42).

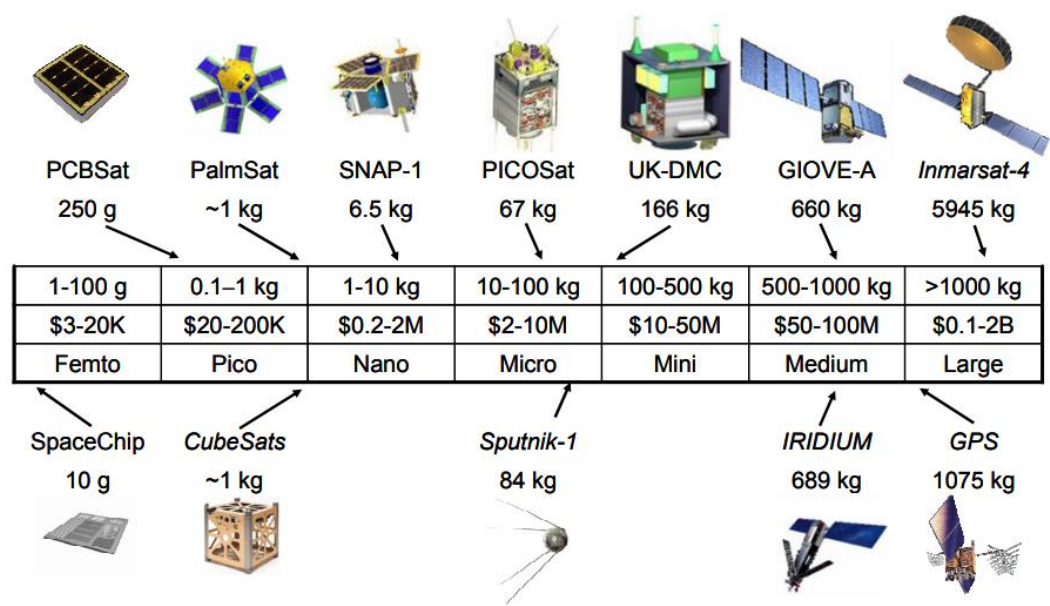


Figura 2 – Categoria de Pequenos Satélites e alguns exemplos.

Fonte:(WEKERLE; FILHO, 2017, pág.3).

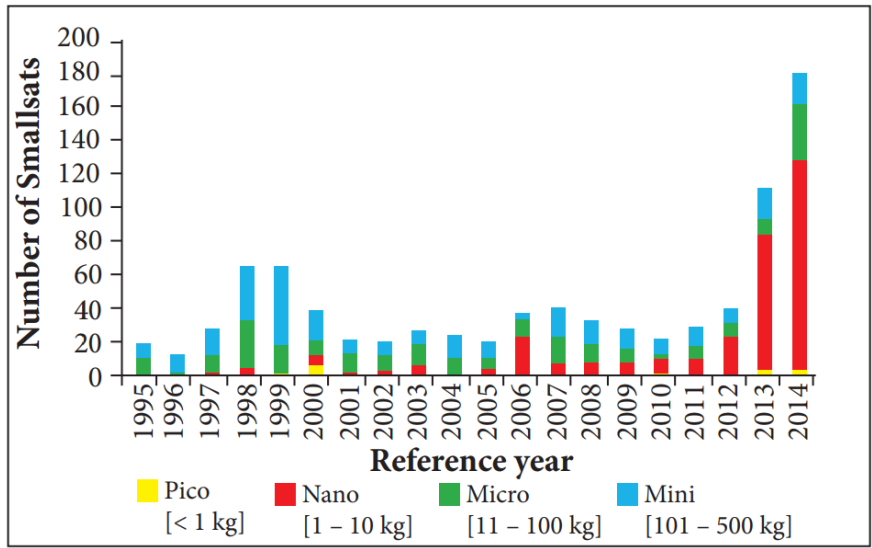


Figura 3 – Lançamento de pequenos satélites entre 1995 e 2014.



Subsistemas de um CubeSat

Fonte:(ADDAIM; KHERRAS ; ZANTOU, 2010, adaptado pág.6).

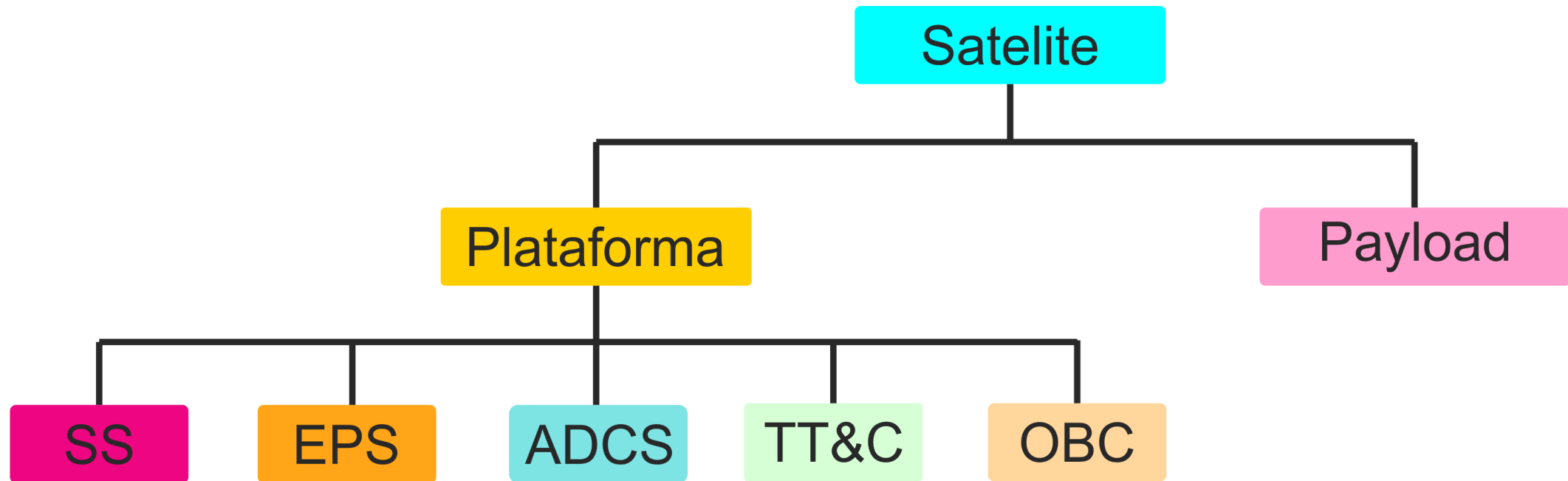


Figura 6 – Arquitetura de um Satélite.



Ambiente Espacial

- Principais Fatores: Vácuo, Radiação Ultravioleta, Radiação Espacial, Plasma, Temperaturas Extremas, Fadiga Térmica e Impacto de Lixo Espacial;
- Os efeitos da radiação espacial são os mais relevantes para a análise da eletrônica embarcada de um satélite;

Radiação Espacial

- Em órbitas LEO (altitude entre 100-1.000 km), TID de aproximadamente 0,1 krad/ano (PETKOV, 2003).

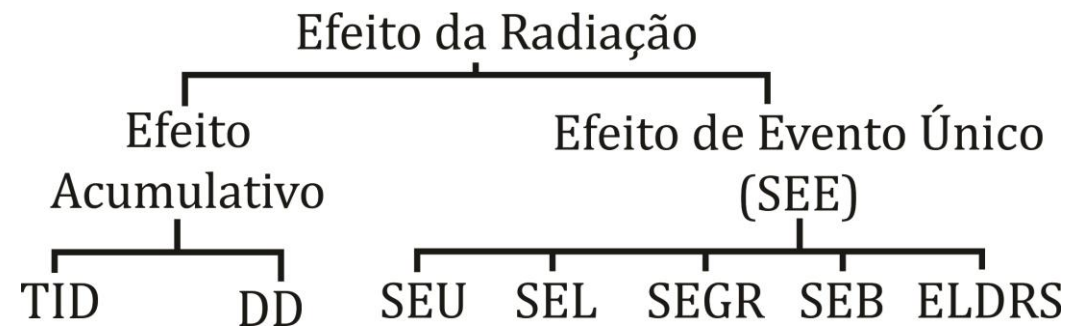


Figura 7 – Classificação dos efeitos da Radiação Espacial.



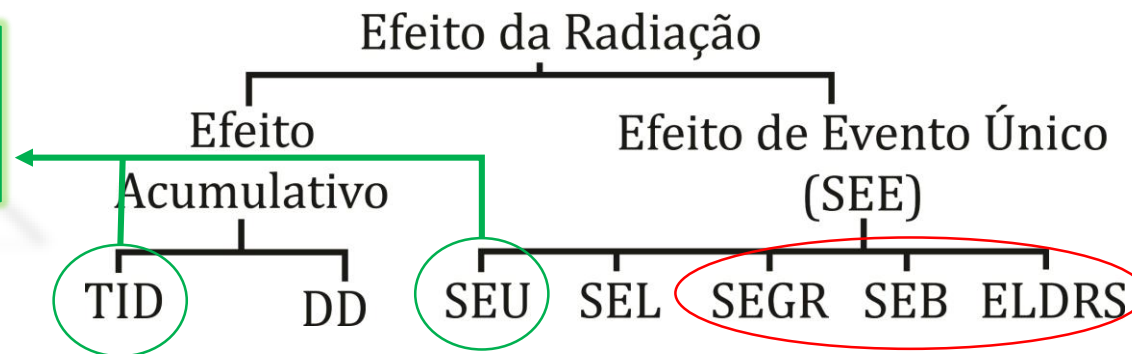
Ambiente Espacial

- Principais Fatores: Vácuo, Radiação Ultravioleta, Radiação Espacial, Plasma, Temperaturas Extremas, Fadiga Térmica e Impacto de Lixo Espacial;
- Os efeitos da radiação espacial são os mais relevantes para a análise da eletrônica embarcada de um satélite;

Radiação Espacial

- Em órbitas LEO (altitude entre 100-1.000 km), TID de aproximadamente 0,1 krad/ano (PETKOV, 2003).

Efeitos mais utilizados nas especificações de componentes eletrônicos.



Efeitos permanentes causados pelo SEL.

Figura 7 – Classificação dos efeitos da Radiação Espacial.



Categorias de Componentes

Comercial:

- O processo de design não garante resistência à radiação.
- Pouco controle da radiação.
- Níveis de resistência:
 - * **TID:** 2 a 10 krad (típico).
 - * **SEU:** 5 *MeV/mg.cm2* .
 - * **Taxa de erro SEU:** 10^{-5} *erros/bit.dia*
- O cliente realiza testes de radiação e assume todos os riscos.
- Avaliação e risco do cliente.

Rad Tolerant:

- O design garante resistência à radiação até um certo nível.
- Pouco controle da radiação.
- Níveis de resistência:
 - * **TID:** 20 a 50 krad (típico).
 - * **SEU:** 20 *MeV/mg.cm2*.
 - * **Taxa de erro SEU:** 10^{-7} - 10^{-8} *erros/bit.dia*.
- Geralmente testado apenas para falha funcional.
- Avaliação e risco do cliente.

Rad-Hard:

- Projetado e processado para um nível de dureza específico
- Vários testes realizados com o substrato do chip
- Níveis de resistência:
 - * **TID:** > 200 krad a >1 Mrad.
 - * **SEU:** 80-150 *MeV/mg.cm2*.
 - * **Taxa de erro SEU:** 10^{-10} - 10^{-12} *erros/bit.dia*.
- Geralmente testado apenas para falha funcional.
- Avaliação e risco do cliente.



Hardware do OBC





Requisitos e Funcionalidades

- Poucos requisitos foram delimitados, pois o projeto da missão CubeSat ainda está em fase de discussão;
- A abordagem utilizada para contornar essa situação foi adicionando requisitos das missões QB50 e Aato-1;

Número do Requisito	Descrição do Requisito
OBC-H-R1	OBC deve realizar a aquisição dos seguintes dados: Temperatura; Tensão e Corrente consumidas pelo sistema; Sensor Inercial;Dados dos demais subsistemas do CubeSat; Payload (Imagens da Câmera).
OBC-H-R2	Possuir sistema de proteção contra travamentos.
OBC-H-R3	Os componentes devem operar entre -45°C e 80°C.
OBC-H-R4	O OBC deve possuir interfaces condizente com cada subsistema do satélite.
OBC-H-R5	Possuir concepção versátil.
OBC-H-R6	Possuir soluções que protejam o sistema contra falhas.
OBC-H-R7	Possuir armazenamento não volátil de dados.

Tabela 1 -Requisitos do Hardware.



Escolha do Microcontrolador

Microcontrolador	Consumo	AD	I/O	InterfaceSerial	PMW	Watchdog Timer	Frequência	Faixa de Temperatura [°C]	SOMA
PESO	5	3	3	4	3	3	5	4	30
MSP432P4111	5	3	3	3,5	3	3	2,4	3,03	25,93
MC9S12XHZ512	2,83	2	2,04	3,7	3	3	2	3,52	22,09
MSP430F5529	1,8	1,5	2,25	3	3	3	1,25	3,03	18,83
RM42L432	0,46	2	1,61	3,7	3	3	5	3,52	22,29
ATSAMD21J18	5	2,5	1,86	4	3	3	2,4	3,03	24,79
ADuCM360	1,93	0,5	0,68	3,5	3	3	0,8	4	17,41

Tabela 2 - Pontuação de cada microcontrolador.

- O microcontrolador da Texas Instruments possui 32 GPIOs e 4 ADC a mais que o microcontrolador da Microchip;
- De acordo com ARM Microcontrollers, o MSP432P4111 (M4F) possui uma performance superior ao ATSAMD21J18 (M0+), aproximadamente 37%;
- Outro item que não foi colocado na tabela de comparação é a memória SRAM. O MSP432P4111 conta com 64 KB de SRAM contra 32 KB do ATSAMD21J18.





MSP432P4111

Principais Características:

Recurso	Valor
Processador	ARM Cortex-M4F
Instrução	32-bit
Temporizadores	sim
Clock	48 MHz
Memoria Flash	2048KB
Memoria Ram	256KB
I2C	4
UART/SPI	4
PWM	sim
I/O	84
ADC	24 canais
Temperatura	-40 a 85°C

Tabela 3 – Características do MSP432P4111.

Fonte: (Texas Instruments, 2018, pág.3).

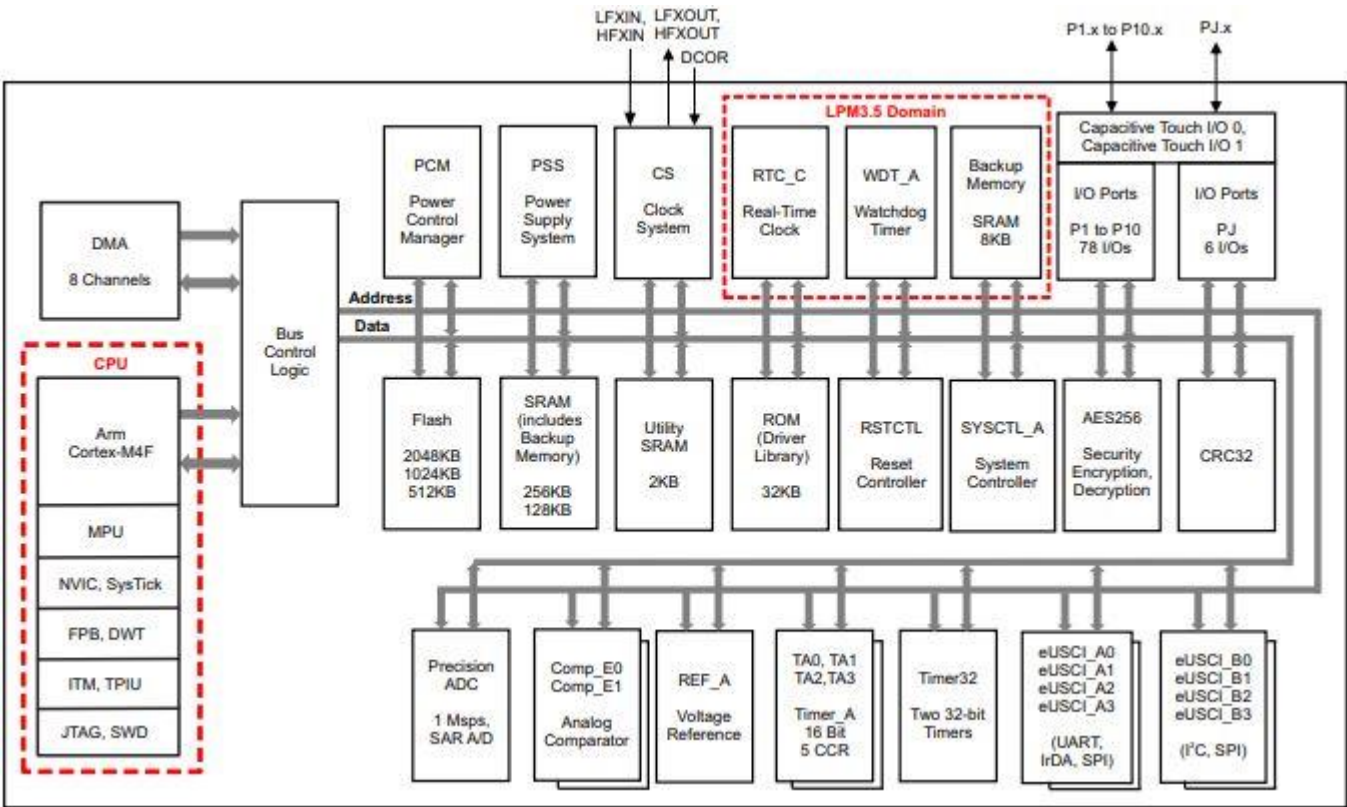


Figura 8 – Arquitetura do microcontrolador MSP432P4111.



Unidade de Armazenamento

- Estimativa de 176MB/dia de dados provenientes de Imagem e Telemetria;
- Estimativa de 512KB para armazenamento do software embarcado;

Fonte: (FROST; AGASID, 2015, pág.97).

Característica	SRAM	DRAM	Flash	MRAM	FRAM	CRAM/PCM
Não-Volátil	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Tensão de operação, +- 10%	3.3 – 5 V	3.3 V	3.3 e 5 V	3.3 V	3.3 V	3.3 V
Organização bits/die	512k x 8	16M x 8	16M x 8; 32M x 8	128k x 8	16k x 8	-
Retenção de Dados (@70° C)	N/A	N/A	10 anos	10 anos	10 anos	10 anos
Resistencia (Ciclo de Deletar/Escrita)	Ilimitado	Ilimitado	10^6	10^13	10^13	10^13
Tempo de Acesso	10 ns	25 ns	50 ns depois de uma pagina lida;	300 ns	300 ns	100 ns
200ms escrita; 2ms para deletar						
Radiação (TID)	1Mrad	59krad	30krad	1Mrad	1 Mrad	1 Mrad
SEU rate (relativo)	zero	Alto	zero (celulas); Baixo -Medio (dispositivos eletronicos)	zero	zero	zero
Faixa de Temperatura	Padrão Militar	Industrial	Comercial	Padrão Militar	Padrão Militar	Padrão Militar
Potência	500 mW	300 mW	30 mW	900 mW	270 mW	-
Pacote	4MB	128 MB	128 – 256 MB	1 MB	1.5 MB	(pacote com 12 chips)

Tabela 4 – Arquitetura do microcontrolador MSP432P4111.

Recurso	Memórias	
	FM25V05-GTR	SQF-MSDM1-4G-21E
	Cypress	
Fabricante	Semiconductor Corporation	Advantech Corp
Temp Op.	-40°C ~85°C	-40°C ~85°C
Corrente	300uA	150uA
Tensão Op.	2 V ~3.6 V	2.7 V ~3.6 V
Capaciade	512Kb (64K x 8)	4GB
Protocolo	SPI	SPI

Tabela 5 – Especificação das memórias da Unidade de Armazenamento.



Periféricos

- **Sensor de Corrente**

Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2018d, pág.2)

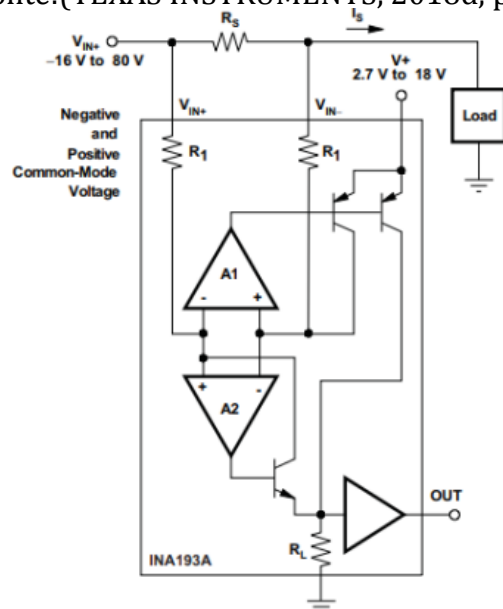


Figura 9 – Esquemático Eletrônico de uma aplicação usual do INA193A-EP.

- **Produto:** INA193A-EP;
- **Fabricante:** Texas Instruments;
- **Temp Op.:** -55 ~ 105°C;
- **Corrente:** 1.3mA;
- **Tensão:** 2.7 ~ 18V.

- **Sensor Inercial**

Fonte: (INVENSENSE, 2018, pág.20)

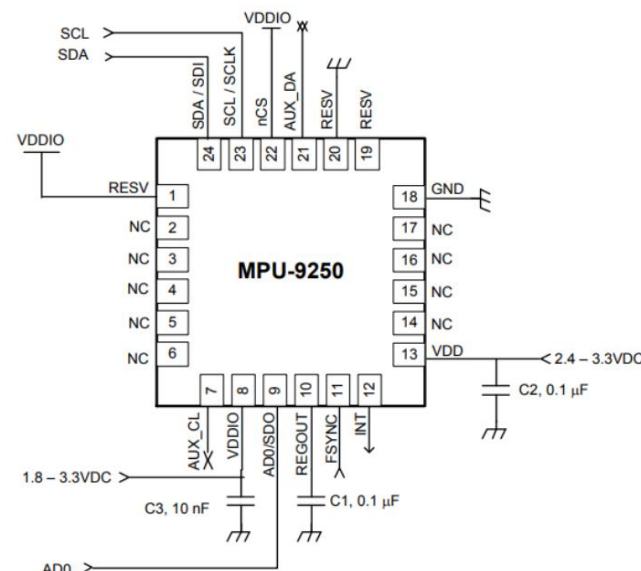


Figura 10 – Esquemático Eletrônico de uma aplicação usual do MPU9250.

- **Produto:** MPU-9250;
- **Fabricante:** TDK InvenSense;
- **Temp Op.:** -40 ~ 85°C;
- **Corrente:** 3.2mA;
- **Tensão:** 2.4 ~ 3.6V.
- **Protocolo:** SPI

- **Sensor de Temperatura**

Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2018, pág.1)

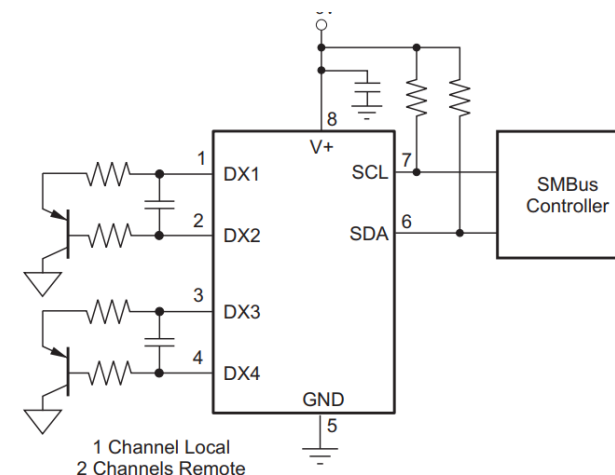


Figura 11 – Esquemático Eletrônico de uma aplicação usual do TMP422-EP

- **Produto:** TMP422-EP;
- **Fabricante:** Texas Instruments;
- **Temp Op.:** -55 ~ 127°C;
- **Corrente:** 60mA;
- **Tensão:** 2.7 ~ 5.5.
- **Protocolo:** SPI

Dimensões Físicas

- Cada placa deve ter uma forma de 90x96mm;
- Furos M3;

Fonte: (PC/104 EMBEDDED CONSORTIUM, 2008, pág.20)

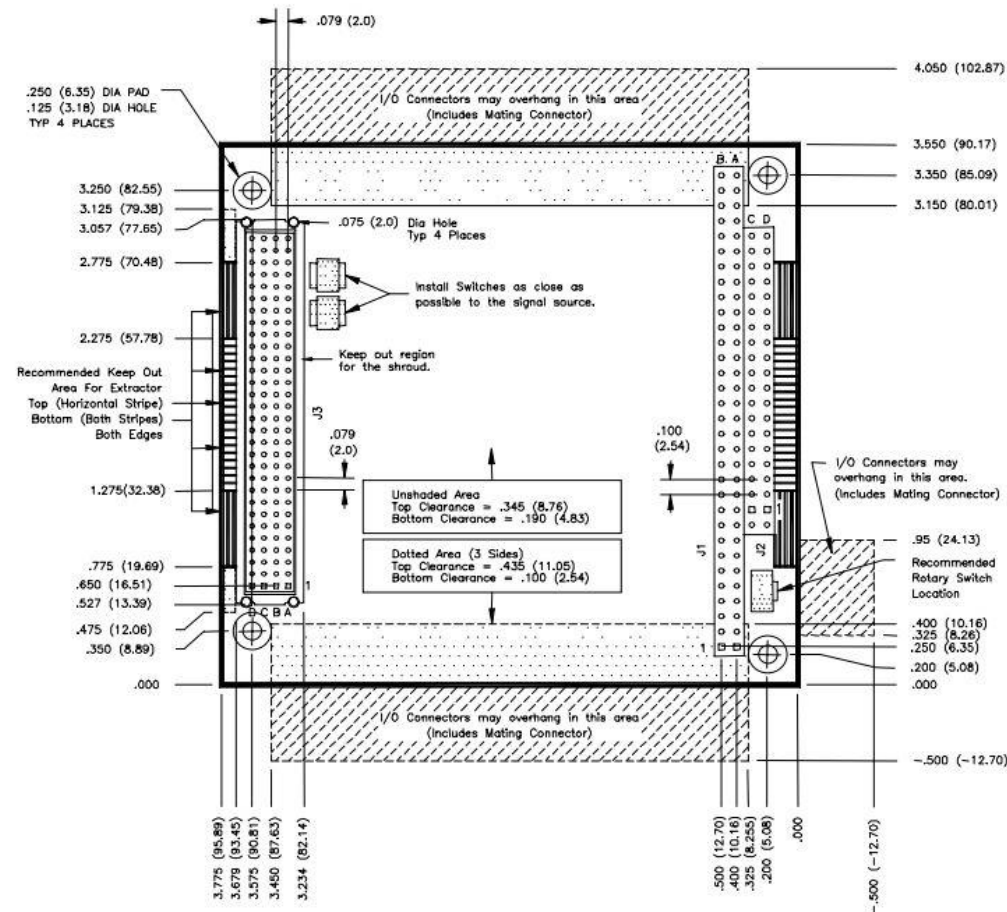


Figura 12 – Dimensões do módulo PC/104-Plus em polegadas e milímetros.

Watchdog Externo

- Normalmente utilizado para monitorar o estado do microcontrolador, evitando o travamento do sistema. Basicamente, um Watchdog externo é um contador regressivo que, ao final da contagem, reinicia o microcontrolador em caso de um evento SEE;
- O contador STWD100, produzido pela fabricante STMicroelectronics, possui três tempos para reset (3.4ms, 6.3ms, 102ms e 1.6s).

Fonte:(STMicroelectronics, 2017, pág.4)

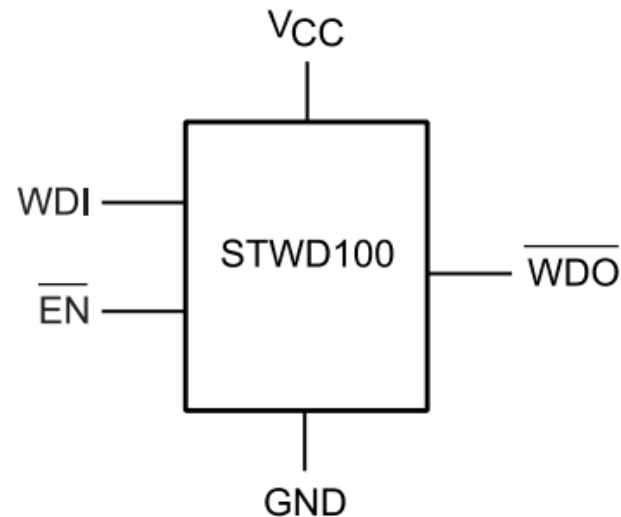


Figura 13 – Diagrama Lógico do STWD100.



Software do OBC



Requisitos e Funcionalidades

- Poucos requisitos foram delimitados, pois o projeto da missão CubeSat ainda está em fase de discussão;
- A abordagem utilizada para contornar essa situação foi adicionando requisitos das missões QB50 e Aato-1;

Número do Requisito	Descrição do Requisito
OBC-SW-R1	O OBC deve armazenar os seguintes dados a cada um segundo: Imagens da Carga Útil e informações temporais e espaciais das imagens; Temperatura do sistema; Tensão e Corrente consumidas pelo sistema; Atitude do CubeSat; Resposta de cada subsistema.
OBC-SW-R2	O OBC deve controlar os subsistemas do CubeSat.
OBC-SW-R3	O OBC deve realizar um log de eventos do sistema.
OBC-SW-R4	O OBC deve ter um controle da referência temporal, com uma precisão de 500ms.
OBC-SW-R5	O OBC deve realizar o pacote de telemetria/payload e enviar dados para o subsistema de TT&C, durante uma janela de transmissão.
OBC-SW-R6	O OBC deve identificar e executar os comandos recebidos da Estação Terrestre.
OBC-SW-R7	O OBC deve alternar os modos de operação de acordo com o a potência na bateria.
OBC-SW-R8	O OBC deve possuir um sistema anti travamento.

Tabela 6 – Requisitos do *Software*.



Arquitetura

- Arquitetura baseada em Camadas (LBA, do inglês Layered-based Architecture);
- Abstrai o *software* embarcado de acordo com sua proximidade com o *hardware*;

Fonte: (EBRARY, 2018, adaptado pág.1).

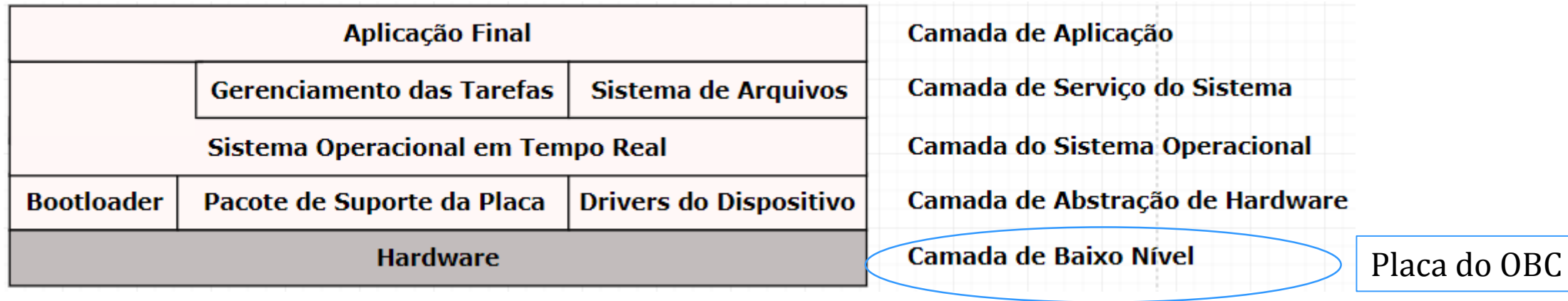


Figura 14 – Arquitetura de abstração de Camadas.



Arquitetura

- Arquitetura baseada em Camadas (LBA, do inglês Layered-based Architecture);
- Abstrai o *software* embarcado de acordo com sua proximidade com o *hardware*;

Fonte: (EBRARY, 2018, adaptado pág.1).

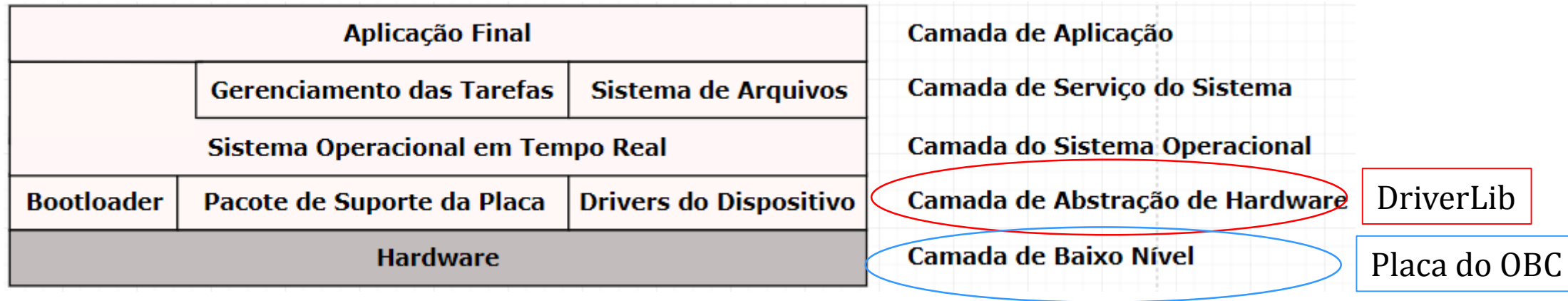


Figura 14 – Arquitetura de abstração de Camadas.



Arquitetura

- Arquitetura baseada em Camadas (LBA, do inglês Layered-based Architecture);
- Abstrai o *software* embarcado de acordo com sua proximidade com o *hardware*;

Fonte: (EBRARY, 2018, adaptado pág.1).

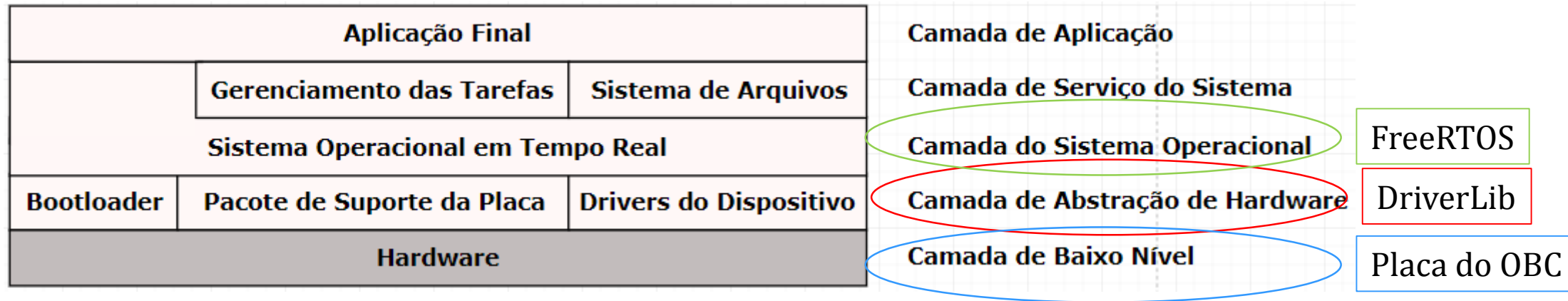


Figura 14 – Arquitetura de abstração de Camadas.



Arquitetura

- Arquitetura baseada em Camadas (LBA, do inglês Layered-based Architecture);
- Abstrai o *software* embarcado de acordo com sua proximidade com o *hardware*;

Fonte: (EBRARY, 2018, adaptado pág.1).

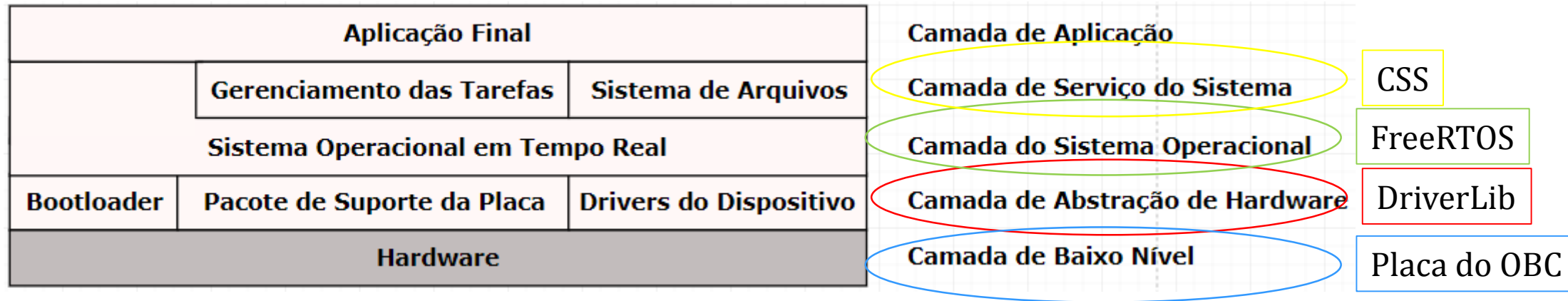


Figura 14 – Arquitetura de abstração de Camadas.



Arquitetura

- Arquitetura baseada em Camadas (LBA, do inglês Layered-based Architecture);
- Abstrai o *software* embarcado de acordo com sua proximidade com o *hardware*;

Fonte: (EBRARY, 2018, adaptado pág.1).

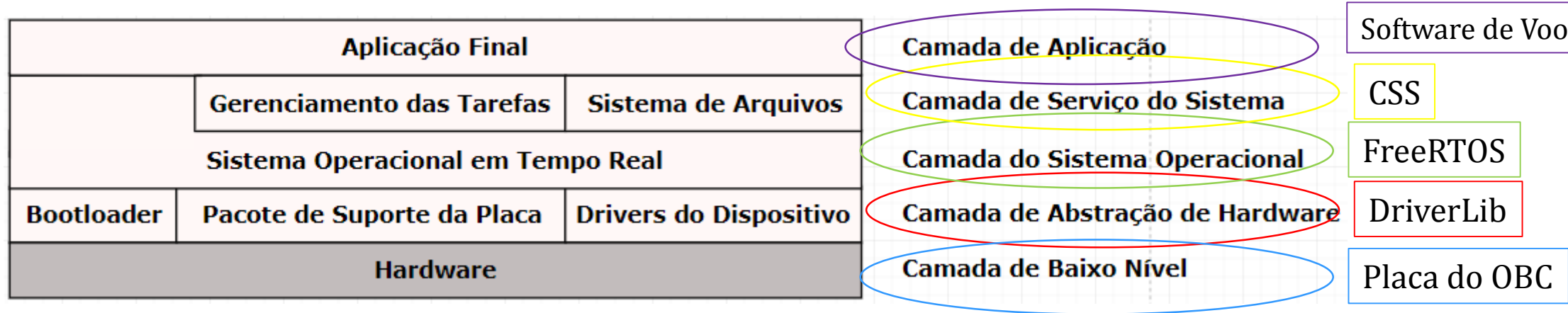


Figura 14 – Arquitetura de abstração de Camadas.



DriverLib

- Conjunto de APIs, distribuído pela Texas Instruments, utilizado para controlar, configurar e manipular os periféricos dos microcontroladores da família MSP432 e MSP430;
- Facilita a implementação do código embarcado, deixando-o mais intuitivo;
- O DriverLib possui 25 APIs;

```
1 int main(void){  
2 //...  
3 CSKEY = 0x695A;  
4 CSCTL |= SELM_1 | DIVM_2;  
5 SKEY = 0;  
6 //...  
7 }
```



```
1 int main(void){  
2 //...  
3 CS_initClockSignal(CS_MCLK, CS_VLOCK_SELECT, CS_CLOCL_DIVIDER_32);  
4 //...  
5 }
```

Figura 16 - Configurando o *MasterClock* com a API do DriverLib.

Figura 15 - Configurando o *MasterClock* a nível de registrador.



FreeRTOS

- Kernel gratuito utilizado em aplicações embarcadas que necessitam de aplicação em tempo real, sendo normalmente empregado em CubeSats;
- Imagem típica de 6K a 12K bytes;
- O sistema controla as tarefas (*Tasks*) de acordo com sua prioridade;
- O FreeRTOS possui 145 APIs;
- As APIs mais utilizadas são as que envolvem o controle das *Tasks*.

Fonte: (LIN,2010, adaptado pág.20)

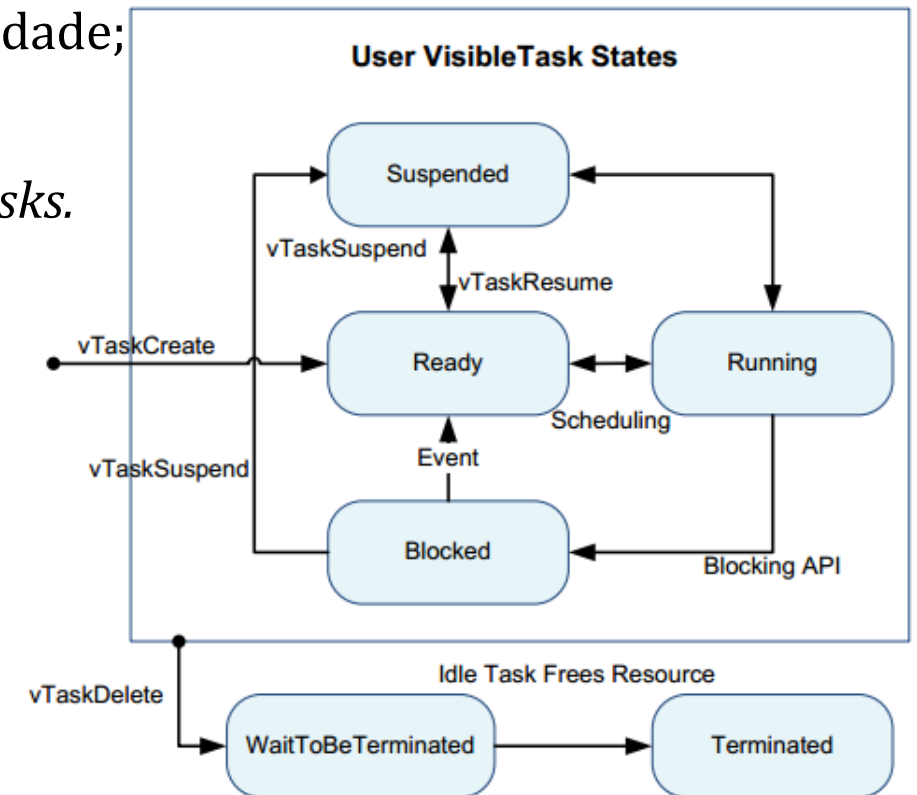


Figura 17 – Estados das *Tasks* no FreeRTOS



Camada de Serviço do Sistema

- Uso da UML para modelar a CSS;
 - rápido entendimento do software a partir do diagrama UML;
 - fácil manutenção do software;
 - portabilidade do software para várias plataformas e linguagens;
 - linguagem de modelagem amplamente utilizada na engenharia de software.
- Usar a extensão *FunctionalC*, permitindo a modelagem do sistema na linguagem C;

Fonte:(DOUGLASS, 2009, pág.5).

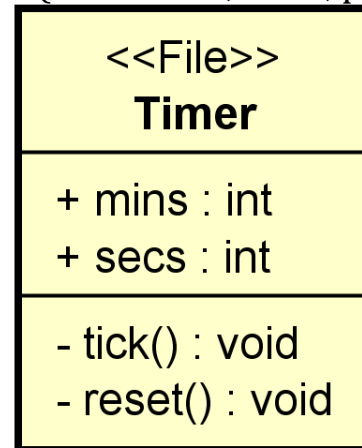


Figura 22 – Exemplo Timer UML.

Fonte:(DOUGLASS, 2009, pág.5).

```
1 extern int mins;
2 extern int secs;
3
4 /*## operation Reset() */
5 void Reset();
6
7 /*## operation tick() */
8 void tick();
9
10 }
```

Figura 23 – Transcrição do Timer UML para código em C.



Camada de Serviço do Sistema

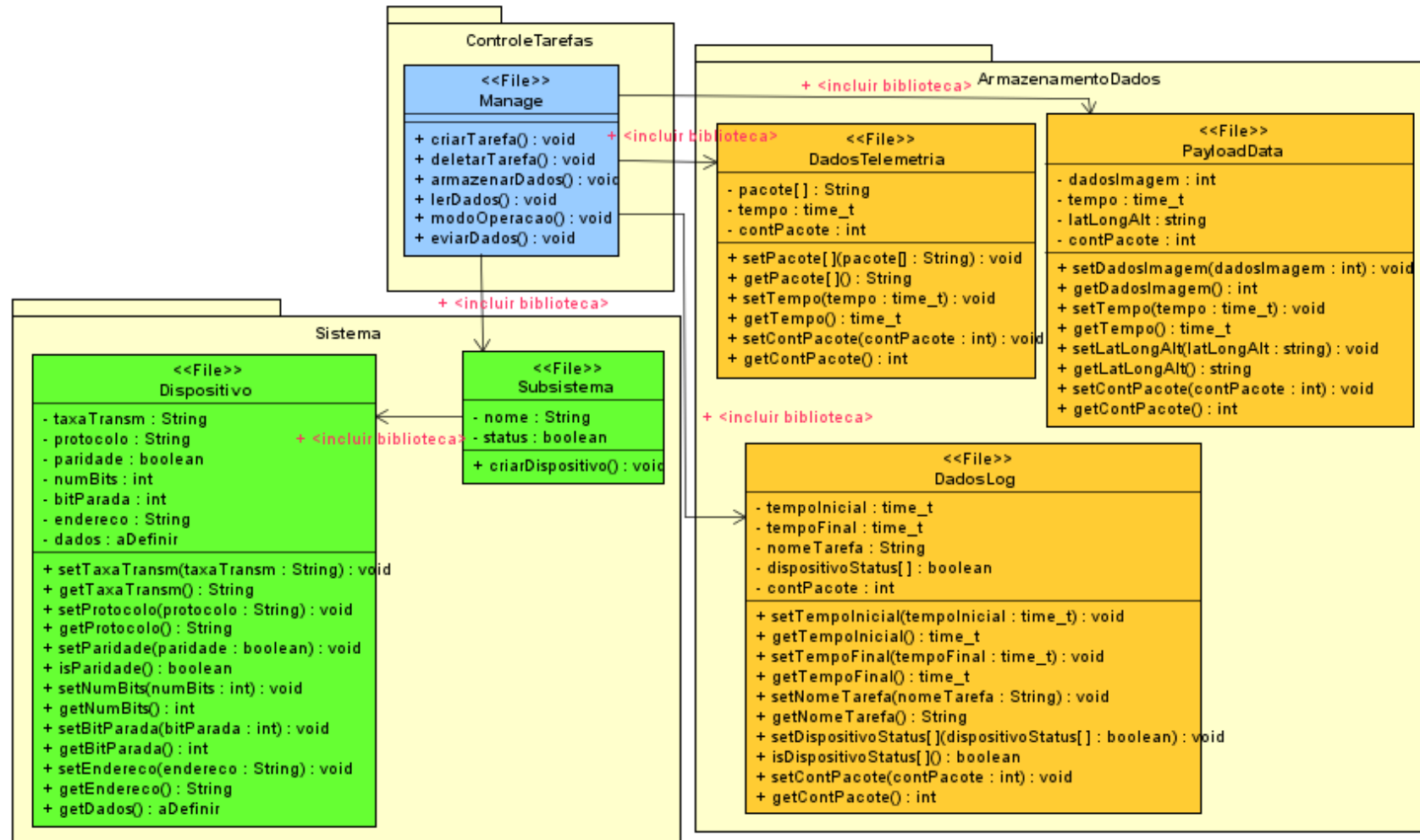


Figura 18 – UML da Camada de Serviço do Sistema.

Resultados Preliminares



Arquitetura do Hardware:

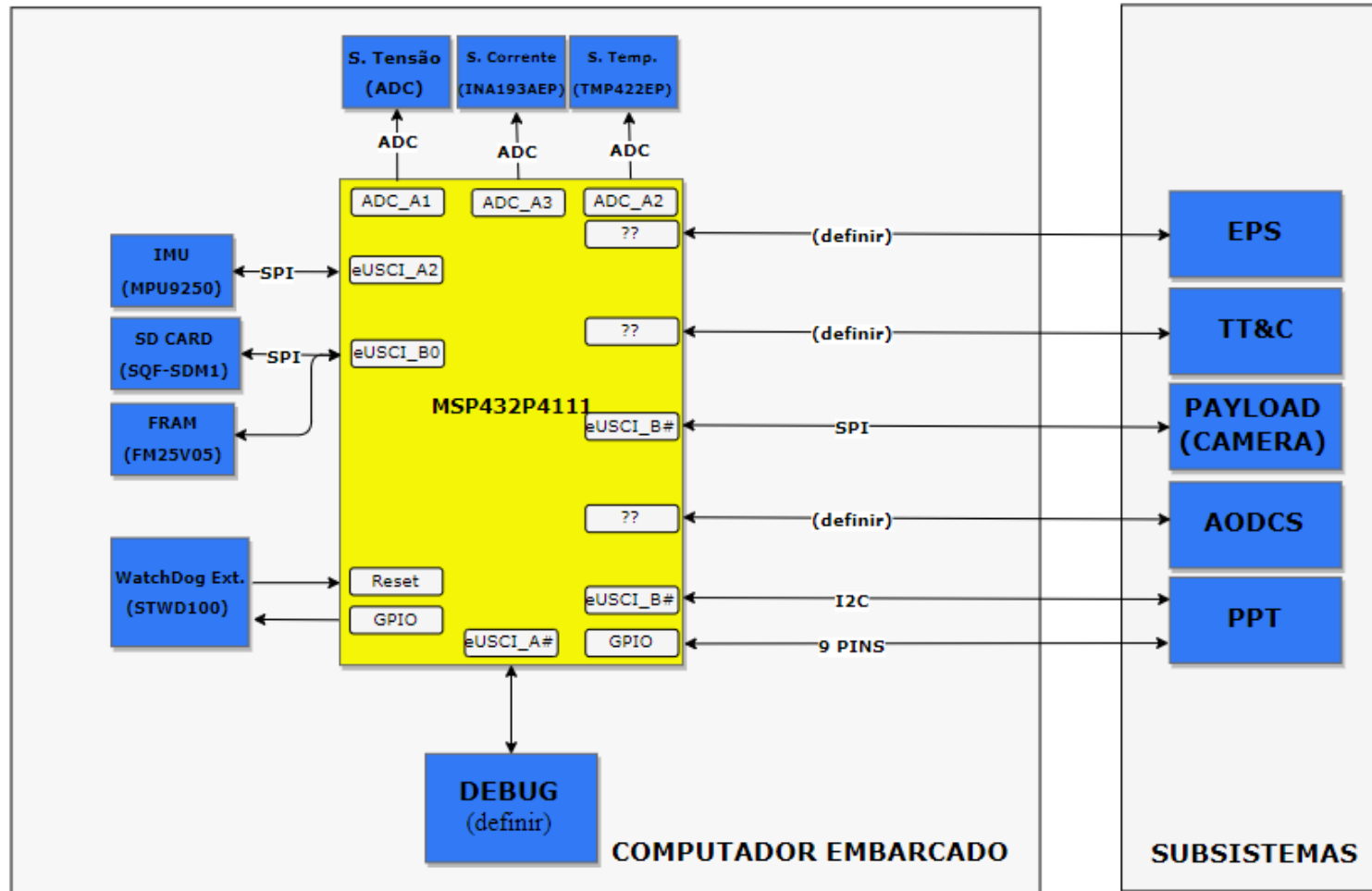


Figura 19 – Arquitetura prévia do OBC.

Esquemático Eletrônico:

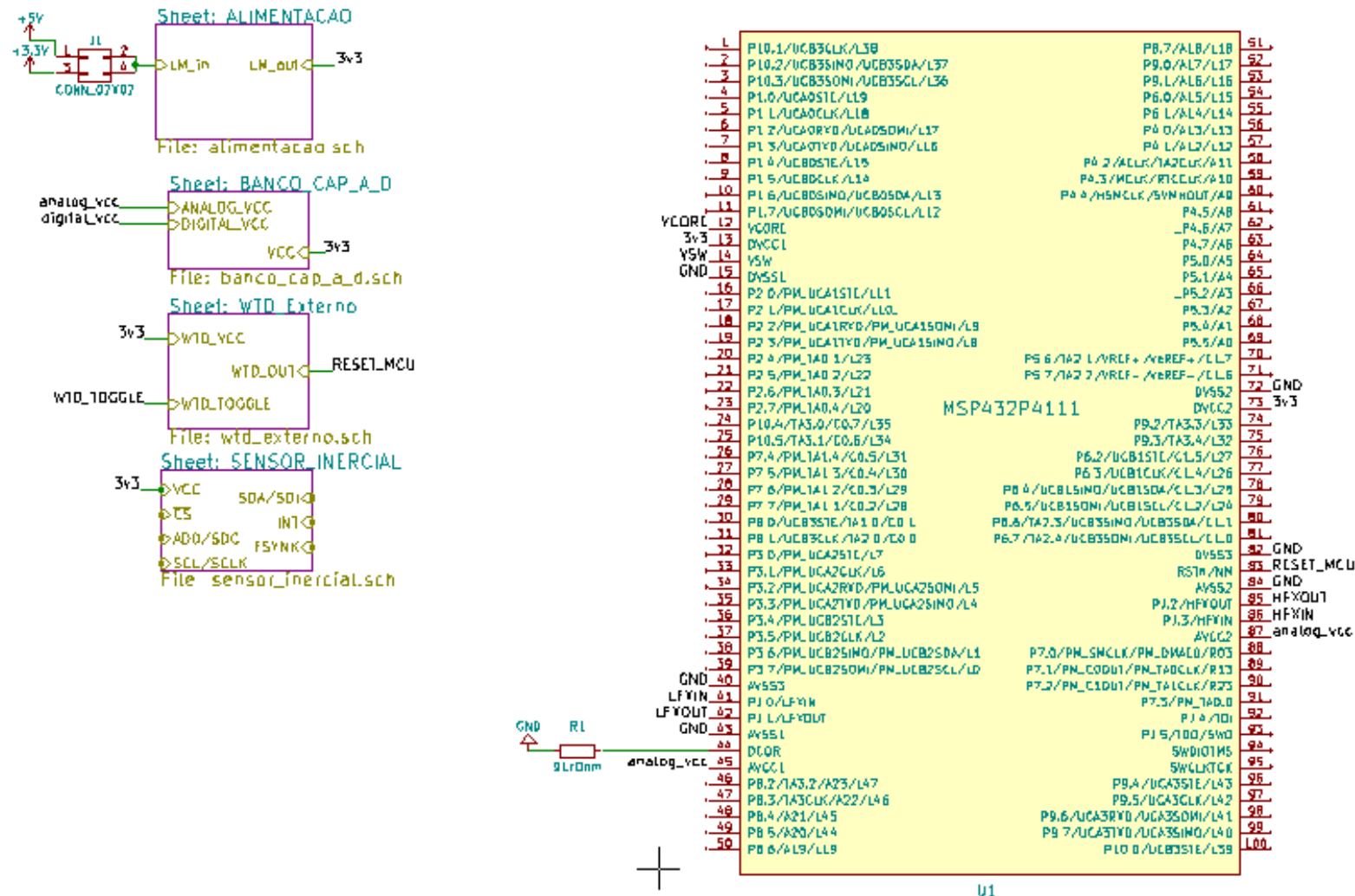
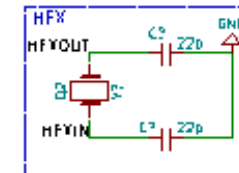
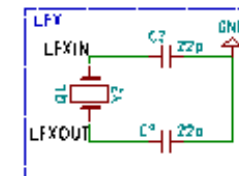
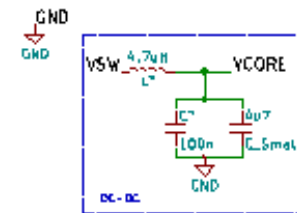


Figura 20 – Esquemático prévio do OBC.



Esquemático Eletrônico:

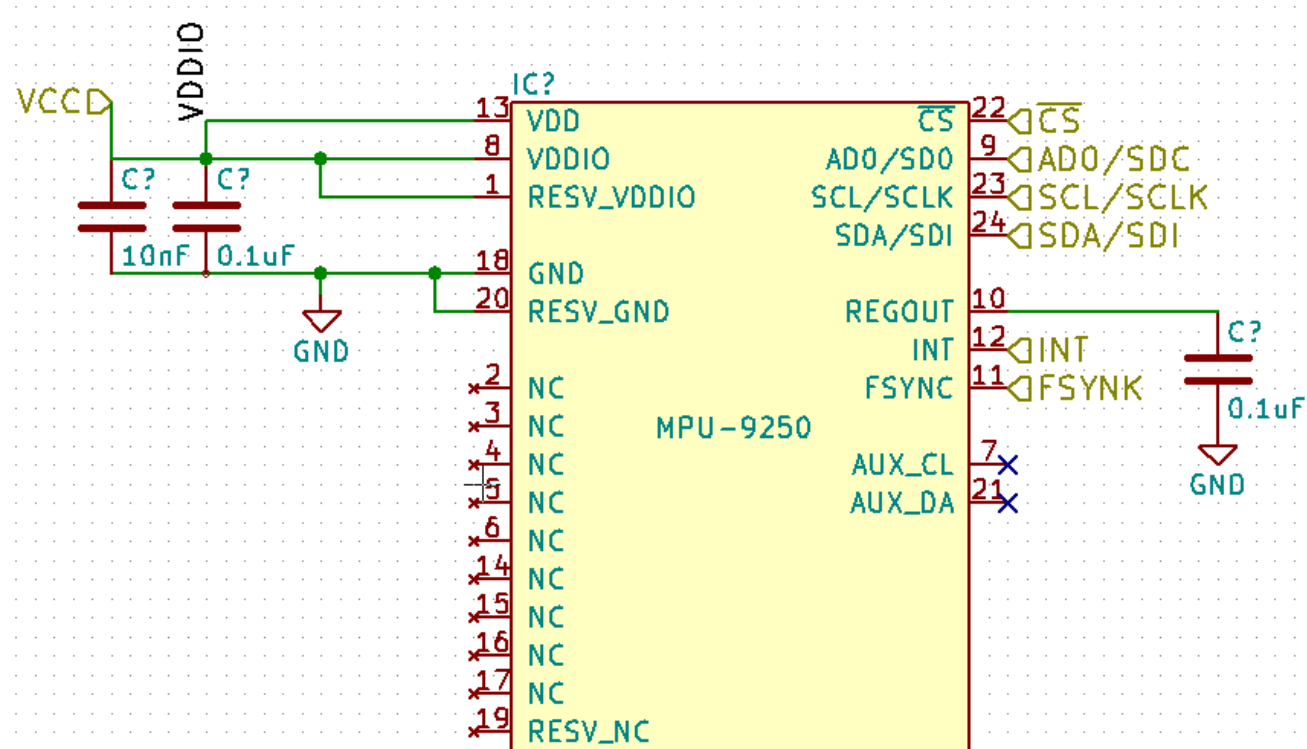


Figura 22 – Desenho do MPU-9250 no KiCad.

Figura 21 – Desenho do MSP432P4111 no KiCad.



Esquemático Eletrônico:

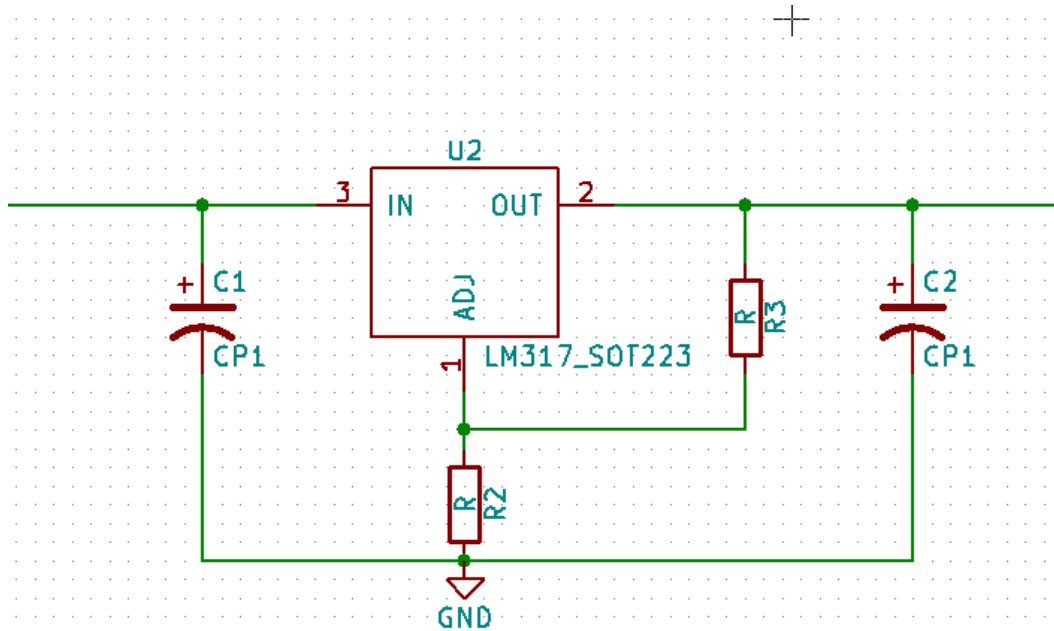


Figura 23 – Desenho do Regulador de Tensão LM317 no KiCad.

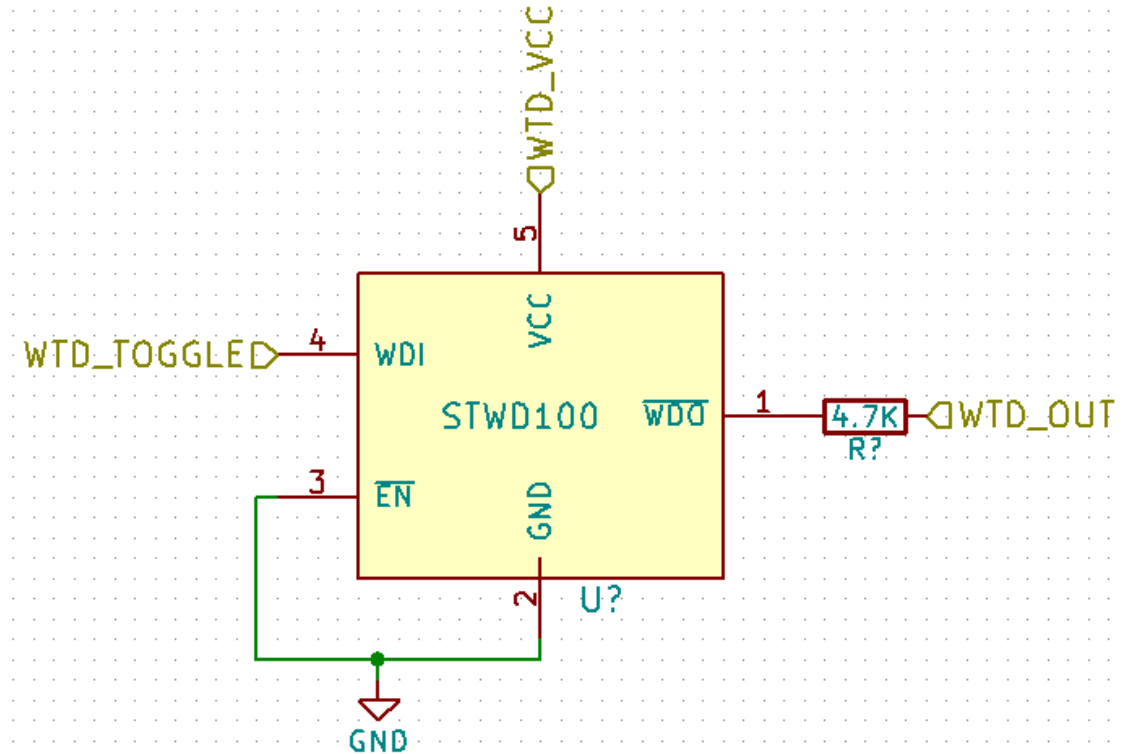


Figura 24 – Desenho do Watchdog STWD100 no KiCad.



Problemas:

- Não cumprimento do cronograma;
- Fatores não cogitados durante a elaboração do cronograma;
 - Atraso de alguns componentes comprados no exterior;
 - Atraso do desenvolvimento do software devido a falta de experiência com o FreeRTOS;
 - entre outros.



Trabalhos Futuros



- Realizar as atividades faltantes durante as férias para não interferir no cronograma;
 - Definição das interfaces do barramento ISA;
 - Teste em protoboard com todos os componentes;
 - Realização do Esquemático completo do sistema;
 - Realização do Fluxograma da camada de Serviço do Sistema;
- Alguns pontos , como *shielding* metálico e códigos corretores, não sejam implementados devido o tempo escasso.



Referências



ADDAIM, Adnane ; KHERRAS , Abdelhaq ; ZANTOU, El Bachir. **Design of Low-cost Telecommunications CubeSat-class Spacecraft**. Centre For Space Research And Studies, EMI, Marocos: [s.n.], 2010. 6 p. Disponível em: <goo.gl/ciGc2d>. Acesso em: 05 abr. 2018.

BARNHART, David J. **Very Small Satellite Design for Space Sensor Networks**. United Kingdom: Faculty Of Engineering And Physical Sciences - Faculty Of Engineering And Physical Sciences, 2008. 233 p. Disponível em: <<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a486188.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2018.

CUBESAT PROGRAM. **CubeSat Design Specification Rev. 13**. California: California Polytechnic, 2014. 42 p. Disponível em: <https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2018.

EBRARY. **Typical Software Architecture**. 2018. Disponível em: <<https://ebrary.net/22045/computer-science/typical-software-architecture>>. Acesso em: 06 jun. 2018.

INVENSENSE. **MPU-9250 Product Specification Revision 1.1**. 2018. Disponível em: <<https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

LIN, Yuhui. **Formal Analysis of FreeRTOS**. 2010. 177 p. Tese (Mestrado em Engenharia de Software)- University of York, Departamento de Ciência da Computação, Estados Unidos, 2010. Disponível em: <goo.gl/R397j8>. Acesso em: 18 jun. 2018.

MABROUK, Elizabeth . **What are SmallSats and CubeSats?**. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/content/what-are-smallsats-and-cubesats>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

PC/104 Embedded Consortium (a). **PC/104 Embedded Consortium**. 2.6. ed. [S.l.:s.n.], 2008. 25 p. Disponível em: <https://pc104.org/wp-content/uploads/2015/02/PC104_Spec_v2_6.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2018.

TEXAS INSTRUMENTS. (d) **CURRENT SHUNT MONITORS -16-V to 80-V COMMON MODE RANGE**. 2018. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina193a-ep.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2018

WEKERLE, Timo ; FILHO, José Bezerra Pessoa . **Status and Trends of Smallsats and Their Launch Vehicles — An Up-to-date Review**. São Paulo: Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial - Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Divisão de Engenharia Aeronáutica e Mecânica, 2017. 18 p. v. 3. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/jatm/v9n3/2175-9146-jatm-09-03-0269.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2018.



Muito
Obrigado!

