



Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia Eletrônica

## **Desenvolvimento de protótipo funcional de hardware e firmware para monitoramento de instalações CC de sistemas fotovoltaicos**

Autor: Matheus Gois Vieira

Orientador: Dr. Alex Reis

Brasília, DF

2022





Matheus Gois Vieira

**Desenvolvimento de protótipo funcional de hardware e  
firmware para monitoramento de instalações CC de  
sistemas fotovoltaicos**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Eletrônica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Eletrônica).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Dr. Alex Reis

Brasília, DF

2022

---

Matheus Gois Vieira

Desenvolvimento de protótipo funcional de hardware e firmware para monitoramento de instalações CC de sistemas fotovoltaicos/ Matheus Gois Vieira. – Brasília, DF, 2022-

95 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Alex Reis

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2022.

1. Palavra-chave01. 2. Palavra-chave02. I. Dr. Alex Reis. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Desenvolvimento de protótipo funcional de hardware e firmware para monitoramento de instalações CC de sistemas fotovoltaicos

CDU 02:141:005.6

---

Matheus Gois Vieira

## **Desenvolvimento de protótipo funcional de hardware e firmware para monitoramento de instalações CC de sistemas fotovoltaicos**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Eletrônica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Eletrônica).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 05 de Maio de 2022:

---

**Dr. Alex Reis**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Loana Nunes Velasco**  
Convidado 1

---

**Prof. Dr. Renato Coral Sampaio**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2022



# Resumo

A procura por fontes de energia alternativa cresce em todo o mundo e essa busca acontece devido a necessidade de reduzir a dependência por combustíveis fósseis. Considerando o cenário atual em que o Brasil sofre com escassez hídrica e consequentemente, com a escassez de energia elétrica, outras fontes de energia alternativa vem ganhando força no mercado. O setor fotovoltaico brasileiro, a alguns anos já foi de difícil acesso à população, porém nos últimos anos, destaca-se o forte crescimento deste setor, e principalmente com integrações com dispositivos conectados a rede. Com evolução deste seguimento, surge a necessidade de se desenvolver sistemas que beneficiam a operação, manutenção e monitoramento, de forma a garantir que os equipamentos ou sistemas operam sob as condições ideais e com baixo risco a saúde e meio ambiente. O mercado requer inovação, visto que o mundo está cada vez mais conectado a rede, diversos equipamentos em vários setores de aplicação se tornam inteligentes (conectados a rede), com o propósito de diminuir custo de operação e pessoal e aumentam a eficácia e produtividade. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema embarcado inteligente, para monitoramento e controle de caixa de junção, que possui a responsabilidade de acomodar todas as conexões dos circuitos de corrente contínua vindos do módulo fotovoltaico, se aproveitando do cenário promissor do setor.

**Palavras-chaves:** Monitoring, photovoltaic sector, embedded and intelligent system.



# Abstract

The demand for alternative energy sources grows worldwide, this search happens due to the need to reduce dependence on fossil fuels, considering the current scenario in which Brazil suffers from water shortages and consequently, with the shortage of electricity, other alternative energy sources have been gaining strength in the market. The Brazilian photovoltaic sector, a few years ago was already of difficult access to the population, however, in the last years, the strong growth of this sector stands out, and mainly with integrations with devices connected to the network. With the evolution of this segment, the need arises to develop systems that benefit the operation, maintenance and monitoring, in order to ensure that the equipment or systems operate under the ideal conditions and with low risk to health and the environment. The market requires innovation, since the world is increasingly connected to the network, various equipment in various application sectors are becoming intelligent (connected to the network), in order to reduce operating and personnel costs and increase efficiency and productivity. Thus, the objective of this work is the development of an intelligent embedded system, for monitoring and control of the junction box, which has the responsibility of accommodating all the connections of the direct current circuits coming from the photovoltaic module, taking advantage of the promising scenario of the sector.

**Key-words:** Energy saving, embedded system, low consumption techniques.



# Listas de ilustrações

Figura 1 – Índices de evolução e distribuição da fonte solar fotovoltaica, retirado de (ABSOLAR, 2021) . . . . .	21
Figura 2 – Configuração básica de um sistema fotovoltaico . . . . .	25
Figura 3 – Efeito fotovoltaico, retirado de (ALVARENGA; FERREIRA; FORTES, 2014) . . . . .	26
Figura 4 – Estrutura de um módulo fotovoltaico, retirado de (SOLAR, 2021) . . . . .	27
Figura 5 – Influência da radicação solar na operação do módulo fotovoltaico, modificado de (ALVARENGA; FERREIRA; FORTES, 2014) . . . . .	28
Figura 6 – Curva características $I \times V$ (corrente - tensão) dos módulos solares, retirado de (ALVARENGA; FERREIRA; FORTES, 2014) . . . . .	29
Figura 7 – Curva características $P \times V$ (potência - tensão) dos módulos solares, retirado de (ALVARENGA; FERREIRA; FORTES, 2014) . . . . .	29
Figura 8 – Influência da temperatura na operação do módulo fotovoltaico, retirado de (ALVARENGA; FERREIRA; FORTES, 2014) . . . . .	29
Figura 9 – Diagrama elétrico geral de uma string box, retirado de (FRONTIN; CARNEIRO, 2017) . . . . .	30
Figura 10 – Diagrama de elementos de uma string box, retirado de (FRONTIN; CARNEIRO, 2017) . . . . .	30
Figura 11 – Caixa de junção real, modelo Clamper Solar SB 4E/2S, retirado de (CLAMPER, 2021) . . . . .	31
Figura 12 – Caixa de junção rela, montada manualmente, retirado de (BRASIL, 2021) . . . . .	31
Figura 13 – Posicionamento de inversor solar em um sistema fotovoltaico conectado à rede, retirado de (ENERGIA, 2018) . . . . .	31
Figura 14 – Sinais originais e reconstruídos para diferentes taxas de amostragens, retirado de (NAWAB; OPPENHEIM; WILLSKY, 2010) . . . . .	32
Figura 15 – Fluxo geral para aquisição e processamento de dados em sistemas microcontrolados (BARRETO, 2011) . . . . .	33
Figura 16 – Topologia de circuito equivalente do AmpOp (SEDRA et al., 2004) . .	34
Figura 17 – Circuito regulador de tensão . . . . .	37
Figura 18 – Esquema do circuito montado para caracterização do circuito de condicionamento de tensão. . . . .	37
Figura 19 – Arquitetura do sistema em camadas . . . . .	41
Figura 20 – Diagrama de componentes de hardware . . . . .	42
Figura 21 – Diagrama de componentes para comunicação MQTT. . . . .	43
Figura 22 – Diagrama de blocos do fluxo de firmware do módulo WiFi . . . . .	44

Figura 23 – Diagrama de blocos do fluxo de firmware . . . . .	45
Figura 24 – Representação do sensor de tensão LV 20-P, retirado de (LEM, 2014) .	46
Figura 25 – Diagrama elétrico do transdutor de corrente LA 55-p, retirado de (55-P, )	47
Figura 26 – Topologia do filtro de 2 <sup>a</sup> ordem utilizado para remoção de componentes de alta frequência. . . . .	48
Figura 27 – Esquemático do circuito proposto para condicionamento e aquisição da tensão. . . . .	51
Figura 28 – Esquemático do circuito proposto para condicionamento e aquisição da corrente. . . . .	52
Figura 29 – Esquemático do circuito proposto para monitoramento da vida útil do DPS. . . . .	52
Figura 30 – Esquemático do circuito proposto para controle dos dispositivo relé 1, voltado para o seccionamento do circuito. . . . .	53
Figura 31 – Esquemático do circuito proposto para controle dos dispositivo relé 2, voltado para o seccionamento do circuito. . . . .	53
Figura 32 – Esquemático do <i>pinout</i> do microcontrolador STM32G473 . . . . .	54
Figura 33 – Esquemático do circuito proposto para periféricos de comunicação da unidade central de processamento. . . . .	54
Figura 34 – Esquemático do circuito proposto para o módulo de comunicação <i>Wireless</i>	55
Figura 35 – Esquemático do circuito proposto para alimentação do sistema. . . . .	55
Figura 36 – Funcionalidades gerais do sistema e meios de interação. . . . .	56
Figura 37 – Fluxograma do módulo de gerenciador de eventos para interrupção externa, modificado de (LEONARDO, 2021). . . . .	56
Figura 38 – Fluxograma do módulo de gerenciador de eventos para dados de amostragem, modificado de (LEONARDO, 2021). . . . .	57
Figura 39 – Fluxograma de execução do firmware do módulo de coleta de dados, modificado de (LEONARDO, 2021) . . . . .	60
Figura 40 – Tela de configuração dos GPIOs na plataforma Cube IDE. . . . .	60
Figura 41 – Fluxograma do processo de conversão do módulo ADC via interrupções. Note que a linha em vermelho indica o fluxo de atividades realizadas pelo módulo ADC, ou seja, sem demandar recursos do processador, modificado de (LEONARDO, 2021). . . . .	63
Figura 42 – Fluxograma de agregação em multi-camadas, após separação das amostras de corrente e tensão, modificado de (LEONARDO, 2021). . . . .	65
Figura 43 – Fluxograma da rotina de cálculo da potência e energia produzidas. . . . .	65
Figura 44 – Fluxograma das rotinas executadas após interrupção externa dos pinos voltados para seccionamento manual e monitoramento de vida útil do DPS, modificado de (LEONARDO, 2021). . . . .	66

Figura 45 – Descritivo da variável utilizada para gerenciamento dos eventos, modificado de (LEONARDO, 2021). . . . .	67
Figura 46 – Fluxograma de execução do <i>firmware</i> do módulo de comunicação. . . . .	68
Figura 47 – Service web para configuração das credenciais de rede. . . . .	70
Figura 48 – Fluxo responsável por indicar o funcionamento do sistema. . . . .	72
Figura 49 – Fluxo responsável por coletar as informações enviadas durante a publicação do módulo de comunicação e expor utilizando nodes chamado gauge, grafics e text. . . . .	73
Figura 50 – Fluxo responsável por enviar para publicação, e consequência forçar o seccionamento dos relés do módulo de coleta de dados. . . . .	73
Figura 51 – Visualização em tempo real dos dados no Node-red. . . . .	74
Figura 52 – Foto da conexão entre os circuito de condicionamento de tensão e corrente e a fonte dos monitorados. . . . .	75
Figura 53 – Gráfico de dispersão dos resultados obtidos na caracterização do circuito de condicionamento de tensão. . . . .	76
Figura 54 – Gráfico de dispersão dos resultados obtidos na caracterização do circuito de condicionamento de corrente. . . . .	77
Figura 55 – Foto da conexão entre o módulo de coleta de dados e módulo de comunicação, além das conexão da tensão de entrada e alimentação. . . . .	77
Figura 56 – Foto da medição de tensão de entrada em 125,40V. . . . .	78
Figura 57 – Resultados de tensão, corrente, potência e energia do dashboard, com a tensão de entrada com 125,40V. . . . .	78
Figura 58 – Foto da medição de tensão de entrada em 150,30V. . . . .	78
Figura 59 – Resultados de tensão, corrente, potência e energia do dashboard, com a tensão de entrada com 150,30V. . . . .	78
Figura 60 – Diagrama Geral. . . . .	85
Figura 61 – Circuito condicionador de tensão e corrente . . . . .	86
Figura 62 – Esquemático do microcontrolador STM32G473RE. . . . .	87
Figura 63 – Esquemático dos periféricos do microcontrolador STM32G474RE. . . . .	88
Figura 64 – Esquemático da fonte de alimentação. . . . .	89
Figura 65 – Esquemático do seccionamento. . . . .	90
Figura 66 – Roteamento da placa de circuito impresso gerado em pdf automaticamente pelo software <i>Altium</i> . . . . .	91
Figura 67 – Tabela de componentes da placa de coleta de dados utilizados gerada automaticamente pelo software <i>Altium</i> . . . . .	92
Figura 68 – Esquemático do modulo de comunicação <i>Wireless</i> . . . . .	93
Figura 69 – Roteamento da placa de circuito impresso gerado em pdf automaticamente pelo software <i>Altium</i> . . . . .	94

Figura 70 – Tabela de componentes do módulo de comunicação utilizados gerada automaticamente pelo software *Altium* . . . . . 95

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Características gerais do transdutor de tensão LV 20-P, retirado de (LEM, 2014) . . . . .	46
Tabela 2 – Características gerais do corrente de tensão LA 55-P, retirado de (55-P,) . . . . .	47
Tabela 3 – Identificação dos eventos e suas respectivas ações de controle, ordenados por prioridade, modificado de (LEONARDO, 2021). . . . .	57
Tabela 4 – Identificação dos eventos e suas respectivas ações de controle, ordenados por prioridade, modificado de (LEONARDO, 2021). . . . .	61
Tabela 5 – Parâmetros de configuração dos módulos ADC1, ADC2 e ADC5, respectivamente, para amostragem simultânea de tensão, corrente e temperatura. . . . .	62
Tabela 6 – Parâmetros de configuração dos módulos TIM1 e TIM2, com frequências de 960Hz e 1Hz, respectivamente. . . . .	63
Tabela 7 – Configurações da UART, para o módulo de comunicação de dados. . . . .	68
Tabela 8 – Descrição dos GPIOs configurados. . . . .	69
Tabela 9 – Resultado do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento para medição de tensão e corrente. . . . .	76
Tabela 10 – Dados obtidos no Dashboard, a partir da tensão de entrada $V_{out}$ e a corrente $V_L$ gerada. . . . .	79



# Listas de abreviaturas e siglas

MCU	Microcontrolador (Microcontroller Unit)
WDT	Cronômetro de vigilância (Watchdog Timers)
RTC	Relógio de tempo real (Real-Time Clock)
RAM	Memória de acesso aleatório (Random-access memory) Swithchover
FRC	Oscilador RC rápido interno (Internal Fast RC Oscillator)
ACLK	Relógio Auxiliar (Auxiliary Clock)
DCO	Oscilador controlado digitalmente (Digitally Controlled Oscillator)
I/O	Entrada/Saída (Input/Output)
MCLK	Relógio mestre (Master Clock)
SMCLK	Relógio Mestre do Sub-sistema (Sub-System Master Clock)
SCG	Gerador de relógio do sistema (System Clock Generator)
SR	Registrador de status (Status Register)
CPU	Unidade Central de Processamento (Central Process Unit)
RTCC	Relógio em tempo real e calendário atual (Real-Time Clock and Calendar Current)
DSRTC	Sono profundo relógio em tempo real e bit de alarme de calendário (Deep Sleep Real-Time Clock and Calendar Alarm bit)
SFR	Registrador de função especial (Special Function Register)
DMA	Acesso direto à memória (Direct memory access)
EEPROM	Memória somente leitura programável apagável eletricamente (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)
UART	Receptor / transmissor assíncrono universal (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)
I2C	Circuito Inter-integrado (Inter-Integrated Circuit)
SPI	Interface Periférica Serial (Serial Peripheral Interface)

SSP	Porta Serial Síncrona (Synchronous Serial Port)
A/D	Analógico/Digital (Analog/Digital)
CC	Corrente contínua
AC	Corrente alternada

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>22</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>22</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do trabalho</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>Sistemas fotovoltaicos</b>	<b>25</b>
2.1.1	Módulo Fotovoltaicos	26
2.1.1.1	Características elétricas dos módulos	27
2.1.2	Caixa de junção ou String box	29
2.1.3	Inversor Solar	30
<b>2.2</b>	<b>Aquisição e condicionamento de sinais</b>	<b>31</b>
2.2.1	Efeito <i>aliasing</i>	32
2.2.2	Condicionamento de Sinais	33
2.2.3	Amplificador Operacional	34
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>Metodologia de desenvolvimento</b>	<b>35</b>
<b>3.2</b>	<b>Procedimentos para Levantamento de Requisitos</b>	<b>35</b>
3.2.1	Convenções, Termos e Abreviações	36
3.2.1.1	Identificação dos Requisitos	36
3.2.1.2	Propriedades dos Requisitos	36
<b>3.3</b>	<b>Protocolo de testes experimentais</b>	<b>36</b>
3.3.1	Circuito de alimentação	36
3.3.2	Circuito condicionador do sinal de tensão	37
3.3.3	Circuito condicionador do sinal de corrente	38
3.3.4	Circuito para monitoramento da vida útil do DPS	38
<b>4</b>	<b>RESULTADOS PARCIAIS</b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Requisitos Funcionais</b>	<b>39</b>
<b>4.2</b>	<b>Arquitetura do Sistema</b>	<b>40</b>
4.2.1	Arquitetura Geral	41
4.2.2	Diagrama de componentes de hardware	42
4.2.3	Módulo de comunicação <i>wireless</i>	43
4.2.4	Fluxo do software embarcado	44
<b>4.3</b>	<b>Projeto de Hardware do Protótipo</b>	<b>45</b>

4.3.1	Transdutor de Tensão LV 20-P . . . . .	45
4.3.2	Transdutor de corrente LA 55-P . . . . .	47
4.3.2.1	Filtro Anti-Aliasing . . . . .	48
4.3.3	Condicionamento de Tensão . . . . .	51
4.3.4	Condicionamento de Corrente . . . . .	51
4.3.5	Monitoramento de Fim de Vida do DPS CC . . . . .	52
4.3.6	Seccionamento do Circuito CC . . . . .	53
4.3.7	Microcontroladores . . . . .	53
4.3.7.1	Unidade de central de processamento . . . . .	53
4.3.7.2	Módulo de comunicação . . . . .	55
4.3.8	Fonte de alimentação . . . . .	55
<b>4.4</b>	<b>Projeto de Firmware do Protótipo . . . . .</b>	<b>56</b>
4.4.1	Gerenciamento de Eventos . . . . .	56
4.4.1.1	Aquisição e Processamento . . . . .	57
4.4.2	Cálculo da Potência e Energia Produzida . . . . .	58
4.4.3	Desenvolvimento de firmware do módulo de coleta de dados . . . . .	59
4.4.3.1	Configurações Gerais do Firmware . . . . .	60
4.4.3.2	Configuração dos GPIOs . . . . .	60
4.4.3.3	Configuração dos Módulos ADC . . . . .	61
4.4.3.4	Configuração dos timers . . . . .	61
4.4.3.5	Amostragem e Processamento de corrente e tensão . . . . .	63
4.4.3.6	Cálculo de Potência e Energia . . . . .	65
4.4.3.7	Aquisição e Processamento da Temperatura Interna do Processador . . . . .	65
4.4.3.8	Interrupções Externas . . . . .	66
4.4.3.9	Controle de Eventos . . . . .	67
4.4.3.10	Módulo de comunicação UART . . . . .	67
4.4.4	Desenvolvimento de firmware do módulo comunicação <i>wireless</i> . . . . .	68
4.4.4.1	Configurações Gerais do Firmware . . . . .	68
4.4.4.1.1	Configuração dos GPIOs . . . . .	68
4.4.4.1.2	Configuração do Módulo UART . . . . .	69
4.4.4.1.3	Configuração do Wifi . . . . .	69
4.4.4.1.4	Configuração da Publicação e Subscrição no Broker MQTT . . . . .	71
4.4.5	Broker e Dashboard . . . . .	72
<b>4.5</b>	<b>Análise de Desempenho do Sistema . . . . .</b>	<b>75</b>
4.5.1	Caracterização da Corrente e Tensão . . . . .	75
4.5.2	Integração dos módulos . . . . .	77
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>81</b>





# 1 Introdução

Nos últimos anos, uma grande evolução dos sistemas de energia elétrica é perceptível, visto que, há mudanças de projeto, operação e manutenção de instalações, assim como, a modernização de processos, as quais estão ligadas aos diversos avanços tecnológicos e preocupações com as mudanças climáticas, eficiência energética e sustentabilidade, dentre outros aspectos.

Neste contexto, a demanda por elétrica está crescendo em todo o mundo, devido a construção contínua de novos recursos que consomem fonte de energia elétrica, há a necessidade de reduzir a dependência por combustíveis fósseis, como o gás natural, por exemplo, no qual pode ser considerado uma fonte de energia limpa, pois é mais leve que o ar e dissipa-se rapidamente, sendo menos poluidor que o petróleo e o carvão. Entretanto, na sua produção podem ocorrer vazamentos que liberam gás metano para a atmosfera.

Há diversas fontes de energia renováveis, dentre elas, destaca-se a de origem solar fotovoltaica, qual tem se apresentado como uma excelente estratégia para geração de energia elétrica no Brasil.

No Brasil, conforme apresentado nas Figuras 1a e 1b, o número de sistemas fotovoltaicos conectados a rede tem aumentado consideravelmente ao longo do últimos anos. Estima-se que, até o primeiro trimestre de 2021, este setor possua uma potência total instalada de 8,8GW, que representa 1,8% da matriz elétrica do país (ENERGÉTICA, 2020).

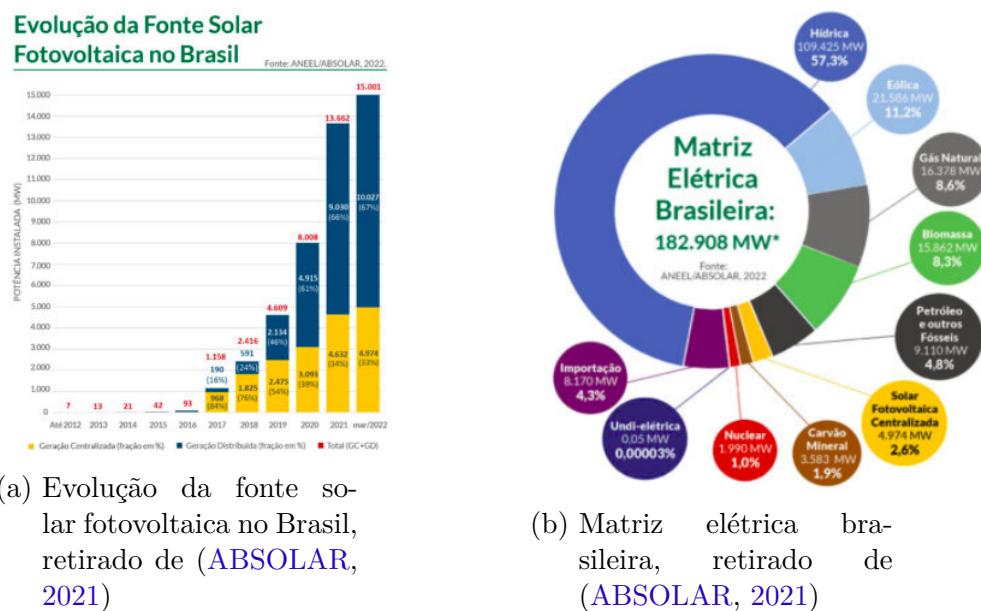


Figura 1 – Índices de evolução e distribuição da fonte solar fotovoltaica, retirado de (ABSOLAR, 2021)

Este crescimento do setor fotovoltaico gera diversos impactos e em diferentes etapas do processo de distribuição da energia, dentre eles, é necessário constante evolução de equipamentos que fazem parte deste processo, dentre eles, módulos fotovoltaicos, inversores, baterias, dentro outros. E todos equipamentos necessitam assegurar qualidade e segurança das instalações elétricas.

Com o avanço da geração solar fotovoltaica distribuída, é necessário o estabelecimento de procedimentos e/ou sistema que assegurem a qualidade e segurança das instalações elétricas. Deste modo, o desenvolvimento de equipamentos que permitam o acompanhamento da operação de sistemas fotovoltaicos, viabilizando o monitoramento da qualidade de energia produzida e a identificação de possíveis falhas se mostra bastante atrativo.

Levando em consideração como referência este cenário, este trabalho tem por finalidade o desenvolvimento de um protótipo, constituído por hardware e software, dedicado ao monitoramento das instalações em corrente contínua (CC) de uma instalação fotovoltaica.

## 1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um hardware e firmware para o monitoramento, em tempo real, de caixas de junção de sistemas fotovoltaicos, viabilizando o acompanhamento de variáveis elétricas e estado de operação dos equipamentos.

## 1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Compreender os equipamentos que compõem um sistema de geração fotovoltaico;
- Desenvolver diagramas esquemáticos e listas de materiais relacionados ao hardware;
- Integrar um módulo de comunicação *WiFi*, para envio dos dados coletados pelo sistema;
- Desenvolver layout de placa de circuito impresso, dividindo as conexões em camadas com intuito de diminuir suas dimensões;
- Desenvolver de firmware para processamento de dados medidos;
- Realizar testes em bancada da PCI, para garantir o correto funcionamento e posicionamento de seus componentes;

### 1.3 Estrutura do trabalho

O conteúdo deste trabalho foi organizado em 6 capítulos, referências bibliográficas, apêndice e anexos. A seguir é apresentado um breve resumo do que o leitor pode encontrar em cada um dos capítulos:

**Capítulo 1:** Neste capítulo contém a justificativa para construção deste trabalho e seus objetivos;

**Capítulo 2:** apresenta a fundamentação teórica do projeto, com destaque para os conceitos e componentes que integram os sistemas solares fotovoltaicos, bem como outros conceitos fundamentais para o bom entendimento do trabalho;

**Capítulo 3:** Descreve a metodologia adotada para cumprir com os objetivos do trabalho, detalhando a arquitetura do sistema proposto.

**Capítulo 4:** É apresentado um estudo de caso do sistema proposto, bem como, simulações e possíveis melhorias;

**Capítulo 5:** São apresentados os resultados e discussões pertinentes ao projeto de hardware do protótipo, desenvolvimento do firmware e análise de desempenho do sistema

**Capítulo 6:** são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho, bem como a proposta para trabalhos futuros.



## 2 Referencial Teórico

Este capítulo contém a base teórica e bibliográfica para o desenvolvimento e execução deste trabalho, bem como, exemplos e dados essenciais para a construção da metodologia e a obtenção dos resultados. Este referencial teórico baseia-se em sistemas fotovoltaicos, amostragem de sinais, protocolos de comunicação *wireless*, *internet of things*, e técnicas de desenvolvimento de placa de circuito impresso.

### 2.1 Sistemas fotovoltaicos

Uma das características mais notáveis de nossa sociedade é a crescente demanda por fornecimento de energia. A industrialização, a expansão dos veículos de transporte e até mesmo a agricultura e a vida urbana contribuíram para a crescente dependência mundial de fontes de energia não renováveis. Em geral, os sistemas fotovoltaicos são compostos por um módulo fotovoltaico, controlador de carga (equipamento responsável por preservar a vida útil das baterias estacionárias, protegendo-as dos efeitos da sobrecarga ou descarga abrupta), baterias, inversor de frequência (dispositivo que transforma corrente elétrica alternada fixa em corrente elétrica CA variável controlando a potência consumida pela carga através da variação da frequência entregue pela rede) e carga (resistência associada) (ZILLES et al., 2016).

Uma configuração básica de um sistema fotovoltaico está representado na Figura 2. Além dos componentes principais, é importante adicionar os circuitos de proteção CC e CA.

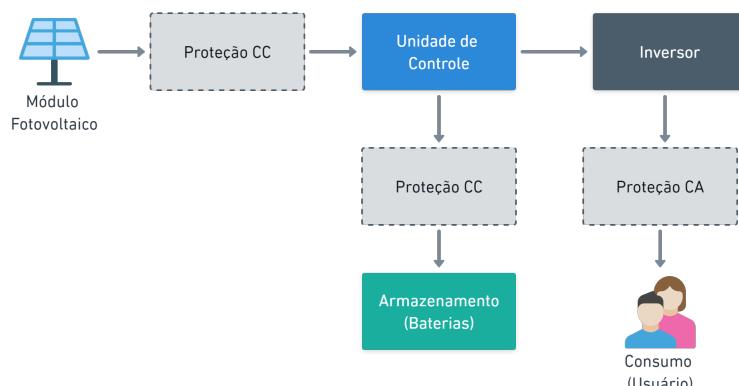


Figura 2 – Configuração básica de um sistema fotovoltaico

### 2.1.1 Módulo Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são os elementos que, quando conectados entre si, formam as matrizes fotovoltaicas. O módulo é a unidade básica do sistema, composto por células conectadas em matrizes que geram tensão e corrente suficientes para alimentar o sistema. Este tipo de transformação se chamada efeito fotovoltaico, fenômeno físico que permite a conversão da energia solar em eletricidade. Isso ocorre quando a radiação solar atinge uma célula composta por materiais semicondutores com propriedades específicas, resultando em uma diferença de potencial no material, conforme ilustrado na Figura 3 ([ALVARENGA; FERREIRA; FORTES, 2014](#)).

O efeito fotovoltaico, é a presença de uma diferença de potencial entre as extremidades de uma estrutura semicondutora causada pela absorção de luz. A célula fotovoltaica, responsável por converter a luz proveniente do sol, é a unidade fundamental do processo de conversão.

A tecnologia fotovoltaica faz uso de células semicondutoras, e essas células normalmente possuem alguns centímetros quadrados de área. A célula solar opera com base no princípio de que fótons incidentais, ao colidirem com determinados átomos materiais, causam um deslocamento negativo dos elétrons, resultando em uma corrente elétrica. Este processo de conversão não é afetado pelo calor; pelo contrário, a saída de uma célula solar diminui à medida que sua temperatura aumenta.

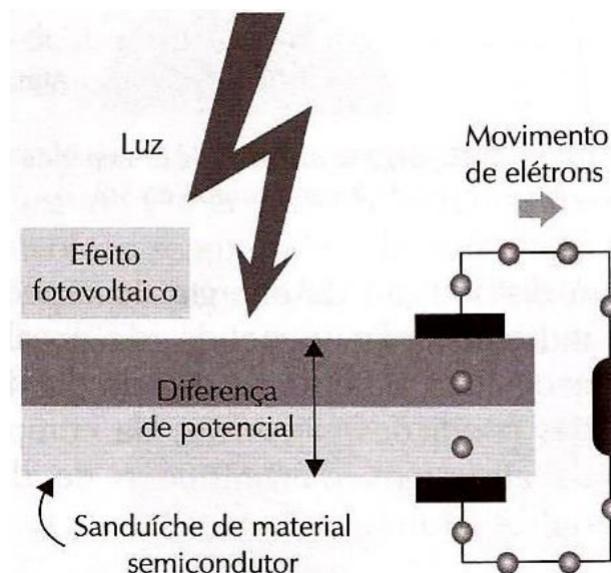


Figura 3 – Efeito fotovoltaico, retirado de ([ALVARENGA; FERREIRA; FORTES, 2014](#))

O módulo fotovoltaico, é composto por uma série de células fotovoltaicas montadas em uma estrutura rígida e conectadas eletricamente umas às outras, conforme ilustrado na Figura 4. Uma única célula fotovoltaica, como por exemplo da fabricante *Seeed Studio*,

fornecer um potencial elétrico de aproximadamente 0,6V. Para obter tensões mais altas, os projetistas conectam as células em série (ALVARENGA; FERREIRA; FORTES, 2014).

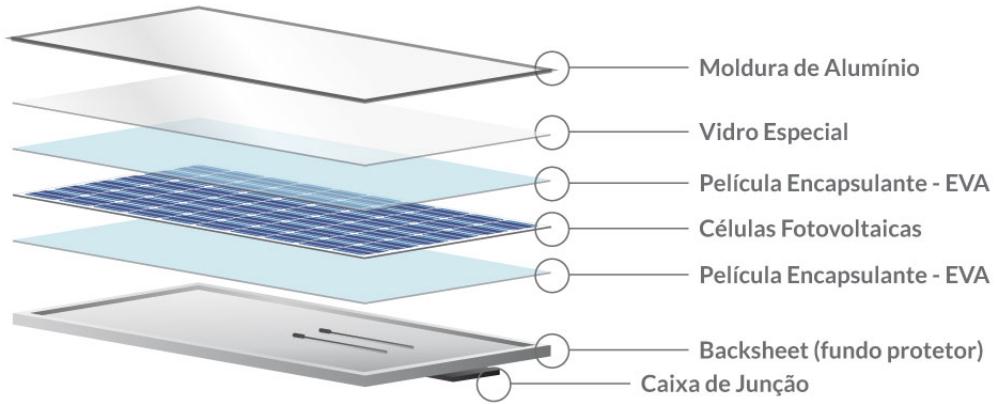


Figura 4 – Estrutura de um módulo fotovoltaico, retirado de (SOLAR, 2021)

As células e suas conexões elétricas são prensadas dentro de lâminas plásticas. O módulo é recoberto por uma lâmina de vidro e por último recebe uma moldura de alumínio. Na parte traseira o módulo recebe uma caixa de conexões elétricas, à qual são conectados os cabos elétricos que normalmente são fornecidos junto com o módulo. Os cabos possuem conectores padronizados, que permitem a rápida conexão de módulos em série (ALVARENGA; FERREIRA; FORTES, 2014).

#### 2.1.1.1 Características elétricas dos módulos

Os parâmetros elétricos que melhor caracterizam a funcionalidade dos módulos fotovoltaicos sob determinada radiação, temperatura de operação e massa de ar são os seguintes:

- Corrente de curto circuito: corrente elétrica que atravessa um condutor ou um dispositivo com resistência desprezível, causando um superaquecimento (NILSSON et al., 1995);
- Tensão de circuito aberto: é o valor de tensão máxima que o módulo solar pode entregar a uma carga sob determinadas condições de radiação e de temperatura, correspondentes a uma circulação de corrente com valor nulo e, consequentemente potência nula (NILSSON et al., 1995);
- Potência máxima: potência entregue por uma fonte a uma carga externa, quando a resistência externa é igual à resistência interna (ALEXANDER; SADIQU, 2013);

Normalmente, os módulos fotovoltaicos funcionam como fontes de corrente, ou seja, o painel gera uma corrente contínua em resposta à radiação solar incidente no painel, como ilustrado na Figura 5.

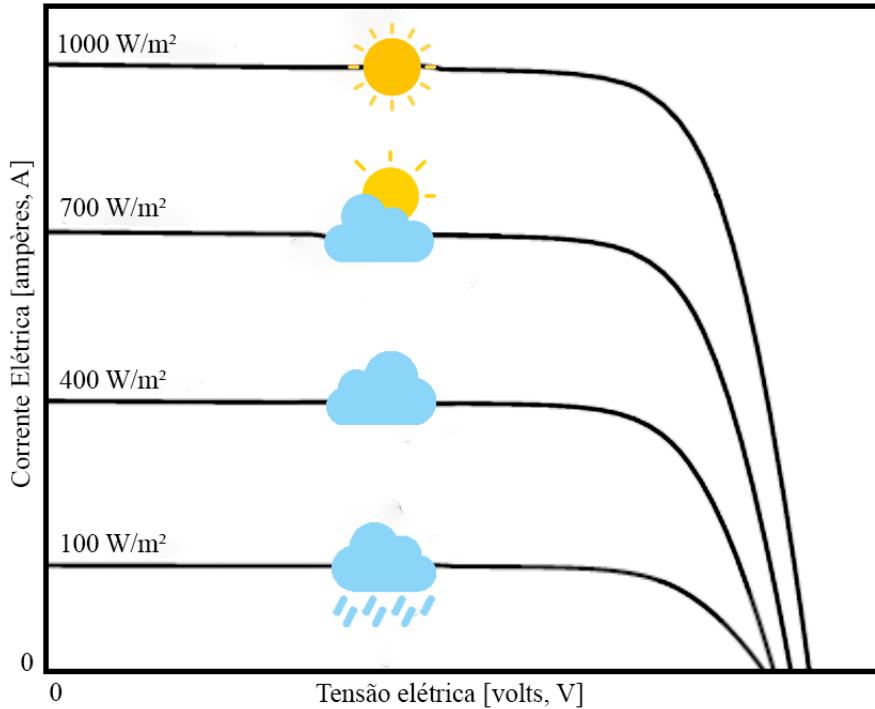


Figura 5 – Influência da radiação solar na operação do módulo fotovoltaico, modificado de ([ALVARENGA; FERREIRA; FORTES, 2014](#))

Um módulo fotovoltaico não se comporta como uma fonte convencional, o mesmo não apresenta uma tensão de saída constante nos seus terminais. A tensão elétrica depende da sua corrente e vice-versa.

O ponto de operação do módulo fotovoltaico, ou seja, o valor da tensão e da corrente nos seus terminais, depende do que está conectado aos seus terminais. Se conectarmos um aparelho que demanda muita corrente, a tensão de saída do módulo tenderá a cair. Por outro lado, se conectarmos uma carga que demanda pouca corrente, a tensão do módulo será mais elevada, tendendo à tensão de circuito aberto ([ALVARENGA; FERREIRA; FORTES, 2014](#)).

As Figuras 6 e 7 mostram as curvas características de Corrente-Tensão e Potência-Tensão de módulos fotovoltaicos ou painéis solares. Em ambos os casos, a corrente de curto-circuito é atingida quando os terminais do módulo são curto-circuitados em conjunto, fazendo com que a tensão de saída se aproxime de zero. A tensão de circuito aberto é a máxima tensão de saída do módulo, idealmente, quando não haja fluxo de corrente. Há ainda um terceiro ponto na qual o módulo opera em sua máxima potência, ou seja, em que se fornece a maior quantidade de energia para a carga alimentada.

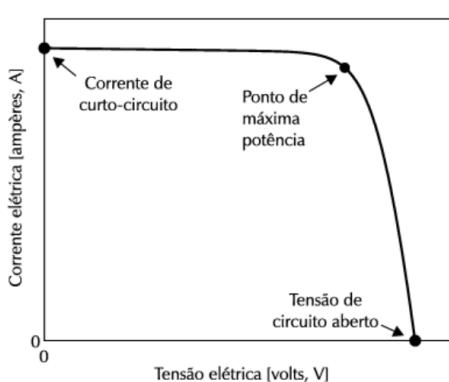


Figura 6 – Curva características  $I \times V$  (corrente - tensão) dos módulos solares, retirado de (ALVARENGA; FERREIRA; FORTES, 2014)



Figura 7 – Curva características  $P \times V$  (potência - tensão) dos módulos solares, retirado de (ALVARENGA; FERREIRA; FORTES, 2014)

A temperatura tem influência na tensão que o módulo fornece em seus terminais e consequentemente na potência fornecida. Em temperaturas mais baixas as tensões são maiores e temperaturas mais altas as tensões são menores, conforme mostra a Figura 8.

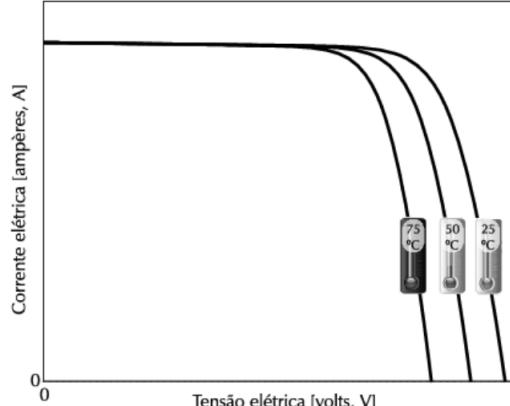


Figura 8 – Influência da temperatura na operação do módulo fotovoltaico, retirado de (ALVARENGA; FERREIRA; FORTES, 2014)

### 2.1.2 Caixa de junção ou String box

As caixas de junção, também conhecidas como String Boxes, são quadros de corrente contínua projetados para interconexão de módulos, séries ou submatrizes de energia fotovoltaica com proteção mínima IP54 (ALVARENGA; FERREIRA; FORTES, 2014). É neste equipamento, que se instalam os dispositivos seccionadores como disjuntores, fusíveis e também os dispositivos de proteção contra surto (DPS) que protegem os sistemas de descargas atmosféricas.

A string box deve ser alocada nas proximidades do inversor, no entanto, caso a

distância entre o inversor e os módulos geradores seja superior a 10 metros, é necessário acrescentar mais uma string box nas proximidades das placas, para garantir a sua proteção. A Figura 9 apresenta um diagrama elétrico geral de uma string box, em que se constata os seguintes elementos:

- Entradas em CC advindas das *strings*;
- Dispositivo de proteção contra sobrecorrentes, os quais, via de regra, se constituem por fusíveis;
- Dispositivo de proteção contra surtos (DPS), compatíveis com os níveis de tensão existente nas instalações CC;
- Dispositivo de seccionamento CC proteção, o qual deve possuir capacidade de interrupção de corrente compatível com o sistema;
- Barramento vinculado ao condutor de proteção da instalação;

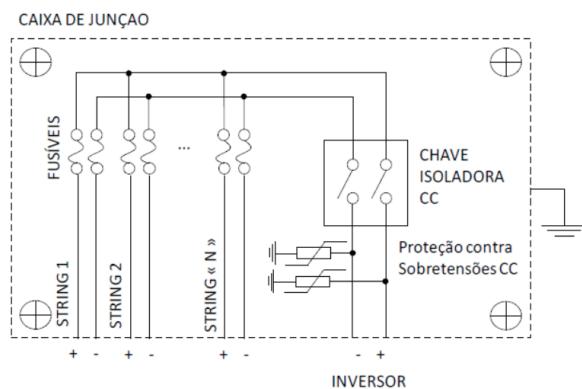


Figura 9 – Diagrama elétrico geral de uma string box, retirado de (FRONTIN; CARNEIRO, 2017)

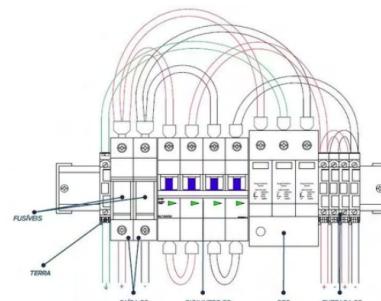


Figura 10 – Diagrama de elementos de uma string box, retirado de (FRONTIN; CARNEIRO, 2017)

### 2.1.3 Inversor Solar

Os inversores solares desempenham um papel crítico em sistemas fotovoltaicos que estão ligados à rede. Ele é o dispositivo eletrônico responsável pela geração contínua de corrente nos módulos fotovoltaicos em corrente alternada, permitindo interligação com a rede elétrica, como ilustrado na Figura 13



Figura 11 – Caixa de junção real, modelo Clamper Solar SB 4E/2S, retirado de ([CLAMPER, 2021](#))



Figura 12 – Caixa de junção rela, montada manualmente, retirado de ([BRASIL, 2021](#))



Figura 13 – Posicionamento de inversor solar em um sistema fotovoltaico conectado à rede, retirado de ([ENERGIA, 2018](#))

No caso de sistemas fotovoltaicos conectados a rede elétrica, os inversores são conhecidos como *grid-tie*, cujo diferencial é o maior controle sobre a tensão, fase e frequência. De acordo com o modo de operação, os inversores *grid-tie* podem ser classificados em dois tipos: controlados/chaveados pela rede e auto controlados.

## 2.2 Aquisição e condicionamento de sinais

As grandezas da natureza como velocidade, temperatura, tensão e corrente elétrica são representadas por funções contínuas no tempo, o que significa que existe um valor para tal grandeza para qualquer infinito de tempo. No entanto, em sistemas de medição digital, essas grandezas são discretizadas (diminuídas no tempo), representadas tomando um número específico de amostras, para que esse sinal ainda possa ser representado. Para garantir que a discretização ocorra de maneira eficiente, ela deve ocorrer de acordo com a teoria padrão, que estabelece que um número de amostras do sinal contínuo deve

estar presente para que ele seja representado discretamente de maneira fiel (NAWAB; OPPENHEIM; WILLSKY, 2010).

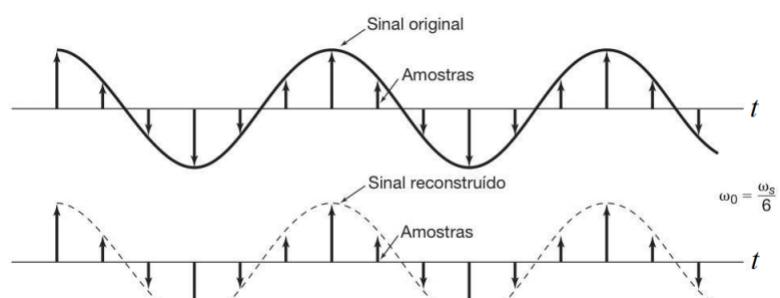
De acordo com a teoria apresentada, tomando-se uma sequência de amostras idênticas no espaço por unidade de tempo, o sinal só pode ser perfeitamente reconstruído se as amostras forem tomadas em uma frequência maior do que as já registradas no sinal. Nesse contexto, a frequência com que as amostras são obtidas é referida como a frequência do número ( $\omega_s$ ), e deve ser maior que duas vezes a frequência do sinal () que deve ser amostrado (NAWAB; OPPENHEIM; WILLSKY, 2010).

$$\omega_s > 2\omega_m \quad (2.1)$$

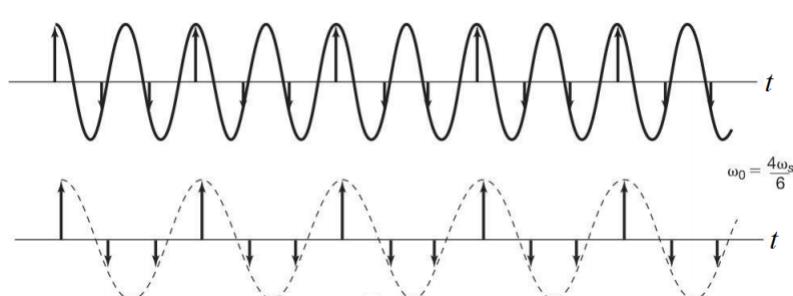
Segundo Oppenheim, Willsky e Nawab (NAWAB; OPPENHEIM; WILLSKY, 2010), “A frequência, que, conforme o teorema da amostragem, deve ser menor que a frequência de amostragem, comumente é conhecida como taxa de Nyquist.”

### 2.2.1 Efeito *aliasing*

Quando a frequência de amostragem não é suficientemente alta, ou seja, de acordo com o teorema da amostragem, a condição  $\omega_s > 2\omega_m$  não é atendida, esse sinal não pode ser reconstruído de forma fiel. Tal diferença entre o sinal real e o reconstruído é conhecido como efeito *aliasing*.



(a) Sinal original e reconstruído com as amostras para  $\omega_0 = \frac{\omega_s}{6}$



(b) Sinal original e reconstruído com as amostras para  $\omega_0 = \frac{4}{6}\omega_s$

Figura 14 – Sinais originais e reconstruídos para diferentes taxas de amostragens, retirado de (NAWAB; OPPENHEIM; WILLSKY, 2010)

Na Figura 14a o sinal pode ser reconstruído de forma feita pois a frequência de amostragem ( $\omega_s$ ) é seis vezes maior que a frequência do sinal ( $\omega_m$ ) já para a Figura 7b o sinal reconstruído é diferente pois a frequência de amostragem é apenas três meios da frequência do sinal original, com isso temos o efeito *aliasing*.

### 2.2.2 Condicionamento de Sinais

O condicionamento de sinais é um processo muito utilizado quando se trata de processamento e aquisição de dados. O objetivo é adequar a grandeza física monitorada ao sistema de medição, de forma a garantir uma medição eficaz e confiável.

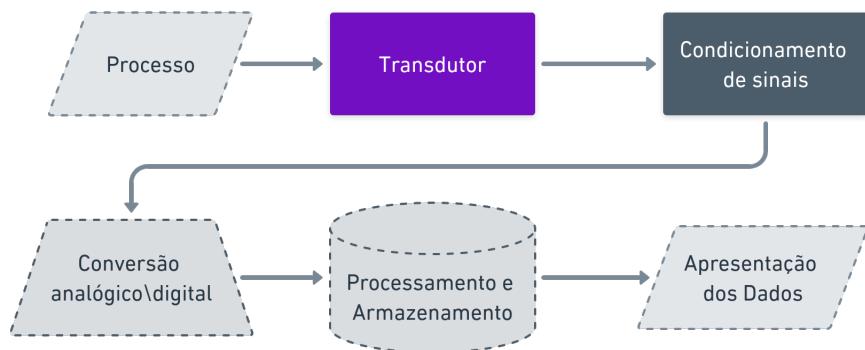


Figura 15 – Fluxo geral para aquisição e processamento de dados em sistemas microcontrolados (BARRETO, 2011)

Dentre as principais funções do condicionamento de sinais, vale ressaltar:

- Conversão: a conversão de sinais é amplamente utilizada quando se trata de sensoriamento de processos. Isso devido aos diferentes sensores empregados, que podem precisar ter sua natureza convertida em função do sistema de medição (LATHI, 2006).
- Amplificação: a amplificação entra como um trunfo na aplicação de um ganho no sinal de saída do sensor. Permitindo, assim, com que parâmetros como faixa útil, resolução e sensibilidade sejam personalizados (LATHI, 2006).
- Filtragem: os filtros são muito utilizados na remoção ou atenuação de ruídos dentro de uma determinada faixa de frequência, de forma a filtrar tudo além da informação desejada (LATHI, 2006).
- Isolamento: dispositivos com isolamento passam o sinal da fonte para o dispositivo de medição sem uma conexão física, utilizando, por exemplo, transformadores, acopladores capacitivos ou ópticos etc. Além de evitar *loops* de terra, de modo a proteger o dispositivos contra surtos de alta tensão (LATHI, 2006).

### 2.2.3 Amplificador Operacional

Os amplificadores operacionais são componentes capazes de realizar operações matemáticas (adição, subtração, multiplicação, divisão, integração e diferenciação), o que justifica seu nome. Suas principais características são impedância de entrada alta, impedância de saída baixa e ganho de tensão elevado.

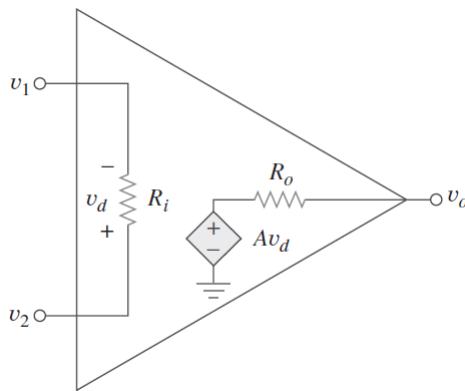


Figura 16 – Topologia de circuito equivalente do AmpOp ([SEDRA et al., 2004](#))

Para escolha do amplificador operacional, foram levados em consideração os critérios abordados no artigo *"Select the Right Operational Amplifier for your Filtering Circuits Design Note ADN003"*, publicado pela empresa Microchip ([BAKER, 2003](#)), são eles:

- Largura de banda (BW): definida em função da frequência de corte do filtro ( $f_c$ ), conforme Equação 2.2;

$$BW = 100 \times f_c \quad (2.2)$$

- Slew Rate(SR): definida em função da tensão de saída, pico a pico ( $V_{outpp}$ ), e da frequência de corte do filtro, conforme Equação 2.3;

$$SR \geq 2\pi \times V_{outpp} \times f_c \quad (2.3)$$

- *Input Common Mode Voltage Range (V<sub>CMR</sub>)*: define o limite da faixa do sinal de entrada;
- *Input Current Bias (I<sub>b</sub>)*: define a quantidade de corrente drenada nos pinos de entrada do amplificador operacional;
- *Common Mode Rejection Ratio(CMRR)*: razão de rejeição de modo comum superior a 60dB, quando em operação sob condições nominais;

# 3 Metodologia

Esta seção descreve a metodologia empregada para atingir os objetivos deste trabalho.

## 3.1 Metodologia de desenvolvimento

A metodologia para o desenvolvimento do sistema será tipo *Top-Down*. Nesse sentido, a partir de uma visão geral do sistema e de suas funcionalidades, realiza-se a decomposição das atividades em etapas, sendo que cada uma possui seu objetivo no desenvolvimento do sistema. Para cada etapa de trabalho, identifica-se as atividades e sub-sistemas, viabilizando o desenvolvimento incremental do produto e sua integração. Nesse contexto, o fluxo de trabalho adotado neste Trabalho de Conclusão de Curso abrange as etapas especificadas na sequência:

- Etapa 01 - Levantamento de requisitos para concepção do sistema;
- Etapa 02 - Definição de arquitetura de hardware e software embarcado e integração entre sistemas;
- Etapa 03 - Desenvolvimento de projeto de hardware, envolvendo a concepção de diagramas esquemáticos, listas de materiais e layout de placas de circuito impresso;
- Etapa 04 - Desenvolvimento de projeto de firmware para processamento de dados, envolvendo a definição de protocolos para processamento de sinais de tensão e corrente e transmissão de dados;
- Etapa 05 - Testes funcionais do sistema em ambiente laboratorial;
- Etapa 06 - Desenvolvimento de documentação técnica.

## 3.2 Procedimentos para Levantamento de Requisitos

Essa seção descreve como será realizado o levantamento de requisitos, bem como, identificação e propriedades do mesmo.

### 3.2.1 Convenções, Termos e Abreviações

#### 3.2.1.1 Identificação dos Requisitos

Por convenção, a referência a requisitos é feita através do nome da subseção na qual eles estão descritos, seguidos do identificador do requisito, de acordo com o modelo:

[nome da subseção/identificador do requisito]

Os requisitos serão identificados com um identificador único, com numeração iniciada em [RF001] para um requisito funcional ou [NF001] para um requisito não funcional.

#### 3.2.1.2 Propriedades dos Requisitos

Para estabelecer a prioridade dos requisitos, nas seções 4, 5 e 6, foram adotadas as denominações “essencial”, “importante” e “desejável”, tal que:

**Essencial** é o requisito sem o qual o sistema não entra em funcionamento. Requisitos essenciais são aqueles imprescindíveis, que devem ser implementados impreterivelmente.

**Importante** é o requisito sem o qual o sistema entra em funcionamento, mas de forma não satisfatória. Requisitos importantes devem ser implementados, mas, se não forem, o sistema poderá ser implementado e usado normalmente.

**Desejável** é o requisito que não compromete as funcionalidades básicas do sistema, isto é, o sistema pode funcionar de forma satisfatória sem ele. Requisitos desejáveis podem ser deixados para versões posteriores do sistema, caso não haja tempo hábil para implementação dos mesmos nesta etapa.

## 3.3 Protocolo de testes experimentais

Os procedimentos descritos nessa seção tem o objetivo de verificar a conformidade dos resultados entre o sistema construído e o que foi projetado. Assim garantindo que cada componente funcione conforme desejado e os requisitos sejam alcançados, consequente, o sistema eletrônico integrado.

### 3.3.1 Circuito de alimentação

Para validação do circuito de alimentação foi realizado um teste de circuito aberto e um teste com carga. Os seguintes passos foram executados para realização do teste de circuito aberto:

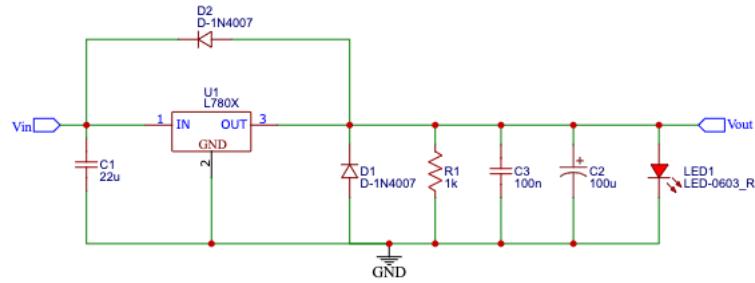


Figura 17 – Circuito regulador de tensão

1. Montar topologia de acordo com a Figura 17;
2. Estimular a entrada do circuito de alimentação com uma fonte AC de 220V/60Hz;
3. Verificar com um voltímetro as saídas de 3.3V, 5V e 12V e estão estáveis;
4. Anotar os valores de saída;

Para o teste de circuito com carga, deve-se seguir os seguintes passos:

1. Repetir os passos do teste de circuito aberto;
2. Adicionar um carga conhecida nos terminais de saída do circuito;
3. Posicione um amperímetro em série com a carga e o terminal de saída;
4. Varie o valor da carga;
5. Anote os valores de tensão e corrente;

### 3.3.2 Circuito condicionador do sinal de tensão

Para validação do circuito condicionador do sinal de tensão deve realizar um teste com carga.

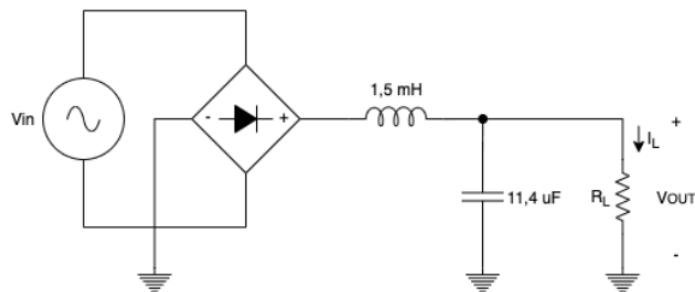


Figura 18 – Esquema do circuito montado para caracterização do circuito de condicionamento de tensão.

Os seguintes passos devem ser feitos para realização do teste:

1. Montar circuito apresentado na Figura 18;
2. Estimular a entrada do circuito com tensões características de um circuito fotovoltaico (100V - 400V), para isso utilize um Varivolt;
3. Verificar com um voltímetro a tensão de entrada entregue pelo Varivolt, a saída do barramento CC e a saída do circuito condicionador;
4. Anotar os valores de saída;
5. Trace um gráfico dos valores de tensões de entrada e saída;
6. Verifique a linearidade da saída do circuito condicionador;

### 3.3.3 Circuito condicionador do sinal de corrente

Para validação do circuito condicionador do sinal de corrente deve realizar um teste com carga, semelhante ao teste do circuito condicionador do sinal de tensão.

1. Repita os item 1, 2, 3 do teste do circuito condicionador do sinal de tensão;
2. Posicione um amperímetro em série com a carga;
3. Anote os valores de tensão e corrente nos visores dos multímetros;
4. Trace um gráfico do valor da tensão de entrada pela corrente da carga conectada no circuito condicionador;
5. Verifique a linearidade da saída do circuito condicionador;

### 3.3.4 Circuito para monitoramento da vida útil do DPS

Para validação do circuito para monitoramento da vida útil do DPS deve realizar um teste circuito aberto. Os seguintes passos devem ser feitos para realização do teste:

1. Montar circuito descrito no Item 29;
2. Estimule um tensão AC de 220V/60Hz na entrada do circuito.
3. Posicione um voltímetro da saída do circuito;
4. Com uma chave alterne o estado da tensão de entrada;
5. Anote os valores de tensão coletados;
6. Verifique a integridade do seccionamento do circuito;

# 4 Resultados

Este capítulo contém resultados alcançados ao longo do desenvolvimento deste trabalho, o projeto de hardware do protótipo, simulações em software e análise e discussão dos resultados para validação da construção física do protótipo funcional. Os esquemáticos descritos no seção 4.3, estão dispostos no Apêndice A com maior resolução.

## 4.1 Requisitos Funcionais

### [RF001] Medição de tensão CC

O sistema deve ser capaz de monitorar, tempo real, a tensão de entrada da *String box*.

Faixa de medição: 0 a 1200V.

Prioridade: Essencial.

### [RF002] Medição de corrente CC

O sistema deve ser capaz de monitorar, em tempo real, a corrente de entrada da *String box*.

Faixa de medição: 0 a 20A (C.C)

Prioridade: Essencial.

### [RF003] Identificação de eventos nos circuitos CC

O sistema deve ser capaz de identificar a ocorrência de eventos nos circuito C.C. das *strings* abrangendo as seguintes situações:

- Sobretensão e sobrecorrente: quando o sistema opera próximo ou acima dos limites estabelecidos (500V e 20A);
- Subtensão: quando o sistema opera próximo ou abaixo da tensão de alimentação (24V);

Prioridade: Importante.

### [RF004] Cálculo de potência instantânea

O sistema deve ser capaz de estimar a potência instantânea produzida em *kW*, a partir das medições de tensão e corrente.

Prioridade: Importante.

**[RF005]** Cálculo da produção acumulada de energia

O sistema deve ser capaz de estimar a energia produzida, em  $kWh$ , a partir das medições de tensão e corrente.

Prioridade: Importante.

**[RF006]** Seccionamento do Circuito

O sistema deve permitir que o usuário realize manobras no circuitos CC, para fins de manutenção ou outras ações.

Prioridade: Importante.

**[RF007]** Monitoramento de vida útil do DPS

O sistema deve capaz de monitorar o estado de funcionamento do DPS, por meio da leitura de sinalização disponibilizada pelo próprio componente.

Prioridade: Importante.

**[RF008]** Identificação de Superaquecimento do Sistema

O sistema deve capaz de identificar superaquecimento do processador ao atingir  $75^{\circ}C$ , bem como entrar em *low power mode*, visando garantir sua vida útil em instalações ao tempo.

Prioridade: Desejável.

**[RF009]** Sistema de alimentação

O sistema deve possuir uma fonte de alimentação, integrada ou não, para energização dos circuitos eletrônicos.

Prioridade: Essencial.

**[RF010]** Sistema de comunicação *Wireless*

O sistema deve possuir um módulo de comunicação Wireless para envio dos dados coletados.

Prioridade: Importante.

## 4.2 Arquitetura do Sistema

Este capítulo descreve a arquitetura do sistema proposto para atingir os objetivos deste trabalho. Contém a descrição geral do sistema, bem como, etapa de coleta de dados em hardware e fluxo do firmware do sistema.

### 4.2.1 Arquitetura Geral

A arquitetura do sistema é baseado em camadas como mostrado na Figura 19. A divisão em camadas tem como finalidade separar as responsabilidades de cada subsistema. Cada camada possui as seguintes responsabilidades:

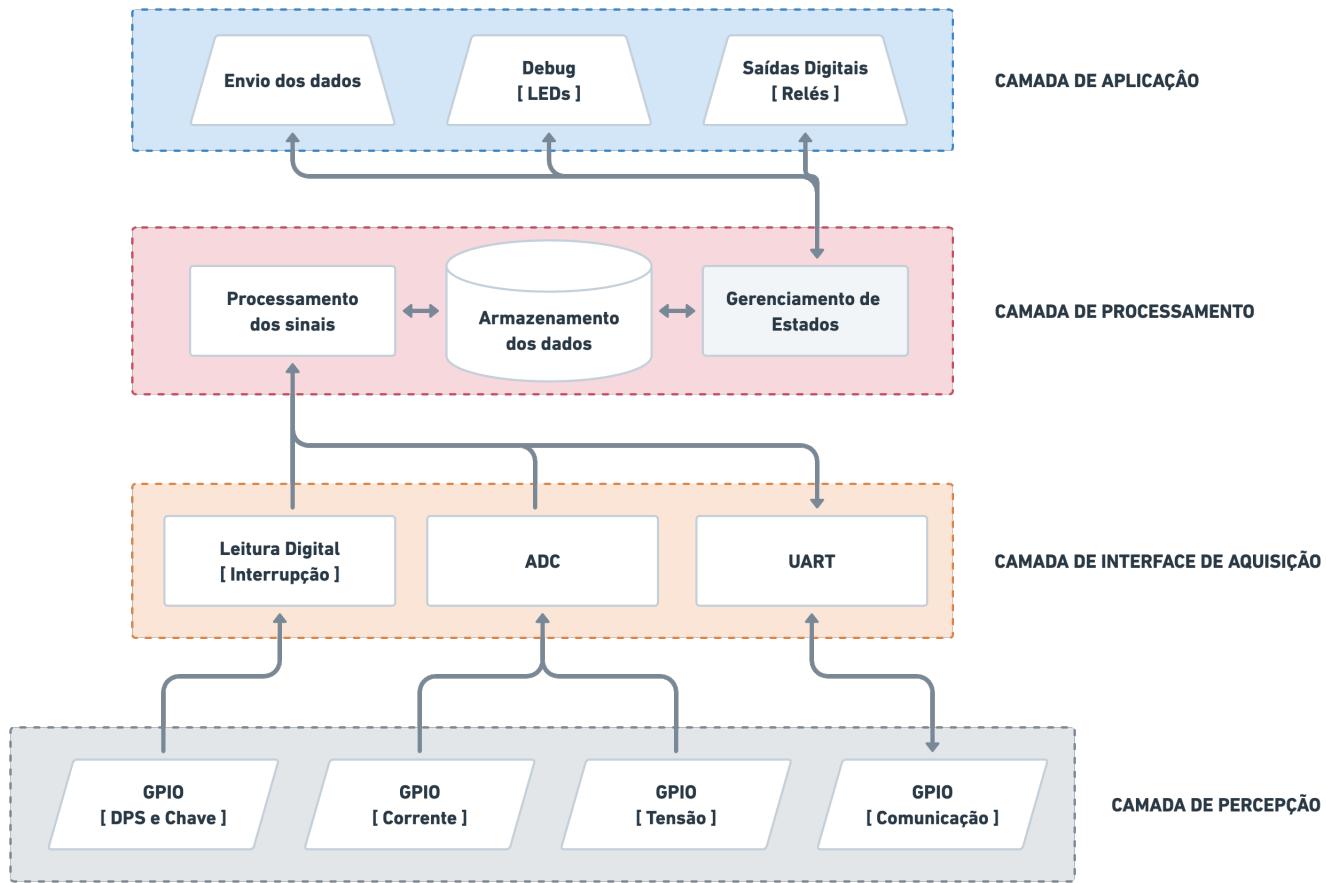


Figura 19 – Arquitetura do sistema em camadas

- Camada de percepção: Conectar e coletar as informações oriunda dos sensores e atuadores;
- Camada de interface de aquisição: Possui as interface de comunicação para cada tipo de entrada;
- Camada de processamento: Contém recursos avançados, como armazenamento e processamento dos dados, além disso, o gerenciamento dos estados de cada processo;
- Camada de aplicação: Responsável por envio dos dados coletados e tratados e estímulo dos atuadores;

#### 4.2.2 Diagrama de componentes de hardware

O diagrama de componentes de hardware do sistema mostrado na Figura 20, mostra os componentes e a conexão entre eles. O diagrama tem como objetivo mostrar a interação dos sensores com a central de controle e a interação do módulo de comunicação com a central de controle. Além disso, são apresentados os barramentos de entradas dos sinais analógicos, circuito de condicionamento e barramento de geração e distribuição de alimentação.

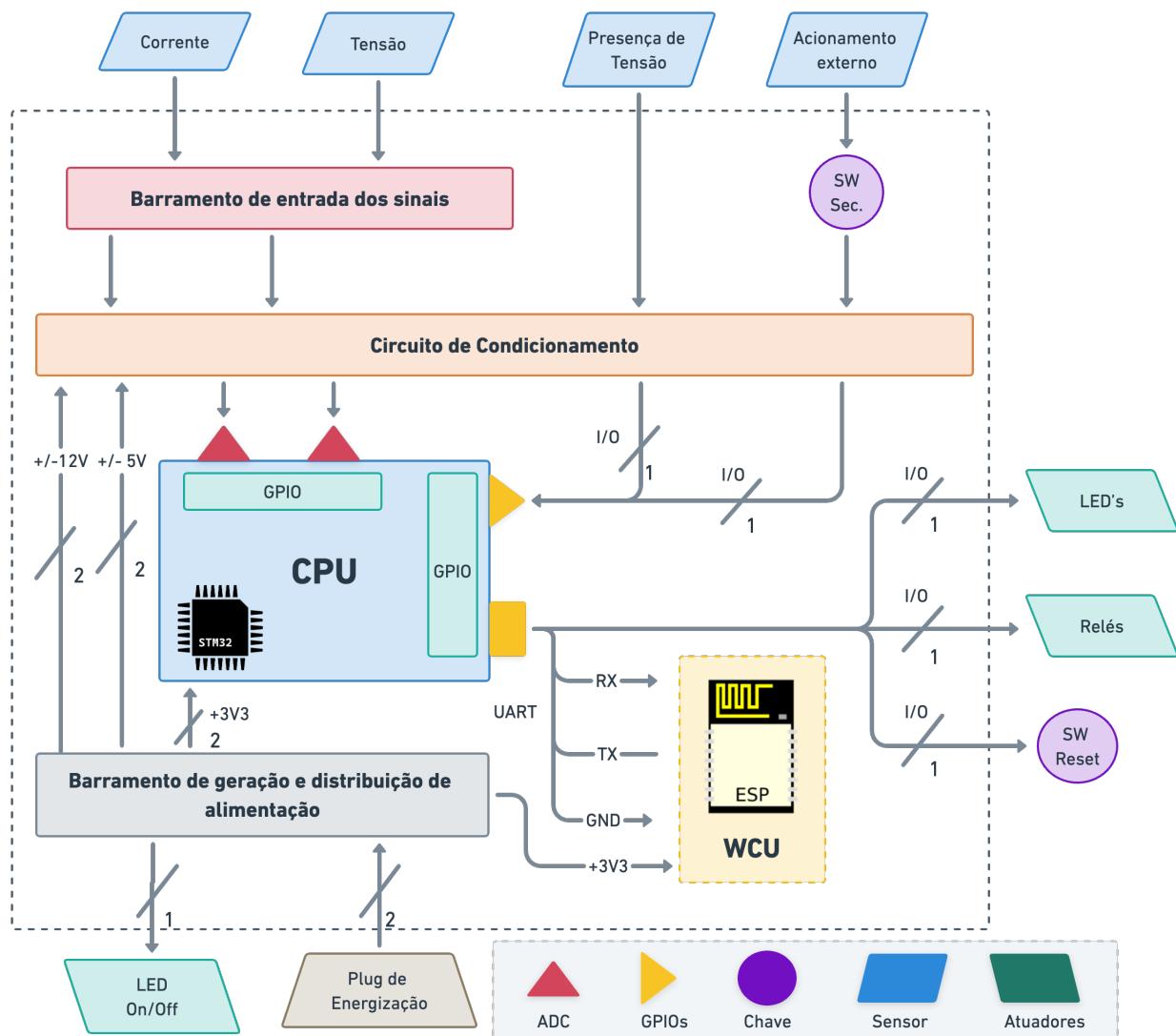


Figura 20 – Diagrama de componentes de hardware

O componente WCU, é responsável pela comunicação do sistema com o *broker* MQTT, apesar deste componente ser presente neste diagrama, ele é um modulo, que será interligado por um barramento e compartilha os barramento de terra comum do sistema e os pinos de transmissão (TX) e recepção dos dados (RX), além a conexão com o barramento +3V3.

### 4.2.3 Módulo de comunicação wireless

A Figura 21 apresenta os componentes do módulo de comunicação *Wireless*. Será realizado a comunicação MQTT com um *broker*, onde será enviado os estados dos dados coletados e o recebidos dados para controlar o seccionamento dos relés. Além disso, LEDs para *debug* do sistema, para verificar se o sistema está ativo e se está conectado a rede *wireless*.

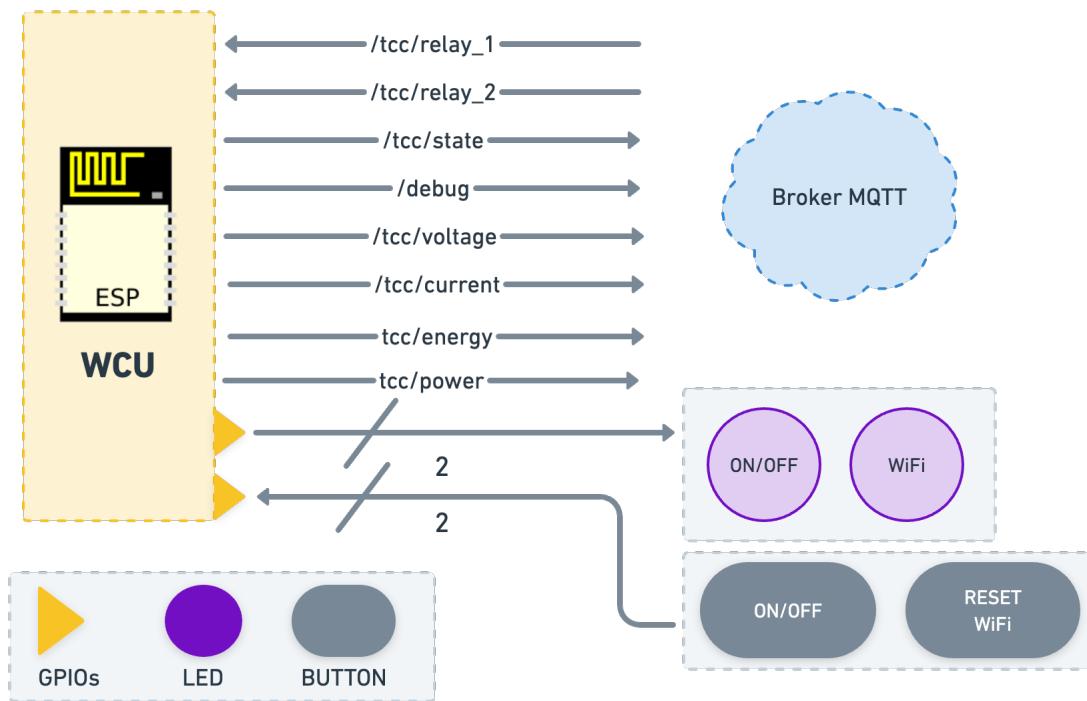


Figura 21 – Diagrama de componentes para comunicação MQTT.

Os tópicos do *broker* MQTT foram definidos de acordo com o tipo de dado enviado, onde tensão, corrente, energia e potência correspondem aos tópicos /tcc/voltage, /tcc/current, /tcc/energy e /tcc/power, respectivamente. Além destes, os tópicos /tcc/relay\_1 e /tcc/relay\_2 são tópicos de subscritor, ou seja, são informações que transitam do *broker* MQTT para o módulo WCU, responsáveis também pela ativação do relês. E por fim, o tópico /tcc/state, que publicar a informação de estado ativo e inativo no *broker* MQTT.

Somando a isso, foi adicionado dois *push-buttons*, "On/Off" e "Reset WiFi", no qual são responsáveis por reiniciar o sistema e limpar as configurações da rede *wireless*, como usuário e senha da rede, gravados na memória *flash*, que por sua vez é não volátil, isto é, consiste no tipo de armazenamento em que se pode persistir dados mesmo com a troca de estado da fonte de energia.

#### 4.2.4 Fluxo do software embarcado

Após a construção física das conexões do sistema, deve-se desenvolver o *firmware* do sistema embarcado. Para o desenvolvimento do firmware do módulo de comunicação WiFi, o fluxo mostrado na Figura 22 é adotado.

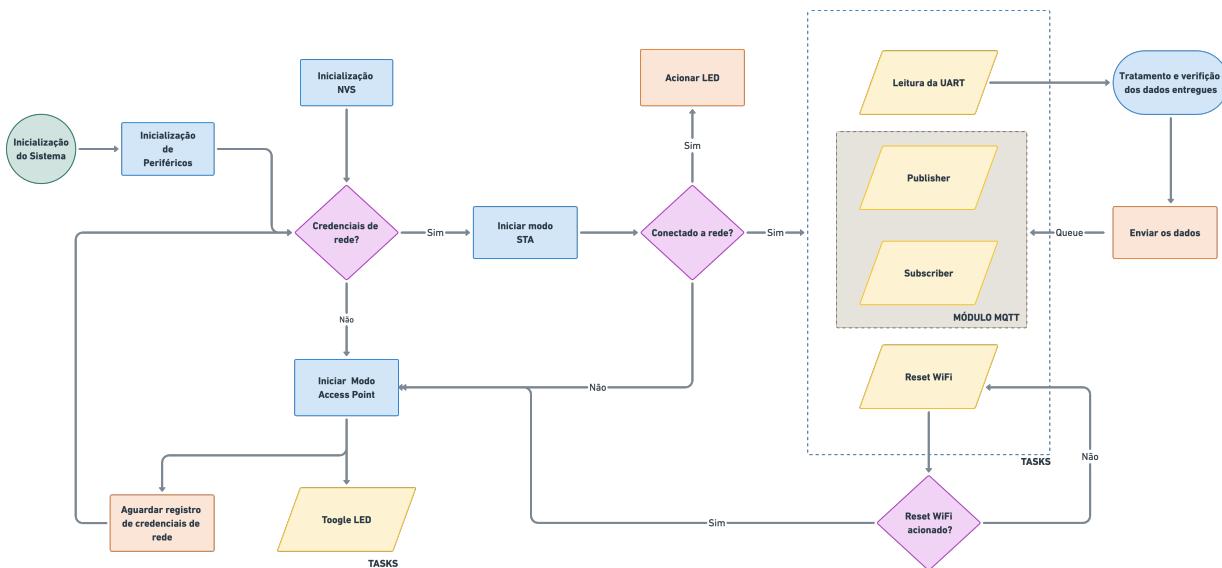


Figura 22 – Diagrama de blocos do fluxo de firmware do módulo WiFi

As funcionalidades existentes, abordam o gerenciamento da conexão com a rede *wireless*, utilizando recursos do microcontrolador como os modos de configuração *wireless*, *Access Point* e *Station Mode*, no qual durante o funcionamento do modo AP o microcontrolador cria ponto de acesso sem fio e aguarda o envio das credenciais como corpo de uma requisição HTTP, já o modo STA conecta o dispositivo com uma rede *wireless* externa.

As tarefas (*tasks*), fluxo de sequencial de instruções (MAZIERO, 2014), mostradas na Figura 22, representam blocos assíncronos, que executam a leitura da UART, publicação e subscrição dos dados no *broker MQTT* e reinicialização das configurações de rede WiFi.

Publicação e subscrição de dados do wifi, é uma atividade que depende diretamente dos dados entregues e lidos pela *task* de leitura da UART, na através *Queues* é realizando a comunicação entre as *tasks*.

É importante ressaltar que o *firmware* do módulo de comunicação foi construído utilizando a ESP-IDF que se baseia no Vanilla FreeRTOS v10.4.3 (ESPRESSIF, 2022).

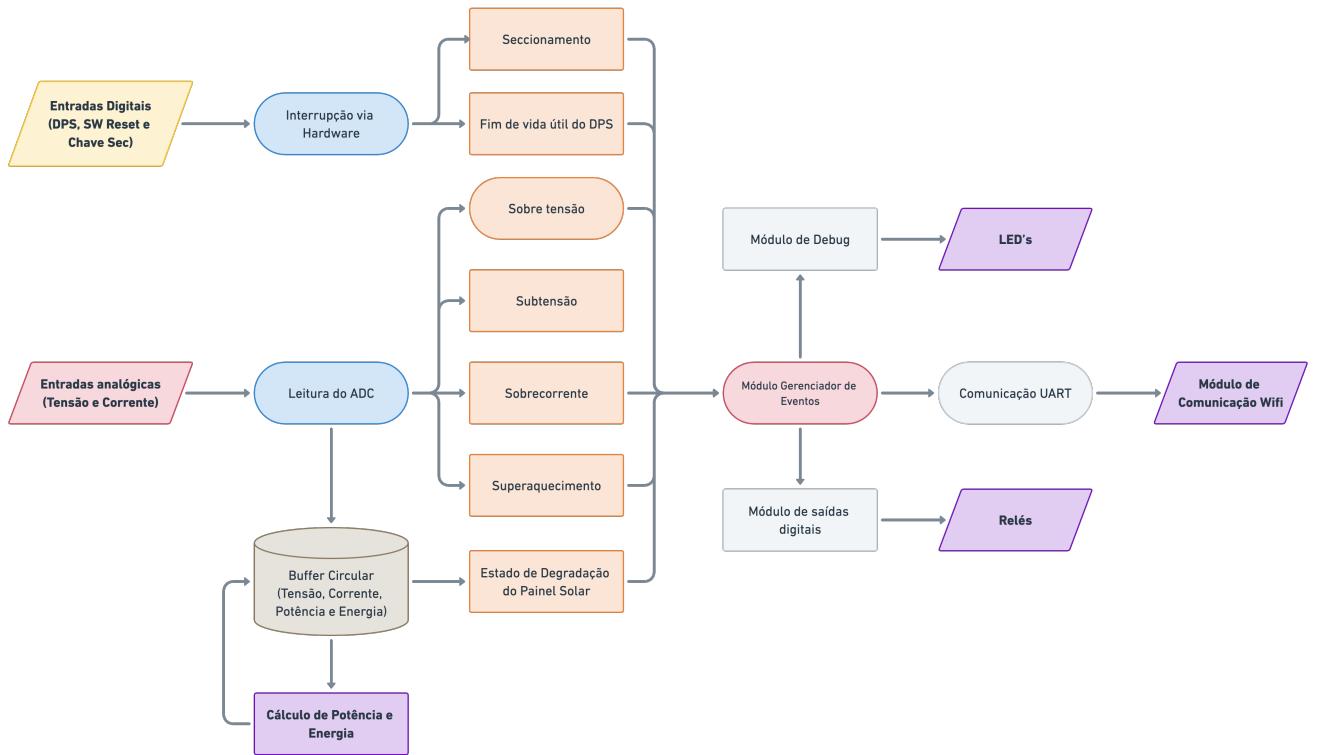


Figura 23 – Diagrama de blocos do fluxo de firmware

Para o sistema de coleta de dados, pode-se dividir a implementação em três frentes, entrada dos sinais analógicos, entrada dos sinais digitais, atuadores e módulo de comunicação Wi-fi. O fluxo do software embarcado, ilustrado na figura 23, contém o caminho dos sinais de entrada, tratamentos dos sinais, eventos, controle, gerenciamento dos atuadores e envio dos dados.

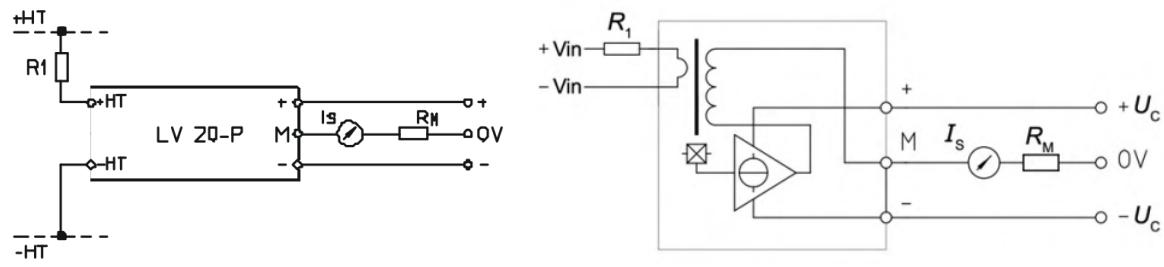
O software será desenvolvido em linguagem C, utilizando os microcontroladores STM32G473 da fabricante *STMmicroelectronics* e ESP32 da fabricante *Espressif*.

## 4.3 Projeto de Hardware do Protótipo

Nesta seção é realizado a descrição, análise e caracterização do projeto de hardware da solução proposta.

### 4.3.1 Transdutor de Tensão LV 20-P

A Figura 24 apresenta um diagrama elétrico simplificado do transdutor de tensão LV 20-P. Neste diagrama, o princípio de funcionamento do sensor, baseado no efeito hall, é representado por meio de bobinas e um circuito de compensação. As Tabelas 1 e 2 apresentam as características básicas de operação do componente.



(a) Terminais do transdutor de tensão LV 20-p

(b) Diagrama elétrico do transdutor de tensão LV 20-p

Figura 24 – Representação do sensor de tensão LV 20-P, retirado de ([LEM, 2014](#))

Tal que  $+U_C$  e  $-U_C$  são os terminais de alimentação do transdutor,  $M$  é a saída do transdutor, com sinal proporcional à sua entrada, e  $+V_{IN}$   $-V_{IN}$  são os terminais associados ao ponto de medição.  $R_1$  deve ser calculado tal que a corrente nominal do primário seja limitada a  $10mA$ , ou seja:

$$R_1 = \frac{500V}{10mA} \approx 50K\Omega/5W \quad (4.1)$$

E  $R_M$  deve ser tal como indicado na Tabela 2, adotando  $3V$  como a máxima tensão de saída, ou seja:

$$R_{MV} = \frac{3V}{25mA} \approx 120\Omega/\frac{1}{4}W \quad (4.2)$$

Tabela 1 – Características gerais do transdutor de tensão LV 20-P, retirado de ([LEM, 2014](#))

Parâmetro	Descrição	Tolerância	Unidade de Medida
$\epsilon$	Erro	$\pm 1,1$	%
$\epsilon_L$	Erro linear	$<0,2$	%
$t_R$	Tempo de resposta	40	$\mu s$
$T_A$	Temperatura de operação	0 a 70	$^{\circ}C$
$I_{PN}$	Corrente nominal do primário	10	mA
$I_P$	Faixa de medição	0 - 14	mA
$V_P$	Faixa de medição	10 - 500	V
$R_M$	com $\pm 12V/10mA$	30-190	$\Omega$
	com $\pm 12V/14mA$	30-100	$\Omega$
	com $\pm 15V/10mA$	100-350	$\Omega$
	com $\pm 15V/14mA$	100-190	$\Omega$
$I_{SN}$	Corrente nominal do secundário	25	mA
$K_N$	Relação de conversão	2500 : 1000	
$V_{CC}$	Tensão de alimentação	$\pm 12a \pm 15$	V
$V_D$	Isolamento AC	2,5	KV

### 4.3.2 Transdutor de corrente LA 55-P

A Figura 25 apresenta o diagrama elétrico simplificado do transdutor de corrente LA 55-P. Novamente, note que o princípio de funcionamento do sensor, baseado no efeito hall, está sendo representado por meio de bobinas e um circuito de compensação.

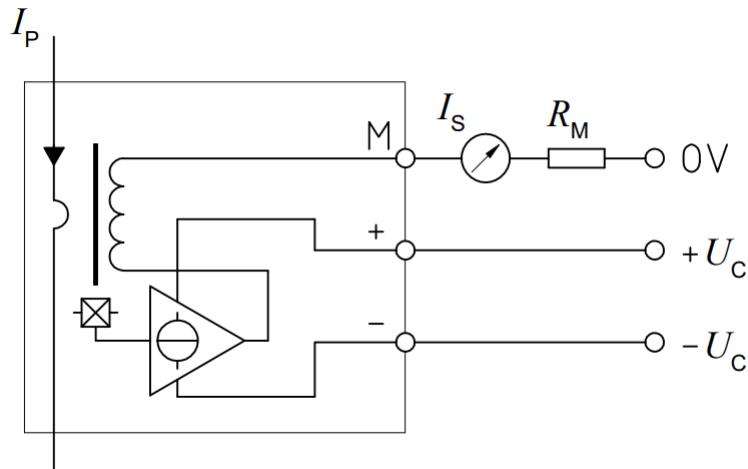


Figura 25 – Diagrama elétrico do transdutor de corrente LA 55-p, retirado de ([55-P](#), )

Tal que  $I_P$  é a corrente que fui no primário do transdutor,  $+U_C$  e  $-U_C$  seus terminais de alimentação,  $M$  é o terminal de saída do transdutor, com sinal proporcional à sua entrada, e  $R_M$  deve ser tal como indicado na Tabela 4. Novamente, adotando 3V como a máxima tensão de saída para uma corrente do primário de 20A:

$$R_{M1} = \frac{3V}{20mA} \approx 150\Omega / \frac{1}{4}W \quad (4.3)$$

Tabela 2 – Características gerais do corrente de tensão LA 55-P, retirado de ([55-P](#), )

Parâmetro	Descrição	Tolerância	Unidade de Medida
$\epsilon$	Erro	$\pm 0,9$	%
$\epsilon_L$	Erro linear	$<0,15$	%
$t_R$	Tempo de resposta	1	$\mu s$
$T_A$	Temperatura de operação	-40 a +85	$^{\circ}C$
$I_{PN}$	Corrente nominal do primário	50	mA
$I_{PM}$	Faixa de medição	0 a $\pm 70$	mA
$R_M$	com $\pm 12V/50A$	10-100	$\Omega$
	com $\pm 12V/70A$	10-50	$\Omega$
	com $\pm 15V/50A$	50-160	$\Omega$
	com $\pm 15V/70A$	50-90	$\Omega$
$I_{SN}$	Corrente nominal do secundário	50	mA
$K_N$	Relação de conversão	1 : 1000	
$V_{CC}$	Tensão de alimentação	$\pm 12a \pm 15$	V
$V_D$	Isolamento AC	2,5	KV

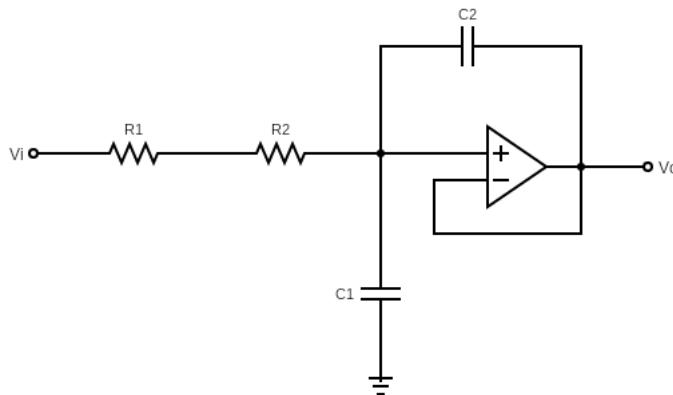


Figura 26 – Topologia do filtro de 2<sup>a</sup> ordem utilizado para remoção de componentes de alta frequência.

#### 4.3.2.1 Filtro Anti-Aliasing

O processo de aquisição de sinais é uma parte fundamental deste trabalho, sendo capaz de reduzir os ruídos que estão prejudicando o sinal de interesse e condicioná-lo para um processamento e análise digital. O filtro anti-aliasing é um elemento importante no processo de aquisição e condicionamento de sinais. O tipo de filtro escolhido para este trabalho foi um passa-baixa com aproximação com aproximação *Bessel*.

O primeiro fator levado em consideração é a frequência de interesse de 60Hz, em razão disso, um filtro passa baixas. Logo, a escolha se baseou nos seguintes aspectos:

Ordem: Devido à maior complexidade dos filtros de ordem superior, foi utilizado um filtro de segunda ordem tanto para obter a função de transferência quanto para implementar o circuito.

Resposta: Uma resposta não plana resultará em maiores ganhos em frequências mais altas, o que resultará em maiores ganhos em ruídos e harmônicos, pois possuem frequências muito mais altas que a de interesse, resultando em uma distorção maior no filtro. Os filtros com respostas *Butterworth* e *Bessel*, possuem uma resposta plana na região de passagem. A resposta de *Butterworth* é ainda mais plana do que a resposta de *Bessel*, entretanto, a resposta de *Bessel* tem a vantagem de uma resposta ao degrau plana, resultando em menor distorção do sinal de saída

Utilizou-se a topologia *Sallen-Key*, mostrado na Figura 26, pois ela é fácil implementação.

Através da Lei de *Kirchhoff* dos Nós, calcula-se a função de transferência do circuito da Figura 26:

$$H(s) = \frac{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + s \frac{(R_1 + R_2)}{R_1 R_2 C_2} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (4.4)$$

Segundo (ALEXANDER; SADIQU, 2013), a função de transferência de um filtro de segunda ordem é de acordo com a Equação 4.5.

$$H(s) = \frac{K w_o^2}{s^2 + s \frac{w_o}{Q} + w_o^2} \quad (4.5)$$

Comparando a função de transferência obtida com a Equação 4.5 pode-se calcular a frequência de pólos da seguinte maneira:

$$w_o^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (4.6)$$

$$w_o = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (4.7)$$

$$2\pi f_p = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (4.8)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (4.9)$$

Adotando  $R_1 = R_2 = R$  e  $K = 1$ , obtém-se:

$$w_o = \frac{1}{2\pi R \sqrt{C_1 C_2}} \quad (4.10)$$

Tem-se ainda da equação que:

$$\frac{w_o}{Q} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C_2} \quad (4.11)$$

$$Q = \frac{R_1 R_2 C_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (4.12)$$

$$Q = \frac{C_2}{2\sqrt{C_1 C_2}} \quad (4.13)$$

$$K w_o^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (4.14)$$

$$K = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} = 1 \quad (4.15)$$

A largura de banda dada pela diferença entre as frequências de -3 dB de corte superior e inferior, assim:

$$BW = f_{cs} - f_{cs} \quad (4.16)$$

Para um filtro passa baixas:

$$BW = f_c \quad (4.17)$$

$$Q = \frac{f_o}{BW} = \frac{f_o}{f_c} \quad (4.18)$$

$$f_o = K_o f_p \quad (4.19)$$

$K_o$  é o ganho na região de passagem, como ele é unitário temos:

$$f_o = f_p \quad (4.20)$$

$$f_c = K_c f_o \quad (4.21)$$

$$f_c = K_c f_p \quad (4.22)$$

Segundo (MALVINO; BATES, 2011), "Uma resposta *Bessel* possui fator de Qualidade  $Q = 0,577$  e ganho  $K_c = 0,786$ ". Comparando a equações 4.10 e 4.22, tem-se 4.23.

$$f_c = \frac{K_c}{2\pi R \sqrt{C_1 C_2}} \quad (4.23)$$

Definindo a frequência de corte de  $5kHz$  e o valor de  $R = 2,2k\Omega$ ,

$$C_1 C_2 = \left( \frac{0,786}{2\pi R f_c} \right)^2 \quad (4.24)$$

$$C_1 C_2 = \left( \frac{0,786}{22 \cdot 2200 \cdot 5000} \right)^2 \quad (4.25)$$

$$C_1 C_2 = 1,293302107 \times 10^{-16} \quad (4.26)$$

Adotando  $C_1 = 10nF$ , tem-se:

$$C_2 = 12,9333nF \quad (4.27)$$

É necessário adotar valores comerciais para o valor do capacitor  $C_2$ , pode-se aproximar  $C_2$  associando 4 capacitores em paralelo, sendo um de  $10nF$ , e outros de  $1nF$ , obtem-se:

$$C_2 = 13nF \quad (4.28)$$

#### 4.3.3 Condicionamento de Tensão

A Figura 27 apresenta o diagrama esquemático do circuito proposto para aquisição e condicionamento da tensão.

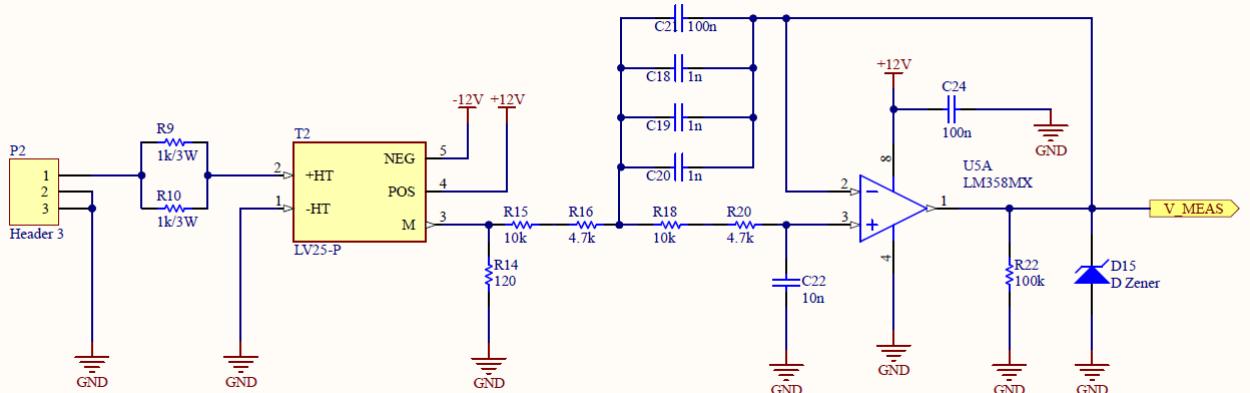


Figura 27 – Esquemático do circuito proposto para condicionamento e aquisição da tensão.

O circuito é composto por um limitador de corrente (resistores de  $100K\Omega$  por  $3W$ ) no primário do transdutor, um resistor *shunt* (resistor de  $120\Omega$  por  $1/4W$ , com tolerância de  $1\%$ ) no secundário do transdutor, seguido por um filtro passa-baixas de  $2^{\text{a}}$  ordem.

O transdutor de tensão de montagem PCB baseado no efeito Hall proporciona isolamento galvânico entre circuitos primários e secundários. Para permitir que uma tensão seja medida, uma corrente proporcional à tensão medida deve ser coletada através de um resistor externo, selecionado pelo usuário, em série com o circuito primário da unidade (LEM, 2021).

#### 4.3.4 Condicionamento de Corrente

A Figura 28 o diagrama esquemático do circuito proposto para o condicionamento e aquisição de corrente.

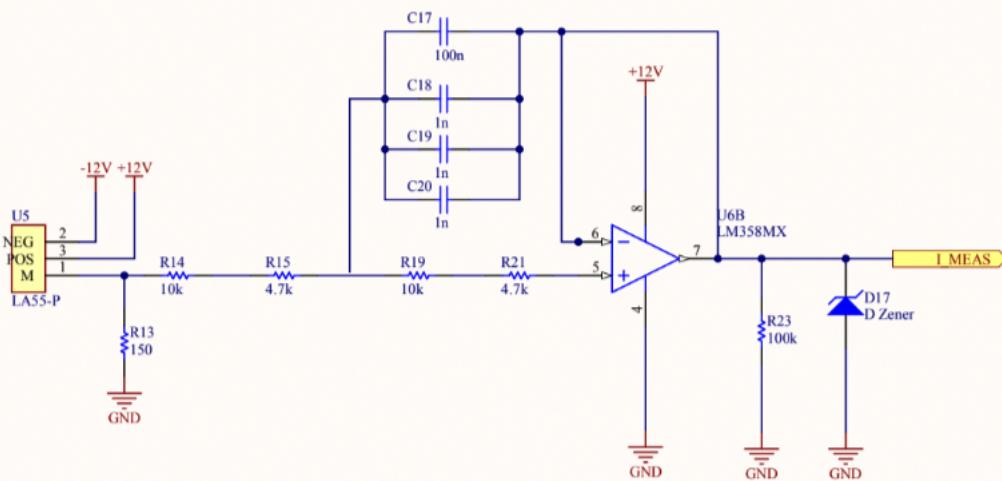


Figura 28 – Esquemático do circuito proposto para condicionamento e aquisição da corrente.

O circuito é composto por um resistor *shunt* (resistor de  $150\Omega$  por  $1/4W$ , com tolerância de 1%) no secundário do transdutor, seguido por um filtro passa-baixas de  $2^{\text{a}}$  ordem.

#### 4.3.5 Monitoramento de Fim de Vida do DPS CC

A Figura 29 apresenta o diagrama esquemático do circuito proposto para o monitoramento da vida útil do DPS, em que o terminal 1 do conector deverá ser acoplado ao terminal comum e o terminal 2 do conector ao terminal normalmente aberto do dispositivo. Assim, utilizando lógica *pullup*, um dispositivo funcional resultará em uma saída com nível lógico alto e um dispositivo com defeito resultará em uma saída com nível lógico baixo.

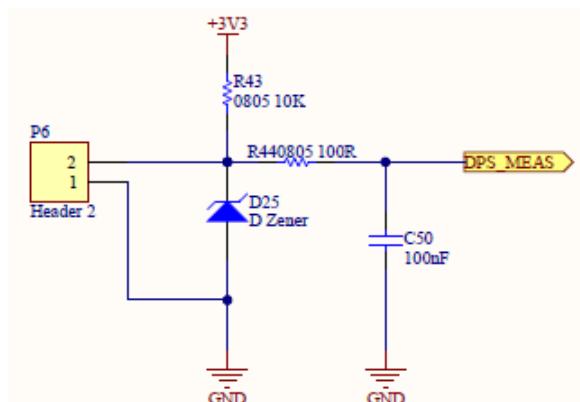


Figura 29 – Esquemático do circuito proposto para monitoramento da vida útil do DPS.

### 4.3.6 Seccionamento do Circuito CC

Com a finalidade de seccionamento do circuito foi utilizado um par de relés *JQC-3F*.

Este componente foi escolhido com base nos requisitos de tensão e corrente especificados para o trabalho. A Figura 30 e Figura 31 apresenta o diagrama esquemático deste circuito.

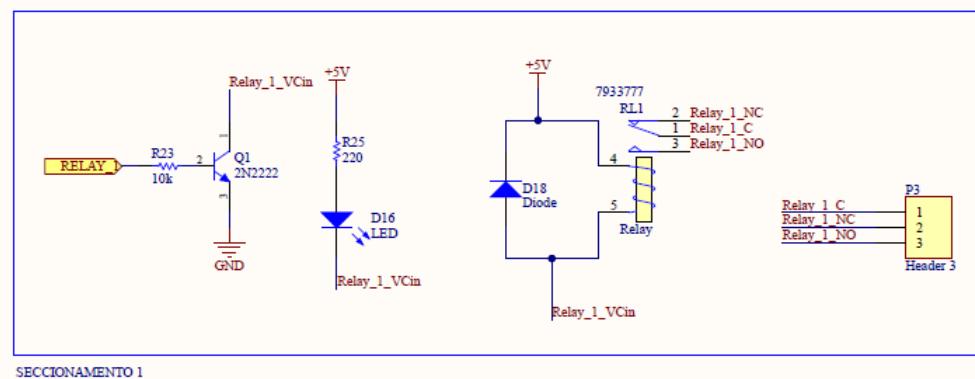


Figura 30 – Esquemático do circuito proposto para controle dos dispositivo relé 1, voltado para o seccionamento do circuito.

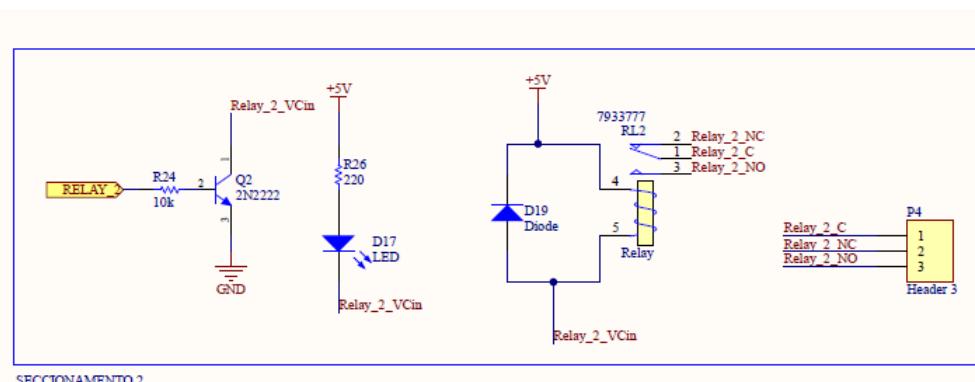


Figura 31 – Esquemático do circuito proposto para controle dos dispositivo relé 2, voltado para o seccionamento do circuito.

### 4.3.7 Microcontroladores

Neste tópico são evidenciados os esquemas propostos para a unidade de central de processamento e o módulo de comunicação *Wireless*.

#### 4.3.7.1 Unidade de central de processamento

A Figura 32 a proposta do *pinout* do microcontrolador STM32G473VCT.

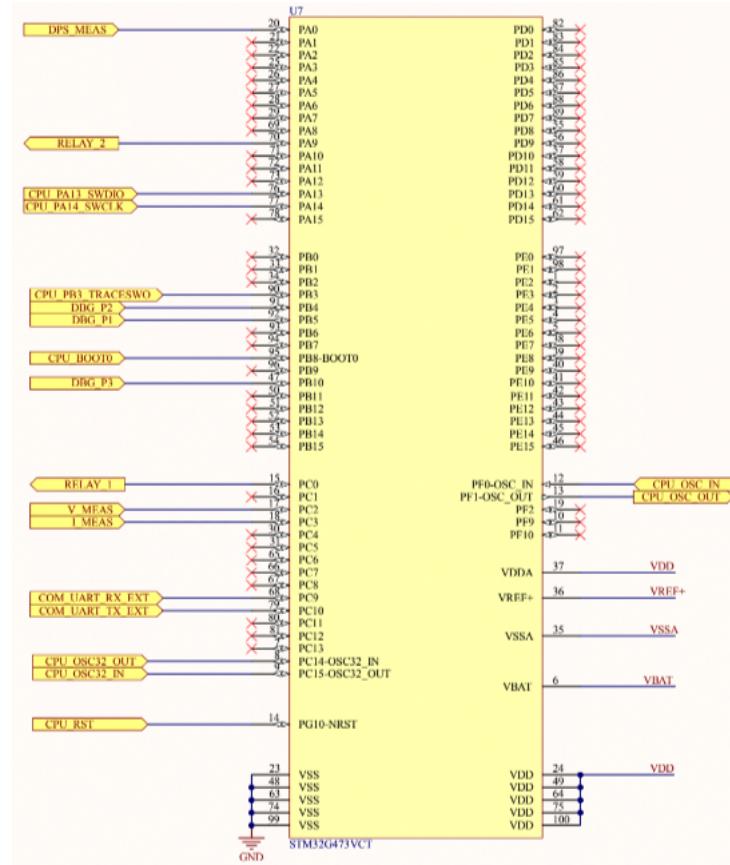


Figura 32 – Esquemático do *pinout* do microcontrolador STM32G473

A Figura 33 apresenta o módulo de *debug* composto pelos *leds* de sinalização, o conector UART para conexão com o módulo de comunicação *Wireless*.

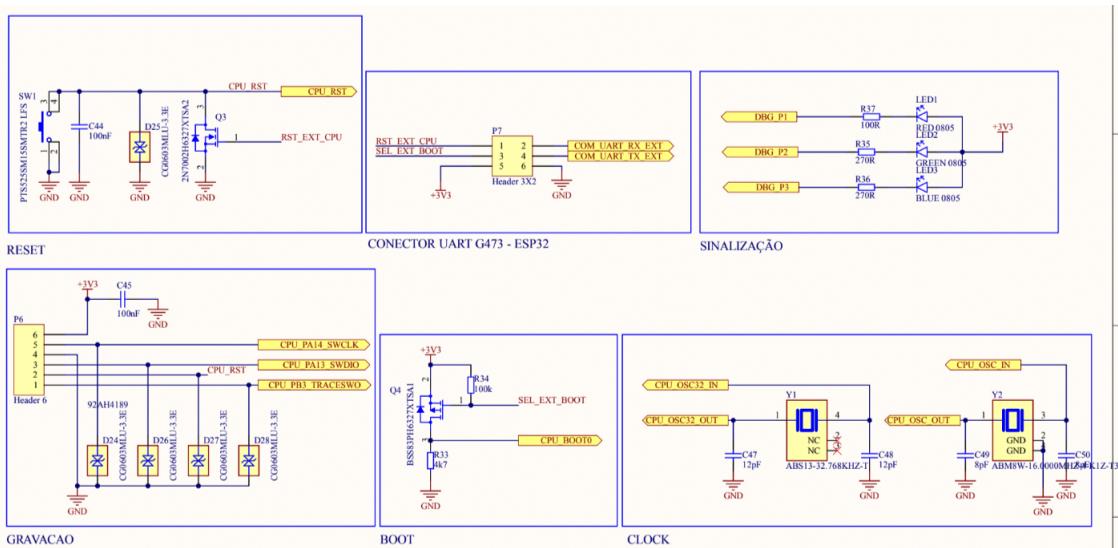


Figura 33 – Esquemático do circuito proposto para periféricos de comunicação da unidade central de processamento.

Além disso, os osciladores do microcontrolador, esquema para *boot*, *reset* e gravação

da unidade, ainda, o conector UART pode ser utilizado para comunicação serial com a unidade,

#### 4.3.7.2 Módulo de comunicação

A Figura 34, mostra o *pinout* do microcontrolador ESP32.

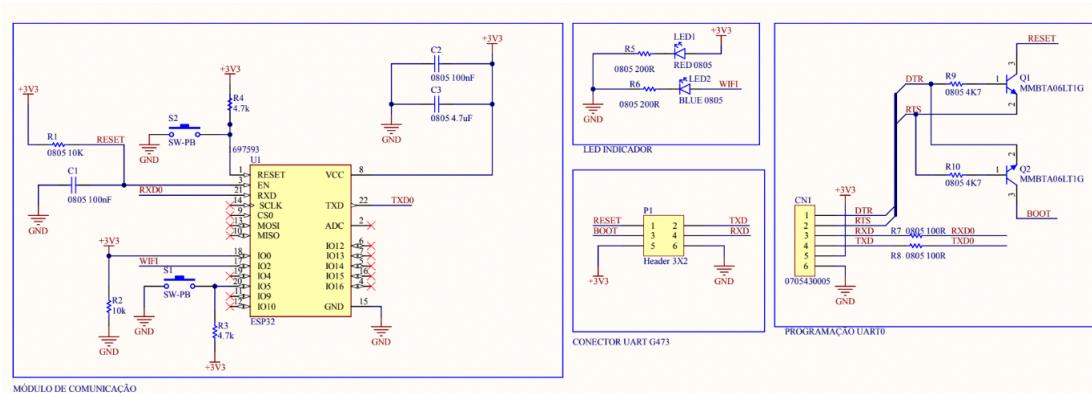


Figura 34 – Esquemático do circuito proposto para o módulo de comunicação *Wireless*

Somando a isso, os LEDs indicadores de funcionamento e comunicação *Wireless*, conector UART para conexão com a CPU e esquema para programação UART.

#### 4.3.8 Fonte de alimentação

A Figura 35 apresenta a proposta do módulo de alimentação do sistema, com terminais de 12V, 5V e 3.3V, além disso um esquema de retificação.

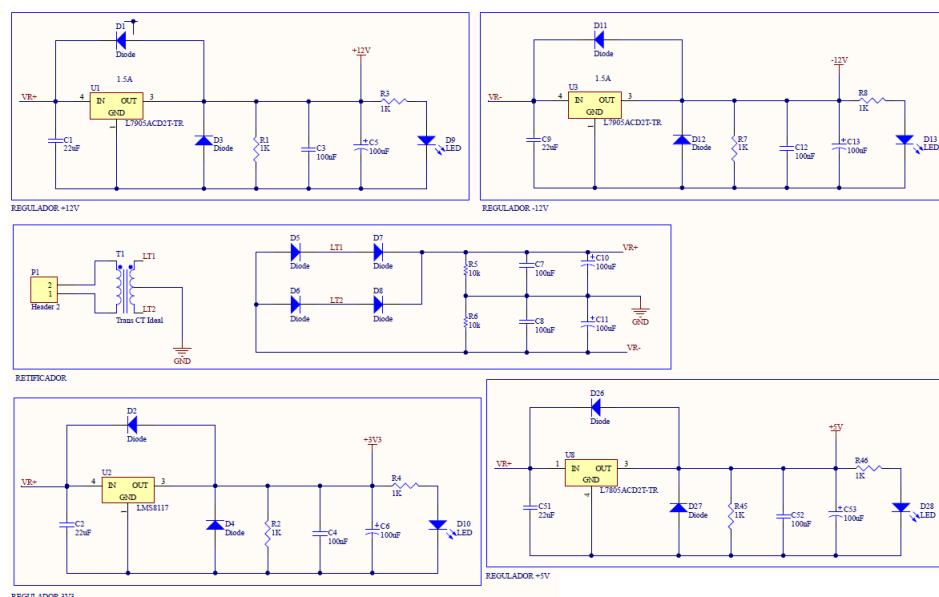


Figura 35 – Esquemático do circuito proposto para alimentação do sistema.

## 4.4 Projeto de Firmware do Protótipo

O projeto de firmware do protótipo, será embarcado em microcontroladores STM32G474 e ESP32, como descrito na Seção 4.3. Ambos, software embarcados foram desenvolvidos em C/C++, utilizando os *frameworks* da ST no CubeIDE v1.10.1, para módulo de coleta de dados e o ESP-IDF v4.4.2 para módulo de comunicação, porém para entender o fluxo do software embarcados como um todo, devemos entender deste a concepção dos dados até a sua exibição.

O fluxo dos dados do protótipo parte da coleta dos dados, comunicação UART, envio dos dados via MQTT para o broker, até que por fim, é realizado a visualização destes dados em um *dashboard*, como mostrado na Figura 36.

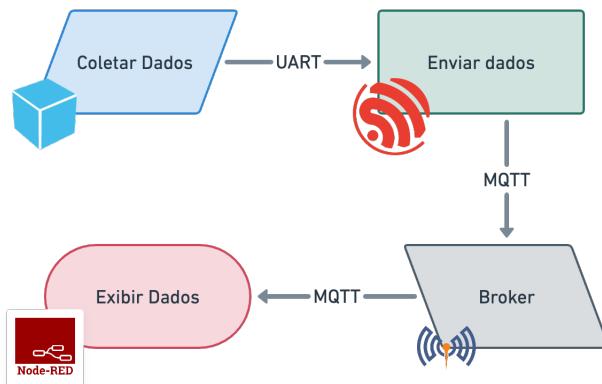


Figura 36 – Funcionalidades gerais do sistema e meios de interação.

### 4.4.1 Gerenciamento de Eventos

O módulo de gerenciamento de eventos é baseado na ativação de *flags* identificadoras do estado do sistema. A Figura 38 apresenta o fluxograma geral do módulo, bem como os pontos de ativação de cada evento.

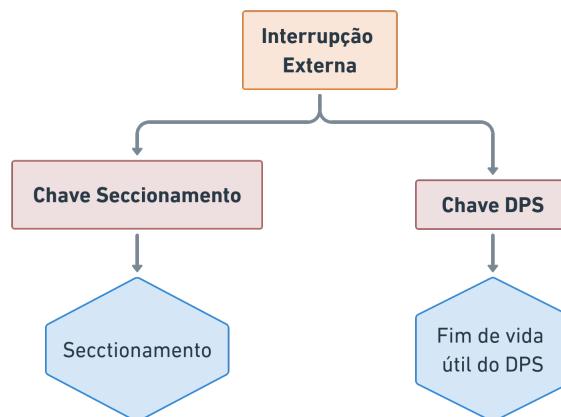


Figura 37 – Fluxograma do módulo de gerenciador de eventos para interrupção externa, modificado de (LEONARDO, 2021).

Eventos obtidos através de comparações com dados da amostragem do ADC.

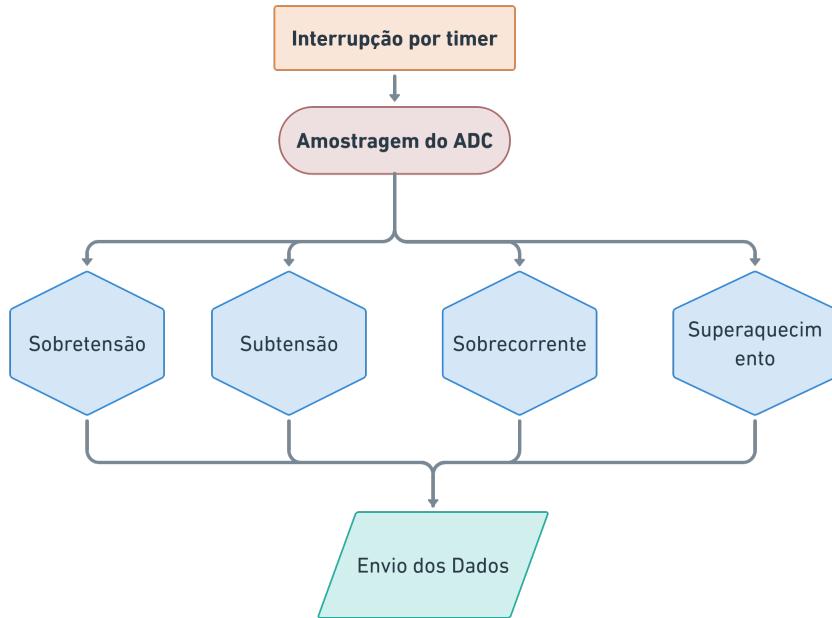


Figura 38 – Fluxograma do módulo de gerenciador de eventos para dados de amostragem, modificado de ([LEONARDO, 2021](#)).

Somando a isso, são apresentados os eventos monitorados seguidos de suas respectivas ações de controle. Para eventos associados a medições de grandezas contínuas no tempo, foi utilizado um sistema de controle de histerese.

Tabela 3 – Identificação dos eventos e suas respectivas ações de controle, ordenados por prioridade, modificado de ([LEONARDO, 2021](#)).

Tipo	Ação	Trigger	Obs
Seccionamento	Desabilita a saída da caixa de strings		Acionado pelo usuário
Sobretensão	Desabilita a saída da caixa de strings	$V_{off} > 475V$ $V_{on} < 450V$	Acionado pelo sistema
Subtensão	Desabilita a saída da caixa de strings	$V_{off} > 25V$ $V_{on} > 50V$	Acionado pelo sistema
Sobrecorrente	Desabilita a saída da caixa de strings	$V_{off} > 19A$ $V_{on} < 18A$	Acionado pelo sistema
Superaquecimento	Desabilita o circuito de monitoramento	$V_{off} > 75C$	Acionado pelo sistema
Fim de vida útil	Desabilita a saída da caixa de strings		Acionado pelo sistema

#### 4.4.1.1 Aquisição e Processamento

Visando agilidade no tempo de resposta a variações, bem como acurácia das medições realizadas, a lógica para aquisição e processamento de tensão e corrente amostra

sequencialmente os canais analógicos à uma taxa de 960 *samples per seconds* e os insere em um *buffer* circular, agregado em multicamadas ([LEONARDO, 2021](#)).

Apesar de a norma IEC 61400-4-30 ([IEC, 2012](#)) ser voltada para sistemas de medições em CA, o método de agregação em multicamadas foi adotado para que o sistema seja capaz de tomar decisões baseadas em variações a curto prazo (surtos, curto circuitos) e a médio e longo prazo (cálculo da potência, degradação das séries fotovoltaicas).

Tal que os níveis de agregação foram divididos em:

1. **1<sup>a</sup> Camada:** *Buffer* circular de 192 posições (12 ciclos de 16 amostras cada), inseridas a partir da leitura do módulo ADC, a uma taxa de 960sps, totalizando 0,2s.
2. **2<sup>a</sup> Camada:** *Buffer* circular de 15 posições, calculadas a partir da média quadrática da primeira camada, a cada 0,2s, totalizando 3s.
3. **3<sup>a</sup> Camada:** *Buffer* circular de 200 posições, calculadas a partir da média quadrática da segunda camada, a cada 3 segundos, totalizando 10m.
4. **4<sup>a</sup> Camada:** *Buffer* circular de 6 posições, calculadas a partir da média quadrática da terceira camada, a cada 10 minutos, totalizando 1h.
5. **5<sup>a</sup> Camada:** *Buffer* circular de 24 posições, calculadas a partir da média quadrática da terceira camada, a cada hora, totalizando 24 horas.

O cálculo da média quadrática entre os níveis é dado por:

$$X_M = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_N^2}{n}} \quad (4.29)$$

Onde  $X_M$  é a média quadrática dos n termos de X, dada em *Volts* ou *Ampère*.

#### 4.4.2 Cálculo da Potência e Energia Produzida

Para o cálculo da potência produzida, o sistema multiplica uma amostra de tensão por uma amostra de corrente, ambos da 3<sup>a</sup> camada do protocolo descrito acima. Assim, a potência calculada é referente a um período de 3 segundos, dada em *kW*.

$$P_{3s} = \frac{V_{3s} \times I_{3s}}{10^3} \quad (4.30)$$

O resultado obtido é armazenado seguindo o mesmo protocolo utilizado para tensão e corrente, a partir da 3<sup>a</sup> camada.

Para o cálculo da energia acumulada, por sua vez é realizado o somatório dos valores calculados de potência a cada 3 segundos, referentes ao período de 1 horas, visto que a unidade de medida é dada em  $kWh$ .

$$E = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{P_{3s}}{3.6 \times 10^3} kWh \quad (4.31)$$

A energia acumulada será armazenada em uma variável do tipo *float*, atualizada conforme a Equações 3.13.

O tipo *float*, de 32 bits, pode assumir valores absolutos entre  $3,4 \times 10^{-38}$  a  $3,4 \times 10^{38}$ , aproximadamente. No geral, pode-se armazenar números com até 7 algarismos significativos, ou seja, para um número como 123456,789 a variável o armazenará como 1,234567E6.

Considerando um cenário contínuo em que a medição estivesse no limite, ou seja, para:

$$P_{3s} = \frac{500V \times 20A}{10^3} = 10kW \quad (4.32)$$

e, logo,  $E_{1h} = 10 \text{ kjWh}$ . O tempo, em anos, até que ocorresse overflow aritmético da variável de energia é de:

$$T_{anos} = \frac{V_{MAX_{float}}}{|E_{1h}| \times 24 \times 30 \times 12} \quad (4.33)$$

Onde  $V_{MAX_{float}}$  é máxima energia armazenada pelo *float*, ou seja, aproximadamente 999.9999,9  $kWh$ .

#### 4.4.3 Desenvolvimento de firmware do módulo de coleta de dados

Seguindo como base os requisitos do projeto, a Figura 39 apresenta o fluxograma modelado para firmware embarcado do módulo de coleta de dados.

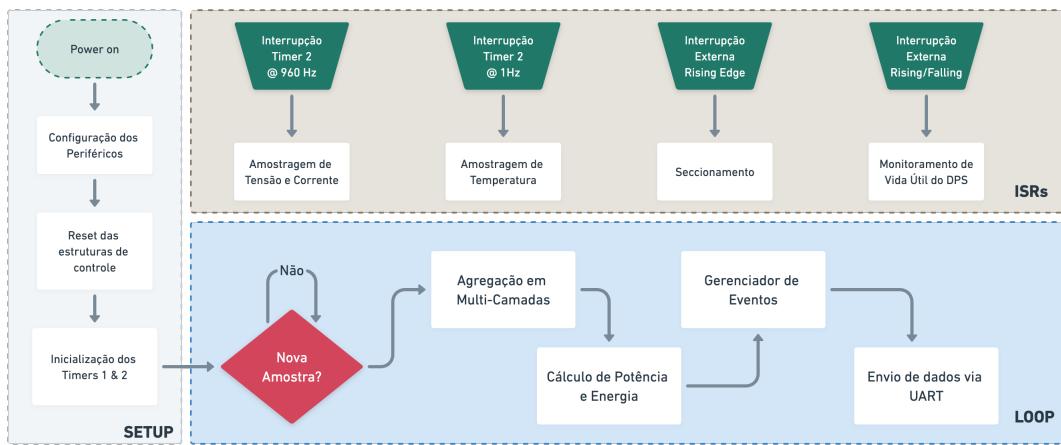


Figura 39 – Fluxograma de execução do firmware do módulo de coleta de dados, modificado de (LEONARDO, 2021)

#### 4.4.3.1 Configurações Gerais do Firmware

Nesse contexto, para implementação do código, foi utilizado a plataforma de desenvolvimento STM CubeIDE v1.101.1, da ST, voltada para desenvolvimento em C e C++. (STMICROELECTRONICS, 2021)

#### 4.4.3.2 Configuração dos GPIOs

A Figura 40 apresenta a relação de configuração dos GPIOs, bem como a Tabela 4 apresenta suas respectivas funcionalidades.

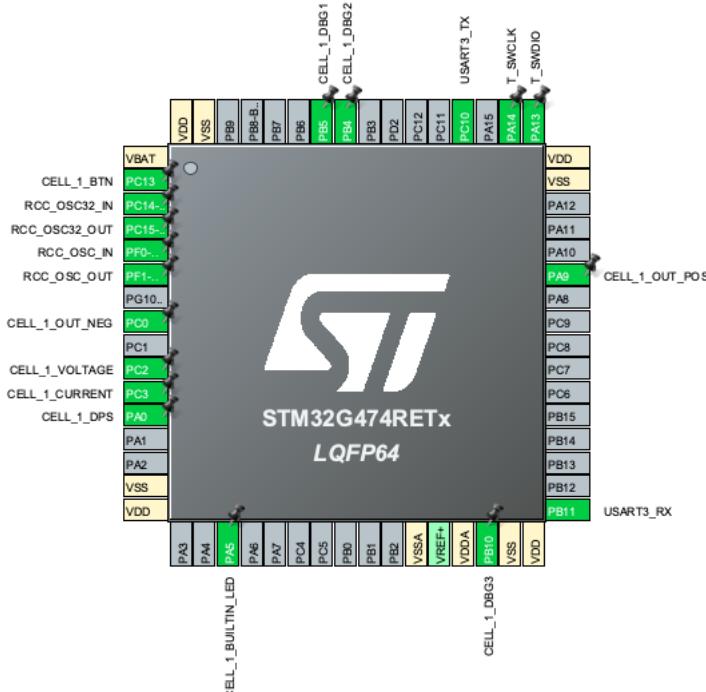


Figura 40 – Tela de configuração dos GPIOs na plataforma Cube IDE.

Tabela 4 – Identificação dos eventos e suas respectivas ações de controle, ordenados por prioridade, modificado de ([LEONARDO, 2021](#)).

ID	GPIO	Observação
CELL 1 BTN	PC13	Botão para seccionamento
CELL 1 Voltage	PC2	Monitoramento de tensão
CELL 1 Current	PC3	Monitoramento de corrente
CELL 1 DPS	PA0	Monitoramento de DPS
CELL 1 OUT NEG	PC0	Relé de saída 1 (Negativo)
CELL 1 OUT POS	PA9	Relé de saída 2 (positivo)
CELL 1 BUILTIN LED	PA5	Status do acoplamento
CELL 1 DBG1	PB5	Debug Probe 1 (MSB)
CELL 1 DBG2	PB4	Debug Probe 2
CELL 1 DBG3	PB10	Debug Probe 3 (LMSB)

#### 4.4.3.3 Configuração dos Módulos ADC

Para este trabalho, foram utilizados 3 módulos ADC (ADC1, ADC2, ADC5), voltados para amostragem de tensão, corrente e temperatura, respectivamente.

Visando tornar os cálculos de potência e energia mais precisos, a amostragem de tensão e corrente foi feita simultaneamente, justificando o uso de 2 módulos ADCs para tal função. A Tabela 5, apresenta os parâmetros de configuração dos módulos ADC1, ADC2 e ADC5, sendo que, o terceiro módulo ADC (ADC5) surge a necessidade de amostrar a temperatura em uma taxa mais lenta.

#### 4.4.3.4 Configuração dos timers

Neste trabalho, o microcontrolador foi parametrizado para operar com um clock interno de **120MHz**, tal que os módulos ADCs operem em máxima velocidade.

Nesse sentido, a Equação 4.34 demonstra como obter a frequência do *timer* em função do divisor de *clock* (PSC) e de seu contador (CNT). Na sequência, a Tabela 6 apresenta a parametrização dos timers utilizados neste trabalho.

$$Freq = \frac{120Mhz}{(PSC + 1) \times CNT} \quad (4.34)$$

Tabela 5 – Parâmetros de configuração dos módulos ADC1, ADC2 e ADC5, respectivamente, para amostragem simultânea de tensão, corrente e temperatura.

Parâmetros	ADC1	ADC2	ADC5
Mode	Dual regular simultaneous mode only	Dual regular simultaneous mode only	-
DMA Acess Mode	DMA access mode disabled	DMA access mode disabled	-
Delay between 2 sampling phases	1 Cycle	1 Cycle	-
Clock Prescaler	Synchronous clock mode divided by 2	Synchronous clock mode divided by 2	Synchronous clock mode divided by 2
Resolution	ADC 12-bit resolution	ADC 12-bit resolution	ADC 12-bit resolution
Data Alignment	Right alignment	Right alignment	Right alignment
Gain Compensation	0	0	0
Scan Conversion Mode	Disabled	Disabled	Disabled
End Of Conversion Selection	End of sequence of conversion	End of sequence of conversion	End of single conversion
Low Power Auto Wait	Disabled	Disabled	Disabled
Continuous Conversion Mode	Disabled	Disabled	Disabled
Discontinuous Conversion Mode	Disabled	Disabled	Disabled
DMA Contunuous Requests	Disabled	Disabled	Disabled
Overrun Behaviour	Overrun data preserved	Overrun data preserved	Overrun data preserved
Enable Regular Conversions	Enable	Enable	Enable
Enable Regular Oversampling	Disable	Disable	Disable
Number Of Conversion	1	1	1
External Trigger Conversion Source	Regular conversion launched by software	-	-
External Trigger Conversion Edge	None	-	-
Rank	Channel	Channel 8	Channel 9
	Sampling Time	2.5 Cycles	2.5 Cycles
	Offset Number	No offset	No offset
Enable Injected Conversions	Disable	Disable	Disable

Tabela 6 – Parâmetros de configuração dos módulos TIM1 e TIM2, com frequências de 960Hz e 1Hz, respectivamente.

Parâmetro	TIM1	TIM2
Prescaler	119	11999
Counter Mode	Up	Up
Dithering	Disable	Disable
Counter Period	1041	10000
Internal Clock Division	No division	No division
Repetiontion Counter	0	-
Auto-Reload	Enable	Enable
Master/Slave Mode	Disable	Disable
Trigger Event Selection TRGO	Reset	Reset
Trigger Event Selection TRGO2	Reset	-

#### 4.4.3.5 Amostragem e Processamento de corrente e tensão

Uma vez inicializado o TIM1, o sistema irá gerar interrupções contínuas à 960Hz. Por sua vez, cada chamada ISR inicializa uma nova amostragem simultânea dos módulos ADC 1 e 2. Ao final da conversão, é gerado uma segunda interrupção para inserção do resultado nas devidas estruturas.

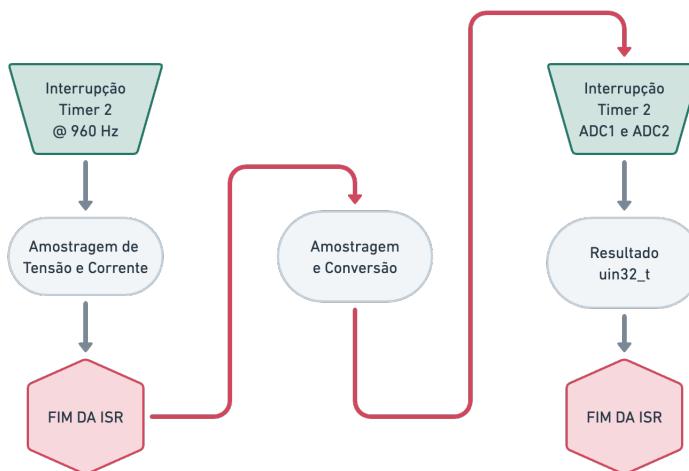


Figura 41 – Fluxograma do processo de conversão do módulo ADC via interrupções. Note que a linha em vermelho indica o fluxo de atividades realizadas pelo módulo ADC, ou seja, sem demandar recursos do processador, modificado de ([LEONARDO, 2021](#)).

O bloco de código abaixo ([LEONARDO, 2021](#)) apresenta a rotina de processamento, após a amostragem simultânea, em que uma dada amostra é dividida em tensão e corrente, seguida pela adição do ganho do módulo ADC.

---

```
void meas_sample_voltage_and_current(photovoltaic *ptr)
```

```

{
    // Obtem a leitura simultânea dos módulos ADC master e slave
    uint32_t raw = HAL_ADCEx_MultiModeGetValue(ptr->master->ADC);

    // Extrai os dados do módulo ADC master (16 bits LSB), em Volts
    ptr->master->frst_level[ptr->master->frst_level_index++] = (float)(raw &
        LSB_WORD_BIT_MASK) * ADC_GAIN;

    // Extrai os dados do módulo ADC slave (16 bits MSB), em Volts
    ptr->slave->frst_level[ptr->slave->frst_level_index++] = (float)(raw >>
        HALF_WORD_LENGTH) * ADC_GAIN;

    ptr->new_sample = true;
}

```

---

A rotina chamada após o término de uma conversão dos módulos ADC 1 e 2. Note que o dado amostrado é retornado em uma única variável, do tipo `uint32_t`, e, portanto deve-se realizar operações lógicas para extração dos dados de tensão e corrente.

Onde `raw` é a variável do tipo `uint32_t` que armazena o resultado da conversão, `LSB_WORD_BIT_MASK` e `HALF_WORD_LENGTH` são macros utilizados para separação das amostras de corrente e tensão, conforme apresentado a seguir.

$$Voltage = raw \>> 16 \quad (4.35)$$

$$Currente = raw >> 16 \quad (4.36)$$

Inseridos os valores de tensão e corrente em suas respectivas estruturas de dados, a ISR é encerrada e, então, inicia-se o protocolo de agregação em multi-camadas e o cálculo de potência e energia no *loop* principal, conforme apresentado no fluxograma a seguir.

Note que, na terceira camada do protocolo, o sistema realiza a verificação dos limiares para *set/reset* dos eventos em regime permanente (sobretensão, sobrecorrente e subtensão).

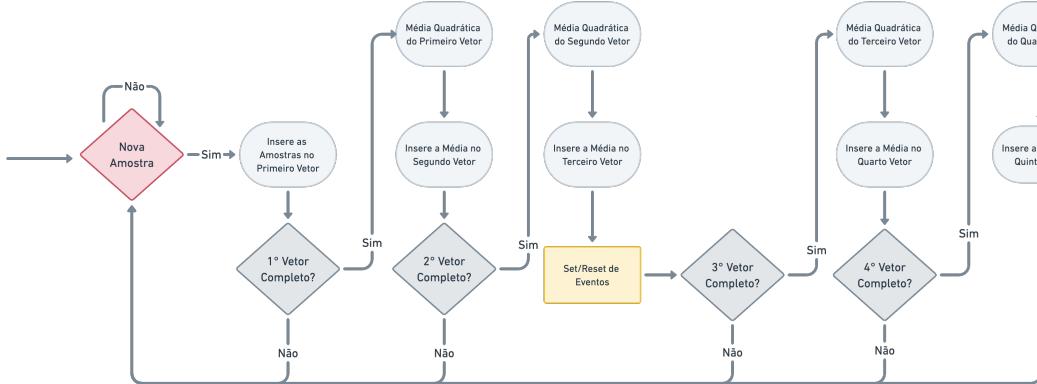


Figura 42 – Fluxograma de agregação em multi-camadas, após separação das amostras de corrente e tensão, modificado de (LEONARDO, 2021).

#### 4.4.3.6 Cálculo de Potência e Energia

Após o término da rotina de gerenciamento do protocolo de agregação das estruturas de corrente e tensão, o sistema executa a rotina de cálculo de potência e energia, conforme apresentado no fluxograma da Figura 43.

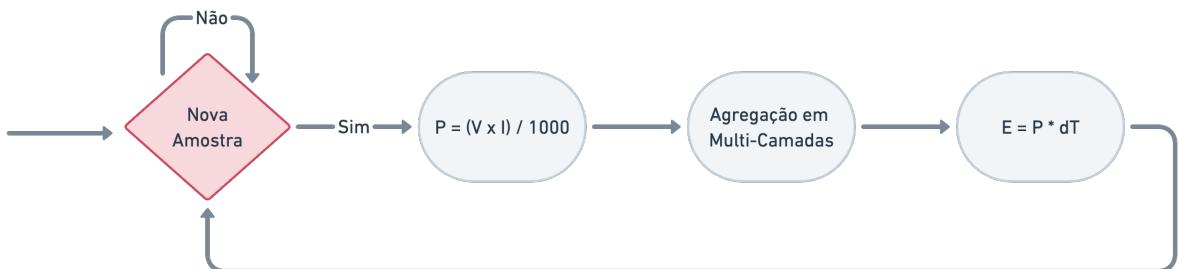


Figura 43 – Fluxograma da rotina de cálculo da potência e energia produzidas.

Tal que a potência calculada é dada em kW e, para obtenção da energia produzida em KWh, o sistema multiplica este resultado pelo intervalo de medição ( $dT$ ), de 3 segundos.

#### 4.4.3.7 Aquisição e Processamento da Temperatura Interna do Processador

Analogamente ao TIM1, uma vez inicializado o TIM5, o sistema irá gerar interrupções contínuas a uma taxa de 1Hz, sendo esta a frequência de amostragem da temperatura interna do microcontrolador. O bloco de código abaixo (LEONARDO, 2021) apresenta a rotina executada ao fim de uma nova conversão do módulo ADC.

```
float meas_get_temperature(void)
{
    // Obtém a leitura do módulo ADC
```

```

uint32_t raw = HAL_ADC_GetValue(&hadc5);

// Converte a leitura do módulo ADC em tensão
float voltage = (float)raw * ADC_GAIN;

// Converte a tensão lida em temperatura (C)
return (((voltage - TEMP_SENSOR_VREF) / TEMP_SENSOR_SLOPE) +
        TEMP_SENSOR_TREF);
}

```

---

Onde *raw* é a variável do tipo *uint32\_t* que armazena o resultado da conversão, *ADC\_GAIN* é o ganho do módulo ADC, *TEMP\_SENSOR\_VREF* é a tensão de referência interna do sensor (0,76V), *TEMP\_SENSOR\_SLOPE* é o ganho do sensor (2,5 mV/°C) e *TEMP\_SENSOR\_TREF* é a temperatura de referência do sensor (30°C) ([ST-MICROELECTRONICS, 2020](#)).

#### 4.4.3.8 Interrupções Externas

Tanto os seccionamento manual do circuito quanto o monitoramento do estado de operação do DPS foram configurados para gerarem interrupções na troca do estado lógico dos pinos, conforme apresentado na Figura 44.

A rotina de seccionamento manual do sistema é ativada apenas em *rising edge*, ou seja, o *switch* se comporta como botoeira de estado permanente e deve ser pressionada para cada troca de estado.

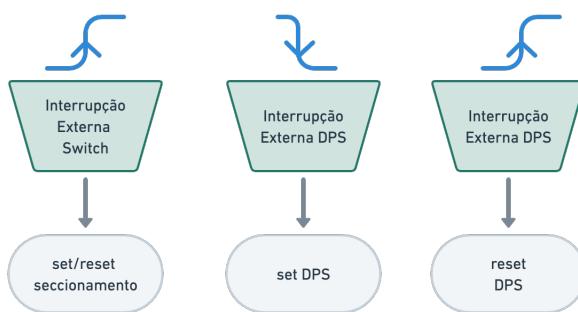


Figura 44 – Fluxograma das rotinas executadas após interrupção externa dos pinos voltados para seccionamento manual e monitoramento de vida útil do DPS, modificado de ([LEONARDO, 2021](#)).

Por sua vez, a rotina de monitoramento de vida útil do DPS é ativada em ambos *rising edge* e *falling edge*, ou seja, o *switch* se comporta como botoeira de estado momentâneo (*momentary switch*), em que o estado lógico alto identifica um DPS funcional e o estado lógico baixa identifica um DPS defeituoso.

#### 4.4.3.9 Controle de Eventos

O firmware foi modelado utilizando a técnica set/reset das flags identificadoras dos eventos. Dessa forma, utilizou-se uma variável de 8 bits para gerenciamento dos eventos conforme mostrado na Figura 45

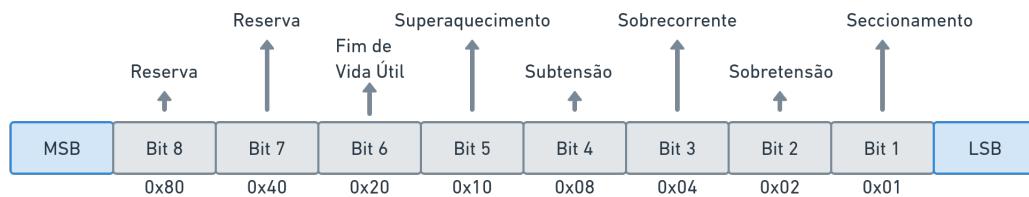


Figura 45 – Descritivo da variável utilizada para gerenciamento dos eventos, modificado de ([LEONARDO, 2021](#)).

Dessa forma, o módulo gerenciador de eventos utiliza operações lógicas para configuração de eventos e, consequentemente, consegue lidar com a ocorrência de eventos paralelos, considerando a prioridade de cada evento, como mostrado na Tabela 3.

---

```
void events_change_state(photovoltaic *ptr, uint8_t event)
{
    if (is_event_active(ptr->events_handler, event))
        ptr->events_handler &= ~event;
    else
        ptr->events_handler |= event;
}
```

---

Onde *ptr* é o ponteiro para a célula fotovoltaica monitorada e *event* é a variável que contém a flag do evento manipulado.

#### 4.4.3.10 Módulo de comunicação UART

Após cada finalização do processamento de coleta de dados através do dispositivo, assim quando é realizado a conversão da tensão, energia, corrente e potência, em valores decimais, uma *flag* sinaliza que o sistema está apto para transmissão dos dados via UART, para que seja enviado os dados para módulo de comunicação *wireless*. As configurações da UART definidas no STM32CubeIDE v1.10.1 estão exposta na Tabela 7.

Tabela 7 – Configurações da UART, para o módulo de comunicação de dados.

Parametro	USART3
Baud Rate	115200
Word Length	8 bits
Parity	None
Stop Bits	1
Data Direction	Receive and Transmit
Over Sampling	16 Samples
Clock Prescaler	1

Com a sinalização da *flag*, é realizado a conversão dos dados para *strings* e enviado pela USART3, utilizando o diretiva HAL\_UART\_Transmit.

#### 4.4.4 Desenvolvimento de firmware do módulo comunicação *wireless*

Tomando-se por base os requisitos do projeto, a Figura 55 apresenta o fluxograma do módulo de comunicação *wireless* modelado para o *firmware* embarcado.

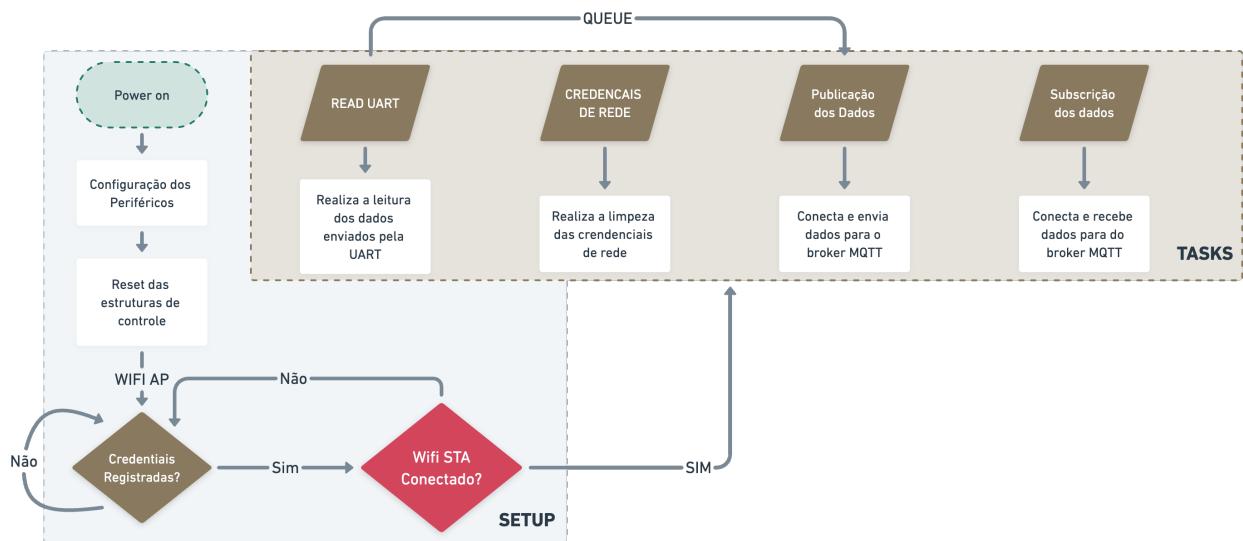


Figura 46 – Fluxograma de execução do *firmware* do módulo de comunicação.

##### 4.4.4.1 Configurações Gerais do Firmware

Neste contexto para implementação do código, foi utilizado o framework ESP-IDF, da Espressif, voltada para desenvolvimento em C e C++.

###### 4.4.4.1.1 Configuração dos GPIOs

A Tabela 8 apresenta a relação de configurações das GPIOs e suas respectivas funcionalidades.

Tabela 8 – Descricão dos GPIOs configurados.

ID	GPIO	Observação
BUTTON_RESET_WIFI	GPIO_NUM_32	Botão para resetar as credenciais de rede
LED_ON_OFF	GPIO_NUM_25	LED para indicar o funcionamento do módulo
LED_WIFI	GPIO_NUM_26	LED para indicar o conexão a rede
UART_TXD_PIN	GPIO_NUM_17	Envio de dados Comunicação UART
UART_RXD_PIN	GPIO_NUM_16	Recebimento de dados Comunicação UART
DEBUG_PIN	GPIO_NUM_19	Permite a inicialização do modo debug do firmware

#### 4.4.4.1.2 Configuração do Módulo UART

Para este trabalho, foi utilizado o canal 2 da UART da ESP32, visando a comunicação assíncrona com o módulo de coleta de dados. As configurações da UART estão definidas na estrutura `uart_config`, como mostrado no bloco de código abaixo.

---

```
const uart_config_t uart_config = {
    .baud_rate = 115200,
    .data_bits = UART_DATA_8_BITS,
    .parity = UART_PARITY_DISABLE,
    .stop_bits = UART_STOP_BITS_1,
    .flow_ctrl = UART_HW_FLOWCTRL_DISABLE,
    .source_clk = UART_SCLK_APB,
};
```

---

A *task* de leitura de dados é responsável por monitorar de maneira contínua os dados entregues no *buffer* serial do microcontrolador, e após a leitura, é verificado a existência desses dados e a diferenciação entre dados de tensão, corrente, potência e energia.

Por fim, são enviados os dados lidos para a *task* de publicação no MQTT, utilizando uma *queue*.

#### 4.4.4.1.3 Configuração do Wifi

A etapa de configuração de WiFi foi realizada, para facilitar o desenvolvimento dos testes em bancada e o ambiente em que seja realizado os testes, devido a escolha da comunicação *wireless*, houve a necessidade realizar a troca das credenciais do WiFi diversas vezes.

Para isso, o módulo *Wi-Fi*, foi utilizado dois modos de configuração Modo Estação (STA) e *Access Point*(AP). O modo AP permite que o microcontrolador crie um ponto de acesso para que dispositivos conectem a ele. O modo STA permite que o dispositivo conecte a uma rede externa.

Ao iniciar o o módulo de comunicação, de acordo com a Figura 46, e o mesmo não possua credenciais de rede de determinado local em sua memória flash, o modo AP é inicializado, paralelamente um serviço *web* também. Esse serviço *web*, é responsável por expor, ao usuário que conectar ponto de acesso do microcontrolador, duas rotas HTTP, no IP da rede, como mostrado na Figura 47. Após o registro das credenciais do WiFi é realizado a persistência da memória Flash do microcontrolador.

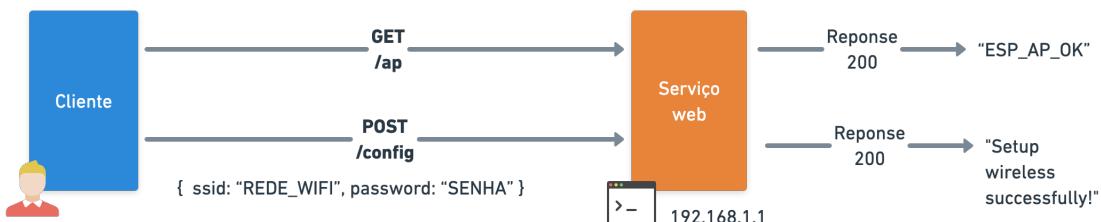


Figura 47 – Service web para configuração das credenciais de rede.

Utilizando o IP fixo (192.1168.1.1) do microcontrolador como *host* do serviço web e realizando uma requisição GET no endpoint /ap, é possível certificar se o serviço web está em funcionamento, recebendo como resposta um texto "ESP\_AP\_OK". Realizando uma requisição POST no endpoint /config, passando como corpo da requisição como *json*, o *ssid* e o *password* é possível salvar na memória flash do microcontrolador as credenciais de rede. Abaixo está o bloco de código de mostra as configurações da estrutura do modo AP.

```
wifi_config_t ap_config = {
    .ap = {
        .ssid = CONFIG_AP_WIFI_SSID,
        .ssid_len = strlen(CONFIG_AP_WIFI_SSID),
        .channel = EXAMPLE_ESP_WIFI_CHANNEL,
        .password = CONFIG_AP_WIFI_PASSWORD,
        .max_connection = EXAMPLE_MAX_STA_CONN,
        .authmode = WIFI_AUTH_WPA_WPA2_PSK,
        .pmf_cfg = {
            .required = false,
        },
    },
};

ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_set_config(WIFI_IF_AP, &ap_config));
```

Após gravar as credenciais de rede e a reinicialização do microcontrolador, o dispositivo irá procurar as credenciais gravadas e inicializa o modo STA, no qual é conectado a rede externa que foi credenciada durante o processo em modo AP. Abaixo está o bloco de código que mostra as configurações da estrutura do modo STA.

---

```
wifi_config_t sta_config = { 0 };
strcpy((char *)sta_config.sta.ssid, credentials->ssid);
strcpy((char *)sta_config.sta.password, credentials->password);
ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_set_mode(WIFI_MODE_STA) );
ESP_ERROR_CHECK( esp_wifi_set_config(ESP_IF_WIFI_STA, &sta_config) );
```

---

#### 4.4.4.1.4 Configuração da Publicação e Subscrição no Broker MQTT

Após conexão do microcontrolador com a rede *Wi-Fi* externa e recebidos os dados coletados pelo módulo UART, é realizado a publicação dos dados no *broker* MQTT. Para conectar ao broker MQTT, foi configurado as credenciais na estrutura de cliente mqtt e inicializado a conexão, como mostrado no bloco de código abaixo.

---

```
const esp_mqtt_client_config_t mqtt_cfg = {
    .broker.address.uri = CONFIG_BROKER_URL,
    .credentials.username = USERNAME_BROKER_MQTT,
    .credentials.authentication.password = PASSWORD_BROKER_MQTT,
};

esp_mqtt_client_handle_t mqtt_client = esp_mqtt_client_init(&mqtt_cfg);
esp_mqtt_client_register_event(mqtt_client, ESP_EVENT_ANY_ID,
    mqtt_event_handler_publish, mqtt_client);
esp_mqtt_client_start(mqtt_client);
```

---

Utilizando a diretiva esp\_mqtt\_client\_publish é realizado a publicação dos dados no broker MQTT.

Por fim, a subscrição dos dados é utilizada caso necessite uma operação forçada do seccionamento do relé do módulo de coleta de dados. Para isso, foi utilizado uma função mqtt\_event\_handler, configurada no bloco de código mostrado anteriormente, que permite a captura do evento de recebimento de dados, assim, após um disparo de dados que passa pelo *broker* em um determinado tópico MQTT para seccionamento dos relés é realizado a captura de dados e enviado para uma possível conexão da UART com o módulo de coleta de dados.

#### 4.4.5 Broker e Dashboard

O serviço de mensagem MQTT Mosquitto, o **broker** da aplicação, responsável por gerenciar todas as mensagens entre os remetentes e os receptores, foi escolhido para este trabalho devido ao reconhecimento do mesmo dentro do atual mercado e por ser *open-source*. Dessa forma, o *broker* foi configurado utilizando através do arquivo mosquitto.conf, com as seguinte configurações:

---

```
persistence false
allow_anonymous true
connection_messages true
log_type all
listener 1883
persistence_location /mosquitto/data/
log_dest file /mosquitto/log/mosquitto.log
```

---

Para o desenvolvimento do Dashboard, o Node-RED foi utilizado, que é uma ferramenta de programação para conectar dispositivos de hardware, APIs e serviços online.

A função principal desta ferramenta é consumir os *topics* MQTT e expor os dados em um dashboard. Nos casos do sensoriamento e a lógica dos componentes de *dashboard*, foi necessário converter os valores de *char* para *float*. Para isso, na tela de desenvolvimento do Node-red foi construído os *flows* mostrados nas Figuras 50, 49 e 50.

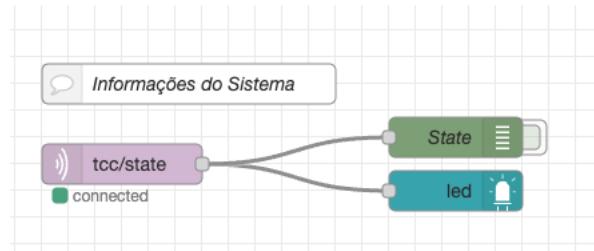


Figura 48 – Fluxo responsável por indicar o funcionamento do sistema.

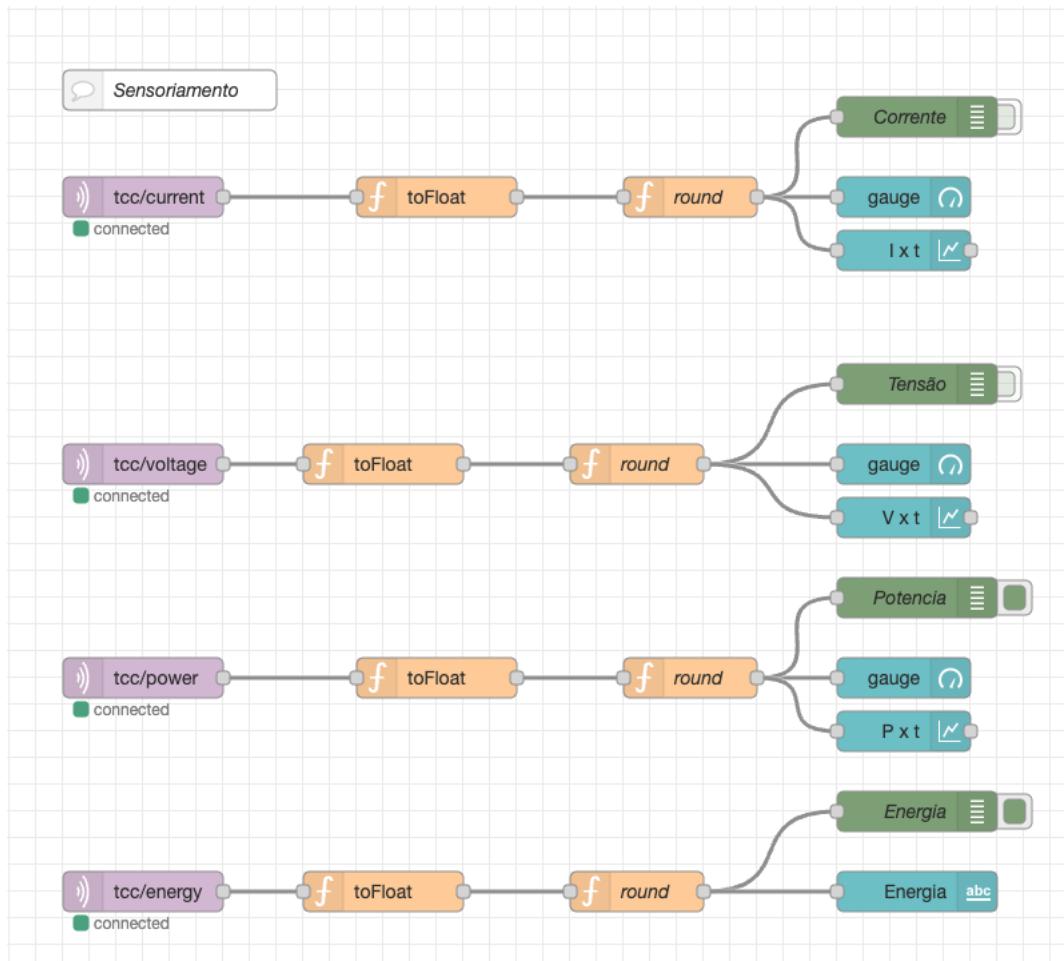


Figura 49 – Fluxo responsável por coletar as informações enviadas durante a publicação do módulo de comunicação e expor utilizando nodes chamado gauge, graphics e text.

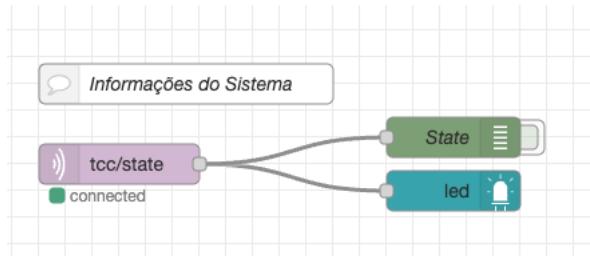


Figura 50 – Fluxo responsável por enviar para publicação, e consequência forçar o seccionamento dos relés do módulo de coleta de dados.

Além disso, o Node-red permite a visualização dos dados através de um *dashboard*, como mostrado na Figura 51.



Figura 51 – Visualização em tempo real dos dados no Node-red.

Ambos os serviços, **broker** e o *Node-red*, devem ser colocados em execução em *containers*, utilizando *Docker*, plataforma *open-source* que facilita a criação e administração de ambientes isolados, em que permite a implantação de aplicações. Para isso, foi criado um docker-compose.yaml mostrado no bloco de código abaixo.

```
version: "3"
services:
  broker:
    image: eclipse-mosquitto
    volumes:
      - ./mosquitto/config/mosquitto.conf:/mosquitto/config/mosquitto.conf
      - ./mosquitto/data:/mosquitto/data
      - ./mosquitto/log:/mosquitto/log
    hostname: mosquitto
    container_name: mosquitto
    expose:
      - "1883"
      - "9001"
    ports:
      - "1883:1883"
      - "9001:9001"

  node-red:
    depends_on:
      - broker
    image: nodered/node-red:latest
    volumes:
```

---

```

- "./node-red:/data"
ports:
- "1880:1880"

```

---

Para executar os serviços com a configuração padrão, é necessário ter Docker instalado em máquina e executar a diretiva ***docker-compose up*** no mesmo diretório do arquivo *yaml*.

## 4.5 Análise de Desempenho do Sistema

Para análise de desempenho do sistema projeto, nesta seção serão apresentados os resultado dos ensaios experimentais relacionados a medição ou monitoramento de cada funcionalidade.

Durante os teste em bancada, foi utilizado a topologia mostrada na Figura 18 e seguindo as orientações da Seção 3.3.2, o protótipo implementado, teve como entrada a tensão  $V_{out}$  e a corrente  $I_L$ .

### 4.5.1 Caracterização da Corrente e Tensão

Analogamente ao circuito de condicionamento e aquisição de tensão, foi realizado um ensaio experimental para caracterização do circuito de condicionamento e aquisição de tensão e corrente.

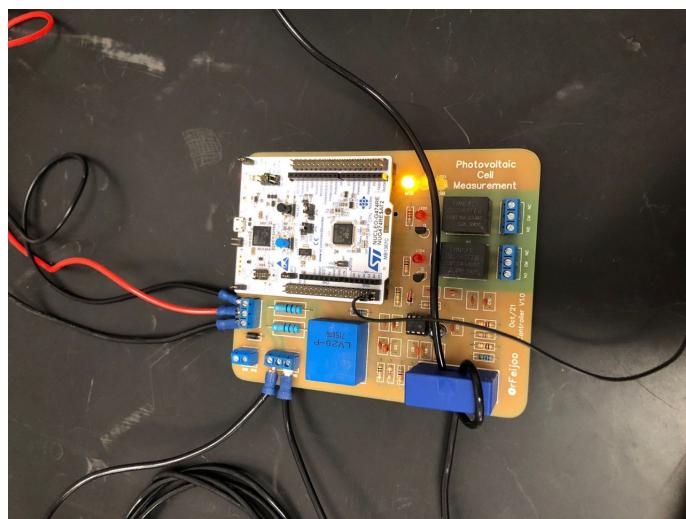


Figura 52 – Foto da conexão entre os circuito de condicionamento de tensão e corrente e a fonte dos monitorados.

Após a montagem do sistema, foi realizado as medições de tensão do nó de conexão com o GPIO PC2 ( $V_{meas}$ ) do microcontrolador e tensão do nó de conexão com o GPIO PC3 ( $I_{meas}$ ), os resultados obtidos foram colocar na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultado do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento para medição de tensão e corrente.

$V_{varivolt}$ [V]	$V_{out}$ [V] Multímetro	$I_L$ [A] Multímetro	$I_{meas}$ [V]	$V_{meas}$ [V]	Carga [ $\Omega$ ]
57	50	2	0,28	0,3	50
76	66,4	2,656	0,384	0,4	50
100	88	3,52	0,512	0,53	50
125	109,7	4,388	0,639	0,67	50
150	132,2	5,288	0,771	0,81	50
175	153,8	6,152	0,897	0,95	50
200	176,1	7,044	1,028	1,1	50
225	198,4	7,936	1,156	1,25	50
236	207,6	8,304	1,206	1,31	50

Onde  $V_{varivolt}$  é a tensão de saída da fonte C.A.,  $V_{out}$  é a tensão do bamento C.C. e  $V_{meas}$  é a tensão medida na saída do circuito de condicionamento de tensão.

Observe também que o circuito de condicionamento de corrente se comporta com um transdutor, com uma entrada de corrente e uma saída de tensão. Dessa forma, a corrente  $I_{meas}$  é medida em Volts, possibilitando a medição por parte do microcontrolador.

A partir dos resultado obtidos na Tabela 9, pode-se observar a linearidade do circuito de condicionamento de tensão, tal que é possível a obtenção da equação do ganho do circuito, conforme indicado na Equação 4.37.

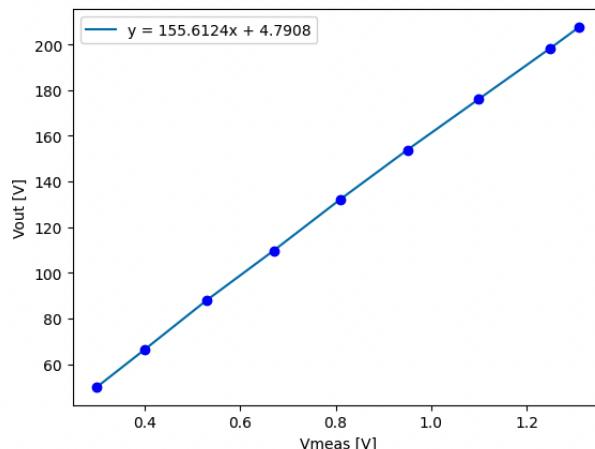


Figura 53 – Gráfico de dispersão dos resultados obtidos na caracterização do circuito de condicionamento de tensão.

$$V_{out} = 155.6124x + 4.7908 \quad (4.37)$$

Onde, novamente,  $V_{meas}$  é a tensão medida na saída do circuito de condicionamento e  $V_{out}$  é a tensão estimada na entrada do barramento C.C.

Novamente, a partir dos resultados obtidos na Tabela 9, é apresentado um modelo linear ajustado ao circuito de condicionamento de corrente, para obtenção da equação de ganho do circuito.

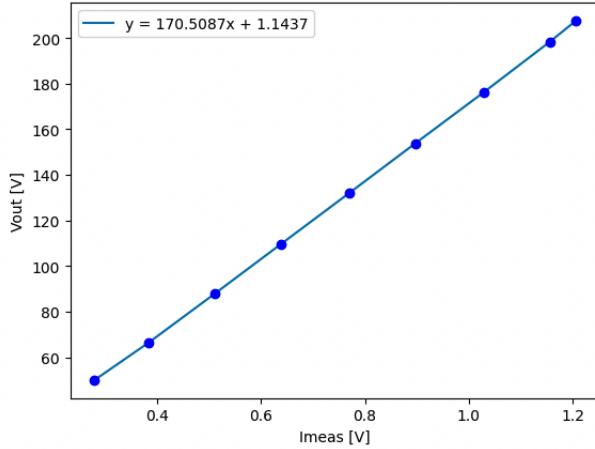


Figura 54 – Gráfico de dispersão dos resultados obtidos na caracterização do circuito de condicionamento de corrente.

$$V_{out} = 170.5087x + 1.1437 \quad (4.38)$$

#### 4.5.2 Integração dos módulos

Após a caracterização do circuito de condicionamento, foi realizado integração entre o módulo de coleta de dados e módulo comunicação, como mostrado na Figura 55.

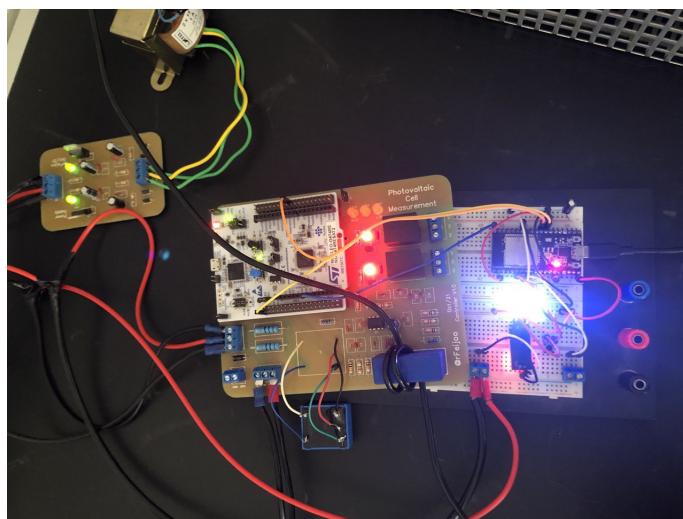


Figura 55 – Foto da conexão entre o módulo de coleta de dados e módulo de comunicação, além das conexões de tensão de entrada e alimentação.

Após a montagem do sistema, foi realizado medições, de acordo com a entrada de tensão de 50V a 200V, acrescida a cada 25 volts.

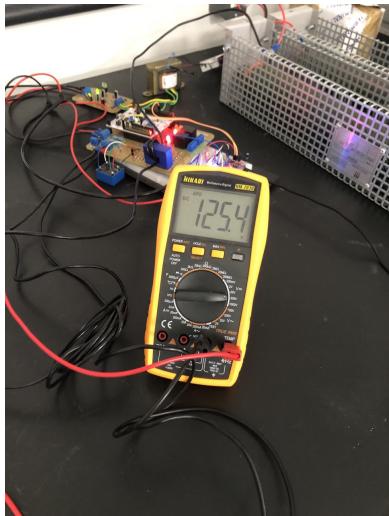


Figura 56 – Foto da medição de tensão de entrada em 125,40V.



Figura 57 – Resultados de tensão, corrente, potência e energia do dashboard, com a tensão de entrada com 125,40V.

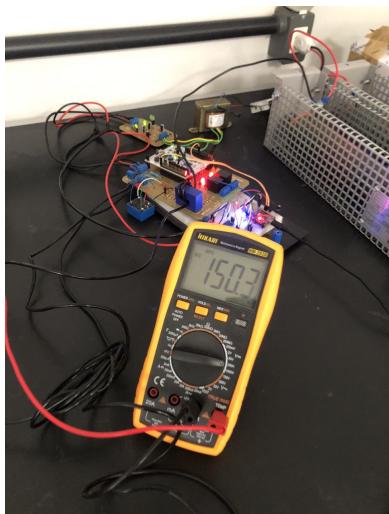


Figura 58 – Foto da medição de tensão de entrada em 150,30V.



Figura 59 – Resultados de tensão, corrente, potência e energia do dashboard, com a tensão de entrada com 150,30V.

Analizando a Tabela 10, com resultados finais, pode-se calcular a precisão dos valores obtidos de tensão,

$$Precisão_{tensão} = \sum(V_{out_i}/Voltage_i)/7 * 100 = 0,9940 \quad (4.39)$$

A precisão dos valores obtidos de corrente,

$$Precisão_{corrente} = \sum(I_L/Corrente_i)/7 * 100 = 0,8978 \quad (4.40)$$

Sendo foram geradas 7 amostras para realização deste cálculo.

Tabela 10 – Dados obtidos no Dashboard, a partir da tensão de entrada  $V_{out}$  e a corrente  $V_L$  gerada.

$V_{out}$ [V]	$I_L$ [A]	Voltage[v]	Corrente[A]	Power[W]	Energia[kWh]
50,10	3,006	51,77	3,31	0,1931	0,2295
75,40	4,524	75,72	5,028	0,43	0,2407
100,10	6,006	99,82	6,7022	0,7601	0,2638
125,40	7,524	124,97	8,43	1,1967	0,2952
150,30	9,018	150,14	10,1	1,7108	0,5007
175,10	10,506	174,62	11,74	2,34	0,6201
200,00	12	203,15	13,4	3,1	0,6886



## 5 Conclusão

Como demonstrado ao longo deste trabalho, a instalação de sistemas de geração solar fotovoltaica, seja de forma distribuída ou centralizada, apresentou um crescimento significativo nos últimos anos e continua com perspectivas de crescimento para os próximos anos. Nesse sentido, o estabelecimento de sistemas que garantam instalações elétricas automatizando a instalação e de fácil instalação e manutenção tem se mostrado promissora em termos de segurança.

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de um protótipo de hardware e firmware para automatizar caixas de junção usadas regime C.C. Dentre as funções oferecidas por este sistema, destacam a medição de tensão, corrente, potência e energia.

No desenvolvimento de *firmware*, foi possível a implementação de um sistema de aquisição e processamento de dados, mais precisamente, de tensão e corrente, identificação de eventos (sobretensão, sobrecorrente, seccionamento, superaquecimento etc) e acionamento remoto com o usuário. Além disso, a parte de comunicação e envio dos dados para um serviço web, o que possibilita o tratamento, armazenamento e análise dos dados de várias maneiras. Os microcontroladores utilizados atenderam todas as necessidades do sistema, o que possibilita o protótipo ser escalável, ou seja, o crescimento de variáveis e grandezas monitoras.

O *hardware* do protótipo sofreu evoluções, com o uso de ferramentas profissionais, no qual, que permite a melhores de regras de fabricação e roteamento e gerenciamento de camadas da placa de circuito impresso, porém não foi possível a fabricação da mesma para os testes realizados.

Somando a isso, não foi possível o teste deste protótipo em um módulo real fotovoltaico, porém com as validações realizadas neste trabalho torna possível a utilização do mesmo em caso real. Tendo em vista a continuidade de desenvolvimento deste sistema, sugere-se os seguintes trabalhos futuros:

- Fabricação da placa de circuito impressos;
- Desenvolver ações automáticas de resposta adversidades em sistema implementado em um módulo fotovoltaico;
- Verificação de CRC dos dados entregues ao módulo de comunicação;
- Desenvolvimento de testes com sistemas fotovoltaicos reais;
- Informar em tempo real qual o evento que está ocorrendo.

- Gerar registro de eventos do sistema.

Por fim, todos os respectivos arquivos estão disponibilizados em  
[\(https://github.com/matheusgvieira/tcc\)](https://github.com/matheusgvieira/tcc) do trabalho no Github.

## Referências

- 55-P, C. T. L. *la\_55-p\_e.pdf*. <[https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/la\\_55-p\\_e.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/la_55-p_e.pdf)>. (Accessed on 04/29/2022). Citado 3 vezes nas páginas 10, 13 e 47.
- ABSOLAR. *Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo*. 2021. <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. (Accessed on 05/01/2022). Citado 2 vezes nas páginas 9 e 21.
- ALEXANDER, C. K.; SADIQU, M. N. *Fundamentos de circuitos elétricos*. [S.l.]: AMGH Editora, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 49.
- ALVARENGA, A. C.; FERREIRA, V. H.; FORTES, M. Z. Energia solar fotovoltaica: uma aplicação na irrigação da agricultura familiar. *Sinergia, São Paulo*, v. 15, n. 4, p. 311–318, 2014. Citado 5 vezes nas páginas 9, 26, 27, 28 e 29.
- BAKER, B. C. Select the right operational amplifier for your filtering circuits-analog design note adn003. *Microchip Technology Inc*, p. 1–2, 2003. Citado na página 34.
- BARRETO, A. C. Circuito integrado de condicionamento de sinais analógicos utilizando tecnologia 0, 5 um para sinais industriais e biomédicos. Universidade Federal de Campina Grande, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 33.
- BRASIL, E. S. *String Box Cc 2:2 1000v 17kw Ip40 2 Entradas 2 Saidas*. 2021. <[https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1131059355-string-box-cc-22-1000v-17kw-ip40-2-entradas-2-saidas-\\_JM#reco\\_item\\_pos=0&reco\\_backend=machinalis-v2p-pdp-boost-v2&reco\\_backend\\_type=low\\_level&reco\\_client=vip-v2p&reco\\_id=e9d88d83-2b91-4846-9f4e-8e44c80a635d](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1131059355-string-box-cc-22-1000v-17kw-ip40-2-entradas-2-saidas-_JM#reco_item_pos=0&reco_backend=machinalis-v2p-pdp-boost-v2&reco_backend_type=low_level&reco_client=vip-v2p&reco_id=e9d88d83-2b91-4846-9f4e-8e44c80a635d)>. (Accessed on 04/15/2022). Citado 2 vezes nas páginas 9 e 31.
- CLAMPER. *CLAMPER Solar SB - CLAMPER*. 2021. <<https://www.lojaclamper.com.br/dps-clamper-solar-string-box-18ka/p>>. (Accessed on 04/15/2022). Citado 2 vezes nas páginas 9 e 31.
- ENERGIA, S. . *Inversor Solar Fotovoltaico. - Sol e Energia*. 2018. <<https://solenergias.com.br/inversor-solar-fotovoltaico/>>. (Accessed on 04/15/2022). Citado 2 vezes nas páginas 9 e 31.
- ENERGÉTICA, E. de P. *Balanço Energético Nacional*. 2020. <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020\\_sp.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf)>. (Accessed on 05/01/2022). Citado na página 21.
- ESPRESSIF. *ESP-IDF FreeRTOS*. 2022. <<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/system/freertos.html>>. (Accessed on 23/09/2022). Citado na página 44.
- FRONTIN, S. d. O.; CARNEIRO, M. T. D. *Usina fotovoltaica Jaíba*. [S.l.]: Teixeira Gráfica e Editora LTDA, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 30.

IEC. Iec 61400-4-30 técnicas de medição e ensaio - métodos de medição de qualidade da energia. p. 1–16, 2012. Citado na página 58.

LATHI, B. P. *Sinais e sistemas lineares-2*. [S.l.]: Bookman, 2006. Citado na página 33.

LEM. *Voltage Transducer LV 20-P*. 2014. <<https://media.digikey.com/pdf/data%20sheets/lem%20usa%20pdfs/lv%2020-p.pdf>>. (Accessed on 04/17/2022). Citado 3 vezes nas páginas 10, 13 e 46.

LEM. *Datasheet LV 25-P*. 2021. <[https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/lv\\_25-p.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lv_25-p.pdf)>. (Accessed on 09/23/2022). Citado na página 51.

LEONARDO, R. F. *Desenvolvimento de um sistema de monitoramento para caixas de junção de sistemas fotovoltaicos*. [S.l.]: UnB, 2021. Citado 12 vezes nas páginas 10, 11, 13, 56, 57, 58, 60, 61, 63, 65, 66 e 67.

MALVINO, A.; BATES, D. J. *Eletrônica: Diódos, Transistores e Amplificadores-Série Tekne*. [S.l.]: AMGH Editora, 2011. Citado na página 50.

MAZIERO, C. A. Sistemas operacionais: conceitos e mecanismos. *Livro aberto*, 2014. Citado na página 44.

NAWAB, S.; OPPENHEIM, A.; WILLSKY, A. *Sinais e Sistemas*. [S.l.]: Pearson, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 32.

NILSSON, J. W. et al. *Circuitos elétricos*. [S.l.]: Addison-Wesley, 1995. Citado na página 27.

SEDRA, A. S. et al. *Microelectronic circuits*. [S.l.]: Oxford university press New York, 2004. v. 4. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 34.

SOLAR, N. *Como Funciona – Nutri Solar*. 2021. <<https://nutrisolar.com.br/como-funciona/>>. (Accessed on 04/04/2022). Citado 2 vezes nas páginas 9 e 27.

STMICROELECTRONICS. *Datasheet - STM32G474xB STM32G474xC STM32G474xE - Arm® Cortex®-M4 32-bit MCU+FPU, 170 MHz / 213 DMIPS, 128 KB SRAM, rich analog, math acc, 184 ps 12 chan Hi-res timer*. 2020. <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32g474cb.pdf>>. (Accessed on 09/24/2022). Citado na página 66.

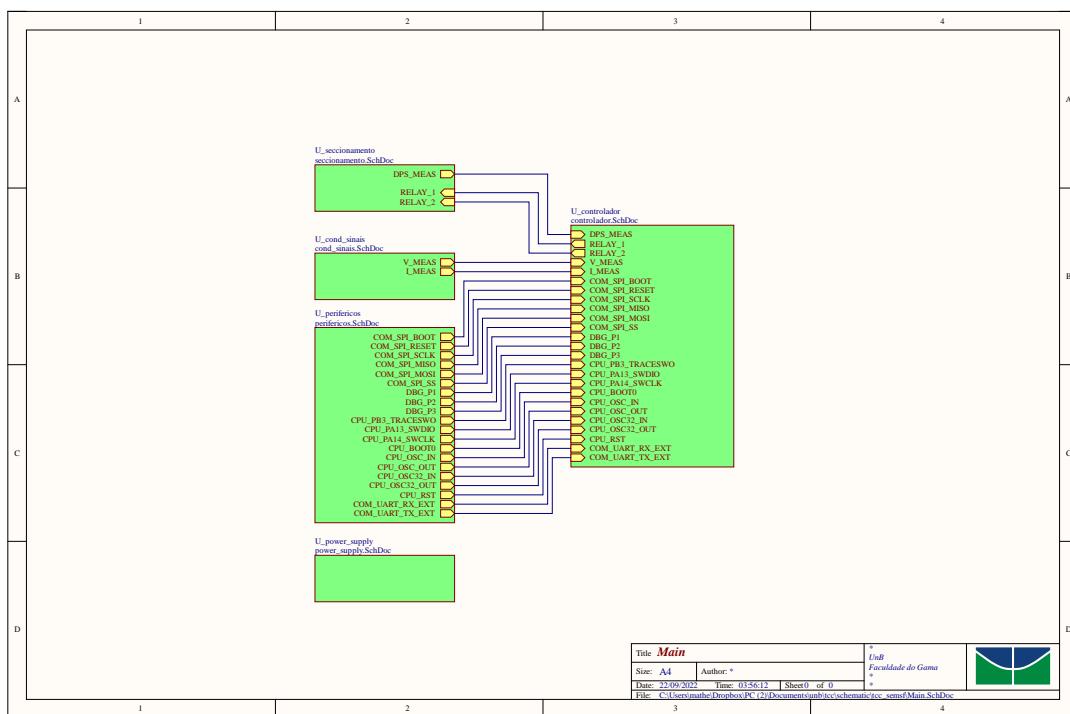
STMICROELECTRONICS. *STM32CubeIDE - Integrated Development Environment for STM32 - STMicroelectronics*. 2021. <<https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>>. (Accessed on 09/24/2022). Citado na página 60.

ZILLES, R. et al. *Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica*. [S.l.]: Oficina de textos, 2016. Citado na página 25.

# Apêndice A - Esquemáticos do Sistema

## Diagrama Geral

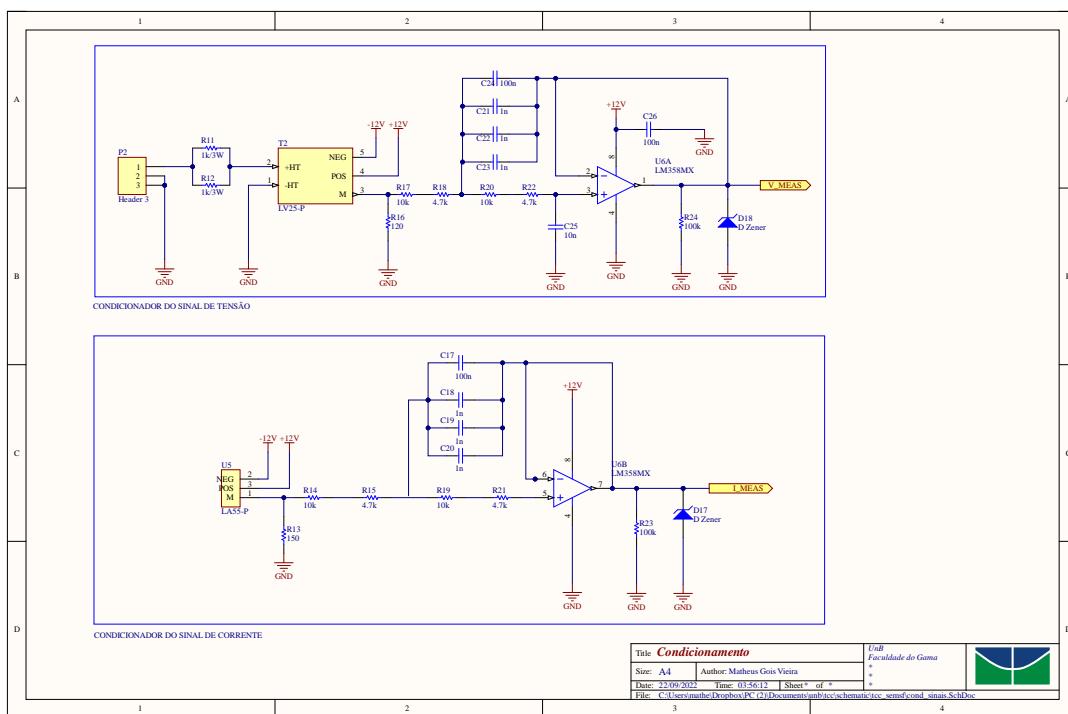
Figura 60 – Diagrama Geral.



Fonte: Autor, 2022

## Condicionador de Tensão e Corrente

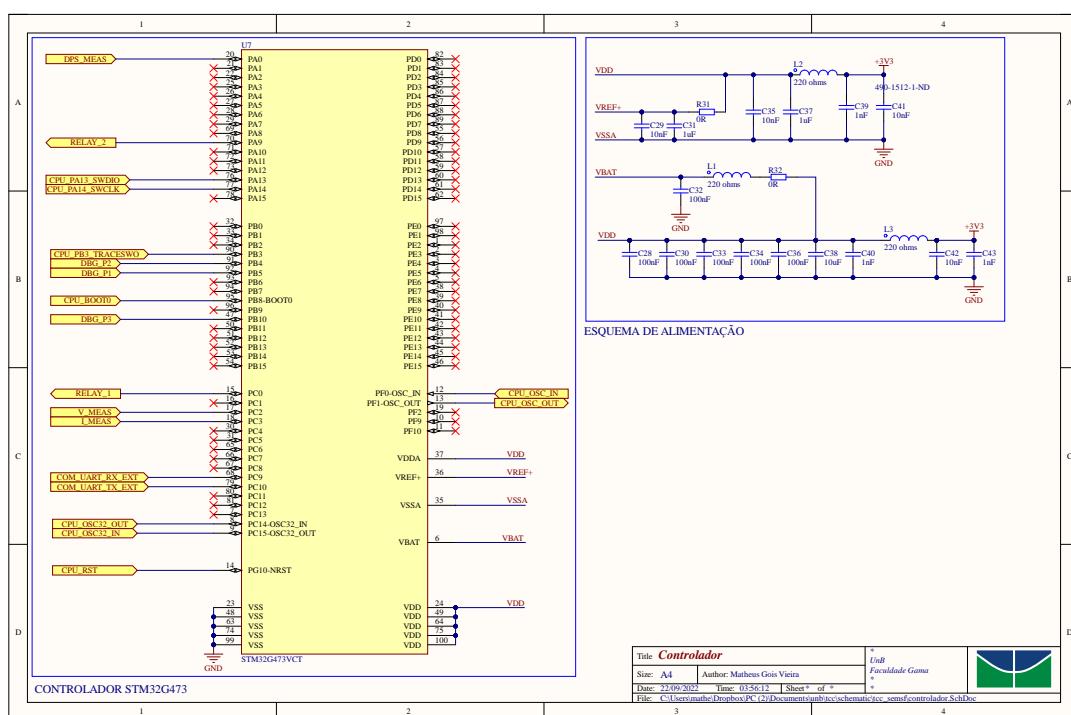
Figura 61 – Circuito condicionador de tensão e corrente



Fonte: Autor, 2022

## Controlador

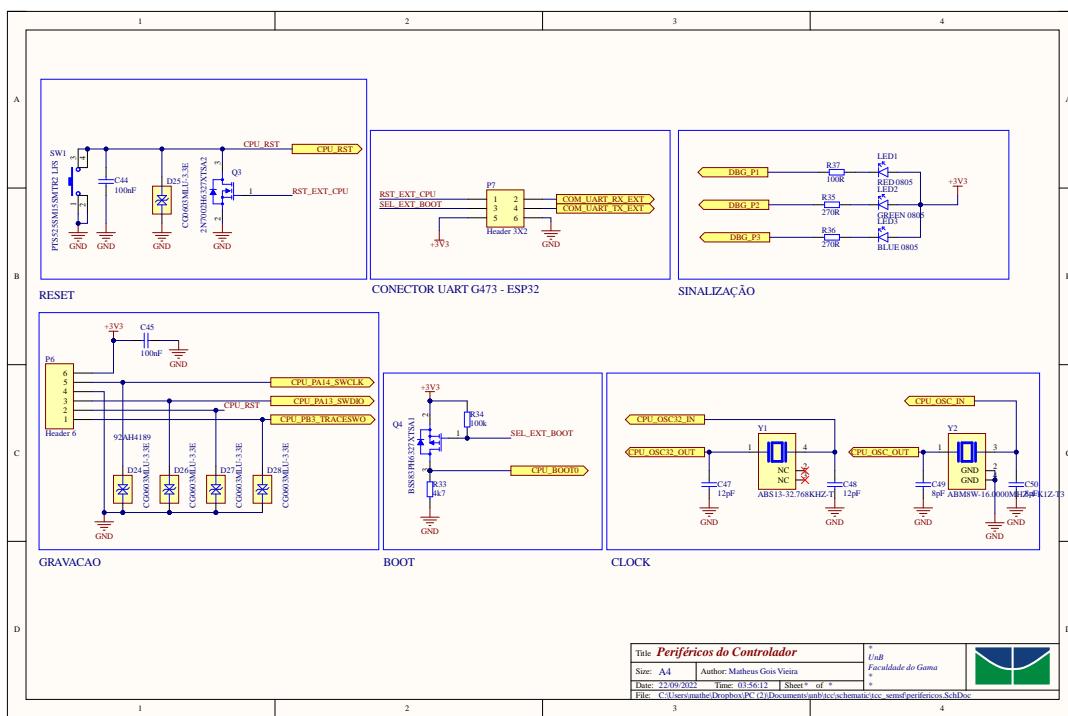
Figura 62 – Esquemático do microcontrolador STM32G473RE.



Fonte: Autor, 2022

## Periféricos do controlador

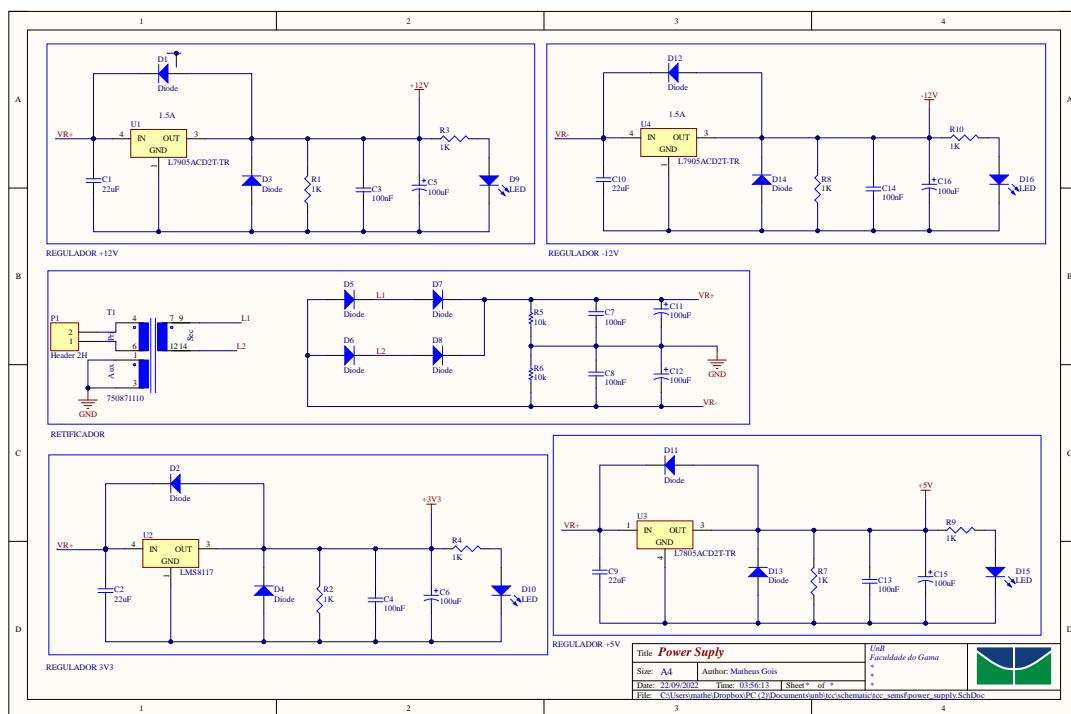
Figura 63 – Esquemático dos periféricos do microcontrolador STM32G474RE.



Fonte: Autor, 2022

## Fonte de alimentação

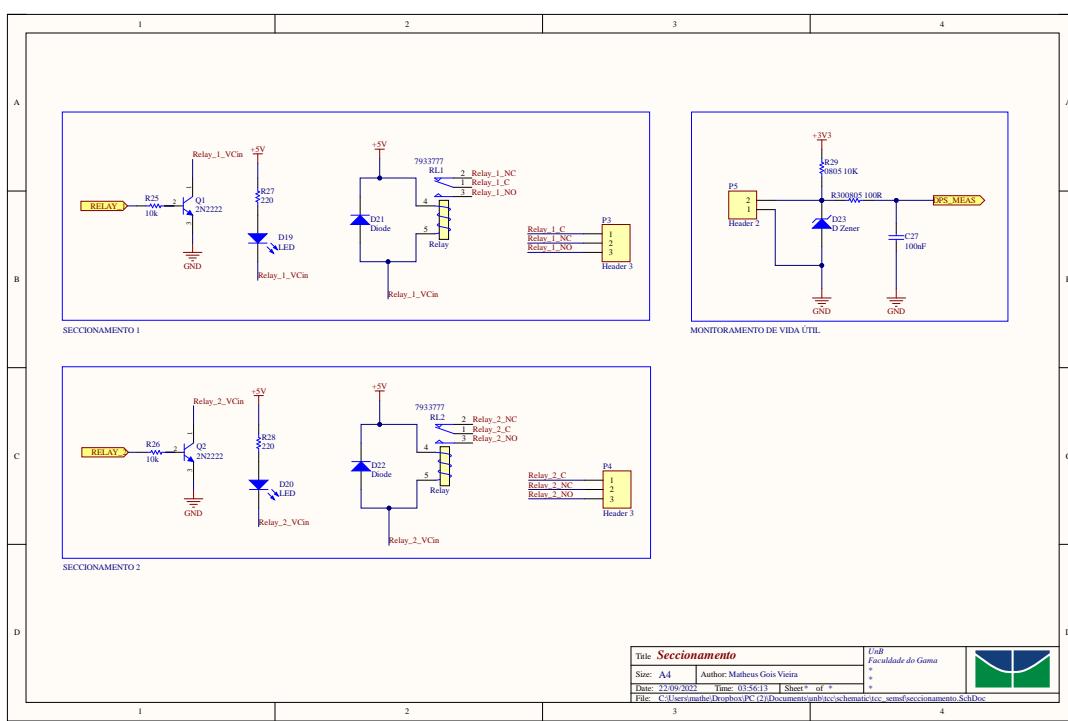
Figura 64 – Esquemático da fonte de alimentação.



Fonte: Autor, 2022

## Seccionamento

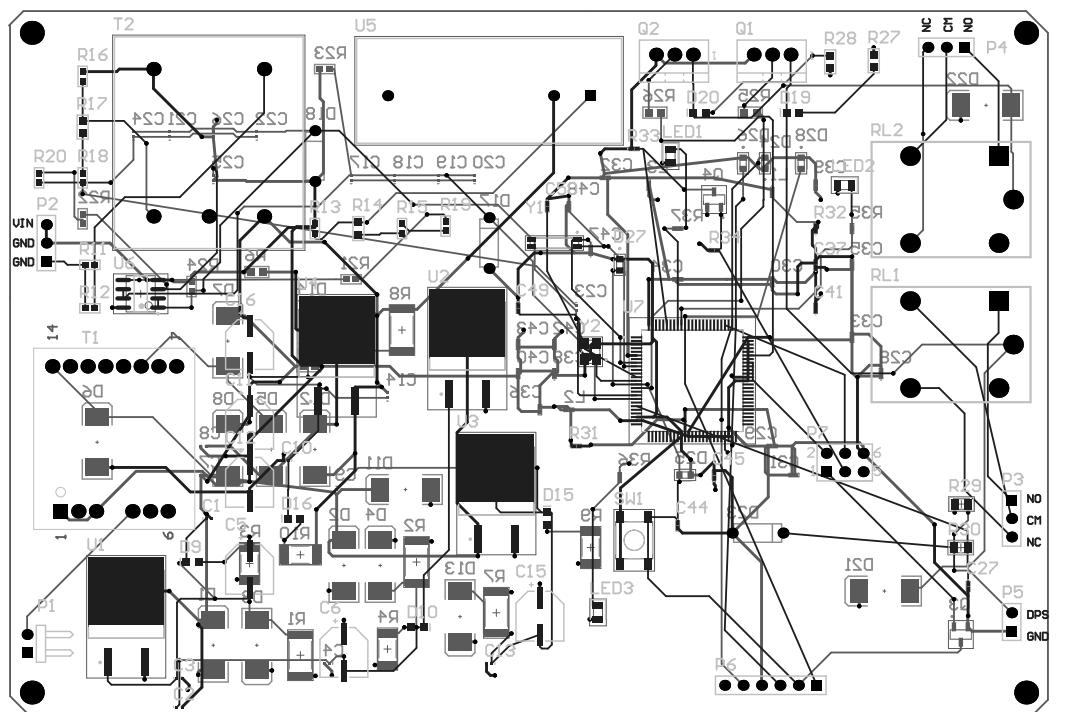
Figura 65 – Esquemático do seccionamento.



Fonte: Autor, 2022

## Roteamento da Placa de Circuito Impresso

Figura 66 – Roteamento da placa de circuito impresso gerado em pdf automaticamente pelo software *Altium*

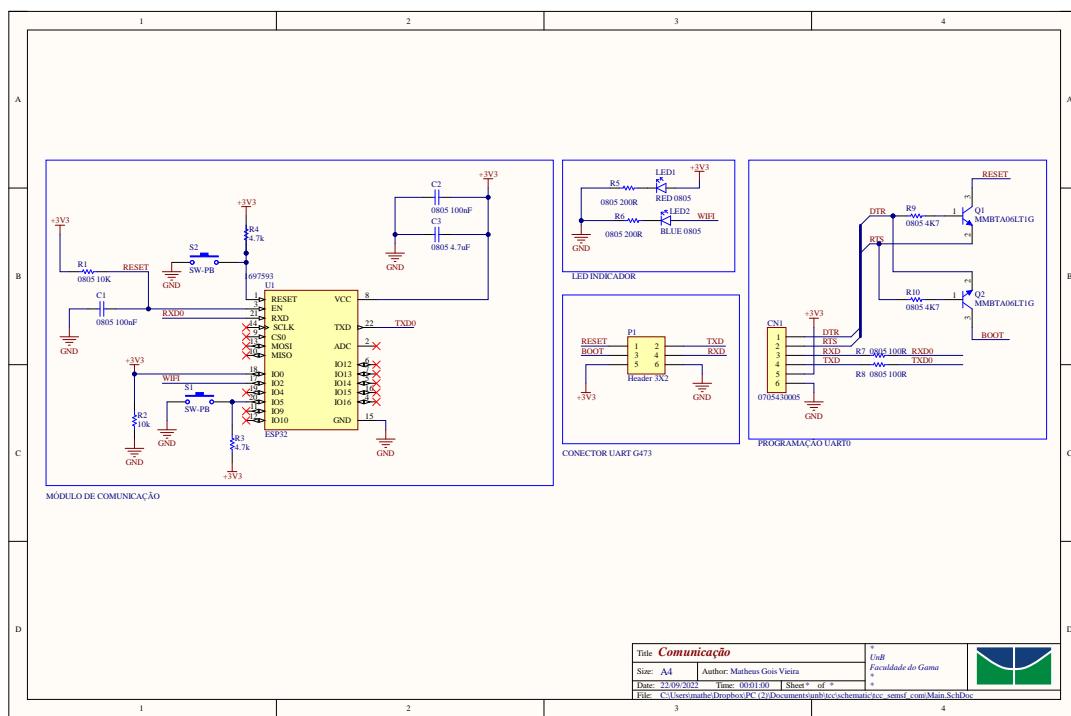


Fonte: Autor, 2022



## Módulo de comunicação

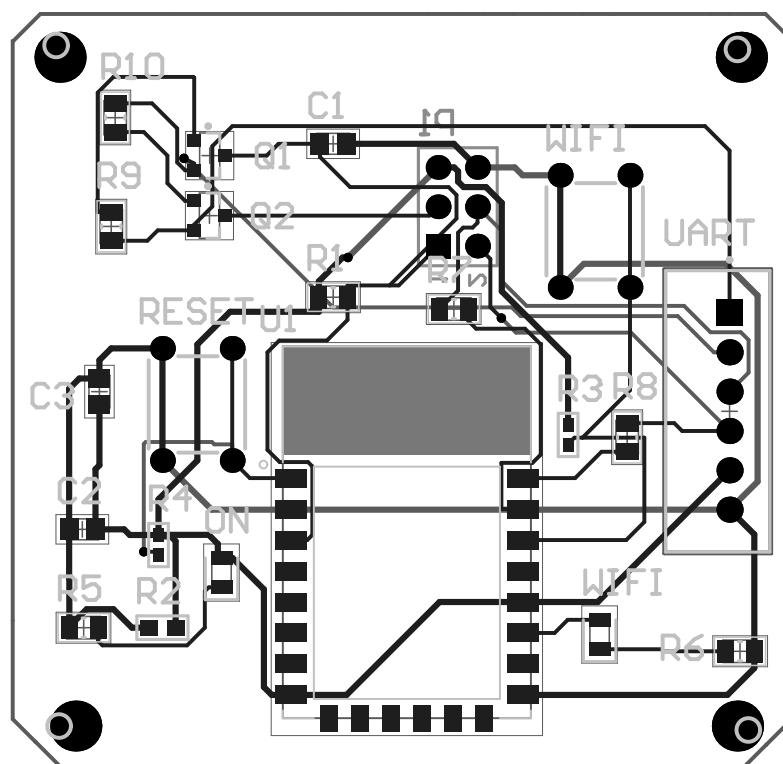
Figura 68 – Esquemático do modulo de comunicação Wireless



Fonte: Autor, 2022

## Roteamento da Placa de Circuito Impresso

Figura 69 – Roteamento da placa de circuito impresso gerado em pdf automaticamente pelo software *Altium*



Fonte: Autor, 2022

## Bill of Materials

Figura 70 – Tabela de componentes do módulo de comunicação utilizados gerada automaticamente pelo software *Altium*

BILL OF MATERIALS									
Bill of Materials for Project [tcc_semsf_.com.PriPcb] [No PCB Document Selected]									
#	Comment	Description	Manufacturer	Manufacturer Part Number	Case/Package	Supplier 1	Supplier Part Number 1	Designator	Quantity
1	0805 100nF	LC-Series 0805 0.1nF ±10 % Tolerance X7R SMD Multilayer Ceramic Capacitor	Yageo	C0805XK047080104	S05 Digi-Key	311-11402-2-ND	C1, C2	2	
2	0805 4.7UF	4.7UF ±10% 50V 0805	TEK	C0805ZCR1H475N125AB	S05 RSComponents	788341	Q5	1	
3	70543000000000000000	2.54mm Solder ST Top Entry Thru-Hole SL™ Tube	Maxx	70543000	RSComponents	6752432	DN	1	
4	RED 0805	Red SMD 420nm LED Indication - Discrete 2V 0805	LEDI				LED1	1	
5	BLUE 0805	Blue SMD 420nm LED Indication - Discrete 2V 0805	LEDI				LED2	1	
6	Header 302	30 Pin 2.54mm Pitch	PT				PT1	1	
7	MBTA105L110	Visible OptoPNP NPN 80V 0.5A 3.3% SOI-23-3	ON Semiconductor	MBTA105L110	S01-23-3 Digi-Key	MBTA105L110SOIC-1-ND	Q1, Q2	2	
8	0805 10K	10K Omega 0805 ± 1 % 0.05W 0.125Ω ± 10ppm/°C	Yageo	R0805PR-0110K	S03 RSComponents	8185183	R1	1	
9	0805 10K	10K Omega 0805 ± 1 % 0.05W 0.125Ω ± 10ppm/°C	Yageo	R0805PR-0110K	S03 RSComponents	71650-10-04251-FAD	R2	1	
10	0.1K	Resistor 0805 0.1KΩ 1W 200ppm/°C	Yageo	R0805PR-0101K	S03 RSComponents	8185183	R3	1	
11	0.1K	Resistor 0805 0.1KΩ 1W 200ppm/°C Marked SMD Purchased Current 10%	Yageo	R0805PR-0101K	S03 RSComponents	8185184	R4, R5	2	
12	0805 200R	200Ω ± 10% 0.05W 0.125Ω ± 10ppm/°C	Yageo	R0805PR-01200R	S03 RSComponents	615843	R6, R8	2	
13	0805 100R	100Ω ± 1.00% 0.125Ω ± 10ppm/°C 0805	Yageo	R0805PR-01100R	S03 RSComponents	615835	R7, R9	2	
14	0805 4K7	4700Ω ± 1.00% 0.125Ω ± 10ppm/°C 0805	Yageo	R0805PR-014K7	S03 RSComponents	615840	R10	1	
15	SW-PA	SW-PA					S1, S2	2	
16	CFP2	This WiFi module has a 32-MHz micro and clock speeds supporting 80-MHz or 160-MHz. Supports the IEEE 802.11a/b/g/n/ac WiFi standard. It also has an on-board antenna.					1697593	1	
Approved		Notes							22

Fonte: Autor, 2022