

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

Desenvolvimento de um sistema de monitoramento para caixas de junção de sistemas fotovoltaicos

Autor: Rafael Feijó Leonardo
Orientador: Prof. Dr. Alex Reis

Brasília, DF
2021



Rafael Feijó Leonardo

Desenvolvimento de um sistema de monitoramento para caixas de junção 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: Prof. Dr. Alex Reis

Brasília, DF

2021

Rafael Feijó Leonardo

Desenvolvimento de um sistema de monitoramento para caixas de junção de sistemas fotovoltaicos/ Rafael Feijó Leonardo. – Brasília, DF, 2021-
95 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Alex Reis

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2021.

1. Sistema de Monitoramento, Energia Fotovoltaica. 2. *String Box*. I. Prof. Dr. Alex Reis. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Desenvolvimento de um sistema de monitoramento para caixas de junção de sistemas fotovoltaicos

CDU 02:141:005.6

Rafael Feijó Leonardo

Desenvolvimento de um sistema de monitoramento para caixas de junção 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).

Brasília, DF, 17 de Novembro de 2021:

Prof. Dr. Alex Reis
Orientador

**Prof. Dr. Sandro Augusto Pavlik
Haddad**
Convidado 1

Prof^ª. Dr^ª. Loana Nunes Velasco
Convidado 2

Brasília, DF
2021

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Fabiana e Allan, que sempre me motivaram a extrair meu melhor.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus pela oportunidade da vida, bem como pela trajetória abençoada ao longo de tantos desafios.

Agradeço também aos meus pais, Fabiana e Allan, por todo esforço, conselhos e, principalmente, amor, que me tornaram quem sou hoje. Aos meus irmãos, Vítor e Thiago, pelo companheirismo e lealdade e a toda minha família que sempre me proporcionou tantos bons adjetivos.

A minha namorada, Rafaella, por todo incentivo, paciência e ajuda, que me incentivou nos momentos mais difíceis.

Aos meus grandes amigos Bismark, Giovanni e Igor, por compartilharem do mesmo momento acadêmico, motivando uns aos outros.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alex Reis, por toda a dedicação e atenção no desenvolvimento do trabalho, mas principalmente pelos valiosos ensinamentos passados.

Por fim, agradeço a todos que fizeram parte, direta ou indiretamente, da minha jornada.

Resumo

O aumento acelerado da demanda por energia elétrica em todo o mundo, associado a necessidade de diminuir a dependência por combustíveis fósseis, têm alavancado a busca por fontes de energia alternativas. Nos últimos anos, destaca-se o forte crescimento do setor solar fotovoltaico brasileiro, com sistemas conectados à rede, que chegou a crescer 216% em um período de três anos. O aumento da quantidade de sistemas fotovoltaicos implantados implicam na necessidade de se desenvolver sistemas que favoreçam a operação e manutenção, de forma a garantir que os equipamentos operem sob as condições projetadas e com menores riscos a saúde e meio ambiente. Nesse contexto, este trabalho tem por objetivo principal o desenvolvimento de um sistema microcontrolado, voltado para o monitoramento e controle de caixas de junção (*String Box*), se aproveitando do cenário promissor do setor.

Palavras-chaves: Sistema Microcontrolado. Monitoramento. Energia Solar. Caixa de *String*.

Abstract

The accelerated increase in the demand for electricity around the world, coupled with the need for decreasing dependence on fossil fuels, has leveraged the search for alternative energy sources. In the last years, the strong growth of the brazilian photovoltaic solar sector, specifically with systems connected on grid, has grew by 216% in a period of three years. In this context, this work aims to develop a embedded system, focused on monitoring and controlling String Boxes, taking advantage of the promising scenario in this sector.

Key-words: Embedded System. Monitoring. Solar Energy. String Box.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil. (ABSOLAR, 2021)	19
Figura 2 – Matriz Elétrica brasileira, referente ao ano 2021. (ABSOLAR, 2021)	19
Figura 3 – Geração Centralizada no Brasil. (ABSOLAR, 2021)	20
Figura 4 – Geração Distribuída no Brasil. (ABSOLAR, 2021)	20
Figura 5 – Estrutura da célula fotovoltaica. (VILLALVA, 2015)	23
Figura 6 – Estrutura de um módulo fotovoltaico. (ENERGêS, 2020)	24
Figura 7 – Influência da radiação solar na corrente de saída do módulo fotovoltaico. (VILLALVA, 2015)	24
Figura 8 – Curva característica I - V (corrente - tensão) dos painéis solares. (VILLALVA, 2015)	25
Figura 9 – Curva característica P - V (potência - tensão) dos painéis solares. (VILLALVA, 2015)	25
Figura 10 – Influência da temperatura ambiente na potência de saída dos módulos fotovoltaicos. (VILLALVA, 2015)	25
Figura 11 – Identificação das células, módulos, séries e arranjos fotovoltaicos. (UCF, 2014)	26
Figura 12 – Resultado da associação série e paralelo em arranjos fotovoltaicos. (VILLALVA, 2015)	26
Figura 13 – Diagrama Elétrico geral de uma <i>String Box</i> . (FRONTIN, 2017)	27
Figura 14 – Diagrama Elétrico geral de uma <i>String Box</i> . (FRONTIN, 2017)	27
Figura 15 – Caixa de junção real, modelo CLAMPER Solar SB. (CLAMPER, 2021b)	27
Figura 16 – Caixa de junção real, montada manualmente. (ML, 2021)	27
Figura 17 – Diagrama funcional de um sistema fotovoltaico conectado à rede. (ECOMAI, 2021)	28
Figura 18 – Discretização de um sinal contínuo no tempo. (USF, 2014)	29
Figura 19 – Fluxograma geral para aquisição e processamento de dados em sistemas microcontrolados. (BARRETTO, 2011)	29
Figura 20 – Topologia de circuito equivalente do <i>AmpOp</i> . (SEDRA, 2011)	30
Figura 21 – (a) Configuração amplificador não inversor. (b) Configuração amplificador inversor. (SEDRA, 2011)	31
Figura 22 – Resposta a frequência, ideal, dos quatro tipos de filtros: (a) passa baixas. (b) passa altas. (c) passa faixa. (d) rejeita faixa. (SEDRA, 2011)	32
Figura 23 – Topologia e resposta de um filtro passa baixa de primeira ordem. (SADIKU, 2013)	33
Figura 24 – Diagrama de blocos do <i>firmware</i> proposto.	38
Figura 25 – Diagrama elétrico do transdutor de tensão LV 20-P. (LEM, 2014b)	39

Figura 26 – Diagrama elétrico do transdutor de corrente LA 55-P. (LEM, 2014a)	40
Figura 27 – Topologia do filtro de 2ª ordem utilizado para remoção de componentes de alta frequência.	41
Figura 28 – Método de agregação em multicamadas, baseado na norma IEC 61400-4-30.	43
Figura 29 – Topologia de circuito para identificação de fim de vida útil do DPS.	45
Figura 30 – Foto do <i>kit</i> de desenvolvimento <i>NUCLEO-G474RE</i> , da <i>STM</i> <i>Microelectronics</i> . (ST, 2020a)	45
Figura 31 – Principais características do microcontrolador STM32G474RE. (ST, 2020b)	46
Figura 32 – Fluxograma do módulo gerenciador de eventos.	46
Figura 33 – Esquemático do circuito proposto para condicionamento e aquisição da tensão.	49
Figura 34 – Esquema do circuito montado para caracterização do circuito de condicionamento de tensão.	50
Figura 35 – Foto do Varivolt utilizado nos ensaios experimentais. Note que, apesar de o dispositivo ser trifásico, para o teste será utilizada somente uma fase.	51
Figura 36 – Foto da ponte retificadora utilizada nos ensaios experimentais. Note que, novamente, a ponte retificadora é trifásica, porém, serão usados apenas 4 diodos para o ensaio.	51
Figura 37 – Foto do filtro <i>LC</i> utilizado nos ensaios experimentais, tal que o indutor é de $1,5mH/20A$ e o capacitor é de $11,4\mu F/440V$.	51
Figura 38 – Foto do banco de resistores utilizado nos ensaios experimentais. Resistência: 100Ω . Potência máxima: $1KW$.	52
Figura 39 – Foto do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de tensão para condição inicial, ou seja, para um sinal de $0V$.	52
Figura 40 – Fotos dos resultados obtidos no ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de tensão, para sinais entre $25V$ a $250V$.	53
Figura 41 – Gráfico de dispersão dos resultados obtidos na caracterização do circuito de condicionamento de tensão.	54
Figura 42 – Esquemático do circuito proposto para condicionamento e aquisição da corrente.	54
Figura 43 – Foto da conexão entre os circuitos de condicionamento de tensão e corrente e a fonte dos sinais monitorados.	55
Figura 44 – Fotos do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de corrente, para sinais entre $0,2A$ a $3A$.	56
Figura 45 – Gráfico de dispersão dos resultados obtidos na caracterização do circuito de condicionamento de corrente.	57

Figura 46 – Foto ilustrativa de um DPS da linha <i>CLAMPER Front SR</i> , voltado para instalações em sistemas fotovoltaicos, da fabricante <i>Clamper</i> . (CLAMPER, 2021a)	58
Figura 47 – Foto do esquema elétrico de dispositivos DPS voltados para instalações em sistemas fotovoltaicos, com sinalização remota, da fabricante <i>Clamper</i> . (CLAMPER, 2021a)	58
Figura 48 – Esquemático do circuito proposto para o monitoramento da vida útil do DPS.	59
Figura 49 – Esquemático do circuito proposto para controle dos dispositivos relés, voltados para o seccionamento do circuito.	59
Figura 50 – Esquemático contendo o <i>pinout</i> do microcontrolador e os <i>LEDs</i> do módulo <i>debug</i>	60
Figura 51 – Esquemático do circuito de alimentação, baseado em um transformador com <i>TAP</i> central, um retificador completo e reguladores lineares de tensão.	61
Figura 52 – Foto do <i>layout</i> projetado e da placa montada do sistema de alimentação. Dimensões: 92x58,45mm	63
Figura 53 – Foto do <i>layout</i> projetado e da placa montada do sistema de controle. Dimensões: 120x150mm.	63
Figura 54 – Fluxograma global de execução do <i>firmware</i>	64
Figura 55 – Tela de configuração dos <i>GPIOs</i> na plataforma <i>Cube IDE</i>	64
Figura 56 – Parâmetros de configuração dos módulos ADC1 e ADC2, respectivamente, para amostragem simultânea de tensão e corrente.	65
Figura 57 – Parâmetros de configuração do módulo ADC5, para amostragem da temperatura interna do processador.	66
Figura 58 – Parâmetros de configuração dos módulos TIM1 e TIM2, com frequências de 960Hz e 1Hz, respectivamente.	66
Figura 59 – Fluxograma do processo de conversão do módulo ADC via interrupções. Note que a linha tracejada indica o fluxo de atividades realizadas pelo módulo ADC, ou seja, sem demandar recursos do processador.	67
Figura 60 – 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 <i>uint32_t</i> , e, portanto, deve-se realizar operações lógicas para extração dos dados de tensão e corrente.	67
Figura 61 – Fluxograma da agregação em multi-camadas, após separação das amostras de corrente e tensão.	68
Figura 62 – Fluxograma da rotina de cálculo da potência e energia produzidas.	68
Figura 63 – <i>Printscreen</i> da rotina chamada após o término de uma conversão do módulo ADC 5.	69

Figura 64 – Fluxograma das rotinas executadas após interrupção externa dos pinos voltados para seccionamento manual e monitoramento de vida útil do DPS.	69
Figura 65 – Descritivo da variável utilizada para gerenciamento dos eventos.	70
Figura 66 – Rotina de <i>set/reset</i> das flags identificadores dos eventos.	70
Figura 67 – Foto do ensaio experimental relacionado ao seccionamento manual, sem detecção de qualquer evento.	71
Figura 68 – Foto do ensaio experimental após interação com a botoeira de seccionamento manual.	71
Figura 69 – <i>Printscreen</i> das macros referente aos limiares para identificação dos eventos.	72
Figura 70 – Resultados dos ensaios de 0V até, aproximadamente, 50V.	73
Figura 71 – Resultados dos ensaios de 100V até, aproximadamente, 200V.	74
Figura 72 – Resultado do ensaio de, aproximadamente, 215V.	75
Figura 73 – Resultados dos ensaios de 200V até, aproximadamente, 175V.	76
Figura 74 – Resultado do ensaio em, aproximadamente, 150V.	76
Figura 75 – Resultados dos ensaios de 100V até, aproximadamente, 25V.	77
Figura 76 – Plote dos resultados obtidos na medição de tensão e corrente, respectivamente, em função do número de amostras do ensaio.	78
Figura 77 – Resultado do ensaio voltado para validação do cálculo da potência e energia gerada.	79
Figura 78 – Resultado do ensaio voltado para validação do monitoramento da temperatura interna do microcontrolador.	80
Figura 79 – Resultado do ensaio voltado para validação do monitoramento de vida útil do componente DPS.	81

Lista de tabelas

Tabela 1 – Características gerais do transdutor de tensão <i>LV 20-P</i> , da fabricante <i>LEM</i> . (LEM, 2014b)	39
Tabela 2 – Características elétricas do transdutor de tensão <i>LV 20-P</i> , da fabricante <i>LEM</i> . (LEM, 2014b)	40
Tabela 3 – Características gerais do transdutor de corrente <i>LA 55-P</i> , da fabricante <i>LEM</i> . (LEM, 2014a)	41
Tabela 4 – Características elétricas do transdutor de corrente <i>LA 55-P</i> , da fabricante <i>LEM</i> . (LEM, 2014a)	41
Tabela 5 – Identificação dos eventos e suas respectivas ações de controle, ordenados por prioridade.	47
Tabela 6 – Tabela verdade do módulo <i>Debug</i>	47
Tabela 7 – Resultado do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento para medição de tensão.	53
Tabela 8 – Resultado do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento para medição de corrente.	57
Tabela 9 – Estimativa de consumo de corrente, considerando o pior cenário, ou seja, em que todos os circuitos e sub-circuitos estarão ligados.	61
Tabela 10 – Largura mínima de uma trilha, em função de sua espessura e corrente nominal. (LIMA, 2012)	62
Tabela 11 – Espaçamento mínimo entre trilhas adjacentes, em função da diferença de potencial. (LIMA, 2012)	62
Tabela 12 – Descrição dos <i>GPIOs</i> configurados na plataforma <i>Cube IDE</i>	65
Tabela 13 – Resultado da multiplexação da variável de gerenciamento dos eventos para o módulo <i>debug</i>	70
Tabela 14 – Resultado consolidado do ensaio de análise de desempenho do sistema de medição de corrente e tensão.	78

Lista de abreviaturas e siglas

<i>ANEEL</i>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>IEC</i>	Do inglês, International Electrotechnical Commission
<i>NBR</i>	Norma Brasileira Regulamentadora
<i>NR</i>	Norma Regulamentadora
<i>GC</i>	Geração Centralizada
<i>GD</i>	Geração Distribuída
<i>C.C.</i>	Corrente Contínua
<i>C.A.</i>	Corrente Alternada
<i>SFCR</i>	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
<i>MPPT</i>	Do inglês, Rastreamento do Ponto Máximo de Potência
<i>IOT</i>	Do inglês, Internet das Coisas
<i>ISR</i>	Do inglês, Rotina de Serviço de Interrupção
<i>ADC</i>	Do inglês, Conversor Analógico-Digital
<i>RTC</i>	Do inglês, Relógio em Tempo Real
<i>RF</i>	Do inglês, Radiofrequência
<i>sps</i>	Do inglês, Amostras por Segundo
<i>CMRR</i>	Do inglês, Relação de Rejeição em Modo Comum

Lista de símbolos

G	Prefixo 'Giga' (10^9)
M	Prefixo 'Mega' (10^6)
K	Prefixo 'Kilo' (10^3)
m	Prefixo 'Mili' (10^{-3})
μ	Prefixo 'Micro' (10^{-6})
n	Prefixo 'Nano' (10^{-9})
V	Tensão elétrica, dada em <i>Volt</i>
A	Corrente elétrica, dada em <i>Ampère</i>
W	Potência elétrica, dada em <i>Watts</i>
Wh	Energia elétrica, dada em <i>Watts-hora</i>
Hz	Frequência, dada em <i>Hertz</i>
dB	<i>Decibel</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivo Geral	21
1.1.1	Objetivos Específicos	21
1.2	Organização do Trabalho	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	Componentes do Sistema Fotovoltaico	23
2.1.1	Módulo Fotovoltaico	23
2.1.1.1	Características Gerais	24
2.1.1.2	Instalação em Corrente Contínua	25
2.1.2	Caixa de Junção ou <i>String Box</i>	26
2.1.3	Inversor Solar	27
2.1.3.1	Rastreamento do Ponto de Potência Máxima	28
2.1.3.2	Detecção de Ilhamento	28
2.2	Outros Conceitos Fundamentais	29
2.2.1	Teorema da Amostragem de Sinais	29
2.2.2	Condicionamento de Sinais	29
2.2.3	Amplificador Operacional	30
2.2.3.1	Amplificador Inversor e Não Inversor	31
2.2.4	Filtros Eletrônicos	32
2.2.4.1	Filtro Passa Baixas	32
3	METODOLOGIA	35
3.1	Análise de Requisitos	35
3.1.1	Requisitos Funcionais	35
3.1.2	Requisitos Não Funcionais	37
3.2	Arquitetura do Sistema	38
3.2.1	Diagrama de Blocos do Sistema	38
3.2.2	Medição de Tensão e Corrente	38
3.2.2.1	Transdutor de Tensão LV 20-P	39
3.2.2.2	Transdutor de Corrente LA 55-P	40
3.2.2.3	Filtro Anti <i>Aliasing</i>	41
3.2.2.4	Aquisição e Processamento	42
3.2.3	Cálculo da Potência e Energia Produzida	44
3.2.4	Monitoramento de Vida Útil do DPS	45
3.2.5	Seccionamento do Circuito	45

3.2.6	Microcontrolador	45
3.2.7	Gerenciamento de Eventos	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Projeto de Hardware do Protótipo	49
4.1.1	Condicionamento de Tensão	49
4.1.1.1	Caracterização do Circuito de Condicionamento de Tensão	49
4.1.2	Condicionamento de Corrente	54
4.1.2.1	Caracterização do Circuito de Condicionamento de Corrente	55
4.1.3	Monitoramento de Fim de Vida Útil do DPS	58
4.1.4	Seccionamento do Circuito	59
4.1.5	Microcontrolador	60
4.1.6	Fonte de Alimentação	60
4.1.7	Placa de Circuito Impresso	61
4.1.7.1	Requisitos de <i>Layout</i>	62
4.1.8	Produção das <i>PCIs</i>	63
4.2	Desenvolvimento de Firmware do Protótipo Funcional	64
4.2.1	Configurações Gerais do <i>Firmware</i>	64
4.2.1.1	Configuração dos <i>GPIOs</i>	64
4.2.1.2	Configuração dos Módulos ADC	65
4.2.1.3	Configuração dos <i>Timers</i>	66
4.2.2	Amostragem e Processamento de Corrente e Tensão	66
4.2.3	Cálculo de Potência e Energia	68
4.2.4	Aquisição e Processamento da Temperatura Interna do Processador	68
4.2.5	Interrupções Externas	69
4.2.6	Gerenciador de Eventos	69
4.2.6.1	Módulo <i>Debug</i>	70
4.3	Análise de Desempenho do Sistema	71
4.3.1	Seccionamento Manual	71
4.3.2	Medição de Tensão e Corrente	72
4.3.3	Medição de Potência e Energia	79
4.3.4	Monitoramento da Temperatura Interna	80
4.3.5	Monitoramento da Vida Útil do DPS	81
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
	REFERÊNCIAS	85

ANEXOS	87
ANEXO A – ESQUEMÁTICO COMPLETO	89
ANEXO B – LISTA DE MATERIAIS	95

1 Introdução

Os sistemas de energia elétrica têm passado, nas últimas décadas, por grandes alterações em paradigmas de projeto, operação e manutenção de instalações, bem como modernização de processos, as quais estão associadas aos diversos avanços tecnológicos e preocupações com as mudanças climáticas, eficiência energética e sustentabilidade, segurança de suprimento, dentre outros aspectos. Nesse sentido, o aumento acelerado da demanda por energia elétrica em todo o mundo, associado a necessidade de diminuir a dependência por combustíveis fósseis, têm alavancado a busca por fontes de energia renováveis. Dentre estas, destaca-se a de origem solar fotovoltaica, a qual tem se apresentado como uma eminente estratégia para a geração de energia elétrica no Brasil e no Mundo

No Brasil, conforme apresentado nas Figuras 1 e 2, o número de sistemas fotovoltaicos conectados à rede tem aumentado consideravelmente ao longo dos 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 (EPE, 2020).

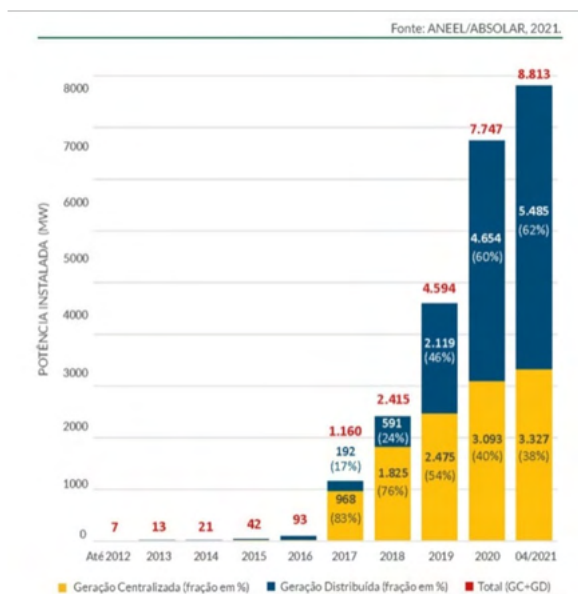


Figura 1 – Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil. (ABSOLAR, 2021)

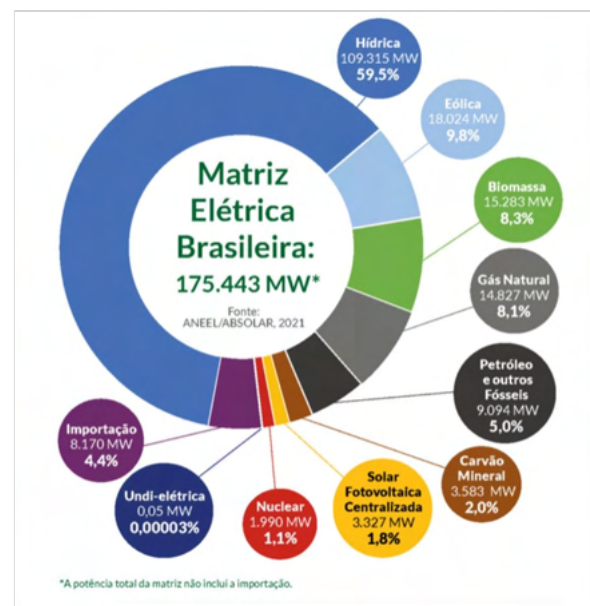


Figura 2 – Matriz Elétrica brasileira, referente ao ano 2021. (ABSOLAR, 2021)

No quesito Geração Centralizada, conforme dados apresentados na Figura 3, as principais fontes geradoras de energia solar fotovoltaica estão localizadas nas regiões Nordeste (Bahia, Pernambuco, Ceará, Piauí, Rio Grande do Norte e Paraíba) e Sudeste (Minas Gerais e São Paulo), e, juntas, somam uma potência total instalada de, aproximadamente, 3,3GW (ABSOLAR, 2021). Baseado nos projetos contratados em leilões do

Ambiente de Contratação Regulada (ACR), é previsto que o Brasil atinja a marca de potência operacional de 26GW até o ano de 2025, com investimentos de mais de R\$25,4 bilhões no setor. (PORTAL SOLAR, 2020)

Outra grande evolução para o setor solar fotovoltaico foi a regulamentação da Geração Distribuída (GD), através da Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012. Nesta, foi estabelecido o sistema de compensação de energia para micro e minigerações conectadas às redes de distribuição, favorecendo ao consumidor a geração de sua própria energia elétrica, a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição local. (ANEEL, 2012)

Na GD, as fontes eólica, hídrica e biomassa juntas representam 2%, enquanto a fonte solar fotovoltaica representa 97,1% das instalações, totalizando 470.156 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, com potência operacional estimada em 4,7GW, conforme dados apresentados na Figura 4. Desde 2017, o Brasil vem ganhando posições no *Ranking* Global de Capacidade Instalada - 26° em 2017, 21° em 2018 e 16° lugar desde 2019. O forte impulso no setor deve-se, principalmente, aos sistemas da Geração Distribuída, que somaram crescimento de até 216% durante o período. (PORTAL SOLAR, 2020) De acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), estima-se que, só em 2021, haja um crescimento de 60% na potência total instalada, relativa ao ano anterior, totalizando 13,9GW.



Figura 3 – Geração Centralizada no Brasil. (ABSOLAR, 2021)



Figura 4 – Geração Distribuída no Brasil. (ABSOLAR, 2021)

Com o avanço da geração solar fotovoltaica distribuída, é necessário o estabelecimento de procedimentos e/ou sistemas que assegurem a qualidade e segurança das instalações elétricas. De fato, o desenvolvimento de equipamentos que permitam o acompanhamento da operação de sistemas fotovoltaicos, viabilizando o monitoramento da quantidade

de energia produzida e a identificação de possíveis falhas se mostra bastante atrativo. Tomando-se como referência este cenário, este trabalho de conclusão de curso tem por objetivo o desenvolvimento de um protótipo, constituído por hardware e software, dedicado à automatização de caixas de junção, as quais são usadas nos circuitos em corrente contínua de uma instalação fotovoltaica. Dentre as funcionalidades previstas neste sistema, destaca-se: medição de variáveis elétricas (tensão, corrente, potência e energia) na entrada da caixa de junção; acompanhamento do estado de vida útil do Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS); possibilidade de realização de manobras remotas do sistema.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um sistema embarcado 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.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Compreender os equipamentos que compõem um sistema de geração fotovoltaico;
- Identificar as funcionalidades das caixas de junção em sistemas fotovoltaicos;
- Desenvolver o projeto de *hardware*, abrangendo sensores, circuitos de condicionamento, microcontrolador e sistema de alimentação;
- Desenvolver o *firmware* para processamento das grandezas elétricas e acompanhamento da produção de energia;

1.2 Organização do Trabalho

O 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.

O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada para cumprir com os objetivos do trabalho, detalhando a arquitetura do sistema proposto.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões pertinentes ao projeto de *hardware* do protótipo, desenvolvimento do *firmware* e análise de desempenho do sistema.

No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho, bem como a proposta para trabalhos futuros.

Por fim, no Anexo A são apresentados todos os esquemáticos dos circuitos e sub-circuitos e no Anexo B é apresentada a lista de materiais (*BOM*) do sistema.

2 Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica sobre sistemas fotovoltaicos, abrangendo os seus principais componentes, além de conceitos fundamentais para o bom entendimento deste trabalho.

2.1 Componentes do Sistema Fotovoltaico

2.1.1 Módulo Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é o fenômeno físico que permite a transformação da energia proveniente do Sol em eletricidade. Isso ocorre quando a radiação solar incide sobre uma célula composta de materiais semicondutores, com propriedades específicas, que, por sua vez, geram uma diferença de potencial no material, conforme ilustrado na Figura 5. (VILLALVA, 2015)Dentre os diversos materiais semicondutores presentes no mercado, o silício é utilizado em 95% das células fotovoltaicas fabricadas no mundo. Isso devido a sua abundância e baixo custo. (VILLALVA, 2015)

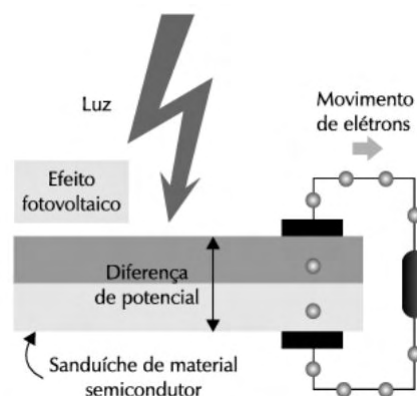


Figura 5 – Estrutura da célula fotovoltaica. (VILLALVA, 2015)

O módulo fotovoltaico, também conhecido como placa solar ou painel solar, é composto por um conjunto de células fotovoltaicas montadas sobre uma estrutura rígida e conectadas eletricamente entre si, conforme esquematizado na Figura 6. Uma única célula fotovoltaica fornece uma tensão elétrica de, aproximadamente, 0,6V. Para obter tensões maiores, os projetistas conectam 36, 54, 60 ou mais células em série. (VILLALVA, 2015)

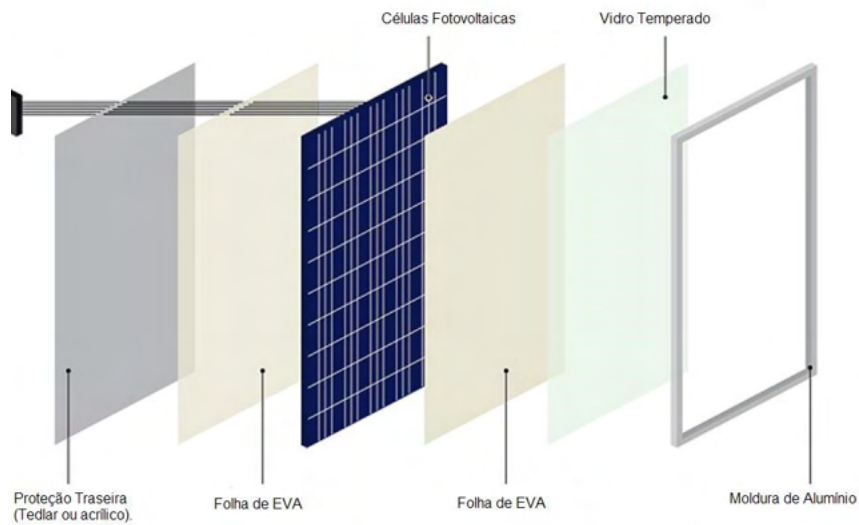


Figura 6 – Estrutura de um módulo fotovoltaico. (ENERGÊS, 2020)

2.1.1.1 Características Gerais

Tipicamente, os módulos fotovoltaicos se comportam como fontes de corrente, ou seja, o painel produz uma corrente contínua em função da radiação solar incidente sobre a placa, conforme exemplificado na Figura 7.

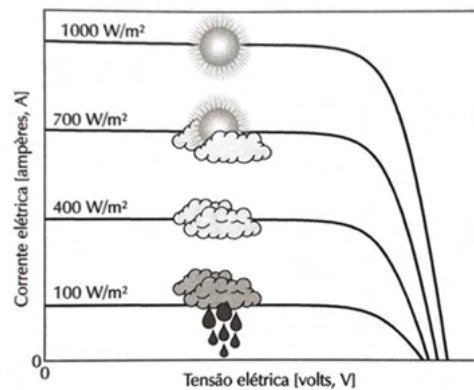


Figura 7 – Influência da radiação solar na corrente de saída do módulo fotovoltaico. (VILLALVA, 2015)

As Figuras 8 e 9 apresentam as curvas características Corrente-Tensão e Potência-Tensão de painéis solares. Nelas, a corrente de curto-circuito é atingida quando os terminais do módulo são curto circuitados entre si, tal que a tensão de saída tenda a zero. A tensão de circuito aberto é a máxima tensão de saída do módulo, idealmente, quando não haja fluxo de corrente. Existe 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.

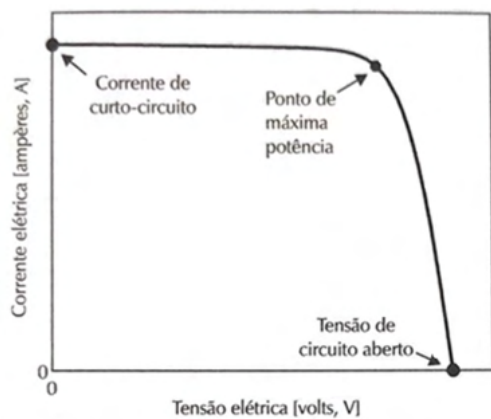


Figura 8 – Curva característica I - V (corrente - tensão) dos painéis solares. (VILLALVA, 2015)



Figura 9 – Curva característica P - V (potência - tensão) dos painéis solares. (VILLALVA, 2015)

Outro fator determinante no quesito potência de saída é a temperatura ambiente. A Figura 10 apresenta a variação da curva $I - V$, considerando três situações diferentes temperaturas para a temperatura ambiente.

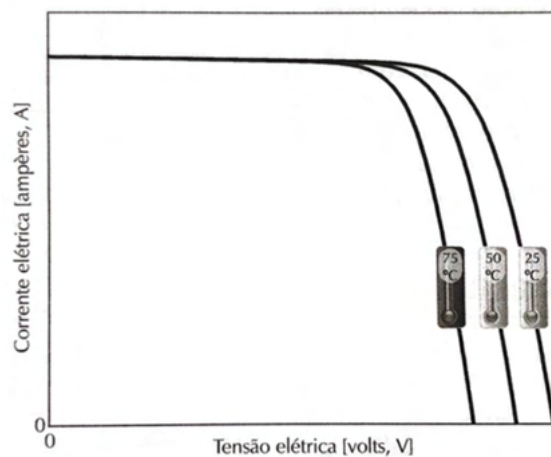


Figura 10 – Influência da temperatura ambiente na potência de saída dos módulos fotovoltaicos. (VILLALVA, 2015)

2.1.1.2 Instalação em Corrente Contínua

Segundo a ABNT NBR 16690:2019, a conexão dos módulos é dividida, basicamente, em duas possibilidades, conforme exemplificado na 11:

- Séries fotovoltaicas (*strings*); ou
- Arranjos fotovoltaicos (*arrays*);

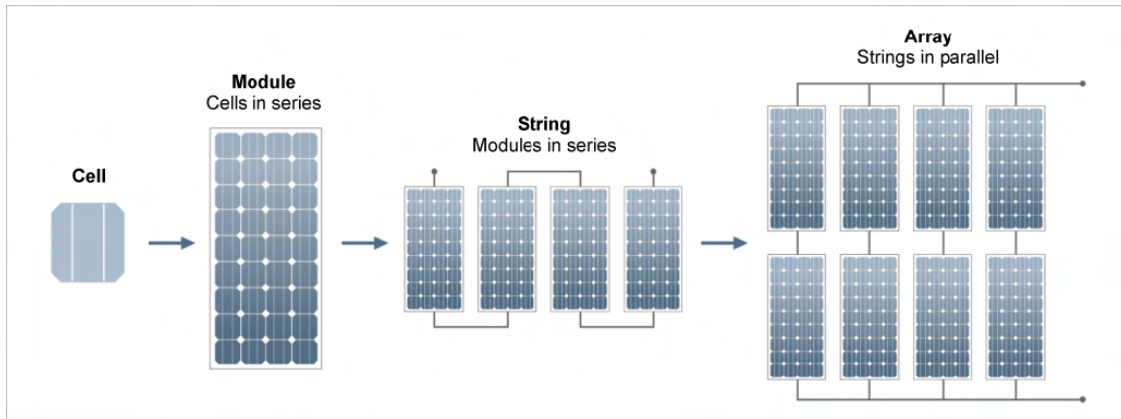


Figura 11 – Identificação das células, módulos, séries e arranjos fotovoltaicos. (UCF, 2014)

Nas *strings*, a tensão de saída é a soma algébrica das tensões individuais e a corrente é comum a todos os módulos. Já nos *arrays*, a corrente de saída é a soma algébrica das correntes individuais e a tensão é comum a todos os módulos. A Figura 12 exemplifica as diferentes disposições de módulos fotovoltaicos, bem como seu resultado em função da corrente e tensão de saída.

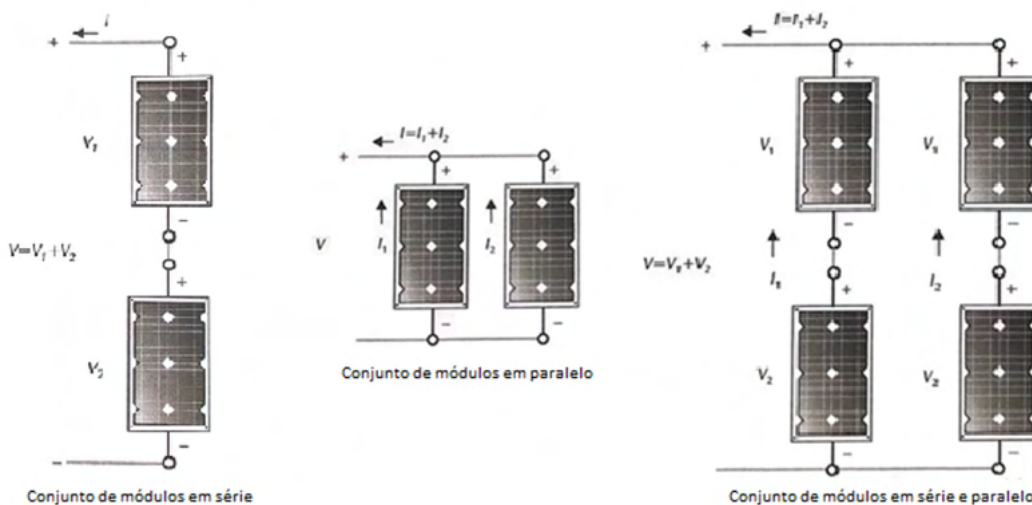


Figura 12 – Resultado da associação série e paralelo em arranjos fotovoltaicos. (VILLALVA, 2015)

2.1.2 Caixa de Junção ou *String Box*

As Caixas de Junção, também conhecidas como *String Boxes*, são quadros elétricos em corrente contínua, voltados para interconexão de módulos, séries ou subarranjos fotovoltaicos, com grau mínimo de proteção IP54 (VILLALVA, 2015). A 13 apresenta um diagrama elétrico geral de uma string box, em que se constata os seguintes elementos:

- Entradas em CC advindas das strigs;

- 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.

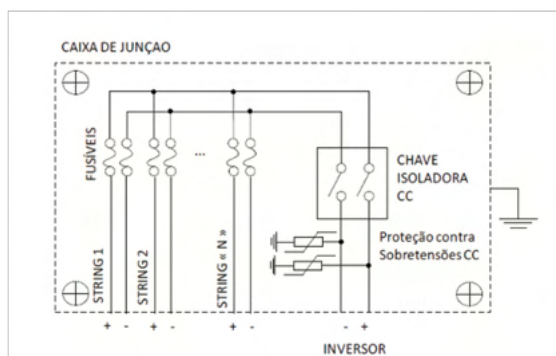


Figura 13 – Diagrama Elétrico geral de uma *String Box*. (FRONTIN, 2017)

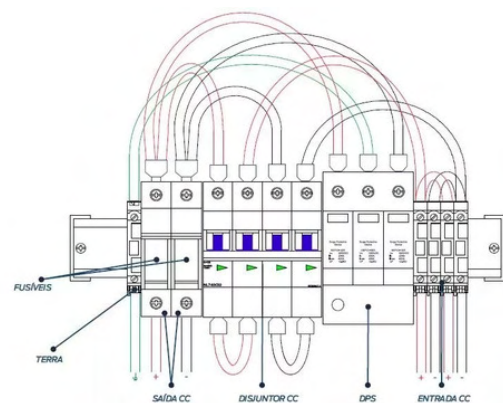


Figura 14 – Diagrama Elétrico geral de uma *String Box*. (FRONTIN, 2017)

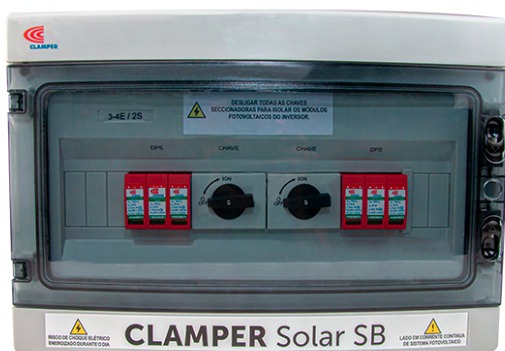


Figura 15 – Caixa de junção real, modelo CLAMPER Solar SB. (CLAMPER, 2021b)



Figura 16 – Caixa de junção real, montada manualmente. (ML, 2021)

2.1.3 Inversor Solar

O Inversor Solar tem papel fundamental em sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Ele é o dispositivo eletrônico responsável pela conversão da corrente contínua gerada

nos módulos fotovoltaicos em corrente alternada, permitindo a interligação com a rede elétrica, conforme ilustrado na 17.

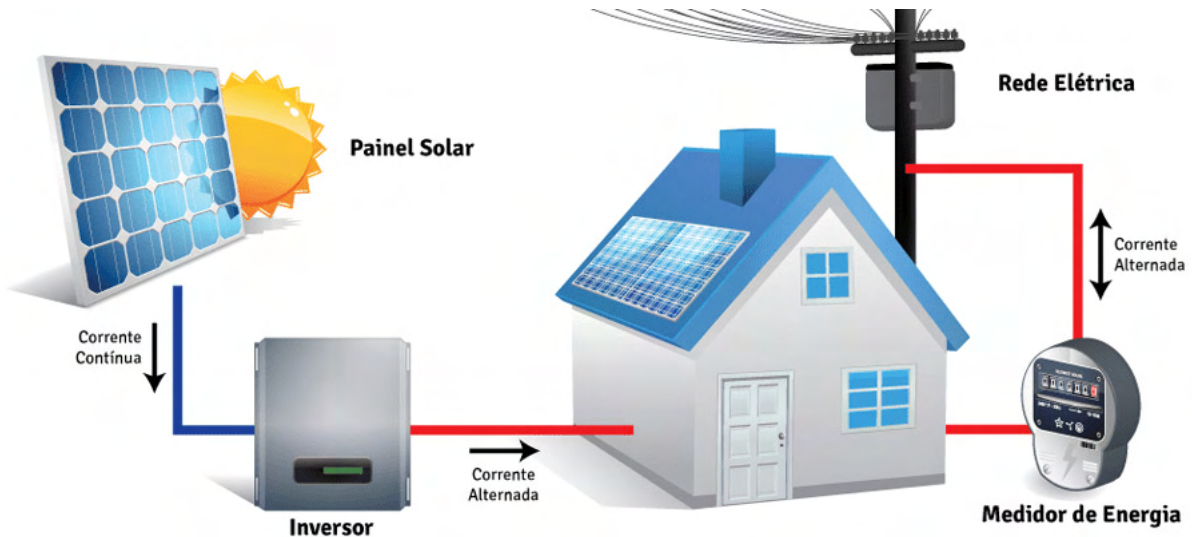


Figura 17 – Diagrama funcional de um sistema fotovoltaico conectado à rede. (ECOMAIS, 2021)

2.1.3.1 Rastreamento do Ponto de Potência Máxima

Como dito anteriormente, a potência fornecida pelos módulos fotovoltaicos depende diretamente da carga a ele conectada. A fim de maximizar o rendimento dos módulos, o gerador deve adaptar a carga de modo a operar sobre o ponto de máxima potência.

Com este propósito, o inversor conta com um transformador *chopper* controlado, voltado para o Rastreamento do Ponto de Potência Máxima (*MPPT*). O controlador calcula, em tempo real, o par V-I do gerador na qual a potência máxima disponível é produzida. (FRONTIN, 2017)

2.1.3.2 Detecção de Ilhamento

Quando se trata de inversores conectados a rede, as normas técnicas de conformidade são extremamente rigorosas quanto a detecção da condição de ilhamento.

Define-se ilhamento, a condição na qual uma seção de uma rede de potência é desconectada de sua principal fonte, tal que as cargas continuam potencializadas por um sistema fotovoltaico. (FRONTIN, 2017) A falta da desconexão do inversor, nessa situação, pode causar a energização de uma rede em manutenção, colocando em risco quem as opera.

2.2 Outros Conceitos Fundamentais

2.2.1 Teorema da Amostragem de Sinais

Grandezas físicas como velocidade, temperatura e tensão são representadas, matematicamente, por funções contínuas no tempo, que possuem um valor definido para cada infinitésimo de tempo.

Em sistemas digitais, este tipo de grandeza é discretizada, ou seja, sua representação é dada através de uma determinada quantidade de amostras, conforme mostrado na Figura 18.

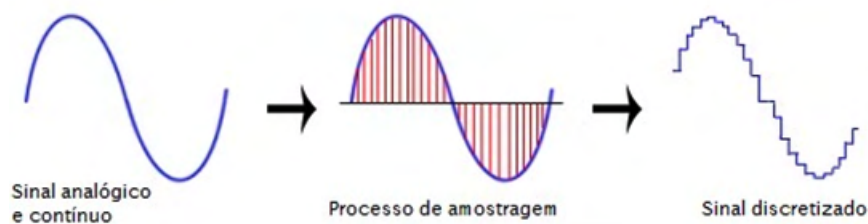


Figura 18 – Discretização de um sinal contínuo no tempo. (USF, 2014)

Segundo o teorema da amostragem, um sinal real, cujo espectro é limitado em faixa a B Hz, tal que $X(\omega) = 0$ para $|\omega| > 2\pi B$, pode ser reconstruído sem qualquer erro a partir de amostras uniformes obtidas a uma frequência $f_s \geq 2B$. (LATHI, 2007)

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.

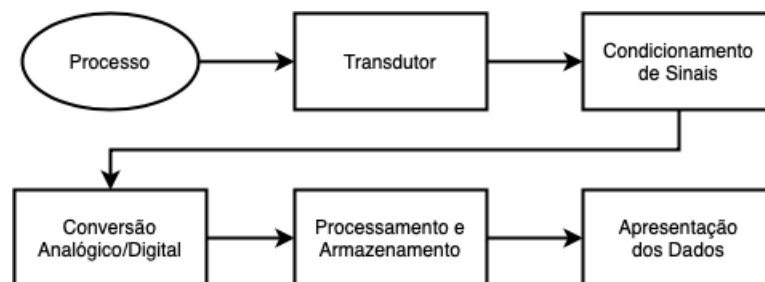


Figura 19 – Fluxograma geral para aquisição e processamento de dados em sistemas microcontrolados. (BARRETTO, 2011)

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, 2007)

- 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, 2007)
- 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, 2007)
- 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 dispositivo contra surtos de alta tensão. (LATHI, 2007)

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.

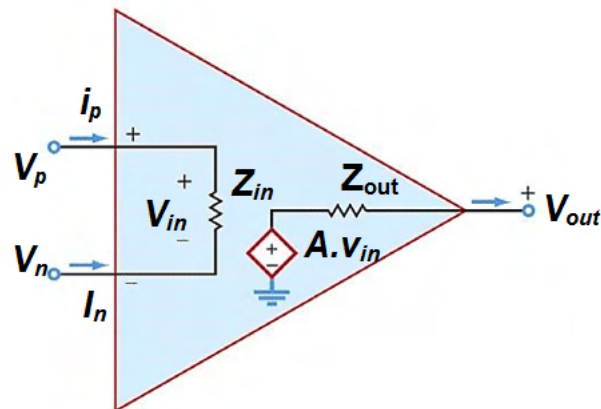


Figura 20 – Topologia de circuito equivalente do *AmpOp*. (SE德拉, 2011)

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; MICROCHIP, 2003), são eles:

- Largura de banda (BW): definida em função da frequência de corte do filtro (f_c), conforme Equação 2.1.

$$BW = 100 \times f_c \quad (2.1)$$

- *Slew Rate (SR)*: definida em função da tensão de saída, pico a pico ($V_{out_{pp}}$), e da frequência de corte do filtro, conforme Equação 2.2.

$$SR \geq 2\pi \times V_{out_{pp}} \times f_c \quad (2.2)$$

- *Input Common Mode Voltage Range (V_{CMR})*: define o limite da faixa do sinal de entrada;
- *Input Current Bias (I_b)*: 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.

Na sequência, são apresentados alguns circuitos que serão utilizados para o condicionamento de sinais ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

2.2.3.1 Amplificador Inversor e Não Inversor

A configuração não inversora (Figura 21 (a)) permite aplicar um ganho no sinal de entrada (V_i), conforme apresentado na Equação 2.3.

Já a configuração inversora (Figura 21 (b)) é utilizada quando, além do ganho, é necessário defasar o sinal de entrada em 180° , dessa forma, o sinal de saída (V_o) é dado pela Equação 2.4.

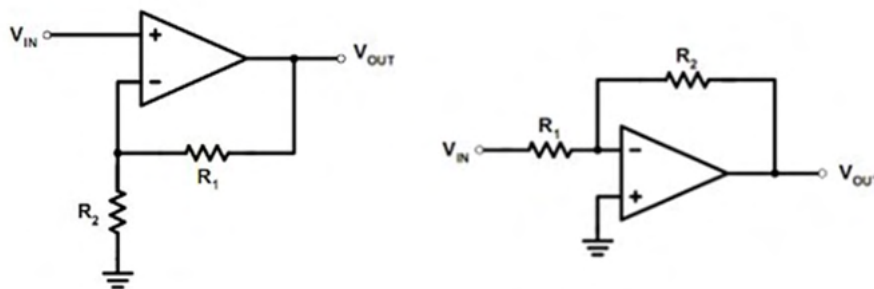


Figura 21 – (a) Configuração amplificador não inversor. (b) Configuração amplificador inversor. (SEDRA, 2011)

$$V_o = \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) \times V_i \quad (2.3)$$

$$V_o = -\frac{R2}{R1} \times V_i \quad (2.4)$$

2.2.4 Filtros Eletrônicos

Filtros são circuitos projetados para permitir a passagem de frequências desejadas e rejeitar, ou atenuar, outras frequências. (SADIKU, 2013)

É denominado filtro passivo o circuito que contém apenas componentes passivos, como resistores, indutores e capacitores. Para circuitos com transistores e *ampops* além dos componentes passivos, denomina-se filtro ativo. (SADIKU, 2013)

O tipo de filtro é caracterizado por sua resposta em frequência. A Figura 22 apresenta a resposta ideal dos quatro tipos de filtros existentes, sejam eles passivos ou ativos.

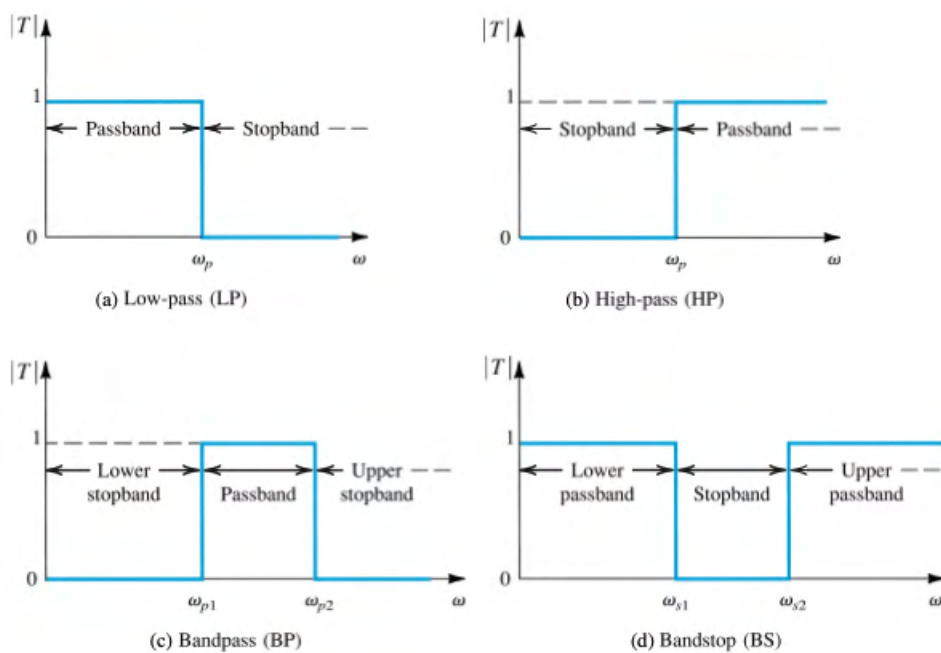


Figura 22 – Resposta a frequência, ideal, dos quatro tipos de filtros: (a) passa baixas. (b) passa altas. (c) passa faixa. (d) rejeita faixa. (SE德拉, 2011)

Outro importante parâmetro em projetos de filtros eletrônicos é a ordem (n) do filtro. A ordem de um filtro está diretamente relacionada com a quantidade de polos em sua função de transferência ($H(s)$), ou seja, sua capacidade de atenuação. Sobre o ponto de vista prático, quanto maior a ordem de um filtro, maior será sua complexidade de implementação.

2.2.4.1 Filtro Passa Baixas

Este filtro possui uma faixa de passagem limitada da frequência zero até a frequência de corte (f_s). Ao se aproximar desta última, as frequências começam a ser atenuadas em uma proporção definida pela ordem do circuito.

Um exemplo da topologia passa baixa é apresentado na Figura 23, com um filtro de primeira ordem.

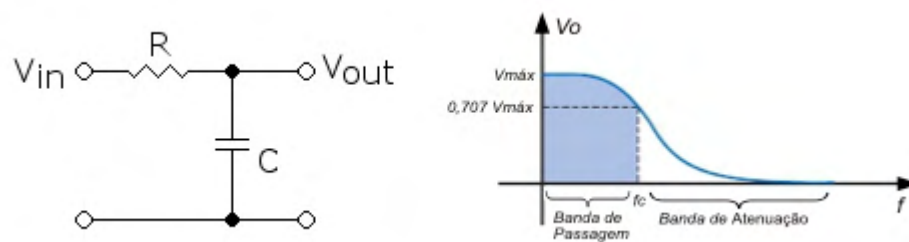


Figura 23 – Topologia e resposta de um filtro passa baixa de primeira ordem. (SADIKU, 2013)

A frequência de corte (f_s) do filtro passa baixa é dada pela Equação 2.5.

$$f_s = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.5)$$

3 Metodologia

Esta seção descreve a metodologia empregada para atingir os objetivos deste trabalho. Basicamente, a mesma se constitui pelo levantamento e análise de requisitos, a seleção de componentes e circuitos e o desenvolvimento de hardware e firmware do protótipo.

3.1 Análise de Requisitos

Tomando por base os equipamentos utilizados em sistemas fotovoltaicos e suas características, na sequência são apresentados os requisitos funcionais e não funcionais do projeto para o desenvolvimento do sistema. Os requisitos serão identificados com um identificador único, com numeração iniciada em [RF1] para um requisito funcional e [NF1] para um requisito não-funcional.

Além do mais, para estabelecer a prioridade na implementação do no sistema, os requisitos foram enquadrados nas seguintes classificações:

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

3.1.1 Requisitos Funcionais

[RF1] - Medição de Tensão CC

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

Faixa de Medição: 0 a 500V.

Prioridade: Essencial.

[RF2] - 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.

[RF3] - Identificação de eventos nos circuitos CC

O sistema deve ser capaz de identificar a ocorrência de eventos nos circuitos 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 (25V);

Prioridade: Importante.

[RF4] - 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.

[RF5] - Cálculo de Energia Acumulada

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

Prioridade: Importante.

[RF6] - Seccionamento do Circuito

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

Prioridade: Essencial.

[RF7] - Monitoramento de Vida Útil do DPS

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

Prioridade: Importante.

[RF8] - Identificação de Superaquecimento do Sistema

O sistema deve ser capaz de identificar superaquecimento do processador ao atingir 75°C, bem como entrar em *low power mode*, visando garantir sua vida útil em instalações ao tempo.

Prioridade: Desejável.

3.1.2 Requisitos Não Funcionais

[NF1] - Sistema de Alimentação

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

Prioridade: Essencial.

[NF2] - Componente Sensor

O sistema deve possuir componentes sensores que atendam ao requisito de faixa de medição.

Prioridade: Essencial.

[NF3] - Componente Seccionador

O sistema deve possuir um componente seccionador, visando subsidiar manutenções via acionamento externo.

Prioridade: Essencial.

[NF4] - Circuito Condicionador

O sistema deve possuir um circuito eletrônico para condicionamento e filtragem das grandezas mensuradas.

Prioridade: Essencial.

[NF5] - Unidade Central de Processamento

O sistema deve possuir um microcontrolador como *CPU*, para aquisição e processamento de dados.

Prioridade: Essencial.

[NF6] - Isolamento

Por se tratar de um sistema eletrônico acoplado a alta tensão, o sistema deverá ser devidamente isolado.

Prioridade: Importante.

3.2 Arquitetura do Sistema

3.2.1 Diagrama de Blocos do Sistema

A Figura 24 apresenta o diagrama de blocos do sistema proposto neste trabalho.

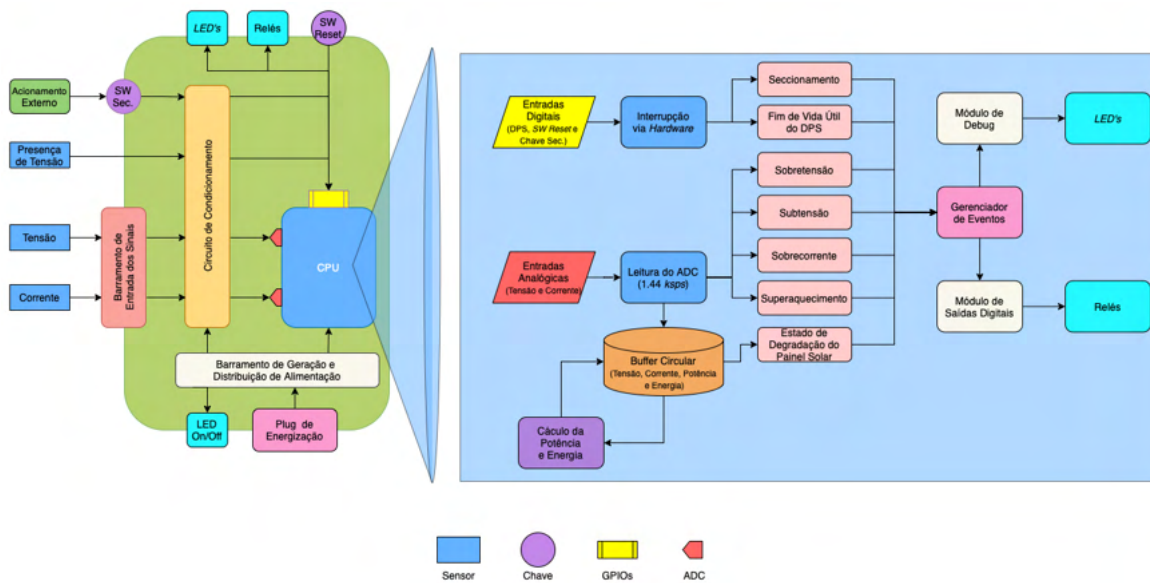


Figura 24 – Diagrama de blocos do *firmware* proposto.

3.2.2 Medição de Tensão e Corrente

Existem, basicamente, duas técnicas para medição de grandezas como tensão e corrente: medição direta e medição indireta.

Na medição direta, a grandeza monitorada pode ser condicionada para atender à requisitos específicos do circuito de medição, mas, no geral, é acoplada diretamente no circuito, ou seja, sem qualquer isolamento. (FRONTIN, 2017)

Já na medição indireta, utilizam-se técnicas para que não haja nenhuma conexão elétrica entre a grandeza e o circuito de medição em si, baseadas nas leis de *Ampère* e *Faraday*. (FRONTIN, 2017)

Neste trabalho, o método adotado para medição de tensão e corrente foi o indireto, baseado em sensores que utilizam o efeito *Hall* em seu funcionamento. Os componentes escolhidos são os sensores LV 20-P e LA 55-P, respectivamente, da fabricante *LEM*. Ambos os sensores podem ser utilizados para medições de sinais alternados, contínuos e pulsantes. Além disso, possuem isolamento galvânico entre os circuitos primário e secundário, atendendo ao requisito de isolamento.

3.2.2.1 Transdutor de Tensão LV 20-P

A Figura 25 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.

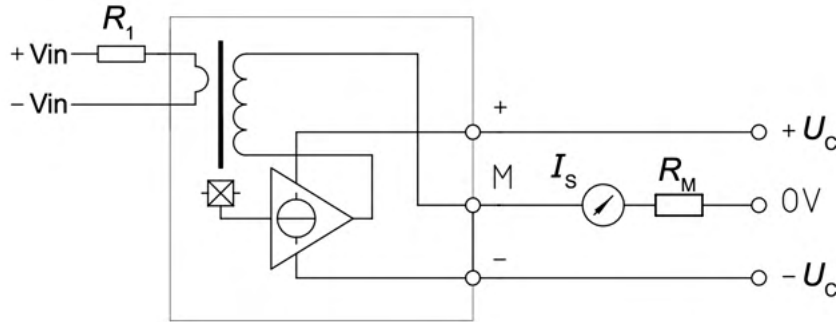


Figura 25 – Diagrama elétrico do transdutor de tensão LV 20-P. (LEM, 2014b)

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 $+V_{IN}$ e $-V_{IN}$ 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:

$$R_1 = \frac{500V}{10mA} \approx 50K\Omega/5W \quad (3.1)$$

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

$$R_{M_V} = \frac{3V}{25mA} \approx 120\Omega/\frac{1}{4}W \quad (3.2)$$

ϵ	Erro ($T_{Amb} = 25^\circ C$)	$\pm 1, 1$	%
ϵ_L	Erro linear	$< 0, 2$	%
t_R	Tempo de resposta (90% of I_{PN})	40	μs
T_A	Temperatura de operação	0 70	$^\circ C$

Tabela 1 – Características gerais do transdutor de tensão LV 20-P, da fabricante LEM. (LEM, 2014b)

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	Resistência R_M	$R_{M_{min}}$	$R_{M_{max}}$	
	with $\pm 12V @ \pm 10mA$	30	190	Ω
	with $\pm 12V @ \pm 14mA$	30	100	Ω
	with $\pm 15V @ \pm 10mA$	100	350	Ω
	with $\pm 15V @ \pm 14mA$	100	190	Ω
I_{SN}	Corrente nominal do secundário	25		mA
K_N	Relação de conversão	2500 : 1000		
V_{CC}	Tensão de alimentação	± 12	± 15	V
V_D	Isolamento AC	2,5		KV

Tabela 2 – Características elétricas do transdutor de tensão *LV 20-P*, da fabricante *LEM*. (LEM, 2014b)

3.2.2.2 Transdutor de Corrente LA 55-P

A Figura 26 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.

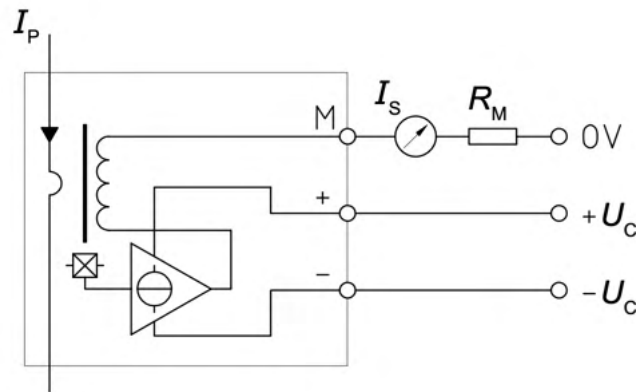


Figura 26 – Diagrama elétrico do transdutor de corrente LA 55-P. (LEM, 2014a)

Tal que I_P é a corrente que flui no primário do transdutor, $+U_C$ e $-U_C$ são 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:

$$R_{M_I} = \frac{3V}{20mA} \approx 150\Omega / \frac{1}{4}W \quad (3.3)$$

ϵ	Erro ($T_{Amb} = 25^\circ\text{C}$)	$\pm 0,9$	%
E_L	Erro linear	$< 0,15$	%
t_R	Tempo de resposta (90% of I_{PN})	1	μs
T_A	Temperatura de operação	-40 85	$^\circ\text{C}$

Tabela 3 – Características gerais do transdutor de corrente *LA 55-P*, da fabricante *LEM*. (LEM, 2014a)

I_{PN}	Corrente nominal do primário	50	A
I_{PM}	Faixa de medição	0 ± 70	A
R_M	Resistência R_M ($T_A = 70^\circ\text{C}$)	R_{Mmin} R_{Mmax}	
	with $\pm 12\text{V} @ \pm 50\text{A}$	10 100	Ω
	with $\pm 12\text{V} @ \pm 70\text{A}$	10 50	Ω
	with $\pm 15\text{V} @ \pm 50\text{A}$	50 160	Ω
	with $\pm 15\text{V} @ \pm 70\text{A}$	50 90	Ω
I_{SN}	Corrente nominal do secundário	50	mA
K_N	Relação de conversão	1 : 1000	
U_C	Tensão de alimentação	± 12 ± 15	V
U_D	Isolamento AC, 50Hz	2,5	KV

Tabela 4 – Características elétricas do transdutor de corrente *LA 55-P*, da fabricante *LEM*. (LEM, 2014a)

3.2.2.3 Filtro Anti *Aliasing*

O filtro adotado é um passa baixas de 2ª ordem, voltado para atenuação de componentes de alta frequência, de topologia *Sallen-Key* e aproximação *Bessel*. (REIS, 2018)

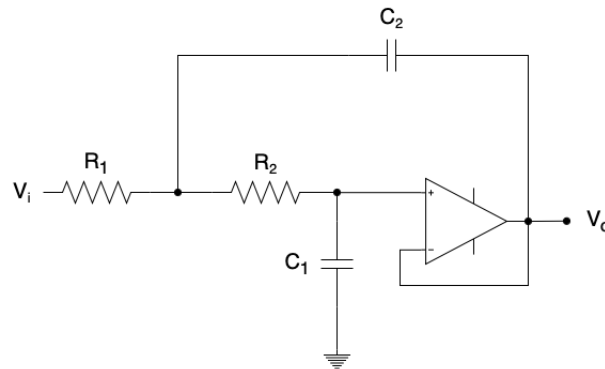


Figura 27 – Topologia do filtro de 2ª ordem utilizado para remoção de componentes de alta frequência.

Utilizando a Lei de *Kirchhoff* dos nós, calcula-se a função de transferência do filtro da Figura 27:

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + s\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C_2}\right) + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3.4)$$

Segundo [SADIKU \(2013\)](#), a função de transferência genérica de filtros de segunda ordem pode ser escrita na forma:

$$H(s) = \frac{K\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0^2}{Q} + \omega_0^2} \quad (3.5)$$

Comparando as Equações 3.4 e 3.5 e, ainda, adotando $R_1 = R_2 = R$ e $K = 1$, obtém-se:

$$\omega_0 = \frac{1}{R\sqrt{C_1C_2}} \quad (3.6)$$

onde $\omega_0 = 2\pi f_c$, e:

$$Q = \frac{C_2}{2\sqrt{C_1C_2}} \quad (3.7)$$

Adotando $C_1 = 10nF$, pode-se estimar $Q = 0,577$ para obter C_2 . ([REIS, 2018](#))

$$C_2 = 4 \times Q^2 \times C_1 \approx 13nF \quad (3.8)$$

Dados C_1 e C_2 e, ainda, adotando uma frequência de corte de 1KHz, obtém-se R .

$$R = \frac{1}{2\pi \times f_c \times \sqrt{C_1C_2}} \approx 14K7 \quad (3.9)$$

Assim, podemos calcular a frequência de corte real do filtro:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \times 14K7 \sqrt{(10n) \times (13n)}} \approx 950Hz \quad (3.10)$$

3.2.2.4 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 (Figura 24) amostra sequencialmente os canais analógicos à uma taxa de 960sps e os insere em um *buffer* circular, agregado em multicamadas.

Apesar de a norma IEC 61400-4-30 ser voltada para sistemas de medição em C.A., 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).

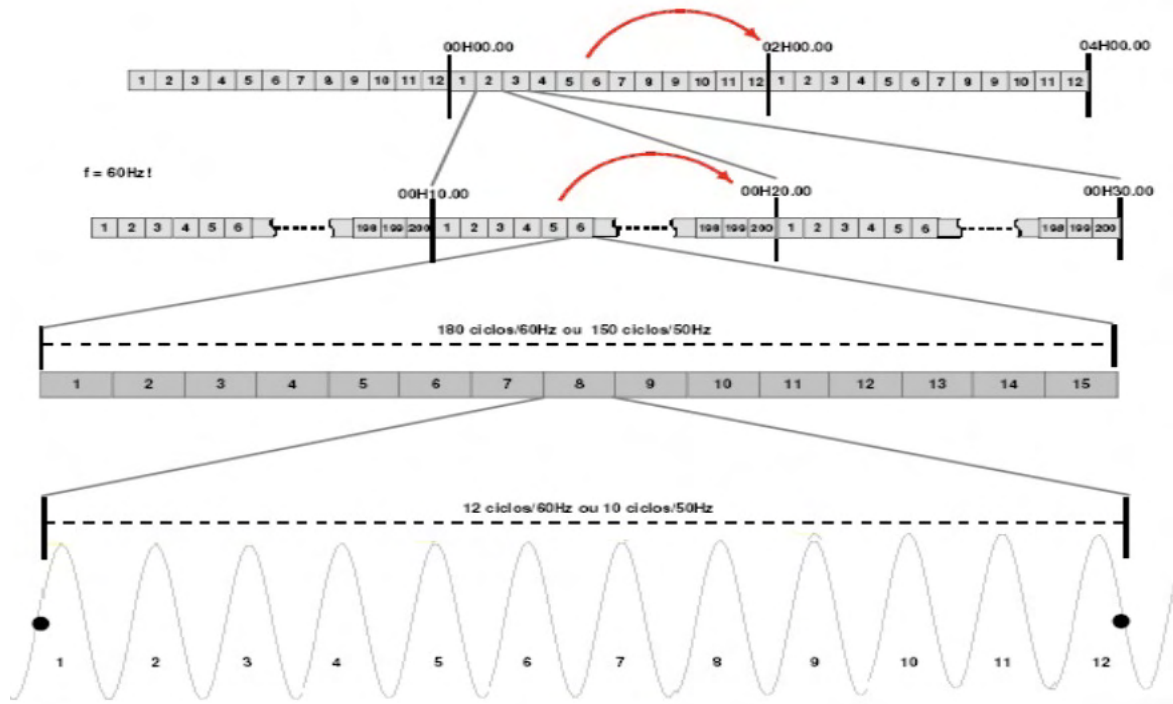


Figura 28 – Método de agregação em multicamadas, baseado na norma IEC 61400-4-30.

Tal que os níveis de agregação foram divididos em:

1. 1^a Camada

Buffer circular de 192 posições (12 ciclos de 16 amostras cada), inseridas a partir da leitura do módulo *ADC*, a uma taxa de 960*sps*, totalizando 0,2*s*.

2. 2^a Camada

Buffer circular de 15 posições, calculadas a partir da média quadrática da primeira camada, a cada 0,2*s*, totalizando 3*s*.

3. 3^a Camada

Buffer circular de 200 posições, calculadas a partir da média quadrática da segunda camada, a cada 3 segundos, totalizando 10*m*.

4. 4^a Camada

Buffer circular de 6 posições, calculadas a partir da média quadrática da terceira camada, a cada 10 minutos, totalizando 1*h*.

5. 5^a Camada

Buffer circular de 24 posições, calculadas a partir da média quadrática da quarta camada, a cada hora, totalizando 24 horas.

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

$$X_M = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_N^2}{n}} \quad (3.11)$$

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

3.2.3 Cálculo da Potência e Energia Produzida

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

$$P_{3s} = \frac{V_{3s} \times I_{3s}}{10^3} [kW] \quad (3.12)$$

O resultado obtido será armazenado seguindo o mesmo protocolo utilizado para tensão e corrente, a partir da 3ª camada.

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

$$E = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{P_{3s}}{3.6 \times 10^3} kWh \quad (3.13)$$

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

O tipo *float*, de 32bits, 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:

$$P_{3s} = \frac{500V \times 20A}{10^3} = 10kW \quad (3.14)$$

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

$$T_{anos} = \frac{V_{MAXfloat}}{E_{1h} \times 24 \times 30 \times 12} \approx 11,57anos \quad (3.15)$$

Onde $V_{MAXfloat}$ é a máxima energia armazenada pelo *float*, ou seja, aproximadamente 999.999,9KWh.

3.2.4 Monitoramento de Vida Útil do DPS

Para o monitoramento da vida útil do DPS, será utilizado a topologia de circuito da Figura 29, tal que os terminais SW_+ e SW_- são conectados a chave mecânica do DPS.

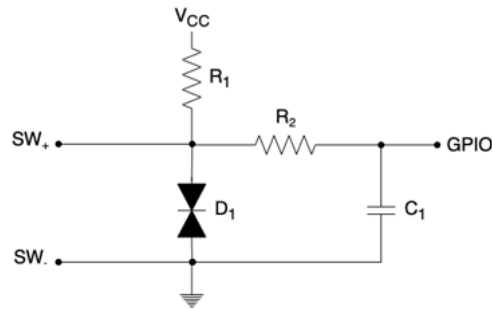


Figura 29 – Topologia de circuito para identificação de fim de vida útil do DPS.

3.2.5 Seccionamento do Circuito

Para o seccionamento do circuito, serão utilizados componentes do tipo relé, controlados pelo microcontrolador na identificação de falhas no barramento C.C. ou via acionamento externo pelo usuário.

3.2.6 Microcontrolador

Como Unidade Central de Processamento (*CPU*), será utilizado o microcontrolador STM32G747RE, da *STMicroelectronics*.

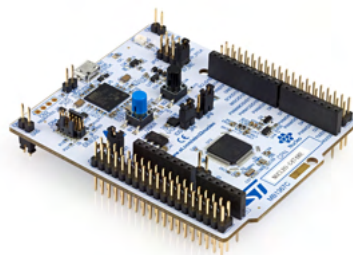


Figura 30 – Foto do *kit* de desenvolvimento *NUCLEO-G474RE*, da *STMicroelectronics*. (ST, 2020a)

Trata-se de um processador de alta performance *ARM® Cortex®-M4*, com arquitetura *RISC* de *32bits* e frequência de até *170MHz*. Conta com *512Kbytes* de memória *Flash*, *96Kbytes* de memória *SRAM*, acelerador para funções matemáticas e aritméticas (*CORDIC* e *FMAC*), além de 5 módulos *ADC* de *12bits*, 7 *timers* de *16bits* e 2 de *32bits* e diversas interfaces de comunicação (*SPI*, *I2C*, *UxART*, *USB*, *CAN*).



Figura 31 – Principais características do microcontrolador STM32G474RE. (ST, 2020b)

3.2.7 Gerenciamento de Eventos

O módulo de gerenciamento de eventos é baseado na ativação de *flags* identificadoras do estado do sistema. A Figura 32 apresenta o fluxograma geral do módulo, bem como os pontos de ativação de cada evento.

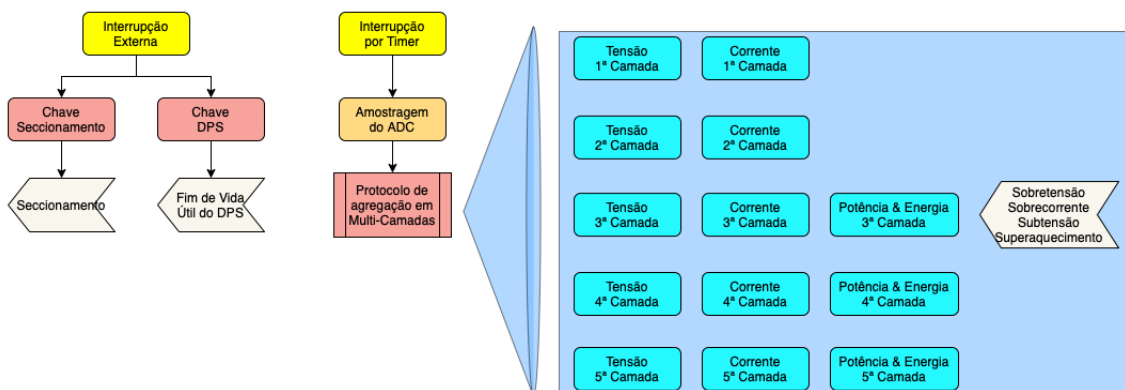


Figura 32 – Fluxograma do módulo gerenciador de eventos.

A seguir, 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 com histerese.

Tipo	Ação	Trigger	Obs
Seccionamento	Desabilita a saída da Caixa de <i>Strings</i>		Acionado pelo usuário.
Sobretensão	Desabilita a saída da Caixa de <i>Strings</i>	$V_{off} \geq 475V$ $V_{on} \leq 450V$	Acionado pelo sistema.
Subtensão	Desabilita a saída da Caixa de <i>Strings</i>	$V_{off} \leq 25V$ $V_{on} \geq 50V$	Acionado pelo sistema.
Sobrecorrente	Desabilita a saída da Caixa de <i>Strings</i>	$V_{off} \geq 19A$ $V_{on} \leq 18A$	Acionado pelo sistema.
Superaquecimento	Desabilita o circuito de monitoramento	$V_{off} \geq 75^{\circ}C$ $V_{on} \leq 50^{\circ}C$	Acionado pelo sistema.
Fim de vida Útil do DPS	Desabilita a saída da Caixa de <i>Strings</i>		Acionado pelo sistema.

Tabela 5 – Identificação dos eventos e suas respectivas ações de controle, ordenados por prioridade.

Por fim, o sistema conta com um módulo *debug*, para identificação dos eventos através de 3 *LED*'s. A Tabela 6 apresenta a tabela verdade do módulo.

LED1	LED2	LED3	Evento
0	0	0	Nenhum evento identificado
0	0	1	Seccionamento
0	1	0	Sobretensão
0	1	1	Sobrecorrente
1	0	0	Subtensão
1	0	1	Superaquecimento
1	1	0	Fim de vida Útil do DPS
1	1	1	Degradação do Painel Solar

Tabela 6 – Tabela verdade do módulo *Debug*.

4 Resultados e Discussão

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados relacionados aos procedimentos experimentais para validação do protótipo funcional.

4.1 Projeto de Hardware do Protótipo

4.1.1 Condicionamento de Tensão

A Figura 33 apresenta diagrama esquemático do circuito proposto para aquisição e condicionamento da tensão.

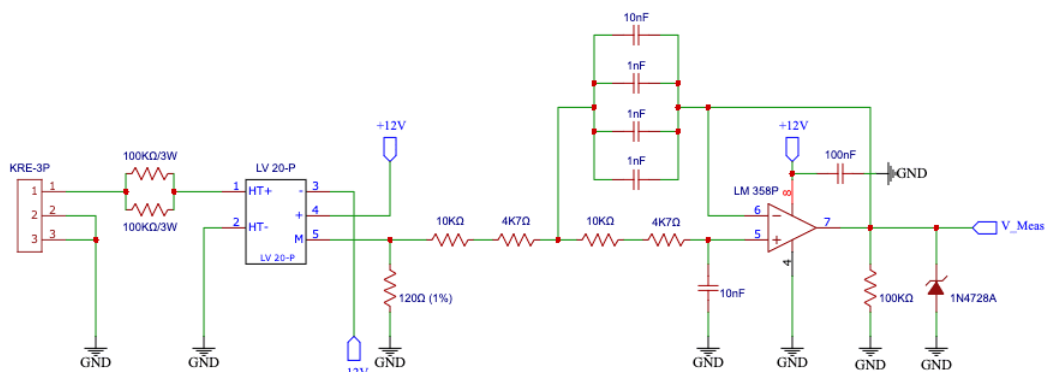


Figura 33 – Esquemático do circuito proposto para condicionamento e aquisição da tensão.

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

4.1.1.1 Caracterização do Circuito de Condicionamento de Tensão

Para caracterização do circuito aquisição e condicionamento de tensão e, por consequência, determinação da relação entre os sinais de entrada e saída, foi realizado um ensaio experimental, o qual toma por base o esquema da Figura 34.

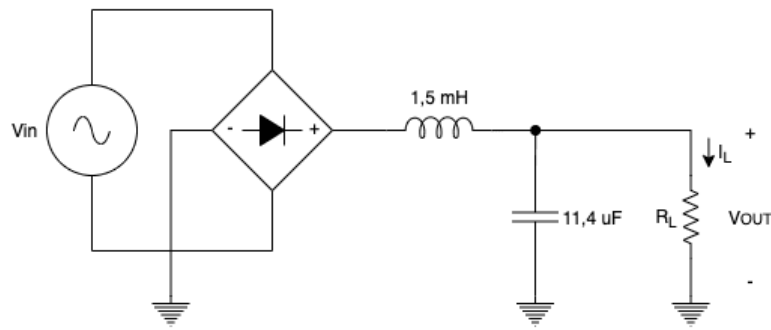


Figura 34 – Esquema do circuito montado para caracterização do circuito de condicionamento de tensão.

Para o ensaio, foi utilizado uma fonte controlada de tensão alternada (V_{IN}), um retificador de onda completa monofásico, um filtro indutivo-capacitivo e uma carga resistiva (R_L). A seguir são apresentadas as premissas definidas para a realização do ensaio. A esquerda, o multímetro amarelo apresenta a tensão de saída do Varivolt e o multímetro vermelho apresenta a tensão do barramento C.C., já a direita, o segundo multímetro amarelo apresenta a tensão de saída do circuito de condicionamento.

- No ponto de medição, sobre a carga resistiva (R_L), serão inseridos sinais de amplitude conhecidas;
- Em função das características do Varivolt utilizado, a máxima tensão aplicada foi de, aproximadamente, $240V_{rms}$;
- Considerando que no laboratório em que foram realizados os testes não há um dispositivo padrão para calibração de medidores em eletricidade, a tensão do barramento C.C. foi aferida por meio de um multímetro *ICEL MD-6400*, do tipo 4 ½ dígitos;
- Outro ponto de medição, para controle do ensaio, foi a tensão de saída da fonte C.A., por meio de um multímetro *Hikari HM-1000*;
- Por sua vez, a tensão de saída do circuito de condicionamento foi medida por um multímetro *Hikari HM-2090*;
- Os testes foram realizados em temperatura ambiente ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$);

A seguir, as Figuras 35, 36, 37 e 38 apresentam fotos dos componentes utilizados ao longo dos ensaios experimentais.

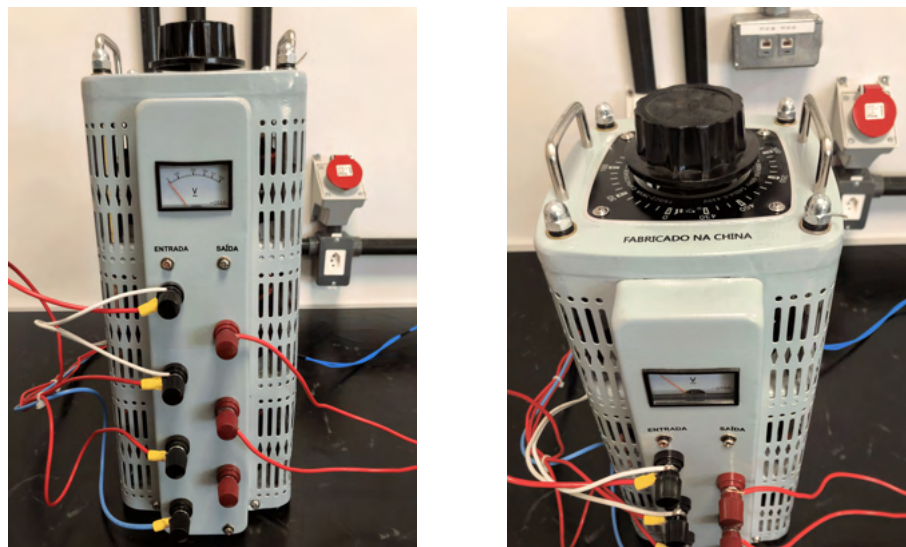


Figura 35 – Foto do Varivolt utilizado nos ensaios experimentais. Note que, apesar de o dispositivo ser trifásico, para o teste será utilizada somente uma fase.

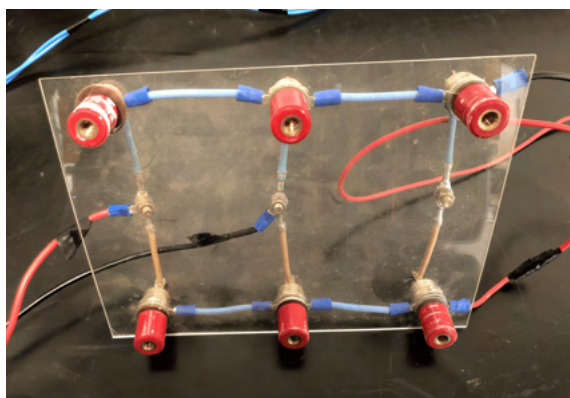


Figura 36 – Foto da ponte retificadora utilizada nos ensaios experimentais. Note que, novamente, a ponte retificadora é trifásica, porém, serão usados apenas 4 diodos para o ensaio.

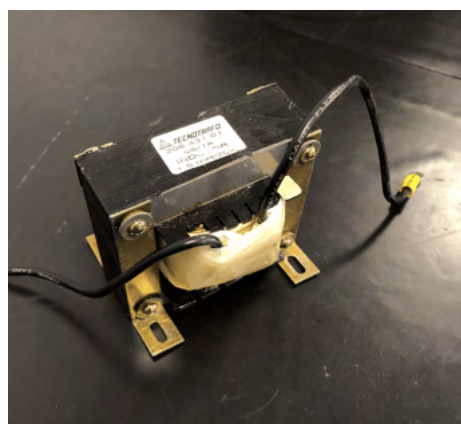


Figura 37 – Foto do filtro LC utilizado nos ensaios experimentais, tal que o indutor é de $1,5\text{mH}/20\text{A}$ e o capacitor é de $11,4\mu\text{F}/440\text{V}$.

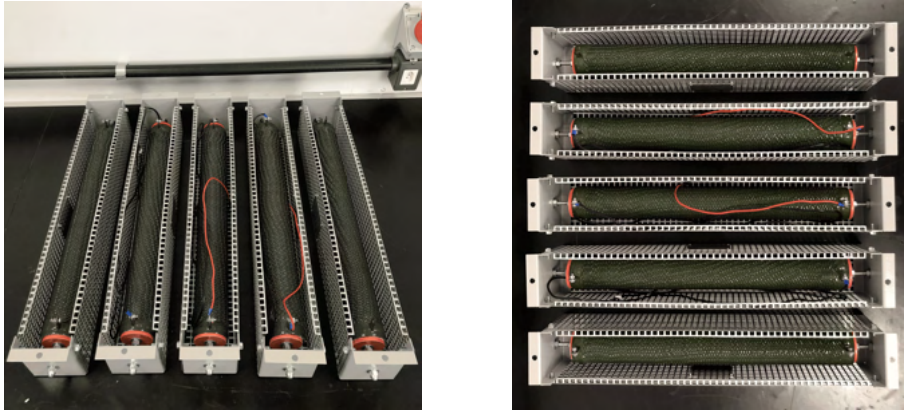
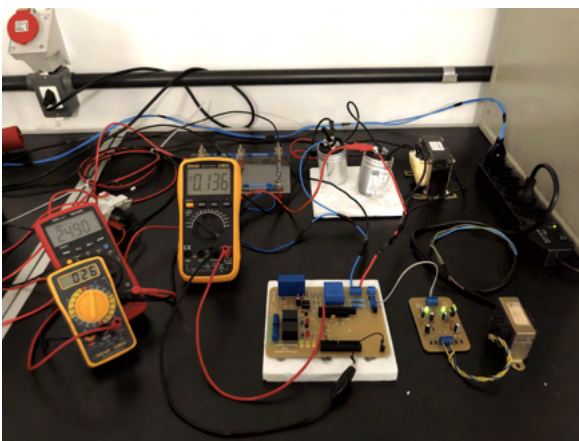


Figura 38 – Foto do banco de resistores utilizado nos ensaios experimentais. Resistência: 100Ω . Potência máxima: $1KW$.

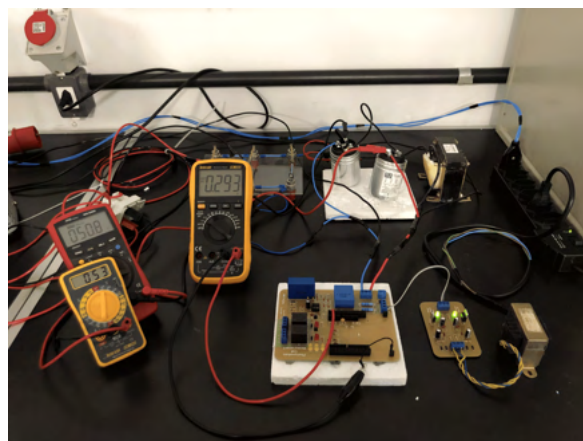
Os resultados obtidos são apresentados a seguir, bem como a Tabela 7 apresenta o consolidado dos dados.



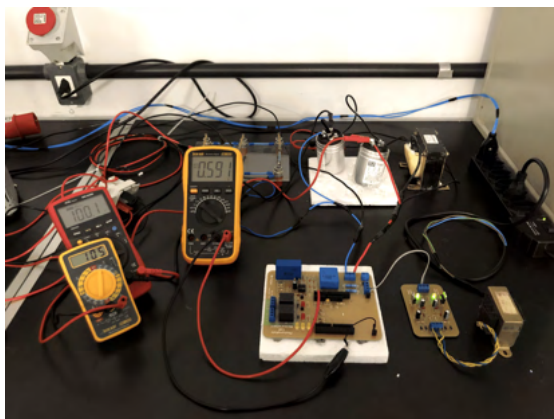
Figura 39 – Foto do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de tensão para condição inicial, ou seja, para um sinal de $0V$.



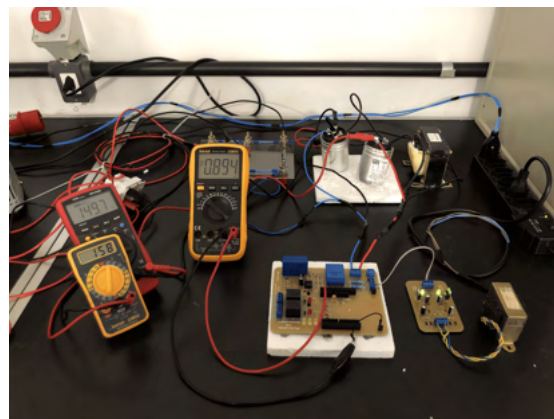
(a) Foto do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de tensão para um sinal de, aproximadamente, $25V$.



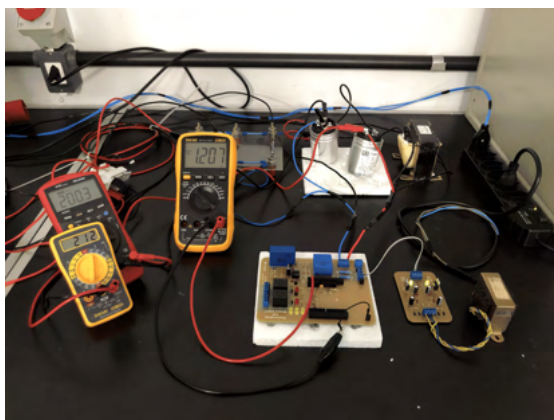
(b) Foto do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de tensão para um sinal de, aproximadamente, $50V$.



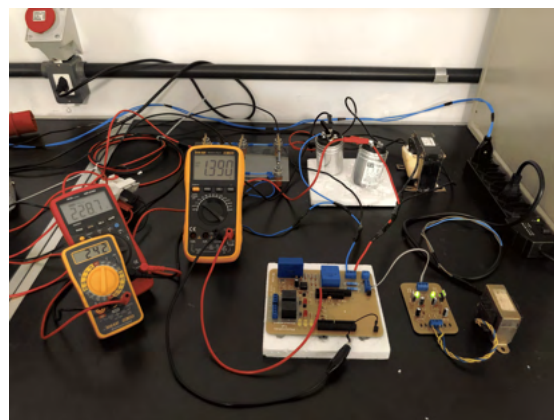
(c) Foto do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de tensão para um sinal de, aproximadamente, 100V.



(d) Foto do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de tensão para um sinal de, aproximadamente, 150V.



(e) Foto do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de tensão para um sinal de, aproximadamente, 200V.



(f) Foto do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de tensão para um sinal de, aproximadamente, 250V.

Figura 40 – Fotos dos resultados obtidos no ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de tensão, para sinais entre 25V a 250V.

$V_{varivolt}(V_{rms})$	$V_{DC}(V)$	Carga (Ω)	$V_{Meas}(V)$
0,0	0,0169	400	0,0
26	24,9	400	0,136
53	50,8	400	0,293
105	100,1	400	0,591
158	149,7	400	0,894
212	200,3	400	1,207
242	228,7	400	1,390

Tabela 7 – Resultado do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento para medição de tensão.

Onde $V_{varivolt}$ é a tensão de saída da fonte C.A., V_{DC} é a tensão do barramento C.C. e V_{Meas} é a tensão medida na saída do circuito de condicionamento de tensão.

A partir dos resultados obtidos na Tabela 7, 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 41.

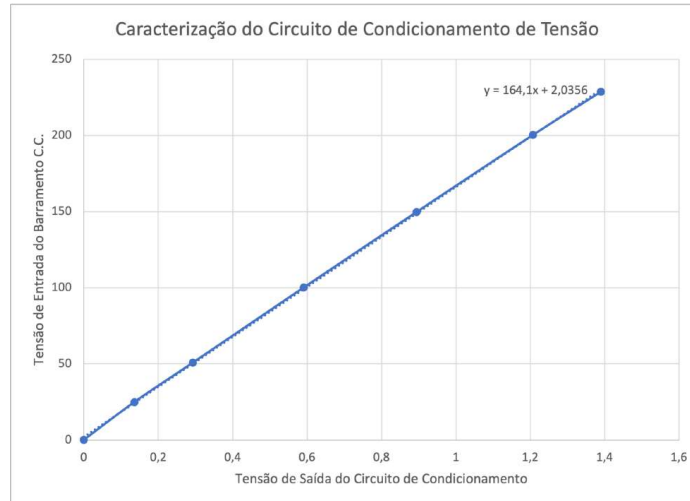


Figura 41 – Gráfico de dispersão dos resultados obtidos na caracterização do circuito de condicionamento de tensão.

$$V_{DC} = 164,1 \times V_{meas} + 2,0356 \quad (4.1)$$

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

4.1.2 Condicionamento de Corrente

A Figura 42 apresenta o diagrama esquemático do circuito proposto para o condicionamento e aquisição de corrente.

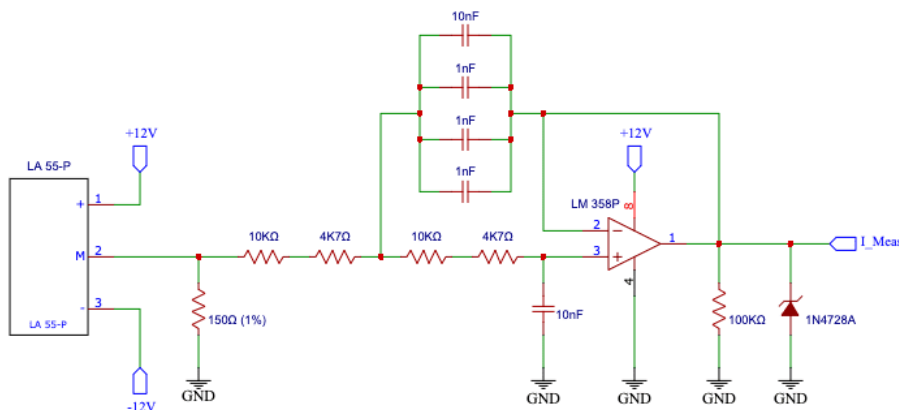


Figura 42 – Esquemático do circuito proposto para condicionamento e aquisição da corrente.

Tal que o circuito é composto por um resistor *shunt* (resistor de 150Ω por $1/4W$, com tolerância de 1%) no secundário do transdutor, seguido por um filtro passa-baixas de 2ª ordem.

4.1.2.1 Caracterização do Circuito de Condicionamento de Corrente

De forma semelhante ao circuito de condicionamento e aquisição de tensão, foi realizado um ensaio experimental para caracterização do circuito de condicionamento e aquisição de corrente, também baseado no circuito da Figura 34.

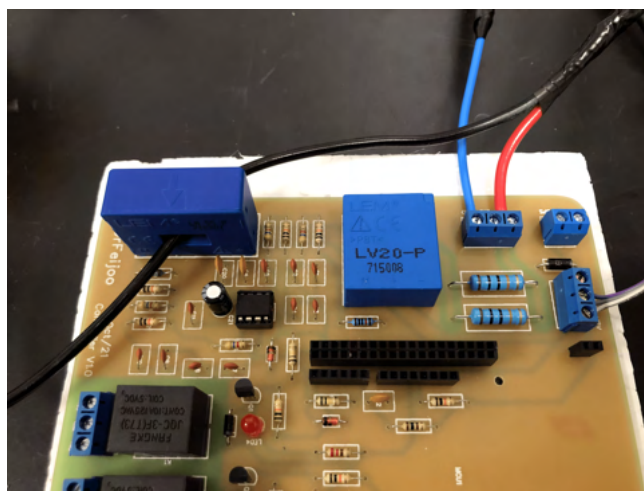
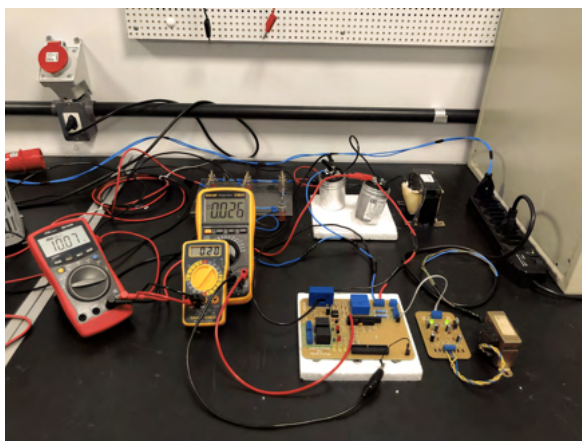
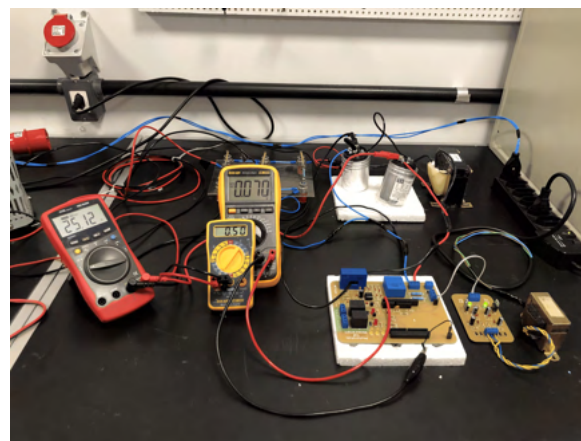


Figura 43 – Foto da conexão entre os circuitos de condicionamento de tensão e corrente e a fonte dos sinais monitorados.

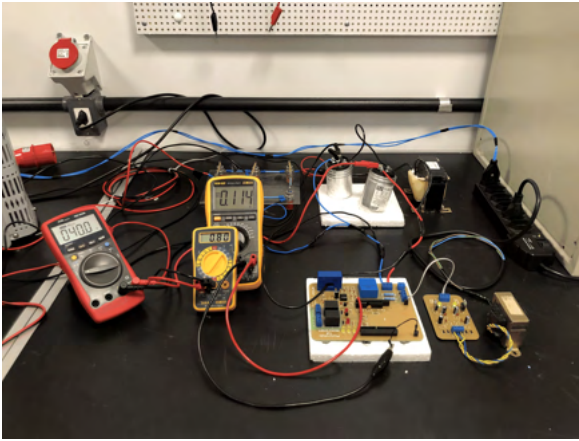
Os resultados do ensaio são apresentados a seguir, bem como a Figura 45 apresenta o modelo linear ajustado ao circuito, para obtenção de seu ganho. Neste ensaio, a esquerda, o multímetro vermelho apresenta a tensão do barramento C.C., já a direita, o multímetro de cima apresenta a tensão de saída do circuito de condicionamento e o multímetro de baixo apresenta a corrente passada no banco de resistores.



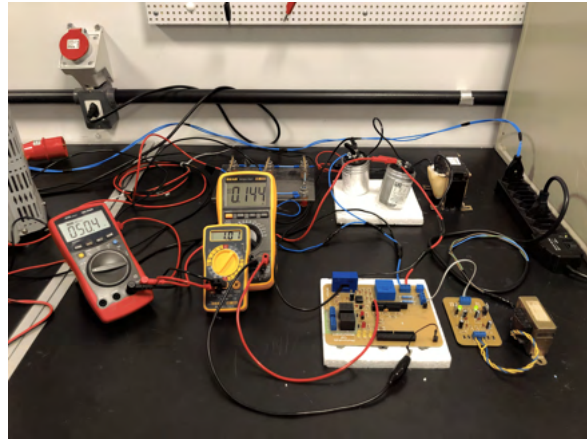
(a) Foto do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de corrente para um sinal de, aproximadamente, $0,2A$.



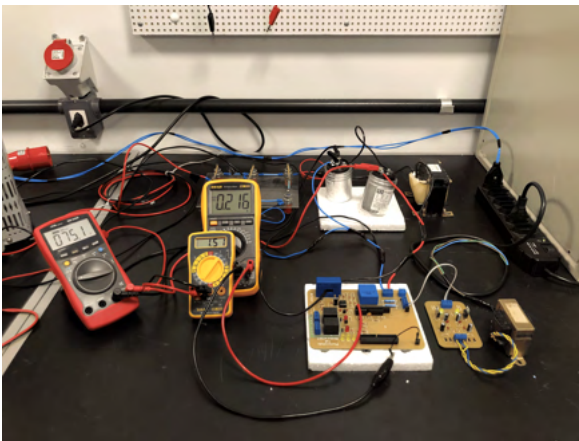
(b) Foto do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de corrente para um sinal de, aproximadamente, $0,5A$.



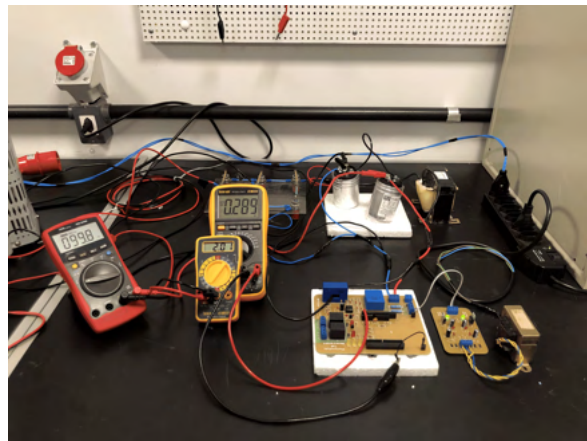
(c) Foto do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de corrente para um sinal de, aproximadamente, 0,8A.



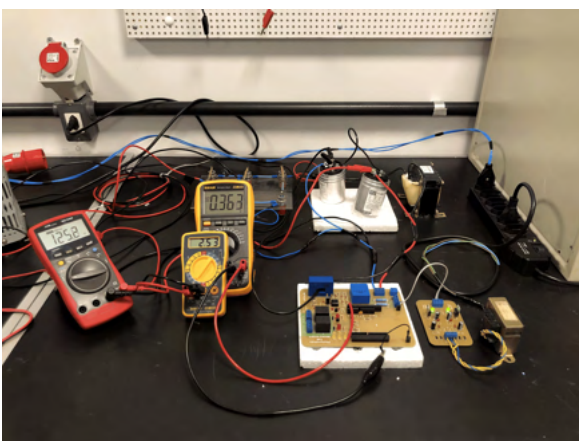
(d) Foto do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de corrente para um sinal de, aproximadamente, 1,0A.



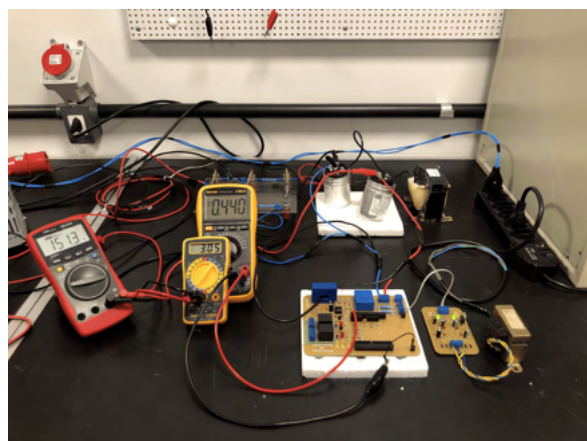
(e) Foto do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de corrente para um sinal de, aproximadamente, 1,5A.



(f) Foto do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de corrente para um sinal de, aproximadamente, 2,0A.



(g) Foto do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de corrente para um sinal de, aproximadamente, 2,5A.



(h) Foto do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de corrente para um sinal de, aproximadamente, 3,0A.

Figura 44 – Fotos do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento de corrente, para sinais entre 0,2A a 3A.

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

$V_{DC}(V)$	Carga (Ω)	$I_{DC}(A)$	$I_{Meas}(V)$
10,07	50	0,20	0,026
25,12	50	0,50	0,070
40,00	50	0,80	0,114
50,40	50	1,01	0,144
75,10	50	1,51	0,216
99,80	50	2,01	0,289
125,20	50	2,53	0,363
151,30	50	3,05	0,440

Tabela 8 – Resultado do ensaio de caracterização do circuito de condicionamento para medição de corrente.

Onde V_{DC} é a tensão do barramento C.C., I_{DC} é a corrente que flui no barramento C.C. e I_{Meas} é a tensão medida na saída do circuito de condicionamento de corrente.

Novamente, a partir dos resultados obtidos na Tabela 8, é apresentado um modelo linear ajustado ao circuito de condicionamento de corrente, para obtenção da equação de ganho do circuito.

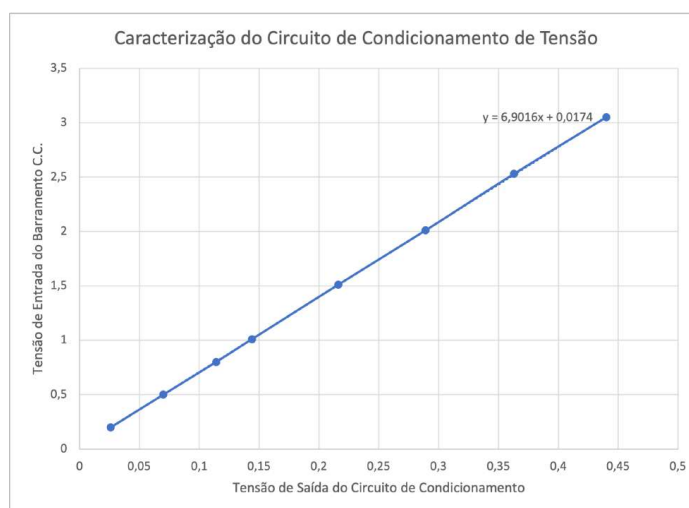


Figura 45 – Gráfico de dispersão dos resultados obtidos na caracterização do circuito de condicionamento de corrente.

$$I_{DC} = 6,9016 \times I_{meas} + 0,0174 \quad (4.2)$$

Onde I_{meas} é a tensão medida na saída do circuito de condicionamento e I_{DC} é a corrente estimada que circula no barramento C.C..

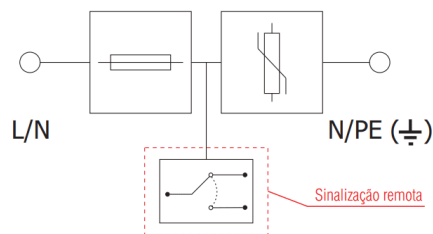
4.1.3 Monitoramento de Fim de Vida Útil do DPS

Para o monitoramento da vida útil do DPS, foi considerado uma string box com a linha de produtos *CLAMPER Front SR*, da fabricante *Clamper*, voltada para instalações em sistemas fotovoltaicos.



Figura 46 – Foto ilustrativa de um DPS da linha *CLAMPER Front SR*, voltado para instalações em sistemas fotovoltaicos, da fabricante *Clamper*. (CLAMPER, 2021a)

Esta linha de produtos possui um sistema para sinalização remota (SR) do estado de vida útil do dispositivo, a partir de três terminais: comum, normalmente aberto e normalmente fechado, conforme ilustrado na Figura 47.



DPS com sinalização remota “/SR”

Figura 47 – Foto do esquema elétrico de dispositivos DPS voltados para instalações em sistemas fotovoltaicos, com sinalização remota, da fabricante *Clamper*. (CLAMPER, 2021a)

A Figura 48 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 *pull-up*, um dispositivo funcional resultará em uma saída com nível lógico alto e um dispositivo com defeito resultará em uma saída com nível lógico baixo.

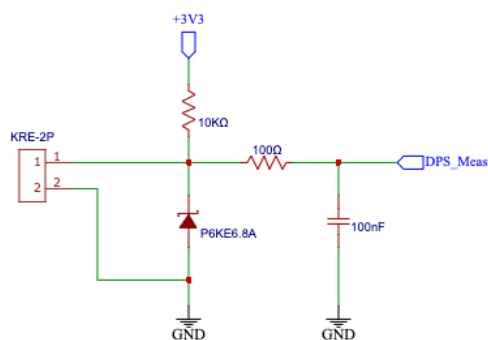


Figura 48 – Esquemático do circuito proposto para o monitoramento da vida útil do DPS.

4.1.4 Seccionamento do Circuito

Para fins de seccionamento do circuito, foi utilizado uma par de relés *JQC-3F*, da fabricante *Fangke*.

Este componente foi escolhido com base nos requisitos de tensão e corrente especificados para o trabalho. Entretanto, ele também poderá ser utilizado para acionamentos de seccionadoras de maior porte. A Figura 49 apresenta o diagrama esquemático deste circuito.

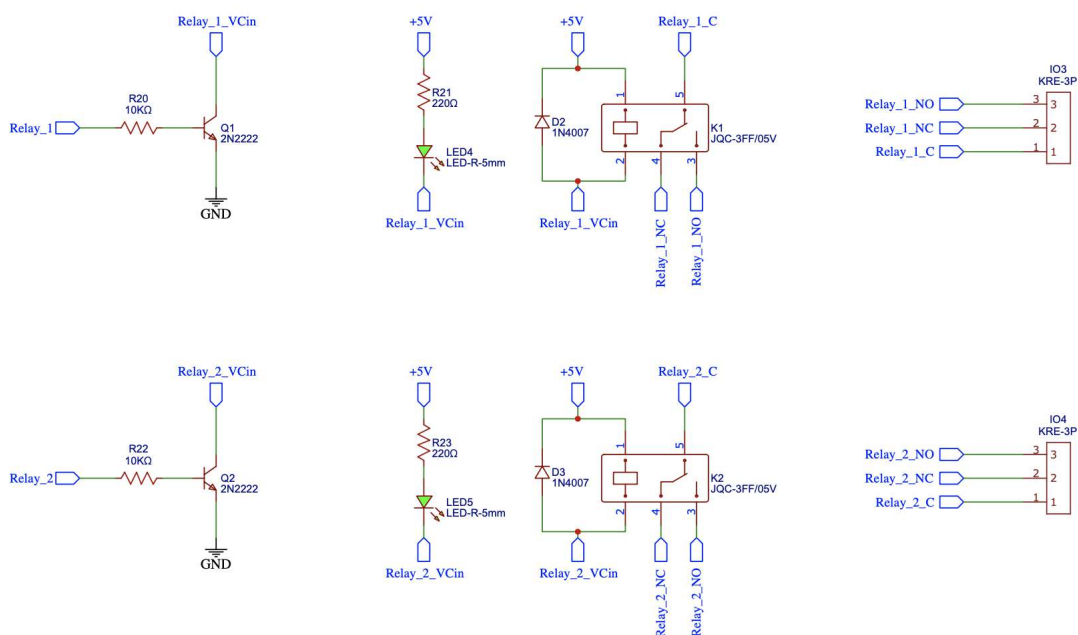


Figura 49 – Esquemático do circuito proposto para controle dos dispositivos relés, voltados para o seccionamento do circuito.

4.1.5 Microcontrolador

Considerando o *kit* de desenvolvimento adotado (*NUCLEO-G474RE*), a Figura 50 apresenta a proposta de *pinout* do microcontrolador, considerando os demais circuito apresentados acima.

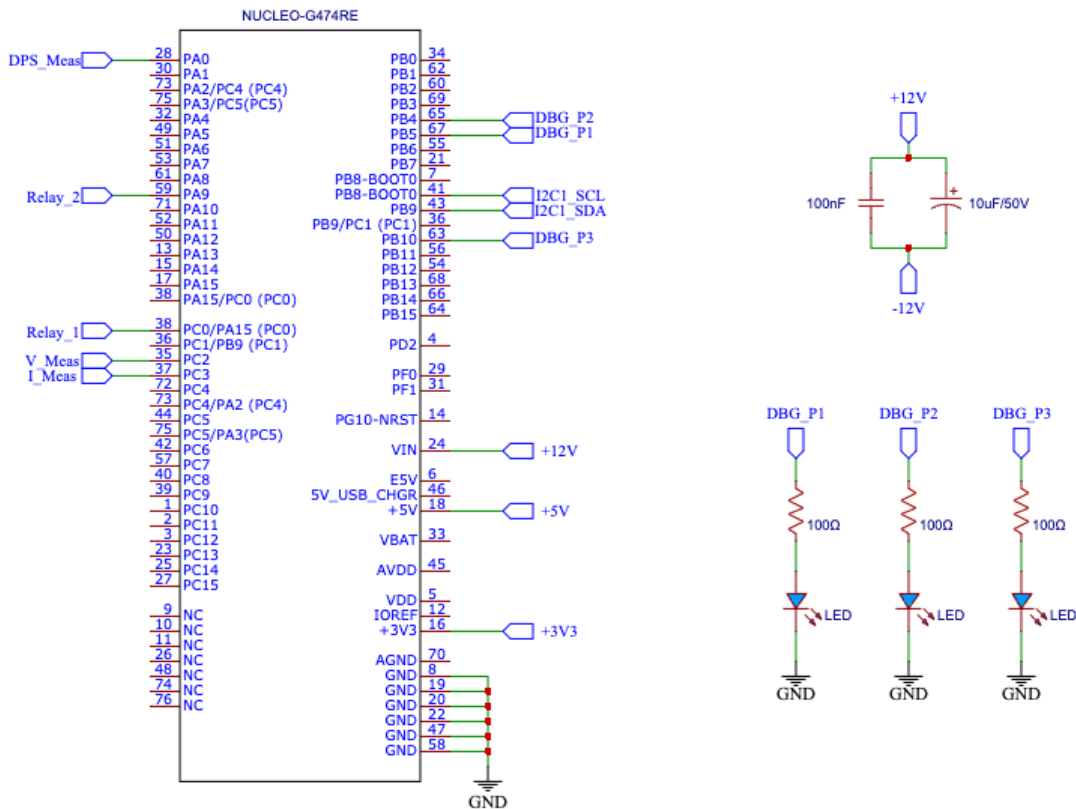


Figura 50 – Esquemático contendo o *pinout* do microcontrolador e os *LEDs* do módulo *debug*.

O módulo *debugg* é composto por três *LED's* (Figura 50), divididos em *Probe 1*, *Probe 2* e *Probe 3*, tal que a *Probe 1* representa o *bit* mais significativo, conforme descrito na Tabela 6.

4.1.6 Fonte de Alimentação

Para determinação do circuito da fonte de alimentação do sistema, foi considerado uma tensão nominal de 12V, bem como o consumo de corrente de cada circuito ou componente utilizado no protótipo.

A Tabela 9 apresenta a estimativa de consumo do circuito no pior cenário, ou seja, em que todos os circuitos e sub-circuitos estarão ligados.

Circuito/Componente	Tensão (V)	Corrente (mA)
Transdutor LV 20-P	12	35
Transdutor LA 55-P	12	60
Condicionamento de Tensão e Corrente	12	5
Monitoramento de Vida Útil do DPS	12	5
Módulo <i>Debug</i>	12	45
Microcontrolador NUCLE-G474RE	12	250
Módulo de Seccionamento	12	200
TOTAL	12 V	600 mA

Tabela 9 – Estimativa de consumo de corrente, considerando o pior cenário, ou seja, em que todos os circuitos e sub-circuitos estarão ligados.

Baseado no levantamento feito, o consumo crítico do sistema poderá chegar a, aproximadamente, $7,2W$ e, nesse sentido, foi adotado um fator de segurança de 1,65 no dimensionamento do circuito do sistema de alimentação.

Dessa forma, foi projetado uma fonte linear simétrica, de $\pm 12V/1A$, conforme circuito esquemático apresentado na Figura 51.

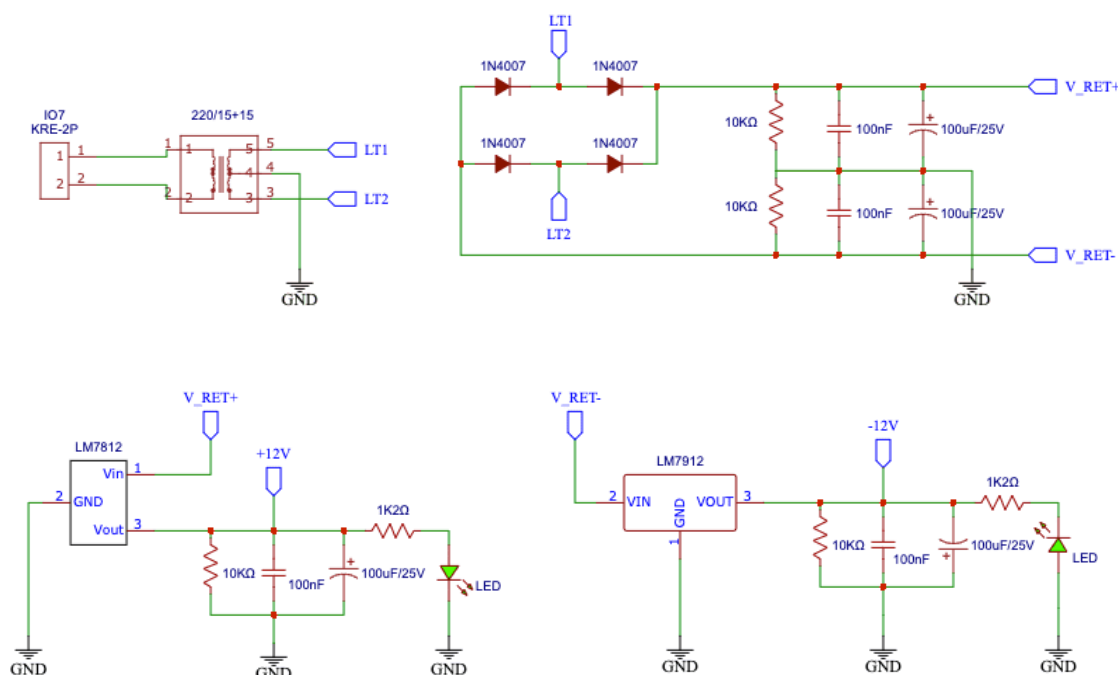


Figura 51 – Esquemático do circuito de alimentação, baseado em um transformador com *TAP* central, um retificador completo e reguladores lineares de tensão.

4.1.7 Placa de Circuito Impresso

Para o projeto da *PCI*, foram considerados os circuitos e componentes apresentados nos Anexos A e B, bem como alguns outros fatores para o correto dimensionamento da placa.

4.1.7.1 Requisitos de *Layout*

Dentre os diversos aspectos a serem levados em conta no desenvolvimento de um *layout* para *PCIs*, destacam-se a largura e espaçamento entre as trilhas.

A largura da camada de cobre, em conjunto com sua espessura, determinam a capacidade de condução de corrente da trilha. A Tabela 10 apresenta uma referência para determinação da largura de trilha, em função de sua espessura e corrente nominal.

Largura da Trilha ¹	Corrente (A)	
	1 oz ²	2 oz ²
5 mils	0,5	0,7
10 mils	0,8	1,4
20 mils	1,4	2,2
30 mils	1,9	3,0
50 mils	2,5	4,0
100 mils	4,0	7,0

Tabela 10 – Largura mínima de uma trilha, em função de sua espessura e corrente nominal. (LIMA, 2012)

O espaçamento entre as trilhas adjacentes, bem como o formato da trilha em si, pode resultar no mau funcionamento do circuito, causado por interferências eletromagnéticas e capacitâncias parasitas. A Tabela 11 apresenta uma referência para determinação do espaçamento mínimo entre as trilhas, em função da sua tensão nominal.

Tensão ³	Clearance ¹
30 V	8 mils
50 V	25 mils
100 V	60 mils
170 V	150 mils
250 V	300 mils
500 V	500 mils

Tabela 11 – Espaçamento mínimo entre trilhas adjacentes, em função da diferença de potencial. (LIMA, 2012)

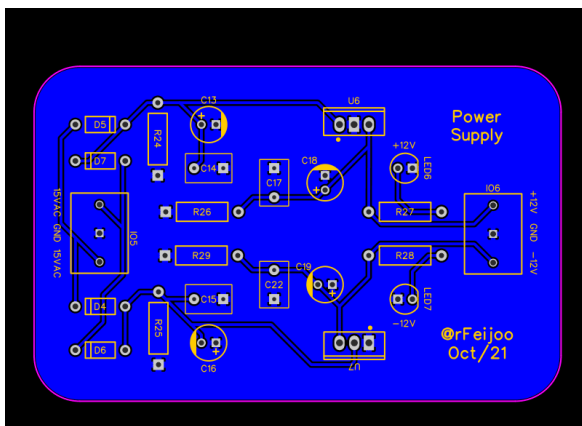
¹ 1 mils = 0,0254 mm.

² 1 oz = 28,35 g.

³ DC ou tensão de pico V_p .

4.1.8 Produção das PCBs

Como o circuito é voltado para quadros em corrente contínua, optou-se por modularizar o sistema em fonte de alimentação e sistema de controle. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

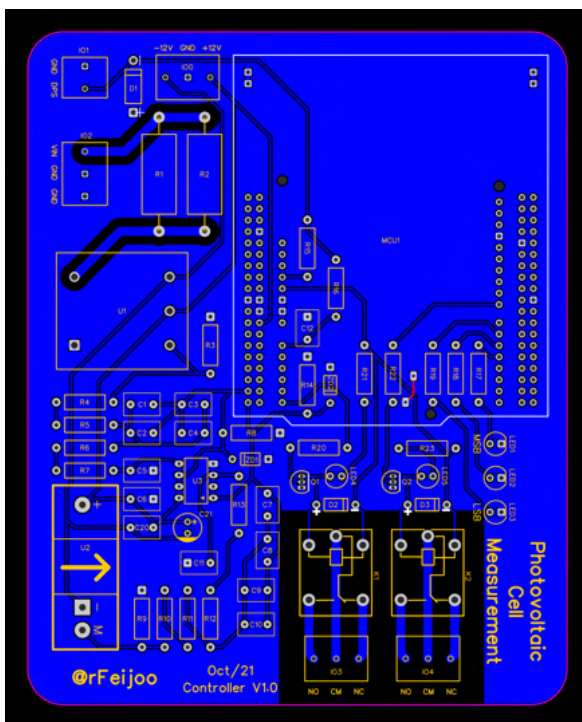


(a) *Layout* da placa de circuito impresso da fonte de alimentação do sistema.

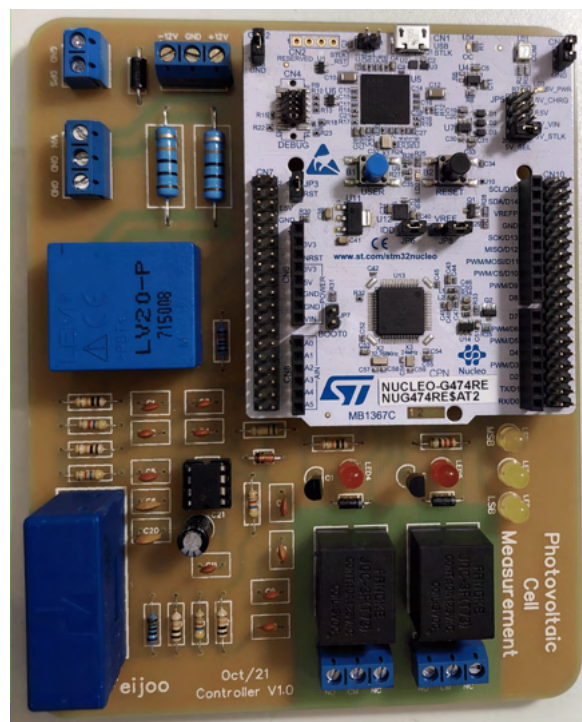


(b) Foto da placa de circuito impresso com a fonte de alimentação montada.

Figura 52 – Foto do *layout* projetado e da placa montada do sistema de alimentação. Dimensões: 92x58,45mm



(a) *Layout* da placa de circuito impresso do sistema de controle.



(b) Foto da placa de circuito impresso com o sistema de controle montado.

Figura 53 – Foto do *layout* projetado e da placa montada do sistema de controle. Dimensões: 120x150mm.

4.2 Desenvolvimento de Firmware do Protótipo Funcional

Tomando-se por base os requisitos do projeto, a Figura 54 apresenta o fluxograma global modelado para o *firmware* embarcado.

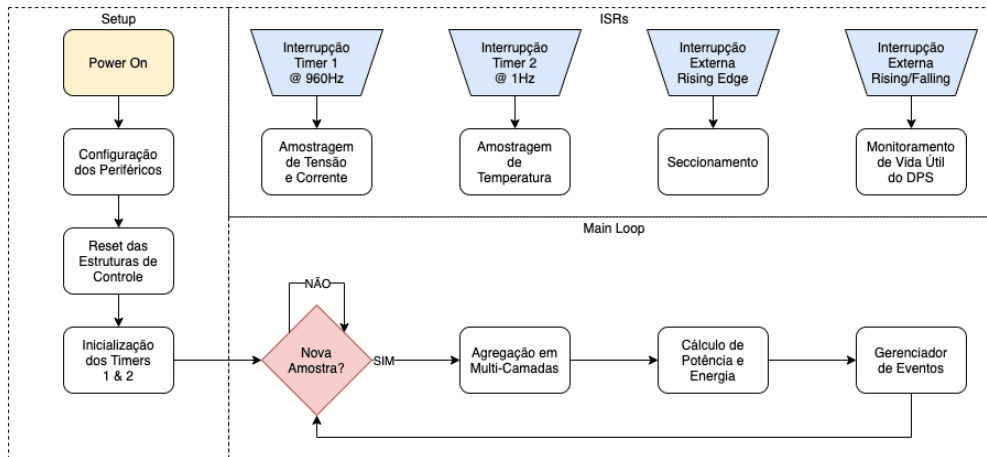


Figura 54 – Fluxograma global de execução do *firmware*.

4.2.1 Configurações Gerais do *Firmware*

Nesse contexto, para implementação do código, foi utilizado a plataforma de desenvolvimento *STM32 Cube IDE*, da *ST*, voltada para o desenvolvimento em C e C++ ([STMICROELECTRONICS, 2021](#))

4.2.1.1 Configuração dos *GPIOs*

A Figura 55 apresenta a relação de configuração dos *GPIOs*, bem como a Tabela 12 apresenta suas respectivas funcionalidades.

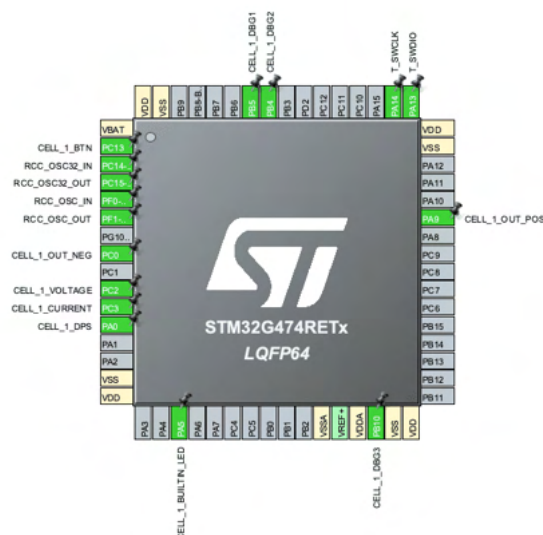


Figura 55 – Tela de configuração dos *GPIOs* na plataforma *Cube IDE*.

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)

Tabela 12 – Descrição dos *GPIOs* configurados na plataforma *Cube IDE*.

4.2.1.2 Configuração dos Módulos ADC

Para este trabalho, foram utilizados 3 módulos ADC (ADC1, ADC2 e 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 Figura 56 apresenta os parâmetros de configuração dos módulos ADC1 e ADC2.

<pre> ADCs_Common_Settings Mode Dual regular simultaneous mode only DMA Access Mode DMA access mode disabled Delay between 2 sampling phases 1 Cycle ADC_Settings Clock Prescaler Synchronous clock mode divided by 2 Resolution ADC 12-bit resolution Data Alignment Right alignment Gain Compensation 0 Scan Conversion Mode Disabled End Of Conversion Selection End of sequence of conversion Low Power Auto Wait Disabled Continuous Conversion Mode Disabled Discontinuous Conversion Mode Disabled DMA Continuous Requests Disabled Overrun behaviour Overrun data preserved ADC_Regular_ConversionMode Enable Regular Conversions Enable Enable Regular Oversampling Disable Number Of Conversion 1 External Trigger Conversion Source Regular Conversion launched by software External Trigger Conversion Edge None Rank Rank 1 Channel Channel 8 Sampling Time 2.5 Cycles Offset Number No offset ADC_Injected_ConversionMode Enable Injected Conversions Disable </pre>	<pre> ADCs_Common_Settings Mode Dual regular simultaneous mode only DMA Access Mode DMA access mode disabled Delay between 2 sampling phases 1 Cycle ADC_Settings Clock Prescaler Synchronous clock mode divided by 2 Resolution ADC 12-bit resolution Data Alignment Right alignment Gain Compensation 0 Scan Conversion Mode Disabled End Of Conversion Selection End of sequence of conversion Low Power Auto Wait Disabled Continuous Conversion Mode Disabled Discontinuous Conversion Mode Disabled DMA Continuous Requests Disabled Overrun behaviour Overrun data preserved ADC_Regular_ConversionMode Enable Regular Conversions Enable Enable Regular Oversampling Disable Number Of Conversion 1 Rank Rank 1 Channel Channel 9 Sampling Time 2.5 Cycles Offset Number No offset ADC_Injected_ConversionMode Enable Injected Conversions Disable </pre>
(a) Configuração do ADC1	(b) Configuração do ADC2

Figura 56 – Parâmetros de configuração dos módulos ADC1 e ADC2, respectivamente, para amostragem simultânea de tensão e corrente.

Nesse contexto, o terceiro módulo ADC (ADC5) surge da necessidade de amostrar a temperatura em uma taxa mais lenta, conforme parametrizado na Figura 57.

<ul style="list-style-type: none"> ▼ ADC_Settings Clock Prescaler Resolution Data Alignment Gain Compensation Scan Conversion Mode End Of Conversion Selection Low Power Auto Wait Continuous Conversion Mode Discontinuous Conversion Mode DMA Continuous Requests Overrun behaviour ▼ ADC_Regular_ConversionMode Enable Regular Conversions Enable Regular Oversampling Number Of Conversion External Trigger Conversion Source External Trigger Conversion Edge Rank Channel Sampling Time Offset Number ▼ ADC_Injected_ConversionMode Enable Injected Conversions 	<ul style="list-style-type: none"> Synchronous clock mode divided by 2 ADC 12-bit resolution Right alignment 0 Disabled End of single conversion Disabled Disabled Disabled Disabled Disabled Overrun data preserved Enable Disable 1 Regular Conversion launched by software None 1 Channel Temperature Sensor 640.5 Cycles No offset Disable
---	--

Figura 57 – Parâmetros de configuração do módulo ADC5, para amostragem da temperatura interna do processador.

4.2.1.3 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 4.3 demonstra como obter a frequência do *timer* em função do divisor de *clock* (PSC) e de seu contador (CNT). Na sequência, a Figura 58 apresenta a parametrização dos *timers* utilizados neste trabalho.

$$Freq = \frac{120MHz}{(PSC + 1) \times CNT} \quad (4.3)$$

<ul style="list-style-type: none"> ▼ Counter Settings Prescaler (PSC – 16 bits value) Counter Mode Dithering Counter Period (AutoReload Register – ...) Internal Clock Division (CKD) Repetition Counter (RCR – 16 bits value) auto-reload preload ▼ Trigger Output (TRGO) Parameters Master/Slave Mode (MSM bit) Trigger Event Selection TRGO Trigger Event Selection TRGO2 	<ul style="list-style-type: none"> 119 Up Disable 1041 No Division 0 Enable Disable (Trigger input effect not delayed) Reset (UG bit from TIMx_EGR) Reset (UG bit from TIMx_EGR) 	<ul style="list-style-type: none"> ▼ Counter Settings Prescaler (PSC – 16 bits value) Counter Mode Dithering Counter Period (AutoReload Register – ...) Internal Clock Division (CKD) auto-reload preload ▼ Trigger Output (TRGO) Parameters Master/Slave Mode (MSM bit) Trigger Event Selection TRGO 	<ul style="list-style-type: none"> 11999 Up Disable 10000 No Division Enable Disable (Trigger input effect not delayed) Reset (UG bit from TIMx_EGR)
--	--	---	--

(a) Configuração do TIM1

(b) Configuração do TIM2

Figura 58 – Parâmetros de configuração dos módulos TIM1 e TIM2, com frequências de $960Hz$ e $1Hz$, respectivamente.

4.2.2 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 da *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 de dados.

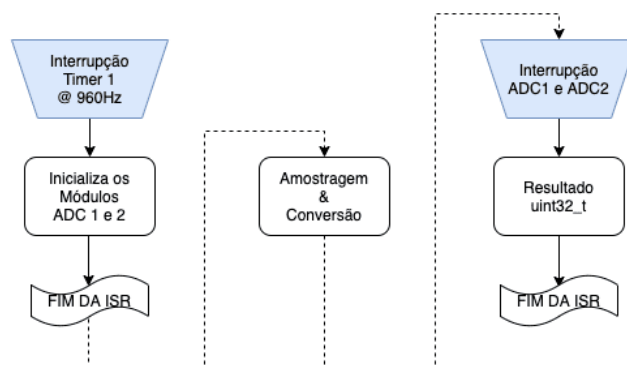


Figura 59 – Fluxograma do processo de conversão do módulo ADC via interrupções. Note que a linha tracejada indica o fluxo de atividades realizadas pelo módulo ADC, ou seja, sem demandar recursos do processador.

A Figura 60 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)
{
    // Obtém 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;
}
  
```

Figura 60 – 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 utilizadas para separação das amostras de corrente e tensão, conforme apresentado a seguir:

$$Voltage = raw \& 0xFFFF \quad (4.4)$$

$$Current = raw \gg 16 \quad (4.5)$$

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.

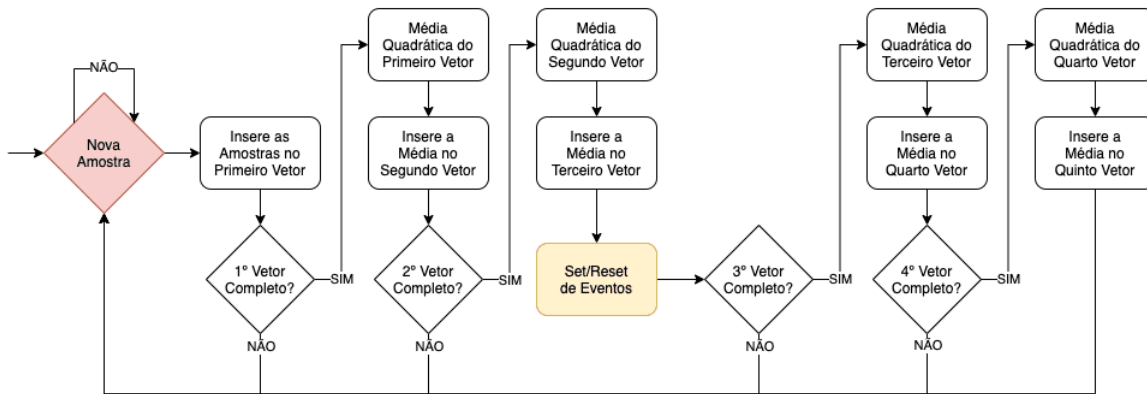


Figura 61 – Fluxograma da agregação em multi-camadas, após separação das amostras de corrente e tensão.

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).

4.2.3 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 54.

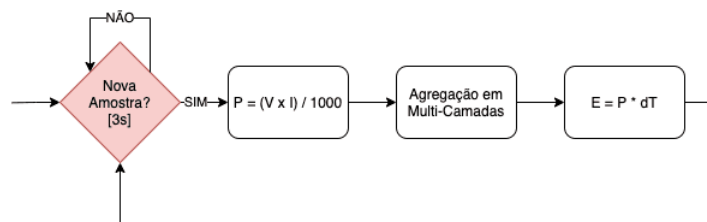


Figura 62 – Fluxograma da rotina de cálculo da potência e energia produzidas.

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.

4.2.4 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. A Figura 63 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);
}

```

Figura 63 – *Printscreen* da rotina chamada após o término de uma conversão do módulo ADC 5.

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 (0,76 V), *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, 2020c)

4.2.5 Interrupções Externas

Tanto o 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 64.

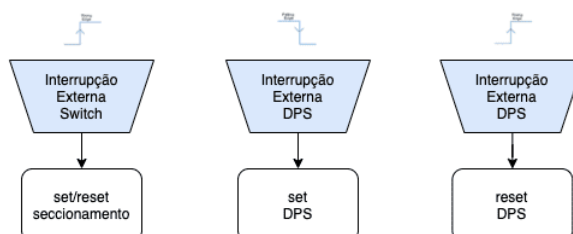


Figura 64 – Fluxograma das rotinas executadas após interrupção externa dos pinos voltados para seccionamento manual e monitoramento de vida útil do DPS.

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

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 baixo identifica um DPS defeituoso.

4.2.6 Gerenciador de Eventos

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

conforme descrito na Figura 65.

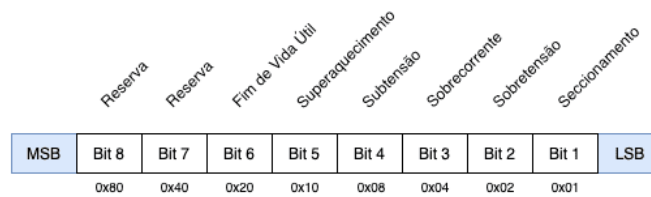


Figura 65 – Descritivo da variável utilizada para gerenciamento dos eventos.

Dessa forma, o módulo gerenciador de eventos utiliza operações lógicas para configuração de eventos e, conseqüentemente, consegue lidar facilmente com a ocorrência de eventos simultâneos, considerando a prioridade de cada evento (Tabela 5).

```
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;
}
```

Figura 66 – Rotina de *set/reset* das flags identificadores dos eventos.

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

4.2.6.1 Módulo *Debug*

Considerando a lógica adotada para gerenciamento dos eventos, descrita acima, foi utilizado um multiplexador 8x3, em que os 6 eventos monitorados são apresentados nos 3 *LEDs* do módulo *Debug*.

Evento	Event's Handler	Módulo Debug
Nenhum evento identificado	0x00	0x0
Seccionamento	0x01	0x1
Sobretensão	0x02	0x2
Sobrecorrente	0x04	0x3
Subtensão	0x08	0x4
Superaquecimento	0x10	0x5
Fim de Vida Útil do DPS	0x20	0x6

Tabela 13 – Resultado da multiplexação da variável de gerenciamento dos eventos para o módulo *debug*.

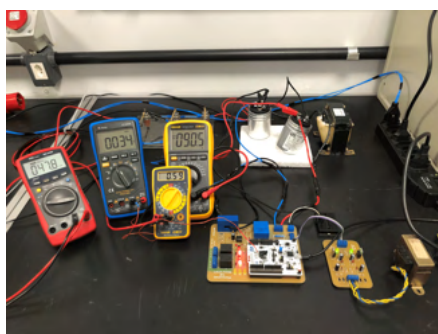
4.3 Análise de Desempenho do Sistema

Para análise de desempenho do sistema projetado, nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios experimentais relacionados a medição ou monitoramento de cada funcionalidade. O *setup* de materiais utilizados nestes ensaios é o mesmo apresentado pela Figura 34.

Para os ensaios seguintes, o multímetro vermelho apresenta a tensão de saída do Varivolt (V_{rms}), o multímetro azul apresenta a temperatura ($^{\circ}C$) de um sensor colado no microcontrolador, o multímetro amarelo de cima mostra a tensão do barramento C.C. e, o de baixo, a corrente que flui no barramento C.C..

4.3.1 Seccionamento Manual

Para o ensaio do seccionamento manual, o sistema foi submetido, inicialmente, a uma condição em regime permanente, ou seja, sem identificação de nenhum evento.



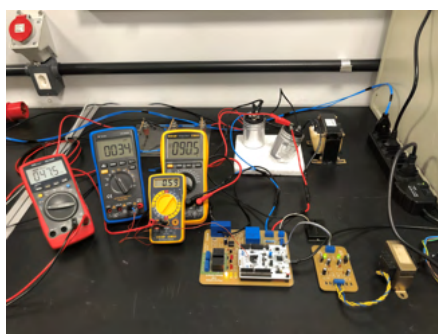
(a) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000488
flag	flag *	0x00000000
!wv_sample	_Bool	false
!wv	hrs_measurement *	0x20000480
!wv2	hrs_measurement *	0x20001188
!wv3	power_measurement *	0x20001880
!wv4	power_measurement *	0x20000080
!wv5	digital_Ox *	0x20000088
!wv6	digital_Ox *	0x20000090
!wv7	digital_Ox *	0x200000A0
!wv8	digital_Ox *	0x200000B8
!wv9	float	88.4481904
!wv10	float	0.601288503
!wv11	float	0.0831792678
!wv12	float	0.00235504972
!wv13	float	39.9433336
!wv14	uint8_t	0x00

(b) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.

Figura 67 – Foto do ensaio experimental relacionado ao seccionamento manual, sem detecção de qualquer evento.

Note, na foto da esquerda, os *LEDs* do módulo *Debug* apagados e, na da direita, a variável *events_handler* zerada, ou seja, para uma condição sem nenhum evento detectado.



(a) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000488
flag	flag *	0x00000000
!wv_sample	_Bool	false
!wv	hrs_measurement *	0x20000480
!wv2	hrs_measurement *	0x20001188
!wv3	power_measurement *	0x20001880
!wv4	power_measurement *	0x20000080
!wv5	digital_Ox *	0x20000088
!wv6	digital_Ox *	0x20000090
!wv7	digital_Ox *	0x200000A0
!wv8	digital_Ox *	0x200000B8
!wv9	float	88.4278484
!wv10	float	0.69487805
!wv11	float	0.0529431861
!wv12	float	0.00247838768
!wv13	float	39.8410217
!wv14	uint8_t	1x001

(b) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.

Figura 68 – Foto do ensaio experimental após interação com a botoeira de seccionamento manual.

Após interação com o botão integrado do sistema, note na foto da esquerda os *LEDs* dos relés apagados, bem como os *LEDs* do módulo *debug* indicando seccionamento manual ativado. Note, também, na foto da direita a variável *events_handler* caracterizando o evento.

4.3.2 Medição de Tensão e Corrente

Para o ensaio de medição de tensão e corrente, o sistema foi submetido a valores conhecidos de tensão para uma carga de 150Ω . Além disso, os limiares foram configurados conforme mostrado na Figura 69 e, na sequência, são apresentados os resultados obtidos.

```

/*
 * @brief Definição dos limiares de tensão e corrente.
 */
#define OVERVOLTAGE_HOLD_LIMIT      200.0
#define OVERVOLTAGE_RELEASE_LIMIT  175.0

#define UNDERVOLTAGE_HOLD_LIMIT    25.00
#define UNDERVOLTAGE_RELEASE_LIMIT 50.00

#define OVERCURRENT_HOLD_LIMIT      1.35
#define OVERCURRENT_RELEASE_LIMIT   1.00

```

Figura 69 – *Printscreen* das macros referente aos limiares para identificação dos eventos.



(a) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000468
tag	char *	0x80098fc "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Bool	true
master	rms_measurement *	0x200004b0
slave	rms_measurement *	0x20001188
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_IDs *	0x20000988
relay_2	digital_IDs *	0x20000990
status	digital_IDs *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	3.29610705
current	float	0.0258168653
power	float	8.50951544e-05
energy	float	7.09126269e-08
temperature	float	38.0293121
events_handler	uint_1	8 '\b'

(b) *Printscreen* da tela *live expressions* da CUBE IDE.



(c) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000468
tag	char *	0x80098fc "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Bool	false
master	rms_measurement *	0x200004b0
slave	rms_measurement *	0x20001188
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_IDs *	0x20000988
relay_2	digital_IDs *	0x20000990
status	digital_IDs *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	25.2009583
current	float	0.160353407
power	float	0.00404105941
energy	float	3.23277454e-05
temperature	float	37.7069473
events_handler	uint_1	8 '\b'

(d) *Printscreen* da tela *live expressions* da CUBE IDE.



(e) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000a68
tag	char *	0x80098fc "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Bool	false
master	rms_measurement *	0x20000a80
slave	rms_measurement *	0x20001198
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_I/Os *	0x20000948
relay_2	digital_I/Os *	0x20000910
status	digital_I/Os *	0x20000900
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	47.6171112
current	float	0.31598899
power	float	0.0150455302
energy	float	0.000147083178
temperature	float	37.3846054
events_handler	uint8_t	0x0

(f) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.

(g) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000a68
tag	char *	0x80098fc "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Bool	false
master	rms_measurement *	0x20000a80
slave	rms_measurement *	0x20001198
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_I/Os *	0x20000948
relay_2	digital_I/Os *	0x20000910
status	digital_I/Os *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	51.2742043
current	float	0.343268457
power	float	0.0176007133
energy	float	0.0003903501022
temperature	float	38.0293121
events_handler	uint8_t	0x0

(h) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.

Figura 70 – Resultados dos ensaios de 0V até, aproximadamente, 50V.

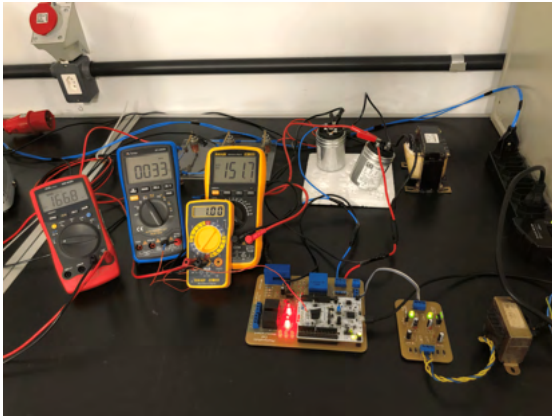
Note que, após *power on*, o sistema identificou corretamente o evento de subtensão tanto na variável *events_handler* (0x08) quanto no módulo *Debug* (0x4). Somente acima dos 50V o evento foi finalizado.



(a) Foto da bancada de ensaio.

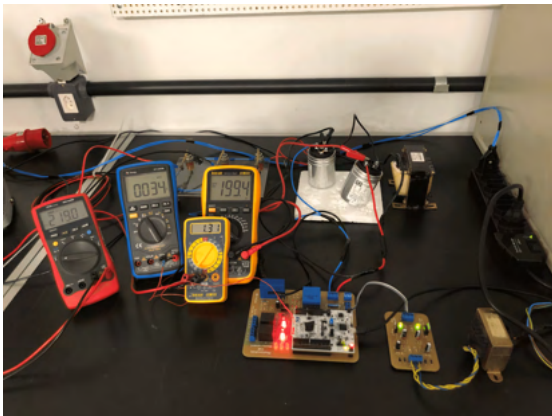
Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000a68
tag	char *	0x80098fc "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Bool	false
master	rms_measurement *	0x20000a80
slave	rms_measurement *	0x20001198
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_I/Os *	0x20000948
relay_2	digital_I/Os *	0x20000910
status	digital_I/Os *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	97.6535339
current	float	0.08534692
power	float	0.084973481
energy	float	0.000736116548
temperature	float	38.673996
events_handler	uint8_t	0x0

(b) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.



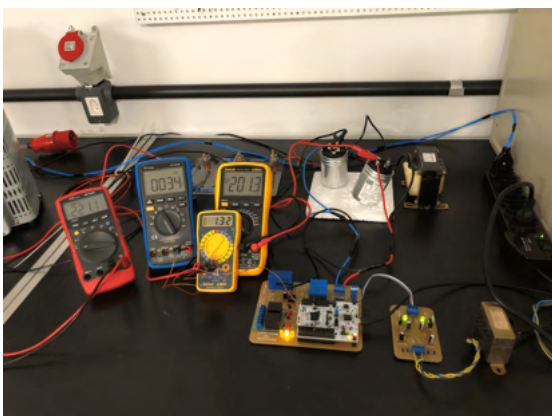
(c) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000a68
tag	char *	0x800098fc "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Bool	false
master	rms_measurement *	0x20000ab0
slave	rms_measurement *	0x20001198
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_iOs *	0x200009d8
relay_2	digital_iOs *	0x200009f0
status	digital_iOs *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	148.802811
current	float	1.01084948
power	float	0.160417238
energy	float	0.000126347895
temperature	float	38.9963379
events_handler	uint8_t	0x0

(d) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.

(e) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000a68
tag	char *	0x800098fc "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Bool	false
master	rms_measurement *	0x20000ab0
slave	rms_measurement *	0x20001198
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_iOs *	0x200009d8
relay_2	digital_iOs *	0x200009f0
status	digital_iOs *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	189.749794
current	float	1.32734166
power	float	0.285133739
energy	float	0.0420347974
temperature	float	42.2187838
events_handler	uint8_t	0x0

(f) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.

(g) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000a68
tag	char *	0x800098fc "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Bool	false
master	rms_measurement *	0x20000ab0
slave	rms_measurement *	0x20001198
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_iOs *	0x200009d8
relay_2	digital_iOs *	0x200009f0
status	digital_iOs *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	202.176468
current	float	1.33590662
power	float	0.27088911
energy	float	0.04382814
temperature	float	41.8974419
events_handler	uint8_t	2x002

(h) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.

Figura 71 – Resultados dos ensaios de 100V até, aproximadamente, 200V.

Desta vez, para tensões maiores que 50V e menores que 200V, o sistema não detectou nenhum evento. Em 201V, o sistema identificou corretamente o evento de sobretensão, tanto na variável *events_handler* (0x02) quanto no módulo *debug* (0x2).



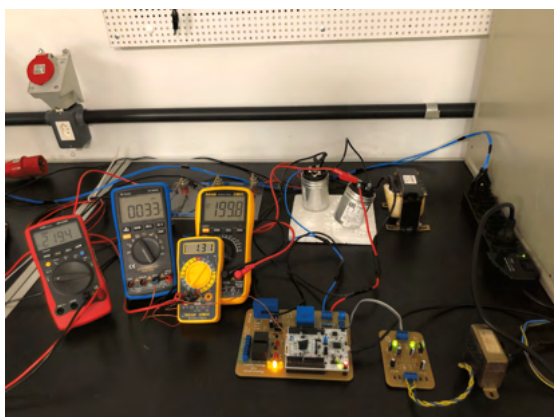
(a) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000a68
tag	char *	0x80098fc "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Boot	false
master	rms_measurement *	0x20000a00
slave	rms_measurement *	0x20001188
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_I/Os *	0x200009d8
relay_2	digital_I/Os *	0x200009f0
status	digital_I/Os *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	217.271591
current	float	1.43162847
power	float	0.311052173
energy	float	0.0457841903
temperature	float	41.252758
events_handler	uint8_t	6'1006

(b) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.

Figura 72 – Resultado do ensaio de, aproximadamente, 215V.

As Figuras 72a e 72b mostram, novamente, a identificação do evento de sobretensão. Note, ainda, que a corrente aplicada é de aproximadamente 1,4A, superior ao limiar para eventos de sobrecorrente. Entretanto, o evento não foi disparado pois o evento de sobretensão possui maior prioridade, conforme apresentado na Tabela 5.



(a) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000a68
tag	char *	0x80098fc "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Boot	false
master	rms_measurement *	0x20000a00
slave	rms_measurement *	0x20001188
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_I/Os *	0x200009d8
relay_2	digital_I/Os *	0x200009f0
status	digital_I/Os *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	201.491058
current	float	1.32589638
power	float	0.267156273
energy	float	0.0479493476
temperature	float	39.9633636
events_handler	uint8_t	6'1006

(b) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.

(c) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000a68
tag	char *	0x80098fc "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Boot	false
master	rms_measurement *	0x20000a00
slave	rms_measurement *	0x20001188
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_I/Os *	0x200009d8
relay_2	digital_I/Os *	0x200009f0
status	digital_I/Os *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	176.937153
current	float	1.37189726
power	float	0.207340211
energy	float	0.0554838814
temperature	float	38.673996
events_handler	uint8_t	6'1006

(d) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.



(e) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x2000a68
tag	char *	0x80098fc "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Bool	false
master	rms_measurement *	0x2000ab0
slave	rms_measurement *	0x20001198
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_iOs *	0x200099d8
relay_2	digital_iOs *	0x200099d0
status	digital_iOs *	0x20000a18
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	173.538635
current	float	1.1505425
power	float	0.199663579
energy	float	0.0566613153
temperature	float	38.3516541
events_handler	uint8_t	4 '004'

(f) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.

Figura 73 – Resultados dos ensaios de 200V até, aproximadamente, 175V.

Abaixo da faixa dos 175V, o sistema finalizou o evento de sobretensão e identificou o evento de sobrecorrente, que já estava ativo, como já dito anteriormente.



(a) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x2000a68
tag	char *	0x80098fc "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Bool	false
master	rms_measurement *	0x2000ab0
slave	rms_measurement *	0x20001198
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_iOs *	0x200099d8
relay_2	digital_iOs *	0x200099d0
status	digital_iOs *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	154.150513
current	float	1.0247498
power	float	0.16792341
energy	float	0.0632291585
temperature	float	38.673996
events_handler	uint8_t	4 '004'

(b) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.

(c) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x2000a68
tag	char *	0x80098fc "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Bool	false
master	rms_measurement *	0x2000ab0
slave	rms_measurement *	0x20001198
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_iOs *	0x200099d8
relay_2	digital_iOs *	0x200099d0
status	digital_iOs *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	148.027313
current	float	0.988919795
power	float	0.146387145
energy	float	0.0642357022
temperature	float	38.9516541
events_handler	uint8_t	0 '0'

(d) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.

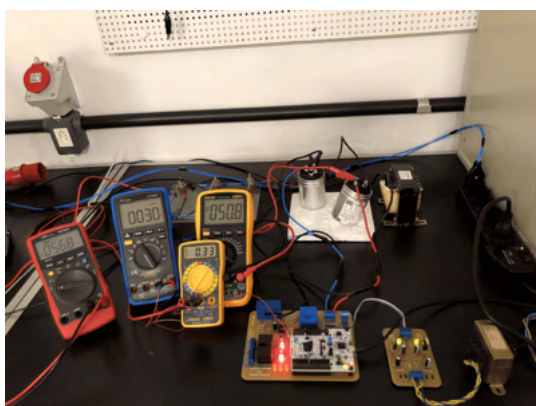
Figura 74 – Resultado do ensaio em, aproximadamente, 150V.

Com o evento de sobrecorrente ativo e uma corrente abaixo de 1A, o sistema volta para regime permanente, sem nenhum evento ativo.



(a) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000a68
tag	char *	0x800988c "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Bool	false
master	rms_measurement *	0x20000ab0
slave	rms_measurement *	0x20001188
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_I/O *	0x20000988
relay_2	digital_I/O *	0x20000990
status	digital_I/O *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	99.0027161
current	float	0.66325965
power	float	0.6659710714
energy	float	0.0654333234
temperature	float	39.6410217
events_handler	uint8_t	0x10'

(b) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.

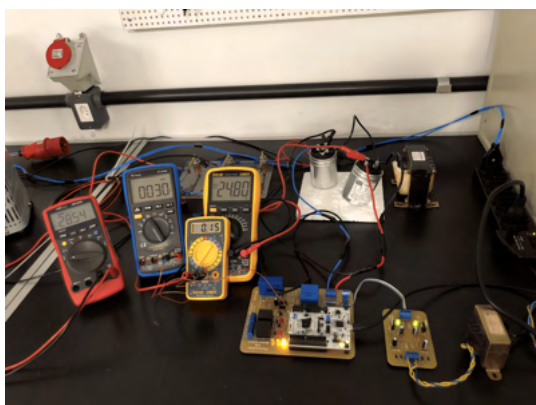
(c) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000a68
tag	char *	0x800988c "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Bool	false
master	rms_measurement *	0x20000ab0
slave	rms_measurement *	0x20001188
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_I/O *	0x20000988
relay_2	digital_I/O *	0x20000990
status	digital_I/O *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	49.4419832
current	float	0.331379341
power	float	0.0163839944
energy	float	0.0660392717
temperature	float	38.3516541
events_handler	uint8_t	0x10'

(d) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.

(e) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000a68
tag	char *	0x800988c "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Bool	false
master	rms_measurement *	0x20000ab0
slave	rms_measurement *	0x20001188
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_I/O *	0x20000988
relay_2	digital_I/O *	0x20000990
status	digital_I/O *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	26.0925961
current	float	0.18997592
power	float	0.0044348957
energy	float	0.0662105232
temperature	float	39.9633836
events_handler	uint8_t	0x10'

(f) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.

(g) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000a68
tag	char *	0x800988c "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Bool	false
master	rms_measurement *	0x20000ab0
slave	rms_measurement *	0x20001188
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_I/O *	0x20000988
relay_2	digital_I/O *	0x20000990
status	digital_I/O *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	24.3080349
current	float	0.185746564
power	float	0.00378589286
energy	float	0.0662303194
temperature	float	40.2887056
events_handler	uint8_t	8x10'

(h) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.

Figura 75 – Resultados dos ensaios de 100V até, aproximadamente, 25V.

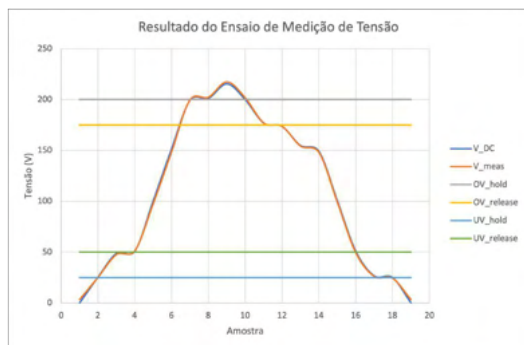
Por fim, ao abaixar a tensão da faixa dos 25V, o sistema identifica novamente o evento de subtensão.

A Tabela 14 apresenta o resultado consolidado do ensaio realizado acima, identificando o início e fim de cada evento detectado. Na sequência, as Figuras 76a e 76b apresentam o plote dos resultados obtidos através da medição de tensão e corrente, em função da quantidade de amostras obtidas.

V_{DC}	I_{DC}	V_{meas}	I_{meas}	Status
0V	0A	3,3V	0,03A	Início subtensão
25,4V	0,16A	25,2V	0,16A	Subtensão
48,7V	0,31A	47,6V	0,32A	Subtensão
51,0V	0,33A	51,3V	0,34A	Fim subtensão
100,4V	0,66A	97,7V	0,67A	Nenhum evento detectado
151,7V	1,00A	148,8V	1,01A	Nenhum evento detectado
199,4V	1,31A	199,7V	1,33A	Nenhum evento detectado
201,3V	1,32A	202,2V	1,34A	Início Sobretensão
215,4V	1,42A	217,3V	1,43A	Sobretensão + início sobrecorrente
199,8V	1,31A	201,5V	1,33A	Sobretensão + sobrecorrente
176,8V	1,16A	176,9V	1,17A	Fim sobretensão + sobrecorrente
173,5V	1,14A	173,5V	1,15A	Sobrecorrente
154,7V	1,01A	154,2V	1,02A	Sobrecorrente
149,0V	0,97A	148,0V	0,98A	Fim sobrecorrente
100,3V	0,65A	99,0V	0,66A	Nenhum evento detectado
50,8V	0,33A	49,4V	0,33A	Nenhum evento detectado
26,6V	0,17A	26,1V	0,17A	Nenhum evento detectado
24,8V	0,15A	24,3V	0,16A	Início subtensão
0V	0A	3,2V	0,03A	Subtensão

Tabela 14 – Resultado consolidado do ensaio de análise de desempenho do sistema de medição de corrente e tensão.

Onde V_{DC} e I_{DC} são tensão e corrente, respectivamente, no barramento C.C. e V_{meas} e I_{meas} são a tensão e corrente medidas pelo sistema.



(a) Medição de tensão.



(b) Medição de corrente.

Figura 76 – Plote dos resultados obtidos na medição de tensão e corrente, respectivamente, em função do número de amostras do ensaio.

Em seguida, as Equações 4.6 e 4.7 apresentam o erro quadrático médio (EQM) estimado para cada circuito de medição.

$$EQM_v \approx 2,68 V \quad (4.6)$$

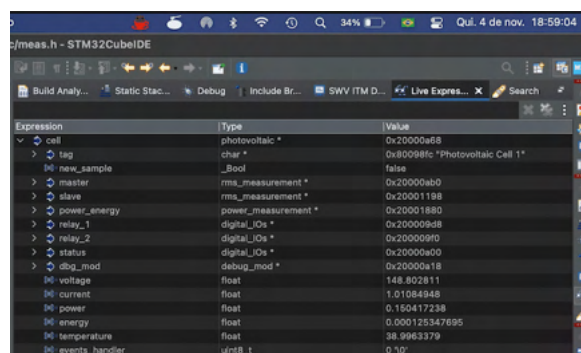
$$EQM_i \approx 0,22 mA \quad (4.7)$$

4.3.3 Medição de Potência e Energia

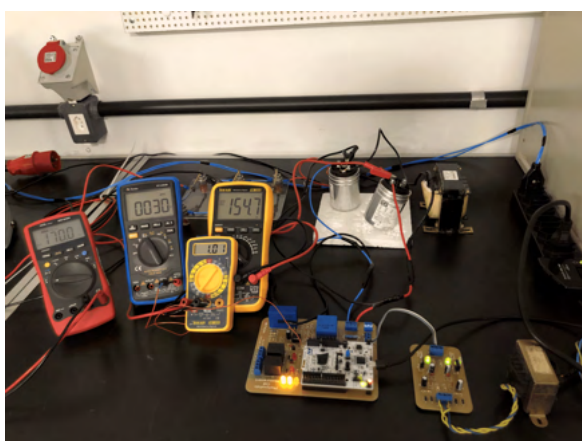
Para validação do cálculo da potência e energia gerada, o sistema foi submetido a uma tensão de 150V com carga de 150Ω, durante um período de 15 minutos.



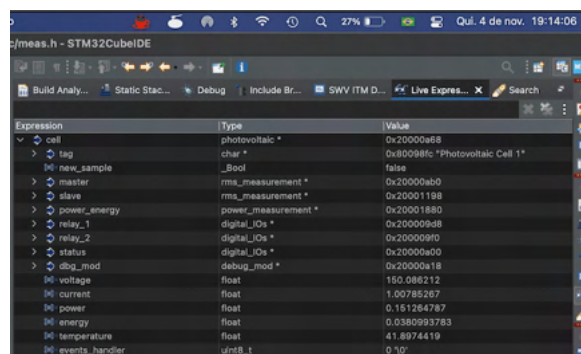
(a) Foto da bancada de ensaio.



(b) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.



(c) Foto da bancada de ensaio.



(d) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.

Figura 77 – Resultado do ensaio voltado para validação do cálculo da potência e energia gerada.

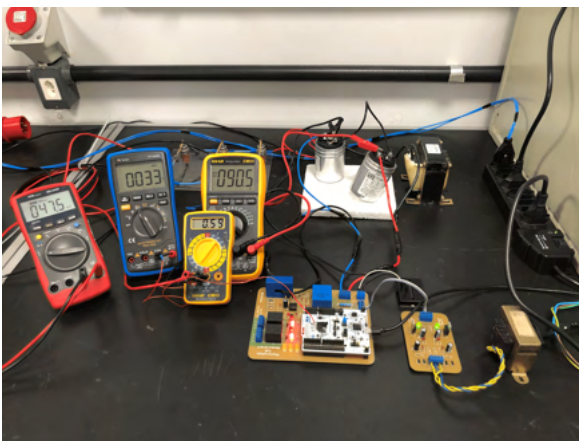
A Figura 77b apresenta o *printscreen* da tela *live expressions* logo após o sistema ser resetado para início do ensaio. Note uma tensão medida de 148,8V e corrente medida de 1,01A, resultando em uma potência de, aproximadamente, 0,15KW. Note, ainda, no topo da Figura 77b, o horário de início do ensaio, 18:59.

Já na Figura 77d, o resultado apresentado é ao fim dos 15 minutos, ou seja, às 19:14. Note uma pequena variação na medida de tensão e corrente, 150,1V e 1,00A. Por fim, note a energia estimada, para o período, de 0,038KWh pelo sistema.

Dessa forma, a energia estimada apresentou erro inferior a 2%.

4.3.4 Monitoramento da Temperatura Interna

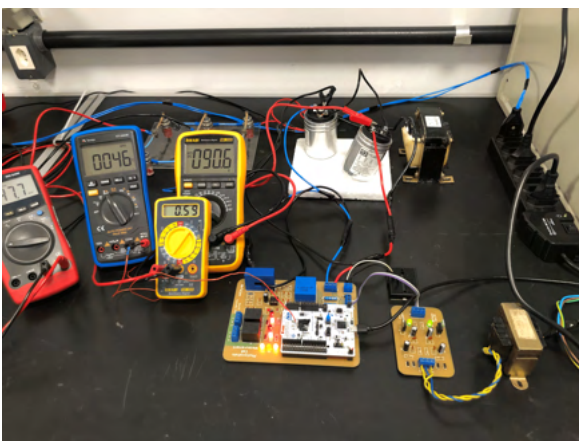
Para validação da medição de temperatura interna do processador, o sistema foi submetido a uma condição em regime permanente e, posteriormente, foi submetido a um soprador térmico para avaliar seu comportamento. Os resultados do ensaio são apresentados a seguir.



(a) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000a68
tag	char *	0x80098fc "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Bool	false
master	rms_measurement *	0x20000ab0
slave	rms_measurement *	0x20001198
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_I/Os *	0x200009d8
relay_2	digital_I/Os *	0x200009f0
status	digital_I/Os *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	88.5824966
current	float	0.601371586
power	float	0.0532709956
energy	float	0.000133098816
temperature	float	38.029121
events_handler	uint8_t	0x0

(b) *Printscreen* da tela *live expressions* da CUBE IDE.



(c) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000a68
tag	char *	0x80098fc "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Bool	false
master	rms_measurement *	0x20000ab0
slave	rms_measurement *	0x20001198
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_I/Os *	0x200009d8
relay_2	digital_I/Os *	0x200009f0
status	digital_I/Os *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	88.6179504
current	float	0.603082359
power	float	0.0534439236
energy	float	0.000578253879
temperature	float	44.4782001
events_handler	uint8_t	18 1020

(d) *Printscreen* da tela *live expressions* da CUBE IDE.

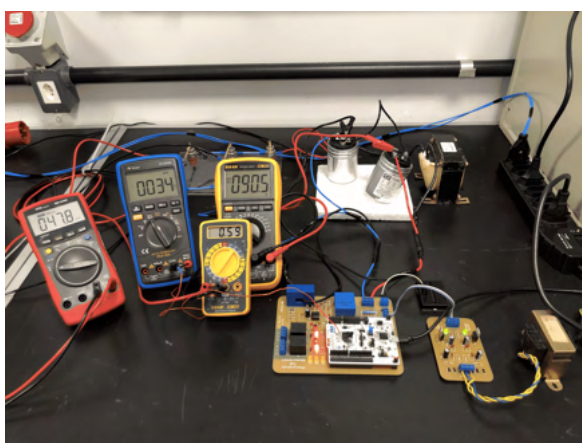
Figura 78 – Resultado do ensaio voltado para validação do monitoramento da temperatura interna do microcontrolador.

Note, nas Figuras 78a e 78b, que o sistema está em regime permanente, sem detecção de qualquer evento. No multímetro, foi aferida temperatura relativa de 33°C, já o sistema estimou uma temperatura relativa de 38°C. Esta diferença está associada muito ao fato de o sensor NTC, utilizado pelo multímetro, não estar devidamente em contato com o chip, resultando em uma má condutividade térmica e aumentando os erros associados a medição.

As Figuras 78c e 78d apresentam o resultado após aproximar o ar quente do microcontrolador. Note que o multímetro marca 46°C e o sistema 45°C. Note, ainda, que a variável *events_handler* identificou o evento (0x10), bem como o módulo *Debug* (0x5).

4.3.5 Monitoramento da Vida Útil do DPS

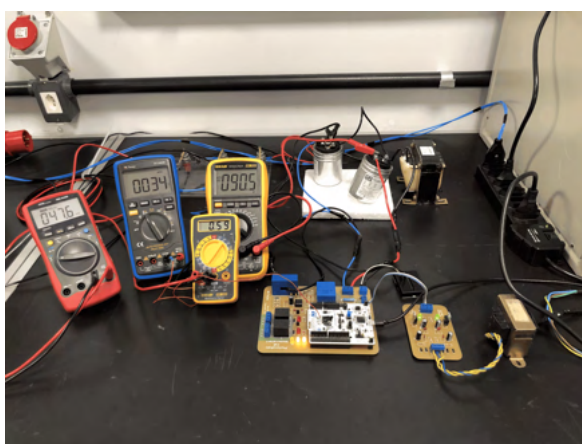
O último evento monitorado é o fim de vida útil do DPS. Para validação da rotina deste evento, o sistema foi novamente submetido a uma condição em regime permanente e, a partir de uma chave táctil, foi simulado a condição de fim de vida útil do componente.



(a) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000a68
tag	char *	0x80098fc "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Bool	false
master	rms_measurement *	0x20000ab0
slave	rms_measurement *	0x20001198
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_IOs *	0x200009e8
relay_2	digital_IOs *	0x200009f0
status	digital_IOs *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	88.6854111
current	float	0.60192436
power	float	0.053217154
energy	float	0.00274237245
temperature	float	39.3186798
events_handler	uint8_t	0x0

(b) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.



(c) Foto da bancada de ensaio.

Expression	Type	Value
cell	photovoltaic *	0x20000a68
tag	char *	0x80098fc "Photovoltaic Cell 1"
new_sample	_Bool	false
master	rms_measurement *	0x20000ab0
slave	rms_measurement *	0x20001198
power_energy	power_measurement *	0x20001880
relay_1	digital_IOs *	0x200009e8
relay_2	digital_IOs *	0x200009f0
status	digital_IOs *	0x20000a00
dbg_mod	debug_mod *	0x20000a18
voltage	float	88.5032264
current	float	0.598884344
power	float	0.053003259
energy	float	0.00296382396
temperature	float	39.6410217
events_handler	uint8_t	0x10

(d) Printscreen da tela *live expressions* da CUBE IDE.

Figura 79 – Resultado do ensaio voltado para validação do monitoramento de vida útil do componente DPS.

Note, na Figura 79b, o sistema em regime permanente, ou seja, sem detecção de qualquer evento. Já as Figuras 79c e 79d apresentam o resultado ao pressionar a chave táctil, simulando o fim de vida útil do componente DPS. Note a identificação do evento através da variável *events_handler* (0x20), bem como pelos *LEDs* do módulo *Debug* (0x6).

5 Considerações Finais

Conforme evidenciado ao longo do trabalho, a implantação de sistemas de geração solar fotovoltaica, seja no formato centralizado ou distribuído, tem apresentado um forte crescimento nos últimos anos e mantém perspectivas de crescimento contínuo para os anos seguintes. Nesse contexto, o estabelecimento de sistemas que assegurem a qualidade e segurança das instalações elétricas, automatizando o acompanhamento da operação e facilitando a manutenção das instalações, se mostram bastantes promissores.

Neste trabalho de conclusão de curso, abordou-se o desenvolvimento de um protótipo de *hardware* e *firmware* para automatização de caixas de junção aplicadas às instalações C.C. de um sistema fotovoltaico. Dentre as funcionalidades previstas neste sistema, destacam-se: medição de variáveis elétricas (tensão, corrente, potência e energia) nas entradas da caixa de junção, acompanhamento do estado operacional do Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS) e possibilidade de realização de manobras remotas do sistema. Tais funcionalidades foram definidas em função de um levantamento de requisitos para automatizar uma caixa de junção.

Em relação ao *hardware*, foram apresentadas as características do projeto, diagramas esquemáticos dos circuitos e desenvolvimento de placa de circuito impresso para validação do sistema. No desenvolvimento do *firmware*, concebeu-se uma arquitetura para aquisição e processamento dos sinais de tensão e corrente, identificação de eventos (sobretensão, sobrecorrente, seccionamento, superaquecimento etc.) e acionamento remoto com o usuário. Ressalta-se a utilização do microcontrolador STM32G473, visto que este atende a todas as necessidades do sistema, permite a fácil expansão do circuito quanto a quantidade de variáveis monitoradas. Por fim, procedeu-se a realização de uma série de experimentos, em ambiente laboratorial, para a caracterização dos circuitos e validação de funcionamento do sistema como um todo.

Tendo em vista a continuidade de desenvolvimento deste sistema, sugere-se os seguintes trabalhos futuros:

- Evolução do hardware, priorizando a compactação da placa por meio de componentes SMD, e integração a uma string box comercial;
- Desenvolvimento e integração de uma fonte chaveada ao *hardware*, na qual utilizam-se os próprios circuitos C.C. das instalações fotovoltaicas como entrada;
- Integração de um sistema de comunicação Wi-fi;

- Integração de algoritmos no *firmware* para subsidiar a manutenção de módulos fotovoltaicos;
- Desenvolvimento de testes com sistemas fotovoltaicos reais.

Por fim, todos os respectivos arquivos estão disponibilizados no [repositório](#) do trabalho, bem como um [vídeo](#) demonstrativo para apresentação do funcionamento do sistema e seu comportamento aos diversos eventos monitorados.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012*. 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acesso em: 19 Abr. 2021. Citado na página 20.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. *Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo*. 2021. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico>>. Acesso em: 19 Abr. 2021. Citado 3 vezes nas páginas 8, 19 e 20.

BAKER, B. C.; MICROCHIP. *Select the Right Operational Amplifier for your Filtering Circuits*. 2003. Disponível em: <<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/adn003.pdf>>. Acesso em: 23 de Mai. 2021. Citado na página 30.

BARRETTO, A. C. *Circuito Integrado de Condicionamento de Sinais Analógicos utilizando Tecnologia 0,5 um para Sinais Industriais e Biomédicos*. 2011. Disponível em: <shorturl.at/mBLNR>. Acesso em: 23 de Mai. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 29.

CLAMPER. *CLAMPER Front 15kA SR*. 2021. Disponível em: <<https://www.lojaclamper.com.br/dps-clamper-front-15ka-sr/p#product-description>>. Acesso em: 27 de Out. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 58.

CLAMPER. *CLAMPER Solar SB*. 2021. Disponível em: <<https://www.clamper.com.br/product/clamper-solar-dps-fotovoltaico-3>>. Acesso em: 24 de Mai. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 27.

ECOMAIS. *Energia Solar*. 2021. Disponível em: <<http://www.ecomais.ind.br/energia-solar>>. Acesso em: 23 de Mai. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 28.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional - Ano Base: 2019*. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf>. Acesso em: 20 Abr. 2021. Citado na página 19.

ENERGÊS. *Guia Completo do Módulo Fotovoltaico*. 2020. Disponível em: <<https://energes.com.br/energia-solar/guia-completo-modulos-fotovoltaicos>>. Acesso em: 5 de Mai. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 24.

FRONTIN, S. de O. *Usina Fotovoltaica Jaíba Solar*. [S.l.]: Teixeira Gráfica e Editora LTDA., 2017. Citado 4 vezes nas páginas 8, 27, 28 e 38.

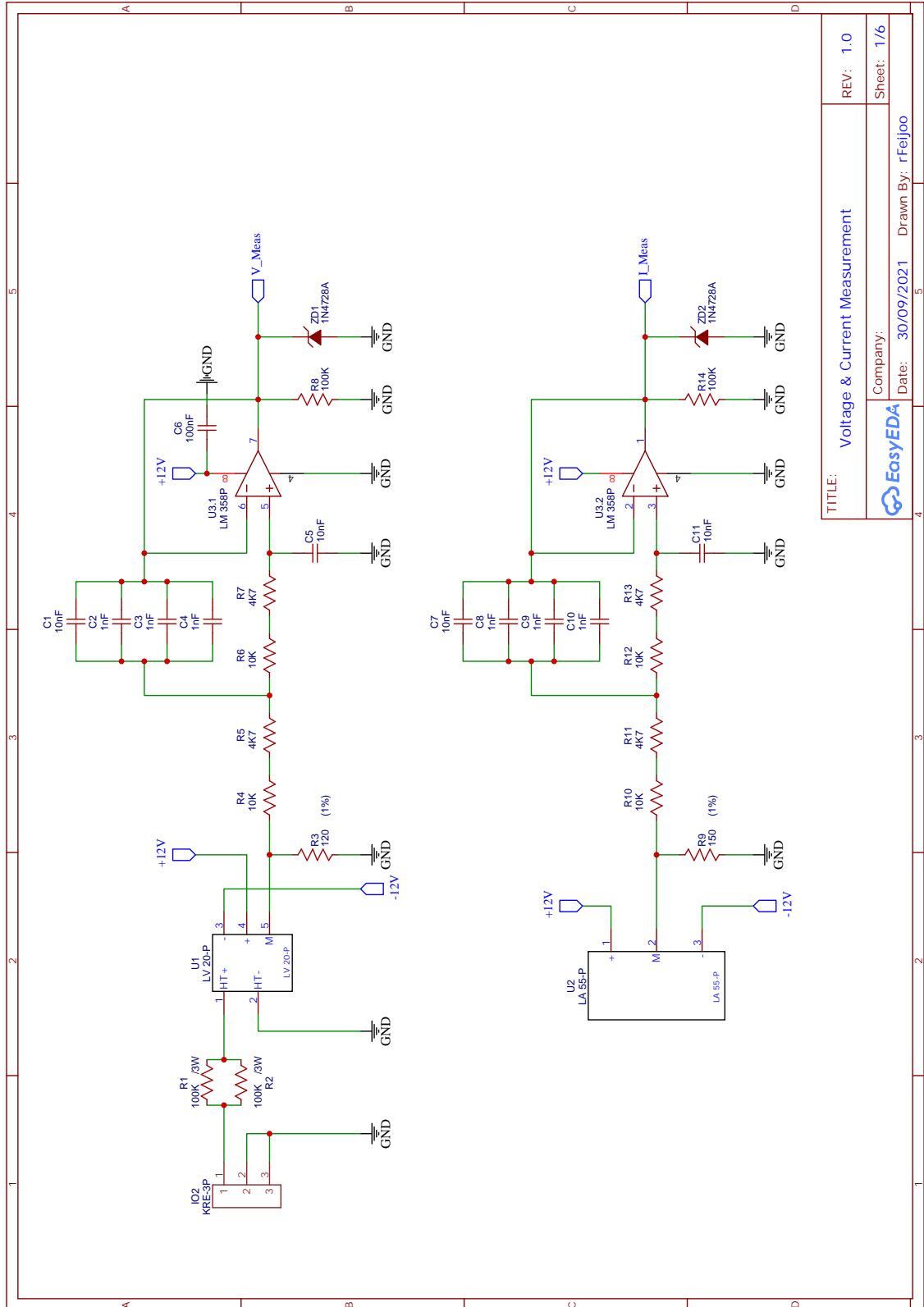
LATHI, B. P. *Sinais e Sistemas Lineares*. [S.l.]: Artmed Editora S.A., 2007. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

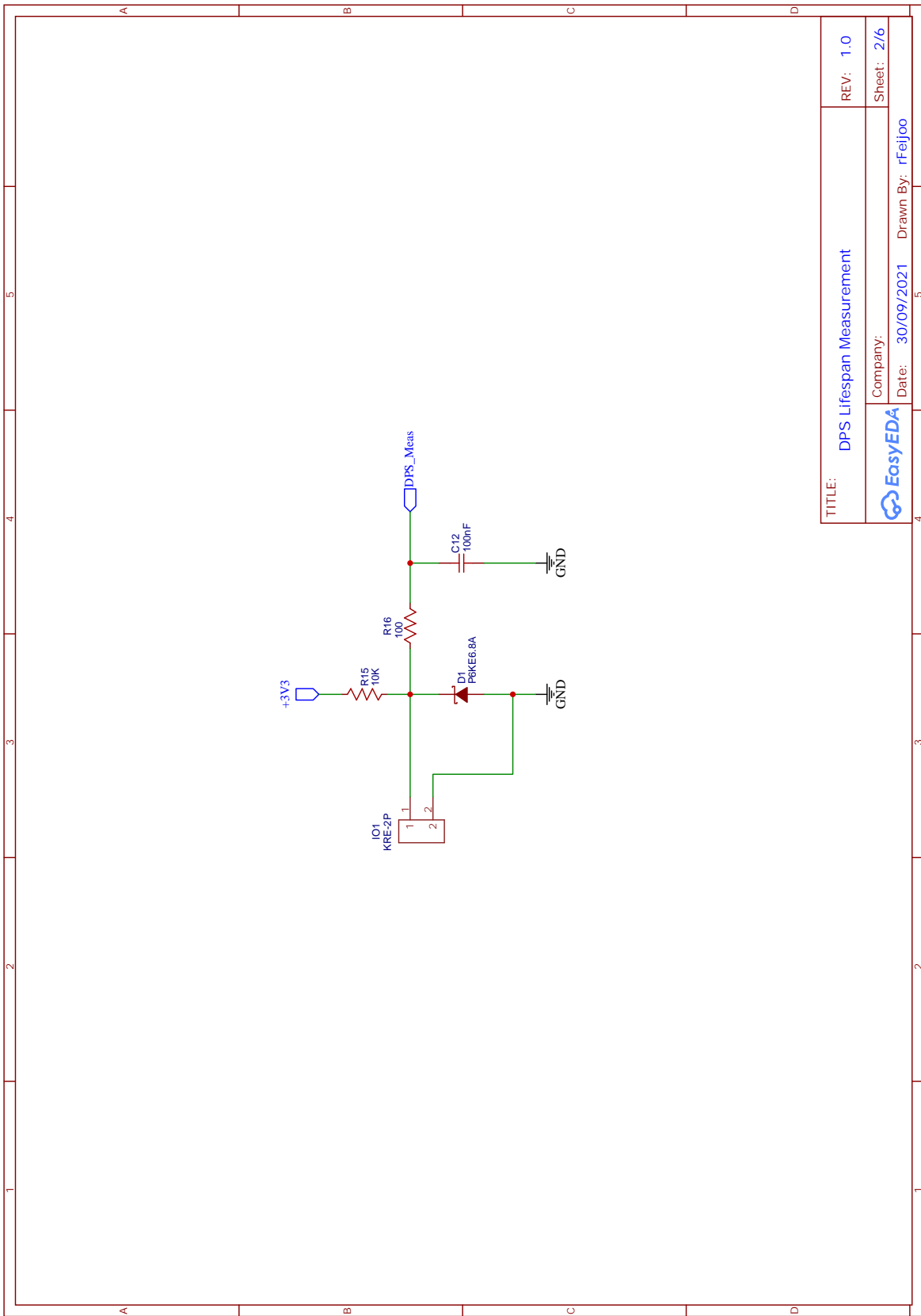
LIFE ENERGY MOTION. *Current Transducer LA 55-P*. 2014. Disponível em: <https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/la_55-p_e.pdf>. Acesso em: 12 de Mai. 2021. Citado 4 vezes nas páginas 9, 12, 40 e 41.

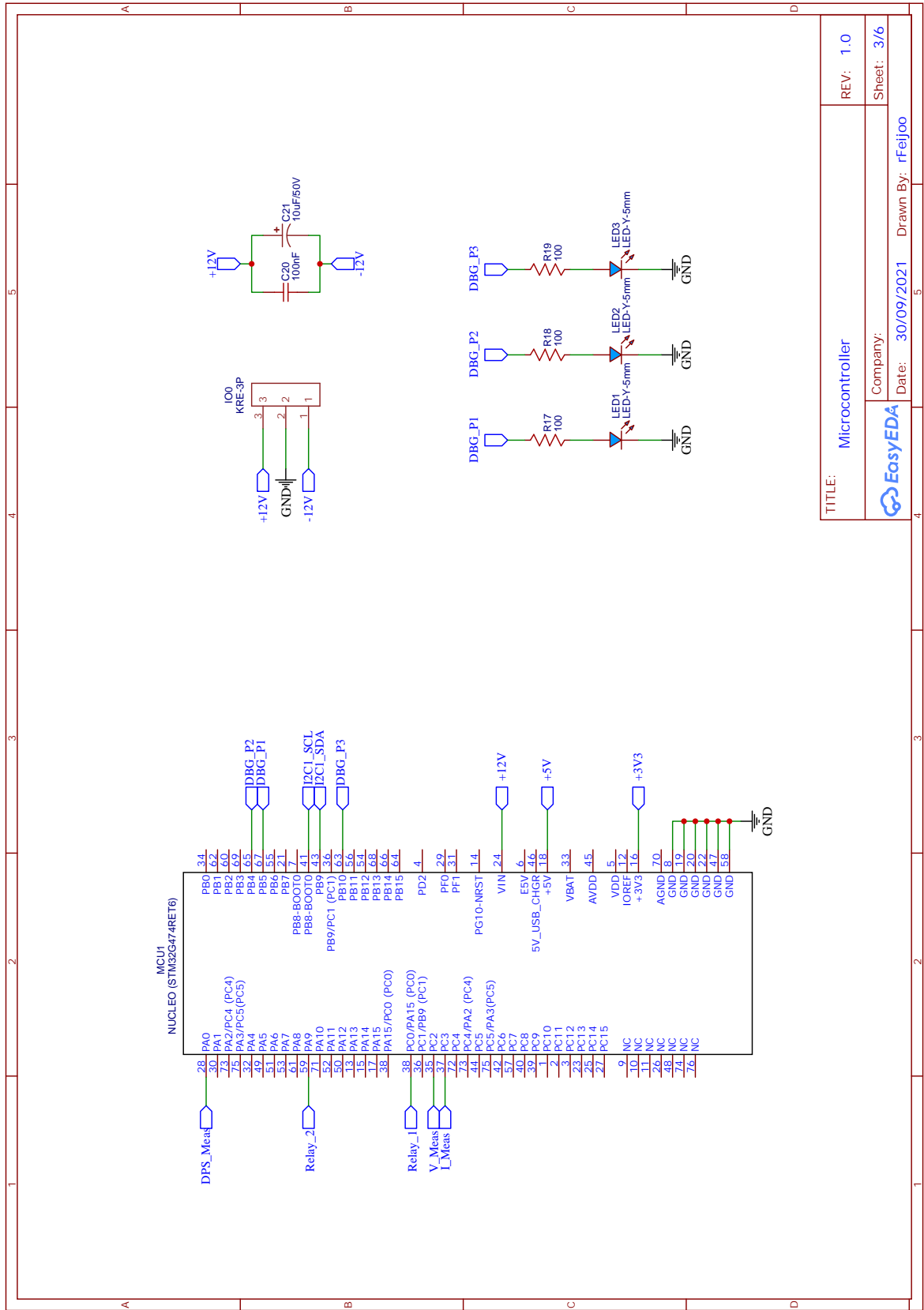
- LIFE ENERGY MOTION. *Voltage Transducer LV 20-P*. 2014. Disponível em: <shorturl.at/stzBY>. Acesso em: 13 de Mai. 2021. Citado 4 vezes nas páginas 8, 12, 39 e 40.
- LIMA, C. B. de. *AVR e Arduino. Técnicas de Projeto, 2 Ed.* São Paulo: Clube de Autores, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 62.
- MERCADO LIVRE. *String Box Cc Fotovoltaica 1000v - 2 Entradas 1 Saída*. 2021. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-980911721-string-box-cc-fotovoltaica-1000v-2-entradas-1-saida-_JM>. Acesso em: 24 de Mai. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 27.
- PORTAL SOLAR. *Geração solar centralizada terá investimentos de R\$9,5 bilhões até 2025*. 2020. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/geracao-solar-centralizada-tera-investimentos-de-r-95-bilhoes-ate-2025.html>>. Acesso em: 20 Abr. 2021. Citado na página 20.
- REIS, P. H. A. dos. *Projeto e Construção de um Sistema de Aquisição e Condicionamento de Sinais para Monitoramento da Qualidade de Energia*. Brasília, DF, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.
- SADIKU, M. N. O. *Fundamentos de Circuitos Elétricos*. [S.l.]: AMGH Editora Ltda., 2013. Citado 4 vezes nas páginas 8, 32, 33 e 42.
- SEDRA, A. S. *Microelectronic Circuits*. [S.l.]: Oxford University Press, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 8, 30, 31 e 32.
- STMICROELECTRONICS. *Microcontrolador NUCLEO-WL55JC STM32*. 2020. Disponível em: <<https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-wl55jc.html>>. Acesso em: 20 de Mai. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 45.
- STMICROELECTRONICS. *NUCLEO-WL55JC STM32 User Manual*. 2020. Disponível em: <<file:///Users/rfeijoo/Downloads/um2505-stm32g4-nucleo64-boards-mb1367-stmicroelectronics.pdf>>. Acesso em: 20 de Mai. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 46.
- STMICROELECTRONICS. *STM32G474 Datasheet*. 2020. Disponível em: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32g474cb.pdf>>. Acesso em: 20 de Mai. 2021. Citado na página 69.
- STMICROELECTRONICS. *STM32 CubeIDE*. 2021. Disponível em: <<https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>>. Acesso em: 1 de Nov. 2021. Citado na página 64.
- UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA. *Cells, Modules and Arrays*. 2014. Disponível em: <http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/solar_electricity/basics/cells_modules_arrays.htm>. Acesso em: 6 de Mai. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 26.
- USF. *Processamento Digital de Sinais*. 2014. Disponível em: <<http://pds-usf.blogspot.com/2014/05/sinais-e-sistemas-discretos.html>>. Acesso em: 10 de Mai. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 29.
- VILLALVA, M. G. *Energia Solar Fotovoltaica. Conceitos e Aplicações*. São Paulo: Érica, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 8, 23, 24, 25 e 26.

Anexos

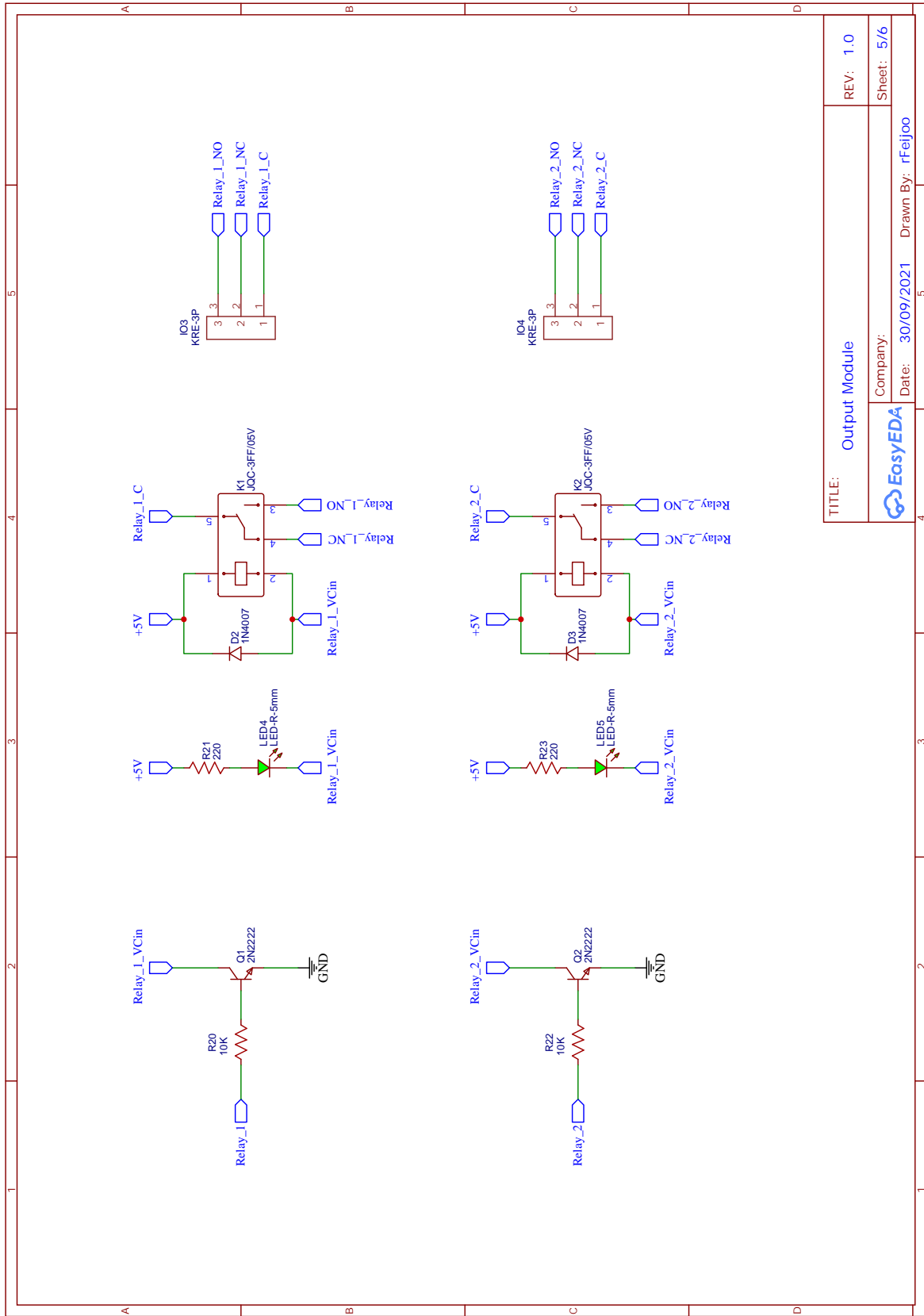
ANEXO A – Esquemático Completo



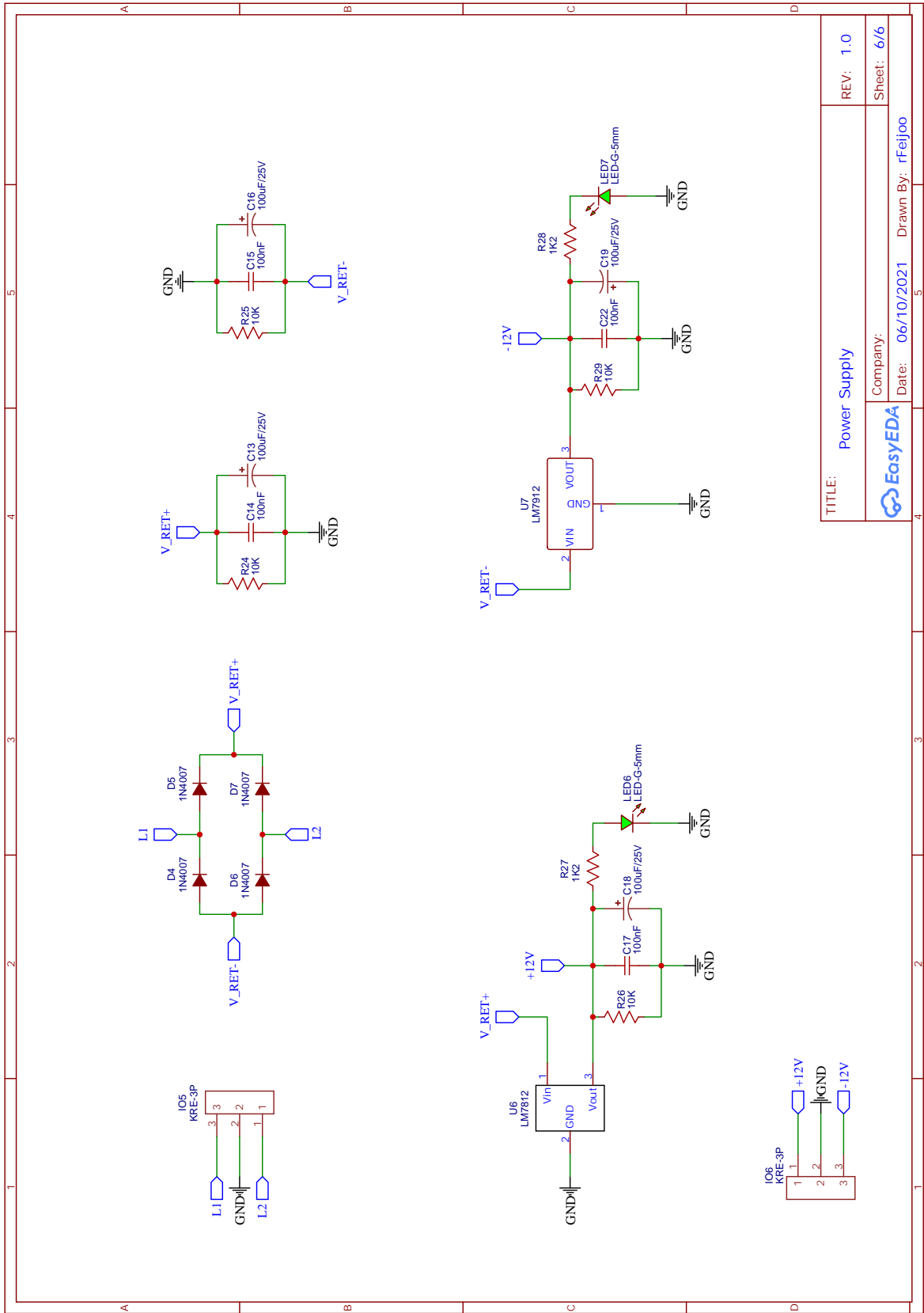




TITLE: Microcontroller	REV: 1.0
Company: EasyEDA	Sheet: 3/6
Date: 30/09/2021	Drawn By: rFeijoo



TITLE: Output Module		REV: 1.0
Company: EasyEDA		Sheet: 5/6
Date: 30/09/2021		Drawn By: rFeijoo



TITLE:	Power Supply	REV:	1.0
Company:	EasyEDA	Sheet:	6/6
Date:	06/10/2021	Drawn By:	rFeijoo

ANEXO B – Lista de Materiais

Componente	Valor	Package	Qnt	Designador
Capacitor	1nF/50V	Cerâmico (RAD-0.2)	6	C2, C3, C4, C8, C9, C10
Capacitor	10nF/50V	Cerâmico (RAD-0.2)	4	C1, C5, C7, C11
Capacitor	100nF/50V	Cerâmico (RAD-0.2)	7	C6, C12, C14, C15, C17, C20, C22
Capacitor	10uF/50V	Eletrolítico (D6.3XF2.5)	1	C21
Capacitor	100uF/25V	Eletrolítico (D6.3XF2.5)	4	C13, C16, C18, C19
Resistor	100Ω	PTH-1/4W	4	R16, R17, R18, R19
Resistor	120Ω	PTH-1/4W (1%)	1	R3
Resistor	150Ω	PTH-1/4W (1%)	1	R9
Resistor	220Ω	PTH-1/4W	3	R21, R23, R34
Resistor	1.2KΩ	PTH-1/4W	2	R27, R28
Resistor	4.7KΩ	PTH-1/4W	4	R5, R7, R11, R13
Resistor	10KΩ	PTH-1/4W	11	R4, R6, R10, R12, R15, R20, R22, R24, R25, R26, R29
Resistor	100KΩ	PTH-1/4W	2	R8, R14
Resistor	100KΩ	PTH-3W	2	R1, R2
Diodo Retificador	1N4007	DO-41	6	D2, D3, D4, D5, D6, D7
Diodo TVS	P6KE6.8A	DO-15	1	D1
Diodo Zener	1N4728 (3.3V)	DO-41	2	ZD1, ZD2
LED	Amarelo	PTH-5mm	3	LED1, LED2, LED3
LED	Vermelho	PTH-5mm	2	LED4, LED5
LED	Verde	PTH-5mm	3	LED6, LED7, LED10
Relé	120VAC 10A	JQC-3F-C 5V	2	K1, K2
TBJ	2N2222	TO-92	2	Q1, Q2
Regulador de Tensão	7812	TO-220	1	U6
Regulador de Tensão	7912	TO-220	1	U7
Transformador	15+15VAC		1	IO5
AmpOp	LM358	DIP8	1	U3
Transdutor de Tensão	LV 20-P		1	U1
Transdutor de Corrente	LA 55-P		1	U2
Microcontrolador	STM32 NUCLEO-G474RE		1	MCU1
Dissipador de Calor	34,5X12,5X20mm	DN322	2	U6, U7
Conector	KRE 2P	KRE	1	IO1
Conector	KRE 3P	KRE	6	IO0, IO2, IO3, IO4, IO5, IO6
Conector	Male Header	Header 2x1	1	JP1
Conector	Female Header	MKBL02	1	JP1
Conector	Female Header	Header 2x19	2	MCU1
Conector	Female Header	Header 2x1	2	MCU1
Conector	Female Header	Header 1x6	1	MCU1
Conector	Female Header	Header 1x8	2	MCU1
Conector	Female Header	Header 1x10	1	MCU1