

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

**Desenvolvimento de protótipo para
identificação de interrupções de tensão em
instalações elétricas na Universidade de Brasília**

Autor: Marcos Felipe dos Santos Vieira Alves
Orientador: Prof. Dr. Alex Reis

Brasília, DF
2022



Marcos Felipe dos Santos Vieira Alves

Desenvolvimento de protótipo para identificação de interrupções de tensão em instalações elétricas na Universidade de Brasília

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

2022

Marcos Felipe dos Santos Vieira Alves

Desenvolvimento de protótipo para identificação de interrupções de tensão em instalações elétricas na Universidade de Brasília/ Marcos Felipe dos Santos Vieira Alves. – Brasília, DF, 2022-

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

Orientador: Prof. Dr. Alex Reis

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

1. Palavra-chave01. 2. Palavra-chave02. I. Prof. Dr. Alex Reis. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Desenvolvimento de protótipo para identificação de interrupções de tensão em instalações elétricas na Universidade de Brasília

CDU

Marcos Felipe dos Santos Vieira Alves

Desenvolvimento de protótipo para identificação de interrupções de tensão em instalações elétricas na Universidade de Brasília

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

Trabalho aprovado. Brasília, DF, :

Prof. Dr. Alex Reis
Orientador

Prof. Dr. Loana Nunes Velasco
Convidado 1

Prof. Dr. Renato Coral Sampaio
Convidado 2

Brasília, DF
2022

Agradecimentos

Na vida as certezas que carregamos moldam o nosso futuro, eu não poderia ter chegado até aqui sem o apoio de muitas pessoas, que me ajudaram a obter a certeza que eu conseguiria vencer essa etapa na minha vida, essas pessoas me ajudaram de inúmeras formas, eu não poderia deixar de honrá-las e agradecer-las nesta página.

Primeiramente, eu gostaria de agradecer a Deus, por me capacitar e me proporcionar uma família e amigos incríveis. Em especial gostaria de agradecer a minha mãe, Maria José dos Santos, que conseguiu criar quatro filhos mesmo diante das dificuldades financeiras, sempre se esforçou para dar o melhor aos filhos. O amor e a educação que me deu contribuiu positivamente na formação do meu caráter. Também não poderia deixar de citar o meu pai, Vitemberg Alves, por me proporcionar apoio e incentivo, e por me fazer acreditar que os objetivos que almejamos pode ser obtido por meio de esforço e dedicação.

Gostaria de agradecer à minha esposa, Gislene Reis, que foi meu apoio em toda caminhada acadêmica, mesmo quando eu descreditava da minha capacidade, as suas palavras me impulsionavam e me davam força para vencer todas as dificuldades. Agradecer aos meus irmãos que me mostraram que eu não estava sozinho nessa caminhada, e aos meus amigos Joacy Teixeira, Jhonattan Carlos e Anderson Isaías, que nos momentos mais difíceis cederam seus ouvidos e seus corações para mim.

Resumo

Desde 2017, a Universidade de Brasília tem desenvolvido uma série de ações voltadas ao aumento da eficiência energética e geração própria de energia nas instalações de seus diversos campi. Ao longo deste período, uma ação importante consistiu na implantação do Sistema de Gestão Energética (SIGE) na Universidade de Brasília. Tal sistema é caracterizado pela implantação de uma infraestrutura de medição de grandezas elétricas e software supervisorio, conectados à rede de internet da instituição, viabilizando o monitoramento contínuo e em tempo real de edificações da Universidade. Embora seja reconhecida a importância do SIGE para a instituição, instabilidades existentes na conexão dos medidores à rede de internet da UnB têm dificultado a identificação de interrupções de tensão nos pontos de conexão das instalações fotovoltaicas. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver um protótipo de hardware, utilizando o protocolo de comunicação Lora, para adicionar redundância na identificação de interrupções nos pontos de conexão dos sistemas fotovoltaicos.

Palavras-chaves: Geração. Energia Solar, Monitoramento, Sistema Microcontrolado. Rede LoRa.

Abstract

Since 2017, the University of Brasília has developed a series of actions affected by the increase in energy efficiency and self-generation of energy at the facilities of its various campuses. During this period, an important action consisted of the implementation of the Energy Management System (SIGE) at the University of Brasília. Such a system is characterized by the implementation of an infrastructure of electrical quantities and software supervisory, connected to the institution's internet network, enabling the monitoring continuous and real-time view of University buildings. Although it is recognized as an importance of SIGE for the institution, existing instabilities in the connection of meters to the internet network, making it difficult to identify the network connection in the connection points of photovoltaic installations. In this context, this work aims to objective to develop a hardware communication, using the communication protocol Lora, add redundancy in the identification of connection points of photovoltaic systems

Key-words: Generation. Solar Energy, Monitoring, Microcontrolled System. LoRa Network.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Geração Solar e Fator de Capacidade Mensal (MWmed) (ELÉTRICO, 2022)	13
Figura 2 – Estrutura de um painel fotovoltaico (ELÉTRICO, 2022)	15
Figura 3 – Espectro solar e resposta espectral de uma célula de silício (SURICHA-QUI, 2015)	16
Figura 4 – Identificação das células, módulos, séries e arranjos fotovoltaicos (FLO-RIDA, 2014)	17
Figura 5 – Diagrama funcional de um sistema fotovoltaico conectado à rede. (SO-LAR, 2022)	18
Figura 6 – Modulação AM e FM. (EMBARCADOS, 2016)	20
Figura 7 – Transmissão de um sinal usando LoRa e codificação de Symbols. (GHOSLYA, 2011)	21
Figura 8 – Modulação LoRa com diferentes valores de Spreading Factor. (GHOSLYA, 2011)	21
Figura 9 – Parâmetros para comunicação LoRa. (GHOSLYA, 2011)	22
Figura 10 – Arquitetura de rede LoraWan. (3GLTEINFO,)	22
Figura 11 – Discretização de um sinal contínuo. (USF, 2014)	23
Figura 12 – Fluxograma geral para aquisição e processamento de dados . (BAR-RETTO, 2011)	23
Figura 13 – Arquitetura geral do Sistema de Gestão Energética. (REIS et al., 2020)	26
Figura 14 – Exemplo de instalação dos medidores no Campus Darcy Ribeiro. (REIS et al., 2020)	27
Figura 15 – Arquitetura do hardware proposto.	29
Figura 16 – Kit de desenvolvimento, Arduino NANO(ARDUINO,)	30
Figura 17 – Módulo Lora1276 com antena SW915-TH12	31
Figura 18 – Circuito Regulador de tensão.(HILINK,)	31
Figura 19 – Representação de um Buffer Circular (GASPAR, 2015)	32
Figura 20 – Circuito de detecção de tensão em fase	34
Figura 21 – Circuito para ensaio de detecção de tensão	35
Figura 22 – Sinal de Saída no circuito detector de tensão	36
Figura 23 – Representação do Sinal de Entrada após passagem pelo diodo 1N4007 .	36
Figura 24 – Sinal Normalizado	37
Figura 25 – Gráfico do sinal da fase 1 e Sinal após o filtro	37
Figura 26 – Conexões do módulo Lora com o microcontrolador	38
Figura 27 – Esquemático de pinagem do microcontrolador	38
Figura 28 – Circuito do protótipo	39

Figura 29 – Fotografia superior do protótipo final.	40
Figura 30 – Fotografia inferior do protótipo final.	41
Figura 31 – Fluxograma global de execução do firmware.	42
Figura 32 – Captura de tela da rotina de leitura e normalização do sinal analógico recebido.	42
Figura 33 – Rotina do algoritmo de média móvel.	43
Figura 34 – Atualização da posição a ser usada do Buffer circular.	43
Figura 35 – Atualização das variáveis locais para detectar o momento de notificação.	43
Figura 36 – Verificações dos valores de cada fase para notificação.	43
Figura 37 – Função de envio das informações usando a rede LoRa.	44
Figura 38 – Leitura do detector de tensão usando o microcontrolador com leitura a cada 1 milissegundo.	44
Figura 39 – Leitura do detector de tensão usando o microcontrolador com leitura a cada 10 milissegundos.	45
Figura 40 – Leitura do detector de tensão usando o microcontrolador com leitura a cada 100 milissegundos.	45
Figura 41 – Filtragem do sinal utilizando 20 amostras no filtro média móvel.	45
Figura 42 – Filtragem do sinal utilizando 50 amostras no filtro média móvel.	45
Figura 43 – Filtragem do sinal utilizando 100 amostras no filtro média móvel.	46
Figura 44 – Alerta de falha referente a cada fase.	46
Figura 45 – Sistema de teste para detecção de interrupções.	47
Figura 46 – Alimentação do protótipo e sinal de fase.	47
Figura 47 – Primeiro teste de recepção de notificação.	48
Figura 48 – Primeiro teste de recepção de notificação.	48

Lista de tabelas

Tabela 1 – Lista de prédios com medidores. (REIS et al., 2020)	27
Tabela 2 – Tabela de Requisitos.	28
Tabela 3 – Tabela de estimativa de corrente do sistema.	31
Tabela 4 – Identificação dos eventos e suas respectivas ações de controle.	33
Tabela 5 – Tabela de largura mínima de uma trilha em função da corrente nominal.(LIMA, 2010)	39
Tabela 6 – Espaçamento mínimo entre trilhas em função da tensão nominal (LIMA, 2010)	40
Tabela 7 – Tabela de variáveis de controle utilizada no firmware.	41
Tabela 8 – Tabela de variáveis locais d função de filtro média móvel.	42
Tabela 9 – Custos dos desenvolvimento do protótipo.	49

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contextualização	12
1.2	Objetivo Geral	13
1.3	Objetivos Específicos	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Componentes do Sistema Fotovoltaico	15
2.1.1	Módulo Fotovoltaico	15
2.1.2	Instalação em Corrente Contínua	17
2.1.3	Caixa de Junção	17
2.1.4	Inversor de Energia Solar	18
2.2	Internet das Coisas	19
2.2.1	LoRa	19
2.2.1.1	Fator de Espalhamento	20
2.2.1.2	Taxa de Código	21
2.2.2	LoRaWAN	22
2.3	Outros Conceitos Fundamentais	23
2.3.1	Aquisição e Condicionamento de Sinais	23
2.3.2	Filtro Digital	24
2.3.2.1	Algoritmo de Média móvel	24
2.4	Sistema de Gestão Energética (SIGE) da Universidade de Brasília	25
3	METODOLOGIA	28
3.1	Análise de Requisitos	28
3.1.1	Requisitos	28
3.1.2	Arquitetura do Sistema	29
3.1.2.1	Diagrama de Blocos do Sistema	29
3.1.2.2	Detecção de Tensão	29
3.1.2.3	Microcontrolador	29
3.1.2.4	Módulo LoRa	30
3.1.2.5	Alimentação e backup de energia	31
3.1.2.6	Filtro de média móvel de um sinal analógico	32
3.1.2.7	Gerenciamento de Eventos	32
4	RESULTADOS	34
4.1	Projeto de Hardware do Protótipo	34

4.1.1	Detecção da Tensão	34
4.1.2	Amostragem do Sinal	35
4.1.3	Filtro de média móvel	36
4.1.4	Integração Microcontrolador e Módulo LoRa	37
4.1.5	Pinout do Microcontrolador	37
4.1.6	Placa de Circuito Impresso	38
4.1.6.1	Requisitos de Layout	38
4.1.7	Produção da Placa de Circuito Impresso	39
4.2	Desenvolvimento de Firmware do Protótipo Funcional	39
4.2.0.1	Configurações Gerais do Firmware	39
4.2.0.2	Variáveis de Controle	40
4.2.0.3	Rotina de Leitura dos Sinais de Fases	40
4.2.0.4	Rotina de Filtro de média móvel	41
4.2.0.5	Gerenciamento de eventos	43
4.2.0.6	Notificação pela Rede LoRa	44
4.2.1	Análise de Desempenho do Sistema	44
4.2.1.1	Detecção de tensão	44
4.2.1.2	Filtragem do sinal	45
4.2.1.3	Envio de Alertas	46
4.2.1.4	Detecção de Falhas	46
4.2.2	Custo Final do Sistema	48
5	CONCLUSÃO E PROSPECÇÕES	50
	REFERÊNCIAS	51
	ANEXO A – ESQUEMÁTICO COMPLETO	54

1 Introdução

1.1 Contextualização

Em um boletim publicado em agosto de 2021 pelo Ministério de Minas e Energia (MME), é possível identificar que a demanda de derivados de petróleo cresceu 7,5% e o consumo de gás natural cresceu 16,3%, influenciado pelo aumento de 46% na demanda de geração de energia elétrica por meio das usinas térmicas. Esses dados se caracterizam como consequências da crise hídrica enfrentada em 2020 e 2021, e mostra a dependência do Brasil por combustíveis fósseis e impactando diretamente o preço da energia elétrica. (MME, 2021)

Nesse contexto, o setor elétrico brasileiro está cada vez mais inserido no processo de transição energética, com a incorporação estratégica de diversas fontes renováveis de energia, dentre elas, a energia solar fotovoltaica [1]. Neste movimento de diversificação da matriz energética, o qual se evidencia pelos crescentes investimentos em novos sistemas de geração, é possível constatar o surgimento de novos desafios, os quais estão associados ao amadurecimento e difusão das tecnologias, bem como às características de intermitência inerente ao recurso natural, a irradiância solar. Neste particular, realizar a gestão da operação e manutenção impacta diretamente na quantidade de energia produzida por um empreendimento, reduz riscos à saúde e segurança de pessoas e meio ambiente, bem como garante a integridade dos equipamentos de uma instalação.

A Figura 1, extraída do site da ONS, mostra o crescimento mensal da geração solar desde 2020 até 2022 no SIN (Sistema Interligado Nacional), onde as barras amarelas são 2020, as barras roxas são 2021 e as barras rosas são 2022.

Em 2012, a ANEEL, por meio da Resolução Normativa nº 482/2012, estabeleceu o sistema de compensação de energia para micro e minigerações conectadas às redes de distribuição. Essa grande evolução no setor solar fotovoltaico favoreceu o 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. (ELÉTRICA, 2012)

Desde 2017, a Universidade de Brasília tem desenvolvido uma série de ações voltadas ao aumento da eficiência energética e geração própria de energia nas instalações de seus diversos campi. Nesse contexto, a faculdade UnB Gama (FGA), em 2019, inaugurou seu primeiro sistema de geração de energia solar fotovoltaico, com uma capacidade de geração de 104,6 kWp. Em 2021, a FGA se tornou auto sustentável, com uma capacidade instalada de cerca de 350 kWp e uma economia estimada de R\$ 423 mil por ano. (ASCOM,

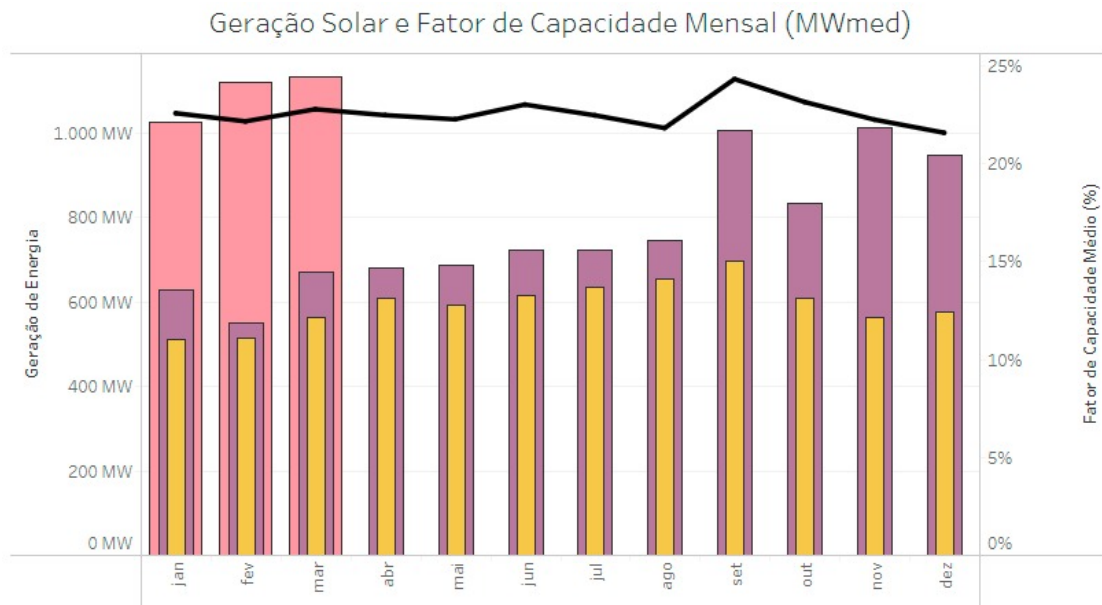


Figura 1 – Geração Solar e Fator de Capacidade Mensal (MWmed) (ELÉTRICO, 2022)

2019). Ao longo deste período, outra ação importante consistiu na implantação do Sistema de Gestão Energética (SIGE) na Universidade de Brasília. Tal sistema é caracterizado pela implantação de uma infraestrutura de medição de grandezas elétricas e software supervi-sório, conectados à rede de internet da instituição, viabilizando o monitoramento contínuo e em tempo real de edificações da Universidade. A relevância deste sistema se baseia no fato de que a rede elétrica interna da UnB não possuía mecanismos para monitoramento contínuo de consumo. De fato, constava-se apenas a presença do medidor dedicado ao faturamento de consumo de energia e demanda, fato este que limita o conhecimento das características de consumo interno da instalação e o desenvolvimento de ações pontuais de eficiência energética. Embora a relevância das ações de eficiência energética apresentadas anteriormente, instabilidades existentes na conexão dos medidores à rede de internet da UnB tem dificultado a identificação de interrupções de tensão nos pontos de conexão das instalações fotovoltaicas. Assim, o desenvolvimento de equipamentos complementares, que permitam o acompanhamento da operação e estabelecimento de notificações de falta de energia, independentes do sistema de medição já existente, se mostra bastante atrativo.

1.2 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um protótipo de hardware para identificação de interrupções de energia em instalações fotovoltaicas na Universidade de Brasília

1.3 Objetivos Específicos

- Compreender os equipamentos que compõem o sistema de geração fotovoltaico;
- Desenvolver um sistema hardware para detecção de interrupção de tensão na rede elétrica da UnB;
- Desenvolver um sistema de comunicação utilizando a protocolo Lora;
- Desenvolver um protótipo de software embarcado para processamento de sinais e envio de informações.

2 Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica sobre sistemas fotovoltaicos e conceitos fundamentais para o bom entendimento deste trabalho.

2.1 Componentes do Sistema Fotovoltaico

2.1.1 Módulo Fotovoltaico

O fenômeno físico que permite a transformação da energia solar em eletricidade é chamado de efeito fotovoltaico, o mesmo ocorre quando há incidência de radiação solar sobre materiais semicondutores que permitem gerar uma diferença de potencial, o dispositivo que realiza essa transformação é chamada de célula fotovoltaica. A maior partes das células fotovoltaicas construídas no mundo utiliza-se do silício como matéria prima pela facilidade de encontrar esse material na natureza e pelo seu baixo custo. A potência máxima alcançada através de uma célula fotovoltaica é insuficiente para aplicações regulares, a tensão máxima potência por volta de 0,5V, por conta disso os painéis de energia solar fotovoltaicas utilizam células agrupada em série.(CARNEIRO, 2010)

Segundo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020), o módulo fotovoltaico é "o menor conjunto ambientalmente protegido de células solares interligadas, com o objetivo de gerar energia elétrica em corrente contínua". 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 responsáveis pela conversão da radiação solar em eletricidade, conforme apresentado na Figura 2

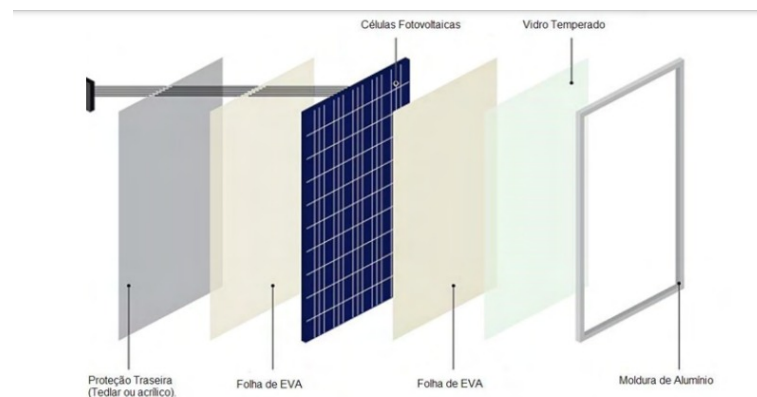


Figura 2 – Estrutura de um painel fotovoltaico (ELÉTRICO, 2022)

O funcionamento dos módulos fotovoltaicos é similar a fontes de corrente, pois

produz uma corrente contínua em função da radiação solar que incide sobre o módulo, a conversão da energia solar em energia elétrica não possui uma eficiência de 100%, pois durante o processo há perdas. Segundo (SURICHAQUI, 2015), a eficiência é afetada por dois fatores, seletividade de absorção da célula e procedimentos de fabricação. A seletividade faz com que todos os fótons incidentes sobre a células não sejam totalmente aproveitados para gerarem a diferença de potencial necessária com pares elétrons-lacunas, alguns motivos são porque os fótons incidentes possuem menos energia que a do *gap* do material e outros possuem maior energia e podem passar sem serem absorvidos. Alguns pares elétrons-lacunas podem se recombinar rapidamente, sem contribuir com o efeito fotovoltaico.

As células de silício são sensíveis à radiação com comprimentos de onda correspondentes à luz infravermelha visível e quase visível, e os máximos de energia nos comprimentos de onda do espectro solar não são consistentes com a resposta espectral das células de silício, o que significa que nem toda a energia solar é absorvida pela célula. A reflexão dos fótons pela superfície da célula, perdas devido a resistência elétrica da célula e contatos elétricos, recombinação e passivação são fatos originados da fabricação das células.

A resistência de uma célula é composta por dois fatores: resistência em série e resistência em paralelo. A resistência em série é devido a dopagem do semiconductor com uma maior resistência da grade de metalização e dos contatos utilizados para a corrente fluir até o um circuito extremo. A resistência em paralelo é causada pelas fugas na superfície das bordas da célula e micro-defeitos do cristal que ocasionam curtos-circuitos.

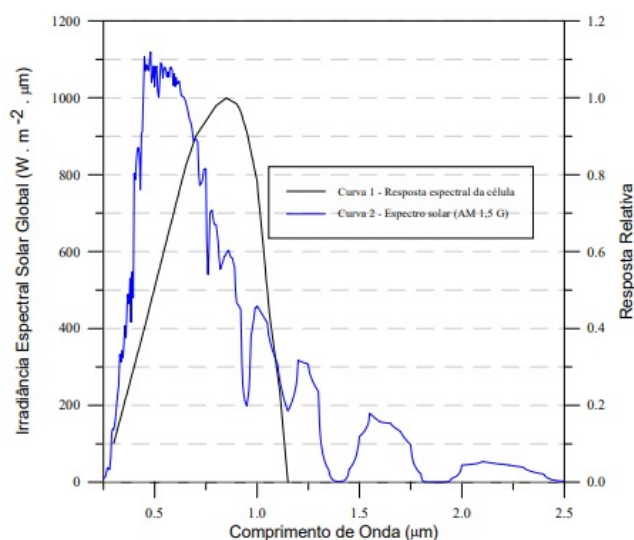


Figura 3 – Espectro solar e resposta espectral de uma célula de silício (SURICHAQUI, 2015)

Segundo Green Brown apud (SURICHAQUI, 2015) (p.47), as células de silício possuem normalmente uma eficiência de 28,8% podendo chegar a 37% com a utilização

de concentradores de radiação solar. Os módulos comerciais apresentam uma eficiência na ordem de 15%.

2.1.2 Instalação em Corrente Contínua

Segunda a (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019), a conexão dos módulos é dividida em duas possibilidades : conexão em série (*strings*) ou arranjos fotovoltaicos (*arrays*). Conforme apresentado na figura 4 .

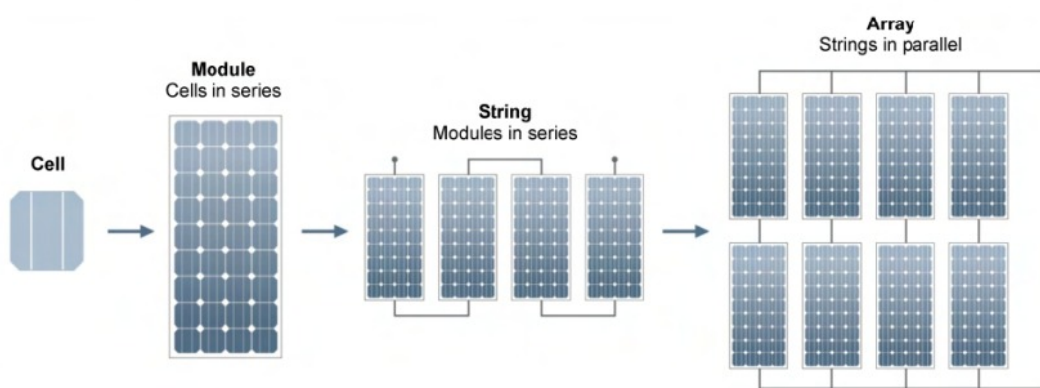


Figura 4 – Identificação das células, módulos, séries e arranjos fotovoltaicos (FLORIDA, 2014)

Os arranjos obedecem o conceito de associação de fontes, já que os módulos apresentam um comportamento semelhante a fontes de corrente. No arranjo de *strings*, a tensão de saída é a soma algébrica das tensões individuais e a corrente é comum a todos os módulos. No arranjo de *arrays*, a corrente de saída é a soma algébrica das correntes individuais e a tensão é comum a todos os módulos.

2.1.3 Caixa de Junção

As caixas de junção ou *String Boxes*, são quadros elétricos utilizadas para acomodar as conexões dos circuitos de correntes contínua derivados dos painéis fotovoltaicos. O diagrama elétrico de uma caixa de junção geralmente apresenta os seguintes elementos:

- Entradas CC para os módulos fotovoltaicos;
- Fusíveis de proteção contra sobrecorrentes;
- Dispositivo de proteção contra surtos (DPS);
- Chaves seccionadoras;
- Barramento vinculado ao condutor de proteção da Instalação.

2.1.4 Inversor de Energia Solar

O inversor de energia solar é o equipamento que converte a corrente contínua (CC) gerada pelos módulos fotovoltaicos em corrente alternada (CA), possibilitando a utilização da energia gerada. O inversor geralmente é instalado em local abrigado protegido do sol, de chuvas e calor.

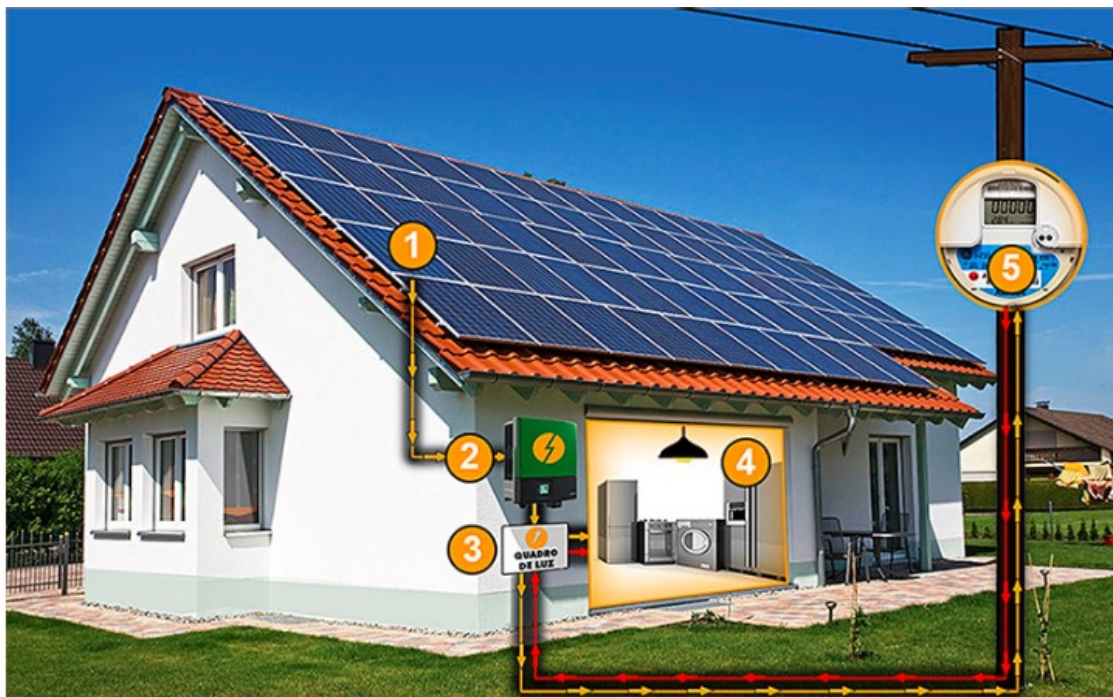


Figura 5 – Diagrama funcional de um sistema fotovoltaico conectado à rede. (SOLAR, 2022)

Além da conversão de CC para CA, os inversos possuem um componente chamado MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), que auxilia no melhor aproveitamento da energia produzida. O MPPT tem a capacidade de localizar o ponto de maior valor entre o produto tensão X corrente. A tensão e a corrente se comportam de maneira diferente. A tensão ao atingir o seu valor máximo começa a decair e a corrente aumenta de maneira linear até a tensão atingir o valor máximo, após isso a corrente começa a decair. O MPPT garante que a potência entregue seja a maior possível diminuindo as perdas. Os elementos comuns de um sistema *IoT* são: dispositivos para aquisição de dados do meio, atuação, um protocolo de comunicação entre os dispositivos e a Internet, um sistema central para processamentos de dados e tomada de decisões e uma interface para disponibilização das informações.

2.2 Internet das Coisas

A internet das coisas, também chamada de *IoT* (*Internet of Things*). Segundo a (ORACLE, 2022), "descreve a rede de objetos físicos incorporados a sensores, software e outras tecnologias com o objetivo de conectar e trocar dados com outros dispositivos e sistemas pela internet. Esses dispositivos variam de objetos domésticos comuns a ferramentas industriais sofisticadas".

Um sistema *IoT* normalmente é dividido em camadas, de modo a facilitar compreensão e dinâmica do sistema. Segundo (XU; HE; LI, 2014) existem 4 camadas: Camada Sensorial, Camada de Rede, Cama de Serviços e a Camada de Interface. Na camada sensorial se encontram os hardwares de sensoriamento e aquisição de dados. A camada de Rede é responsável pela comunicação entre dispositivos e a rede. A camada de serviços é responsável do criar e disponibilizar os serviços para o usuário. Por fim, a camada de interface promove a interação do usuário e outras aplicações. Os elementos mais comuns que compõem um sistema de *IoT* são: dispositivos de aquisição de dados e controle, um protocolo de comunicação dos dispositivos com a internet, central de processamento de dados e uma interface para visualização das informações. (RAY, 2016)

A relevância dos sistemas *IoT* tem ganhando grandes proporções devida sua capacidade automatizar processos além dos avanços tecnológicos em comunicações sem fio com baixo consumo energético e circuitos integrados, facilitando a viabilidade de integração e utilização de diversos dispositivos na camada de sensoriamento, para coleta de dados, processamento, análise e transmissão de informação em diversos cenários e ambientes.

2.2.1 LoRa

LoRa (**Long Range**) é uma tecnologia projetada para fornecer conectividade a dispositivos embarcados a longas distâncias utilizando baixo consumo de energia (*Low-Power Wide-Area Networks ou LPWAN's*). Os dispositivos LoRa são baseados na técnica de modulação por espalhamento espectral, operando no espectro não licenciado de frequências nas bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). Os dispositivos LoRa apresentam um alto grau de imunidade a interferência por conta da utilização da técnica de modulação CSS (*Chirp Spread Spectrum*), também comporta transmissões simultâneas de múltiplos dispositivos. Um sinal para ser enviado de um ponto a outro é necessário sofrer um processo chamado modulação. A modulação é a codificação do sinal em ondas eletromagnéticas para ser transmitida, e para recuperar a informação enviada deve-se fazer o processo inverso, chamado de demodulação. Exemplos de modulação são: Amplitude (AM) e em frequência (FM).

Existem diversas técnicas para modular um sinal. O espalhamento espectral é um técnica que utiliza a largura de banda mínima necessária para transmitir uma informação.

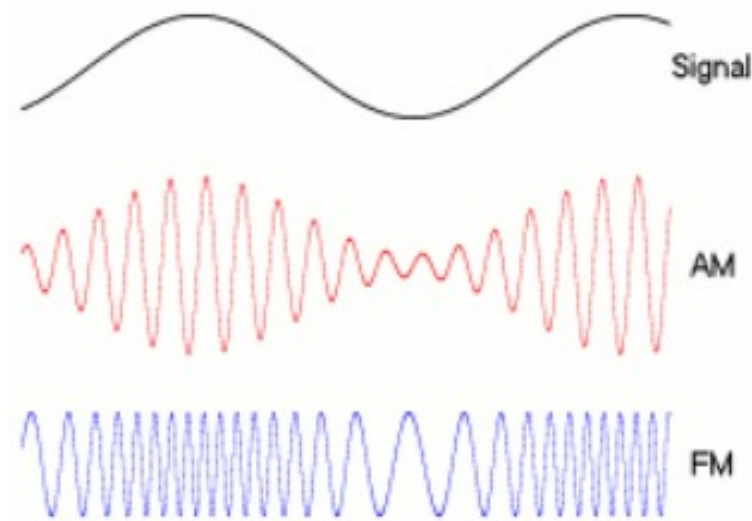


Figura 6 – Modulação AM e FM. (EMBARCADOS, 2016)

Segundo (LIANDO et al., 2019), largura de banda é o intervalo de frequências, em Hz, as frequências máxima e mínima de um intervalo são chamadas de respectivamente de $f_{máxima}$ e $f_{mínima}$. No espalhamento espectral a energia do sinal ocupa uma banda maior do que a informação a ser transmitida. Como o LoRa é em CSS, ele utiliza uma largura de banda linear de frequência para modular a informação em chips. Um chirp é um sinal no qual ocorre aumento na frequência com o tempo (up-chirp), ou decréscimo na frequência (down-chirp) com o tempo.

No LoRa o padrão para transmissão deve ser iniciado com uma sequência de up-chirps seguido de dois down-chirps. O conjunto de up-chirps é chamado de preamble e o conjunto de down-chirps são chamados de sync, pois é responsável pela sincronização. A transição de frequência utilizando chirps representam os symbols. Os symbols depende do fator de espalhamento, as informações são codificadas em x bits, onde x é o fator de espalhamento. Em x bits, são possíveis representar 2^x símbolos, conforme apresentado na figura 7.

2.2.1.1 Fator de Espalhamento

O fator de espalhamento ou SF (*Spreading Factor*), é um valor que determina a quantidade de bits codificados por símbolo. Possui 6 fatores de espalhamento, de SF7 $SF = 7$ à SF12 $SF = 12$, quanto maior o valor de SF maior é a sensibilidade de recepção, alcance e tempo de envio dos dados. Logo um Chirp é formado após varrer todas as frequências em 2^{SF} . (LIANDO et al., 2019)

O tempo de transmissão de cada símbolo (t_{sim}) é proporcional a 2^{SF} e inversamente proporcional à largura de banda (BW) Logo o tempo de transmissão ou duração de cada

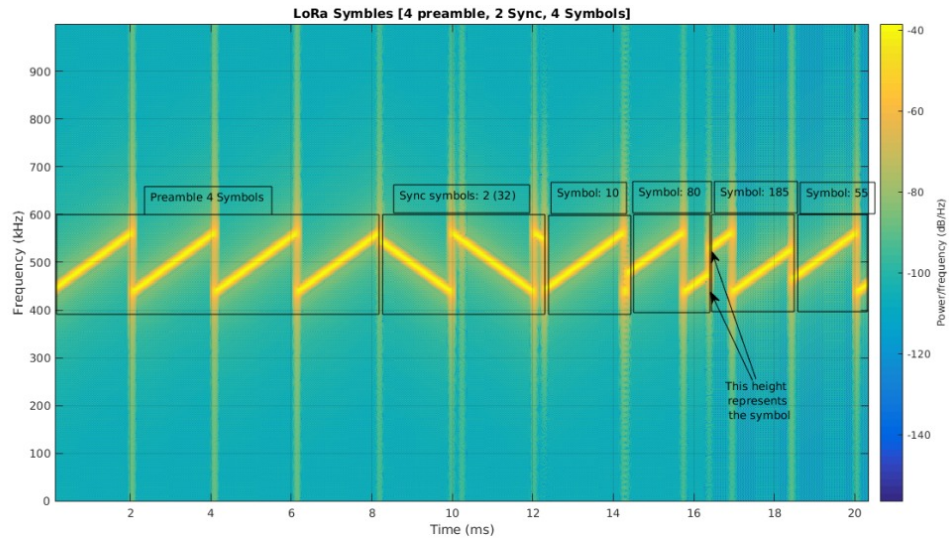


Figura 7 – Transmissão de um sinal usando LoRa e codificação de Symbols. (GHOSLYA, 2011)

Chirp pode ser apresentada pela Equação 2.1. (LIANDO et al., 2019)

$$T_{sim} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2.1)$$

O comportamento da mudança de SF pode ser visualizado na Figura 8

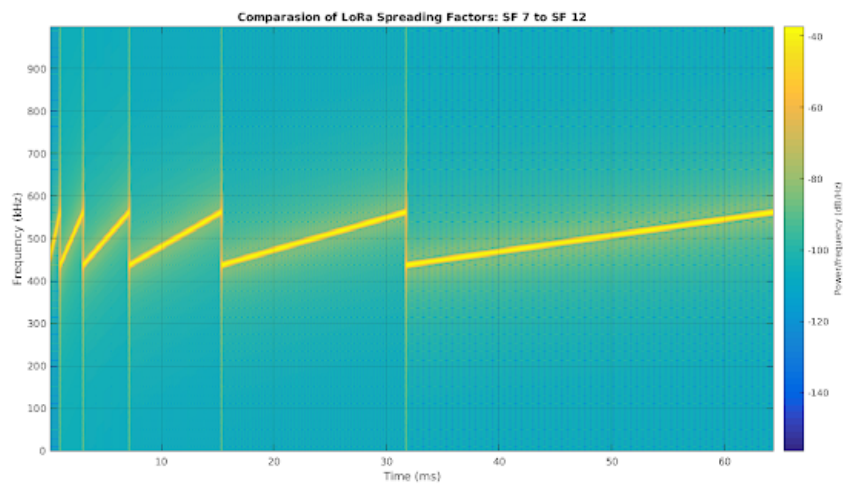


Figura 8 – Modulação LoRa com diferentes valores de Spreading Factor. (GHOSLYA, 2011)

2.2.1.2 Taxa de Código

De modo a prevenir erros, o LoRa adiciona bits redundantes no sinal enviado, de modo a detectar erros de codificação/decodificação, essa técnica é conhecida como *Forward Error Correction*. A taxa de código ou *Code Rate (CR)*, é a razão dos bits de dados em

relação à quantidade de bits de um símbolo. um CR é uma fração em que o numerador é os bits úteis e o denominador é a quantidade de bits, por exemplo um CR de $4/5$ significa que para cada 4 bits de dados 1 bit de correção é adicionado ao sinal. (LIANDO et al., 2019)

Os valores de SF , BW e CR podem ser configurados nos circuitos integrados LoRa, as opções desses parâmetros são apresentados abaixo na Figura 9

Parameter	Options
SF	6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
BW (kHz)	7.8, 10.4, 15.6, 20.8, 31.2, 41.7, 62.5, 125, 250, 500
CR	$4/5$, $4/6$, $4/7$, $4/8$

Figura 9 – Parâmetros para comunicação LoRa. (GHOSLYA, 2011)

2.2.2 LoRaWAN

O LoRa é um protocolo de comunicação de longo alcance com baixo consumo de energia, a modulação permite comunicação P2P (*Ponto a Ponto*). Quando há a necessidade de utilizar os dispositivos em aplicações mais sofisticadas é necessário o uso do LoRaWAN. O LoRaWAN é um protocolo de comunicação baseado em LoRa, que permite o acesso a camadas mais sofisticadas da aplicação, como por exemplo a comunicação dos dispositivos com a rede de internet. O LoRaWAN possui em sua constituição microncontroladores e outros componentes responsáveis pela conexão à rede e segurança na conexão.

Segundo (ADELANTADO et al., 2017), LoRaWAN detém uma topologia de rede em estrela, composta por dispositivos periféricos, gateways e servidor central de redes. Os dispositivos periféricos são compostos por sensores que se comunicam com gateways usando LoRa, os gateways, são retransmissores com comunicação bidirecional que encaminham as informações entre o servidor de rede e os dispositivos periféricos. Os servidores de redes são responsáveis por processar as informações recebidas e enviar novos pacotes caso necessário.

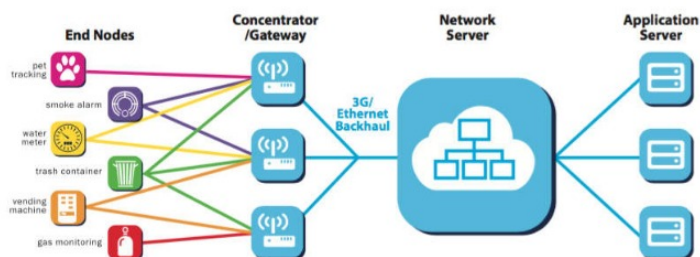


Figura 10 – Arquitetura de rede LoraWan. (3GLTEINFO,)

2.3 Outros Conceitos Fundamentais

2.3.1 Aquisição e Condicionamento de Sinais

Grandezas físicas, como velocidade, tensão, corrente podem ser representadas matematicamente por meios de funções, contínuas ou discretas, essas representações possuem valores definidos para cada instante de tempo.

Utiliza-se o sinal de maneira discreta em sistemas digitais, pois a sua representação é determinada pela quantidade de amostra, conforme apresentado abaixo na figura 11

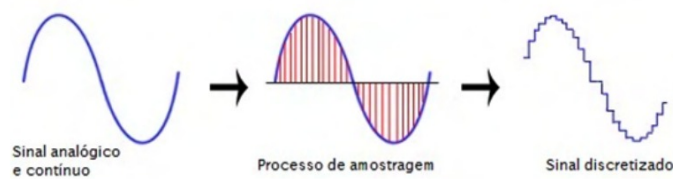


Figura 11 – Discretização de um sinal contínuo. (USF, 2014)

O condicionamento de sinais é o processo de aquisição e processamento de dados. O objetivo é adequar a grandeza física monitorada (Sinal de entrada) em um sinal de saída, garantindo a eficiência da medição.

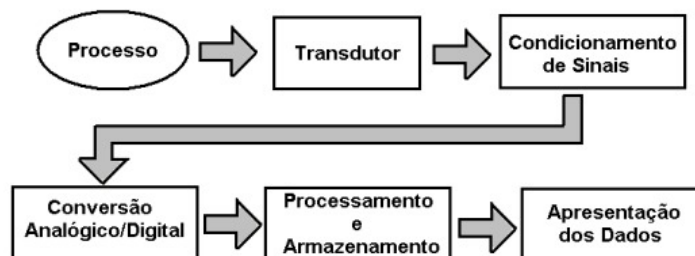


Figura 12 – Fluxograma geral para aquisição e processamento de dados . (BARRETTO, 2011)

A função do condicionamento de sinais, vale ressaltar as seguintes funções:

- Conversão: a conversão de sinais é necessária quando há aquisição de dados por sensores e a natureza da grande medida precisa ser convertida em função do sistema de medição.(LATHI, 2007);
- Amplificação: a amplificação é necessária para amplificação de ganho em sinais medidos. (LATHI, 2007);
- Filtragem: os filtros são utilizados em atenuação e remoção de ruídos dentro determinadas faixas de frequência. (LATHI, 2007);

- Isolamento: o isolamento serve para proteger o dispositivo contra surtos passando sinais da fonte para sistemas de aquisição sem conexões físicas, por exemplo acopladores ópticos.(LATHI, 2007);

2.3.2 Filtro Digital

Segundo (LATHI, 2007), todo sinal digital tem sua origem analógica, um sinal analógico pode assumir qualquer valor de amplitude em faixa contínua. Porém um sinal digital apresenta valores limitados. Logo o sinal obtido por meio da conversão analógico para digital(A/D) é o sinal mais próximo possível obtido por meio de quantização (*arredondamento*). Segundo (MOURA, 2009), o processamento de sinal consiste na compreensão do sinal e sua manipulação de forma a obter informações uteis deste sinal. Tantos sinais analógicos como digitais podem ser processados.

Ao analisar um sinal analógico por meios digitais visando obter uma síntese deste sinal é necessário a utilização de filtros. A função do filtro é remover partes indesejadas do sinal, como ruídos e extrair partes de interesse. (SIGNH; TRIPATHI; PANDEY, 2010), é necessário filtrar os dados obtidos e o processo de filtragem altera o conteúdo de frequência de um sinal. Filtros digitais são facilmente projetados testados e implementados.

2.3.2.1 Algoritmo de Média móvel

O algoritmo de média móvel é bastante utilizado como filtro, pois é aplicável em situações para filtro de ruídos ou altas amplitudes de curta duração, um exemplo disso são os dados do covid-19 no Brasil que antes eram analisados em comparação a média móvel dos casos de modo a suavizar os picos de contágio também muito utilizada no mercado financeiro para análise de valores e ações.

Segundo (VEGA, 2018), um sistema de média móvel tem como objetivo obter o valor de uma sequência de valores $y[n]$ por meio do cálculo de n valores utilizando a média simples. Matematicamente pode ser definido como:

$$y[n] = \frac{1}{N+1} \sum_{K=0}^N x[n-k] \quad (2.2)$$

Onde $y[n]$ é o sinal filtrado, n é o índice atual e $N+1$ é o número de amostras utilizadas no filtro e $x[n-k]$ é os termos a serem somados

2.4 Sistema de Gestão Energética (SIGE) da Universidade de Brasília

No âmbito do Projeto de Eficiência Energética (PEE) intitulado “Eficiência energética em prédios públicos da Universidade de Brasília”, no âmbito da Chamada ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) 001/2016 – Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de Pesquisa e Desenvolvimento: Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior”, o qual se iniciou em 2018, uma das ações consistiu na implantação do Sistema de Gestão Energética (SIGE) na Universidade de Brasília. Tal sistema é caracterizado pela implantação de uma infraestrutura de medição de grandezas elétricas e software supervisorio, viabilizando o monitoramento contínuo e em tempo real de edificações da Universidade. A instalação deste sistema foi particularmente importante, tendo em vista que a rede elétrica interna da UnB não possuía mecanismos para monitoramento contínuo de consumo. De fato, constava-se apenas a presença do medidor dedicado ao faturamento de consumo de energia e demanda, fato este que limita o conhecimento das características de consumo interno da instalação e o desenvolvimento de ações pontuais de eficiência energética. (REIS et al., 2020)

Considerando a topologia das instalações elétricas, o Sistema de Gestão Energética da Universidade de Brasília foi concebido incluindo cinco subsistemas ou camadas:

- Dispositivos de medição: estes elementos se caracterizam por medidores de grandezas elétricas, os quais foram instalados nos quadros gerais de baixa tensão de edificações da Universidade de Brasília ;
- Servidores de Coleta de Dados: responsáveis por coletar periodicamente as medidas de tensão, corrente, consumo e geração de energia, potência ativa/reactiva/total, dentre outros, de múltiplos dispositivos de medição de energia instalados no campus da Universidade. Além disso, monitoram o estado (ligado, desligado, sem conexão etc.) de cada medidor;
- Servidor Central: responsável por centralizar, armazenar e gerenciar todas as medidas coletadas pelos Servidores de Coletas de Dados e tornar as informações disponíveis para serem apresentados pelas camadas de interface gráfica;
- Interface Gráfica Web: responsável por apresentar aos usuários os dados das medições coletadas em formatos de gráficos, relatórios e painéis informativos para auxiliar a gestão do sistema de distribuição de energia da Universidade;
- Interface Gráfica Mobile: responsável por apresentar aos usuários gestores uma interface simplificada de gestão, com informações resumidas e notificações para auxiliar na gestão do sistema.

A Figura 13 apresenta uma visão geral do Sistema de Gestão Energética implantado na Universidade de Brasília.

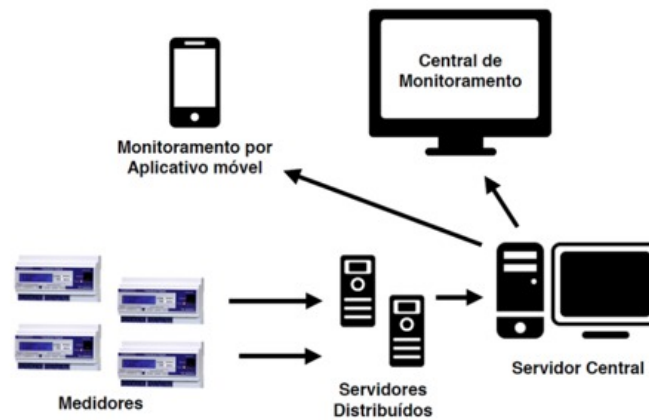


Figura 13 – Arquitetura geral do Sistema de Gestão Energética. (REIS et al., 2020)

Deve-se destacar que o SIGE foi desenvolvido como um Software Livre, o que garante a reprodutibilidade e distribuição deste sistema para outras instituições; a abertura para adaptações na arquitetura deste sistema, para atender a condições particulares de outros locais; a possibilidade de aperfeiçoamento e evolução do sistema ao longo dos anos, por meio de cooperação ativa e contribuições de outros desenvolvedores. Todas estas características viabilizam sua adoção por outros órgãos públicos, bem como a criação de uma comunidade em torno de seu desenvolvimento que ajude a aprimorar cada vez mais suas funcionalidades. (REIS et al., 2020)

Segundo (REIS et al., 2020), A camada de medição é composta por 29 unidades de medidas de grandeza elétrica modelos TR4020 e MD30 do fabricante Embrasul, esses dispositivos tem a capacidade de armazenar dados em sua memória e possuir protocolo aberto com suporte à comunicação via ethernet. A Tabela 1 apresenta os prédios onde foram instalados os dispositivos de medição.

Tabela 1 – Lista de prédios com medidores. (REIS et al., 2020)

Prédio	Quantidade de medidores	
Darcy Ribeiro	Bloco de Salas de Aula Norte (BSAN)	1
Darcy Ribeiro	Casa do Estudante (CEU)	2
Darcy Ribeiro	Centro de Processamento de Dados (CPD)	2
Darcy Ribeiro	Faculdade de Administração, Contabilidade e Economia (FACE)	1
Darcy Ribeiro	Faculdade de Tecnologia (FT)	3
Darcy Ribeiro	Laboratório de Estudos Geodinâmicos e Ambientais	1
Darcy Ribeiro	Hospital Veterinário (HVET)	1
Darcy Ribeiro	Instituto de Biologia (IB)	3
Darcy Ribeiro	Instituto Central de Ciências (ICC)	6
Darcy Ribeiro	Pavilhão Anísio Teixeira (PAT)	1
Darcy Ribeiro	Pavilhão João Calmon (PJC)	1
Darcy Ribeiro	Reitoria	1
Darcy Ribeiro	SG-11	1
Faculdade do Gama	Unidade de Ensino e Docência (UED)	2
Faculdade do Gama	Unidade Acadêmica (UAC)	1
Faculdade do Gama	Laboratório de Desenvolvimento de Transportes e Energias Alternativas (LDTEA)	1



Figura 14 – Exemplo de instalação dos medidores no Campus Darcy Ribeiro. (REIS et al., 2020)

3 Materiais e Métodos

Esta seção tem como objetivo descrever a metodologia empregada para desenvolver um hardware de baixo custo para monitoramento de interrupções de energia elétrica nos pontos de conexão de instalações fotovoltaicas da UnB por meio de comunicação LoRa.

3.1 Análise de Requisitos

A análise que requisitos do sistema podem ser separados em dois grupos: funcionais e não funcionais. Tomando como base os equipamentos utilizados no sistema fotovoltaicos da FGA foram levantados os requisitos identificados com um identificador único, iniciando [RF1] para os requisitos funcionais e [NF1] para os requisitos não funcionais, afóra também afim de estabelecer uma prioridade na implementação dos requisitos nas seguintes classificações:

- Essencial: requisito vital para o funcionamento do sistema, onde o mesmo não pode entrar em funcionamento sem o mesmo;
- Importante: requisito no qual o sistema iniciar o funcionamento, porém não de maneira satisfatória;
- Desejável: requisito que não compromete as funcionalidades básicas do sistema.

3.1.1 Requisitos

Tabela 2 – Tabela de Requisitos.

Requisitos	Identificador	Prioridade
Detecção de Tensão CA	RF1	Essencial
Transmitir os dados via LoRa	RF2	Essencial
Sistema de alimentação e backup de energia	RF3	Essencial
Unidade Central de Processamento	RF4	Essencial
Custo reduzido	NF1	Essencial

- **[RF1]** - O sistema deve ser capaz de monitorar a tensão no ponto de conexão de uma instalação fotovoltaica, em tempo real, em uma faixa de medição de 0 a 220 Vca;
- **[RF2]** - O sistema deve enviar os dados coletados rede LoRa;

- [RF3] - O sistema deve possuir uma fonte de alimentação para energização dos circuitos eletrônicos e um backup de energia para envio de notificações de interrupção;
- [RF4] - O sistema deve possuir um microcontrolador, para aquisição e processamento de dados.
- [NF1] - O sistema deve possuir o menor custo possível, para viabilizar a difusão ao longo das instalações da UnB;

3.1.2 Arquitetura do Sistema

3.1.2.1 Diagrama de Blocos do Sistema

A Figura 15 apresenta o diagrama de blocos do sistema proposto neste trabalho.

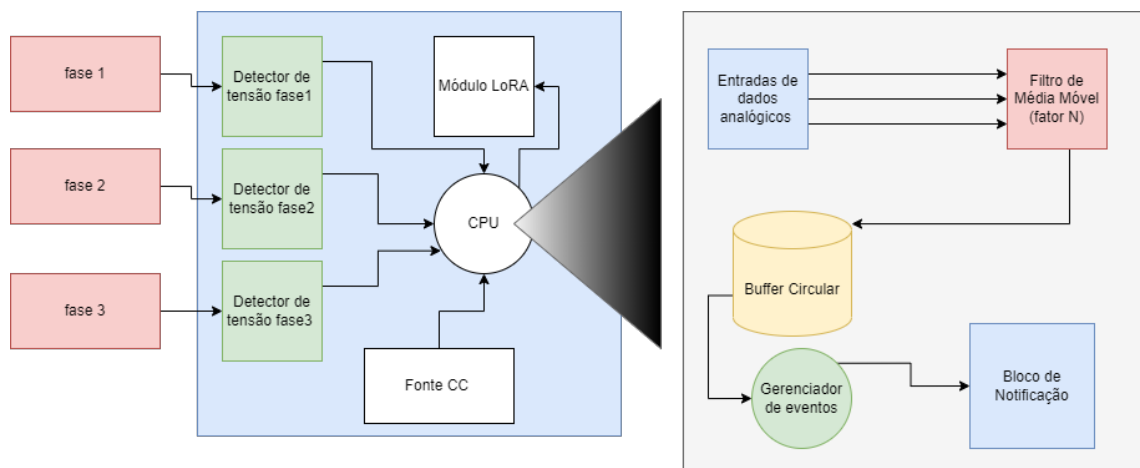


Figura 15 – Arquitetura do hardware proposto.

3.1.2.2 Detecção de Tensão

O intuito de construção do sistema é identificar interrupções de energia nos pontos de conexão do sistema fotovoltaico. Nesse sentido, analisando os níveis de tensão existentes nas redes em corrente alternada, bem como a compatibilidade com os circuitos eletrônicos, optou-se por realizar a detecção de tensão por meio de um acoplador óptico.

Ressalta-se que o protótipo desenvolvido neste trabalho tem por objetivo a definição de dois estados operacionais: presença e ausência de tensão no ponto de interesse. As medições analógicas dos níveis de tensão são realizadas por medidores já existentes na rede da UnB e conectados ao SIGE.

3.1.2.3 Microcontrolador

Dentre as diversas opções existentes, a escolha recaiu sobre o microcontrolador ATmega328P. Este componente possui uma memória flash de 32KB, opera com veloci-

dade máxima de 16 Mhz, com arquitetura RISC(*Reduced Instruction Set Computer*) e conjunto de instruções reduzido. Possui 14 pinos de entrada/saída digital, 8 para entradas analógicas e funcionamento em 3.3 V. Além do mais, ele suporta diversos tipos de protocolos de comunicação, como o I2C, UART e SPI ([ARDUINO](#),). Dentre os critérios norteadores para a escolha deste componente, optou-se pela facilidade de aquisição no mercado nacional.

Este microcontrolador é atualmente empregado na plataforma de desenvolvimento Arduino Nano, a qual está ilustrada na Figura 16, facilitando a prototipagem de hardware.

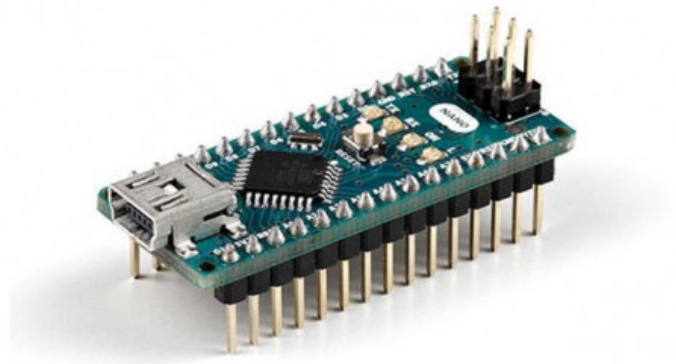


Figura 16 – Kit de desenvolvimento, Arduino NANO([ARDUINO](#),)

3.1.2.4 Módulo LoRa

Dentre as opções de módulos comercialmente disponíveis, o critério norteador de escolha também se baseou na facilidade de aquisição no mercado nacional. Nesse contexto, o módulo Lora1276, apresentado na figura 17, foi a opção escolhida. Este componente é utilizado para comunicação de longo alcance, baseado no chip SX1276 da empresa Semtech e emprego da antena SW915-TH12, este último componente já acompanha o kit de desenvolvimento. O módulo de comunicação possui uma frequência de operação de 915MHz, alimentação de 1,8 Vcc a 3,7V cc, taxa de transferência: 0,018 à 37,5 Kbps e interface de comunicação SPI para integração com unidades de controle e processamento. Segundo dados do fabricante, a expectativa de alcance é cerca de 4 km.

Ressalta-se que o protótipo desenvolvido neste trabalho tem por objetivo o envio de notificação de interrupções de tensão na rede elétrica da UnB, logo será utilizado pelas o protocolo LoRa invés de LoRaWan, que necessidade de inclusão de outros equipamentos na sua arquitetura.

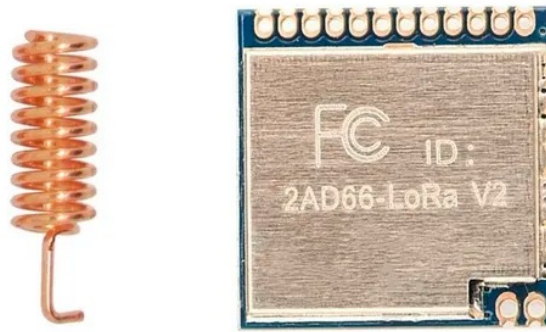


Figura 17 – Módulo Lora1276 com antena SW915-TH12

3.1.2.5 Alimentação e backup de energia

Como o sistema será ligado às instalações elétricas da UnB, é factível o uso da própria rede de 220 V para o suprimento do sistema. Nesse contexto, baseado nas informações da TABELA 3, optou-se pela utilização de fonte chaveada HLK-PM01, a qual possui uma tensão de entrada de 100 a 240 V, tensão de saída de 5 V e corrente de saída máxima de 0,6 A, conforme ilustrado na Figura 18. Considerando que os componentes operam em diferentes níveis de tensão, foi estabelecido o uso de outros componentes de regulação de tensão no protótipo.

Tabela 3 – Tabela de estimativa de corrente do sistema.

Circuito/Componente	Tensão(V)	Corrente(mA)
Microcontrolador Nano 3	5	250
Módulo LoRa	3.3	120
TOTAL	5V	370mA



Figura 18 – Circuito Regulador de tensão.([HILINK](#),)

Por fim, para viabilizar o envio das notificações durante uma interrupção de energia, optou-se pelo uso de um capacitor para armazenamento de energia

3.1.2.6 Filtro de média móvel de um sinal analógico

O filtro de média móvel em resumo é a média de uma quantidade de amostras lindas, essa quantidade de amostras é determinada de acordo com capacidade de processamento da unidade de controle.

Para a implementação do filtro no microcontrolador os valores lidos é armazenado em uma variável temporária chamada de *Buffer*, esse *Buffer* possui dimensão N , em cada posição N é armazenado os valores de sinal lido. A cada ciclo o sinal é lido é armazenado no $Buffer[N]$ e os valores armazenados são somados em um variável, vamos chamar essa variável de *SOMA*. A saída do filtro de média móvel é a *SOMA* dividida pela quantidade de amostras.

Porém a implementação deste tipo de filtro exige muito esforço de uma unidade lógica de microcontrolador como o Arduino, de modo a implementar o filtro digital de maneira tênue, é possível realizar o filtro operando com um *Buffer circular*.

Um buffer circular ou fila circular, é uma estrutura de dados que utiliza somente um buffer de tamanho fixo para armazenamento. Quando completo um novo dado é escrito nas primeiras posições do buffer, sub-escrevendo os dados antigos.(GASPAR, 2015)

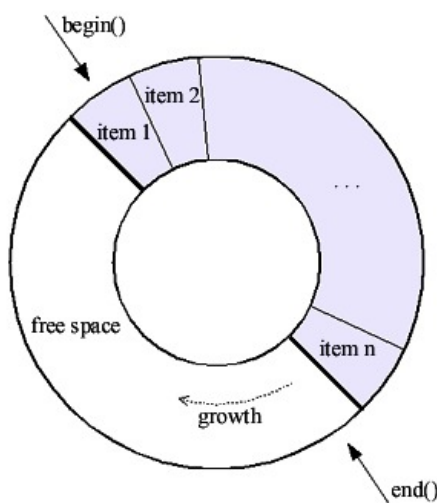


Figura 19 – Representação de um Buffer Circular (GASPAR, 2015)

3.1.2.7 Gerenciamento de Eventos

Para monitorar os eventos é necessário o uso de *flags*, que identifica o estado de uma aplicação. A Tabela 4 apresenta os eventos e as *flags* de ativação para cada evento.

Tabela 4 – Identificação dos eventos e suas respectivas ações de controle.

TIPO	AÇÃO	Flags
Interrupção na Fase 0.5	Enviar mensagem via rede LoRa	Amplitude do sinal Fase 1 filtrado menor que 1
Interrupção na Fase 2	Enviar mensagem via rede LoRa	Amplitude do sinal Fase 2 filtrador menor que 0.5
Interrupção na Fase 3	Enviar mensagem via rede LoRa	Amplitude do sinal Fase 3 filtrado menor que 0.5

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 Detecção da Tensão

A Figura 20 apresenta o circuito proposto para a detecção de tensão.

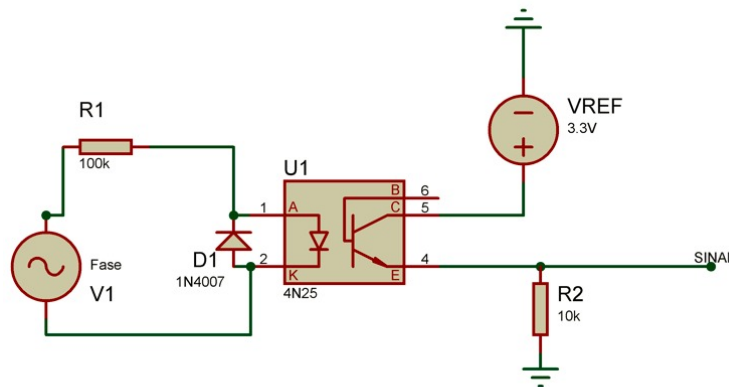


Figura 20 – Circuito de detecção de tensão em fase

O circuito de aquisição utiliza o optoacoplador *4N25*, que apresenta dois estágios isolados entre si. O primeiro estágio é responsável pela aquisição do sinal de tensão na fase, utilizando um resistor de $100k\Omega$ para limitar a corrente de entrada no optoacoplador e o diodo *1N4007*. Com esta configuração, o optoacoplador é polarizado apenas na parcela positiva da onda senoidal CA. O segundo estágio, por meio do resistor de pull-down de $10k\Omega$, possibilita a produção de uma onda quadrada com a mesma frequência da rede CA. Nesse contexto, a ausência deste sinal indica que a tensão de entrada não está presente.

Para o ensaio e validação, toma-se por base a montagem da Figura 19, considerando uma entrada de 220 Vca e uma fonte de bancada ajustada em $3,3\text{ Vcc}$. O monitoramento foi realizado com os seguintes instrumentos:

- Foi utilizado o osciloscópio *BK PRECISION 2530*;
- As tensões de V1 e Vref foram verificadas utilizando um multímetro *Hikari HM-1000*;

- Os testes foram realizados em temperatura ambiente (25 °C).

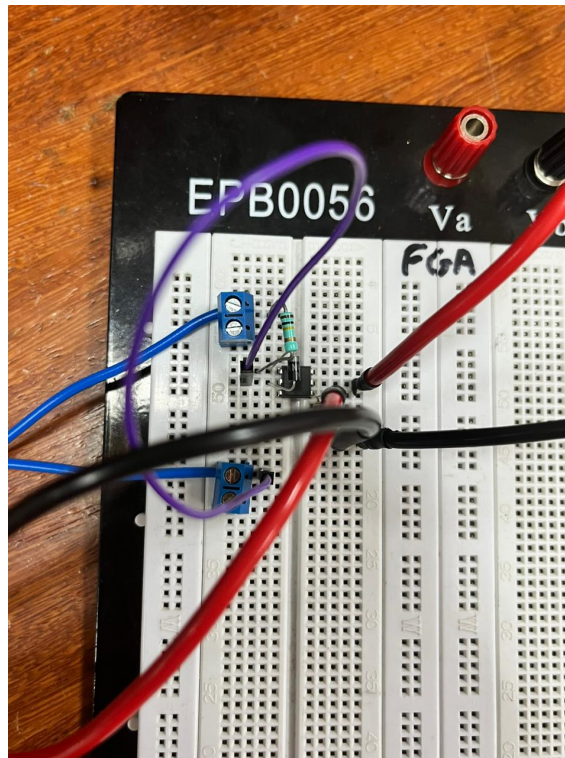


Figura 21 – Circuito para ensaio de detecção de tensão

Conforme apresentado na figura 22, o sinal de saída do circuito detector de tensão é uma onda quadrada com uma amplitude de $3,3V$ e uma frequência de $60Hz$.

4.1.2 Amostragem do Sinal

Para amostragem do sinal foi utilizado os pinos analógicos de A0, A1 e A2.

- A0: Leitura referente a detecção de tensão da Fase 1;
- A1: Leitura referente a detecção de tensão da Fase 2;
- A2: Leitura referente a detecção de tensão da Fase 3.

Conforme apresentado na Figura 21, os sinais recebidos pelos pinos analógicos são ondas quadradas. Nesse contexto, as entradas analógicas do Arduíno fazem a leitura de sinais em uma faixa de 0 a 5 V, onde o sinal lido é convertido da seguinte maneira:

$$Sinal_{convertido} = \frac{Sinal_{entrada}}{1023} \quad (4.1)$$

A equação 4.1 faz com que o sinal lido tenha sua nova representação no intervalo de 0 a 1023, para saber o nível de tensão da onda quadrada lida foi-se necessário fazer

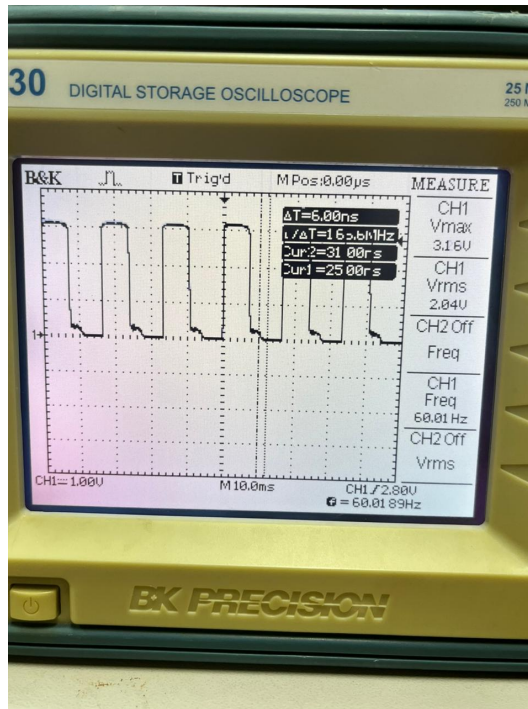


Figura 22 – Sinal de Saída no circuito detector de tensão

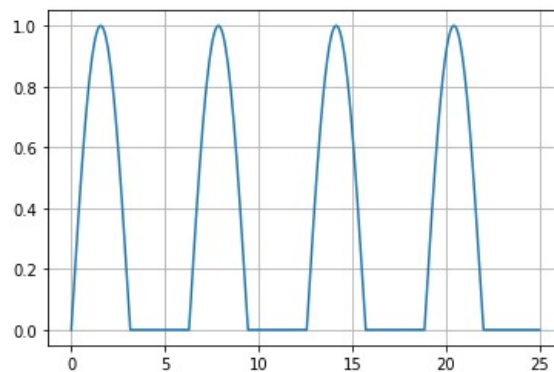


Figura 23 – Representação do Sinal de Entrada após passagem pelo diodo 1N4007

a normalização do sinal da seguinte maneira apresentada na equação 4.2, onde $V_{ref} = 3.3V_{cc}$.

$$Sinal_{normalizado} = Sinal_{convertido} * \left(\frac{V_{ref}}{1023} \right) \quad (4.2)$$

Na Figura 24. é possível ver o sinal normalizado.

4.1.3 Filtro de média móvel

Seguindo os conceitos apresentados na seção 2.3.2.1, foi implementado um algoritmo de filtro filtragem de sinal recebendo os sinais de cada fase utilizando um *Buffer* circular de tamanho N.

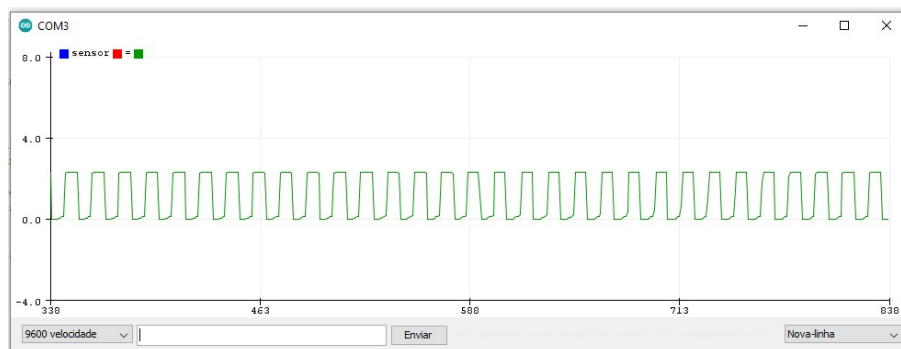


Figura 24 – Sinal Normalizado

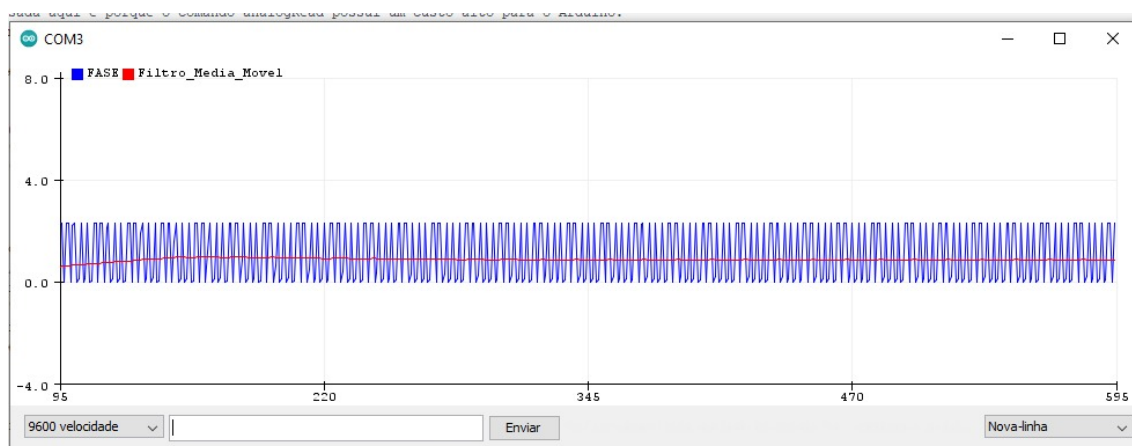


Figura 25 – Gráfico do sinal da fase 1 e Sinal após o filtro

Na Figura 25, a linha em azul é o sinal recebido na entrada analógica A0 e o sinal em vermelho é sinal filtrado utilizando um *Buffer* com 150 posições. Todavia, para o monitoramento das três fases, é necessário utilizar um *Buffer* com um máximo de 60 posições, pois valores maiores que isso implicam no uso de toda a memória do microcontrolador.

4.1.4 Integração Microcontrolador e Módulo LoRa

O módulo LoRa1276 é bastante prático para desenvolvimento de IoT, por conta do baixo custo, facilidade de implementação. A Figura 26 apresenta o diagrama de conexões entre o microcontrolador e o módulo de comunicação

4.1.5 Pinout do Microcontrolador

Considerando o kit de desenvolvimento Arduino Nano, modelo V3, como elemento base para o desenvolvimento do protótipo, a figura 27, apresenta a proposta de ligação da unidade de controle, considerando todos os circuitos apresentados anteriormente.

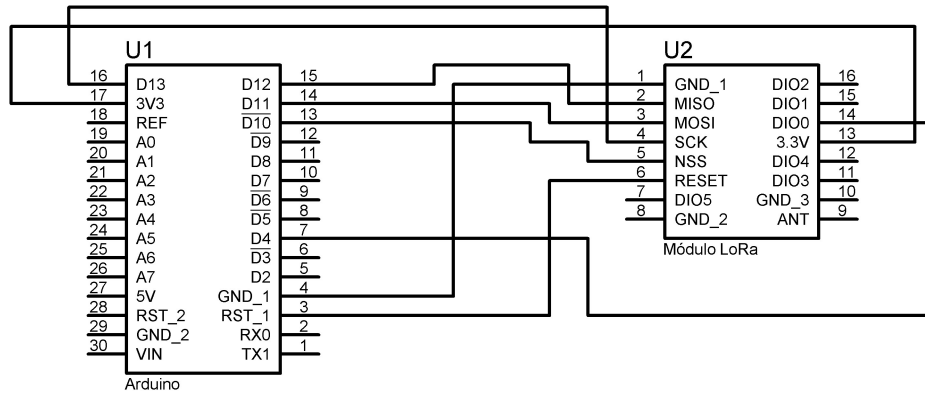


Figura 26 – Conexões do módulo Lora com o microcontrolador

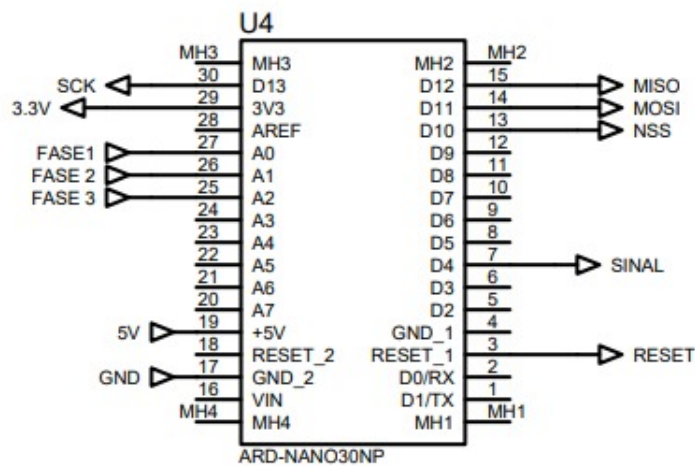


Figura 27 – Esquemático de pinagem do microcontrolador

4.1.6 Placa de Circuito Impresso

Para o projeto da placa de circuito impresso (*PCI*), considerou-se os seguinte esquemático apresentados na Figura 28.

4.1.6.1 Requisitos de Layout

O principal requisito no desenvolvimento de um layout para uma *PCI* é a largura e espaçamento entre as trilhas. A Figura ?? e a Tabela 6 apresentam os parâmetros utilizados no desenvolvimento do protótipo. (LIMA, 2010)

1

¹ 1 mils = 0,0254 mm e 1 oz = 28,35g.

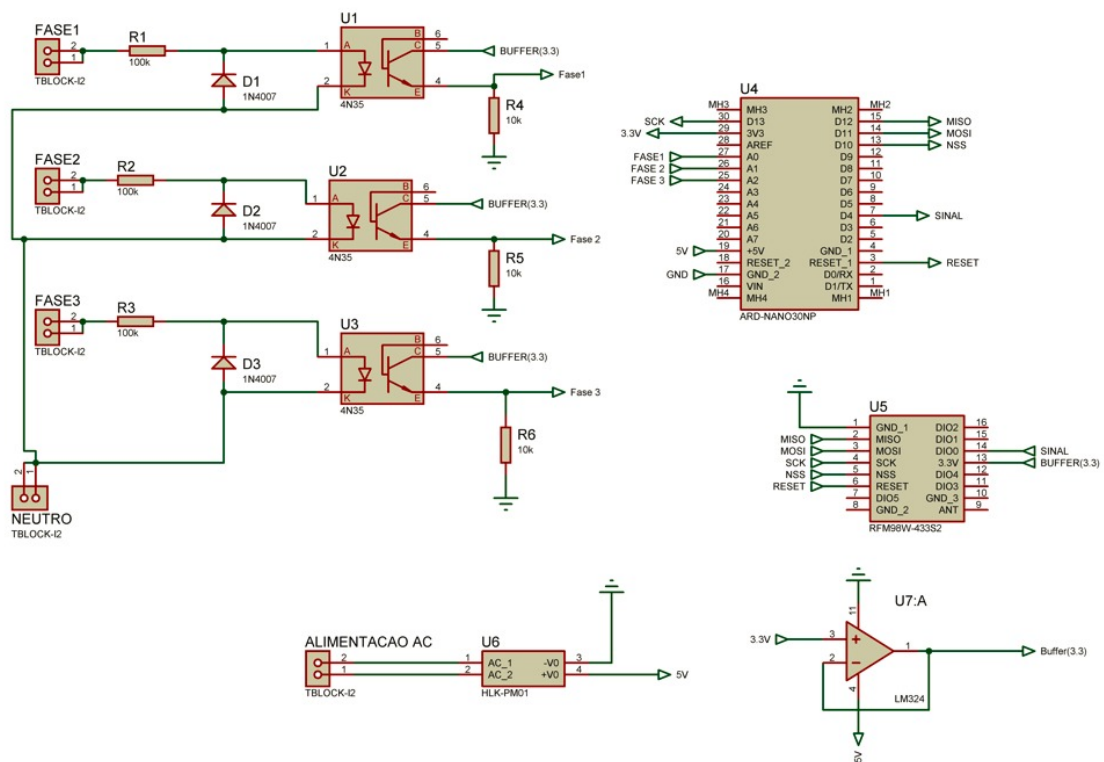


Figura 28 – Circuito do protótipo

Tabela 5 – Tabela de largura mínima de uma trilha em função da corrente nominal. (LIMA, 2010)

Largura da trilha(cobre)	Corrente[A] 1oz	Corrente[A] 2oz	Corrente[A] [μm]
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	

4.1.7 Produção da Placa de Circuito Impresso

O protótipo final foi desenvolvido utilizando software proteus. Os resultados obtidos são apresentados a seguir nas Figuras 29 e 30.

4.2 Desenvolvimento de Firmware do Protótipo Funcional

4.2.0.1 Configurações Gerais do Firmware

Para a implementação do código, foi utilizado a plataforma de desenvolvimento *Arduino IDE* e o *VS Code*, utilizando linguagem de programação C++.

Tabela 6 – Espaçamento mínimo entre trilhas em função da tensão nominal (LIMA, 2010)

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

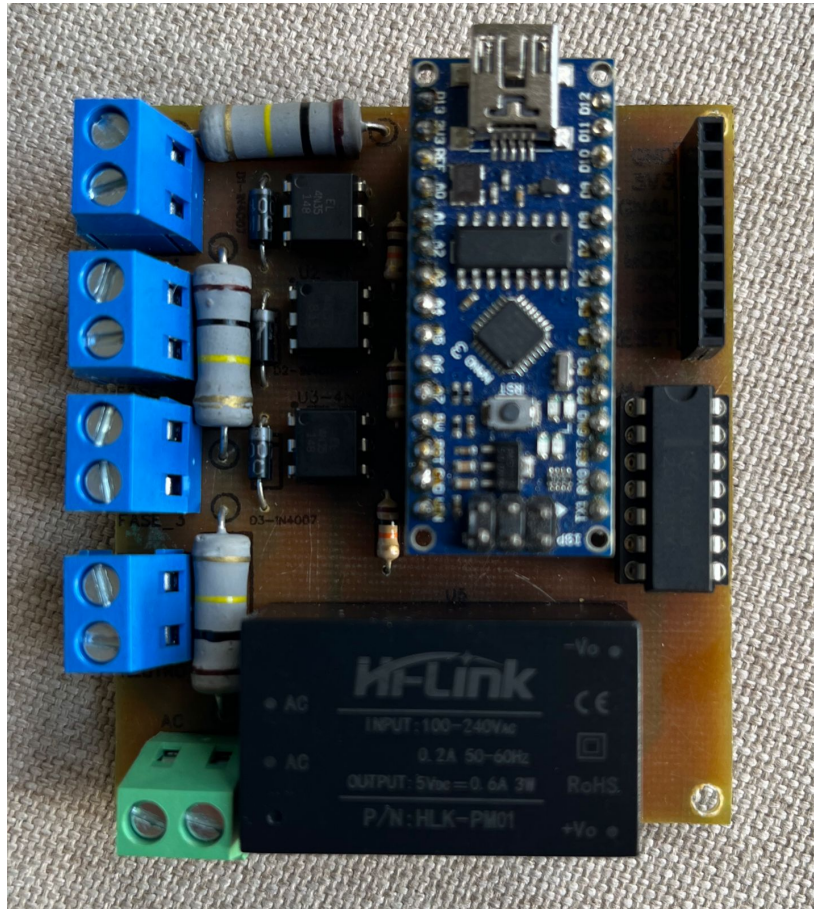


Figura 29 – Fotografia superior do protótipo final.

4.2.0.2 Variáveis de Controle

Para a implementação do firmware, definiu-se nove variáveis de ambiente. Os nomes das variáveis, valores iniciais, tipos e designio de cada variável é indicado na tabela 7.

4.2.0.3 Rotina de Leitura dos Sinais de Fases

Para a leitura de cada sinal referente as 3 fases lida utilizou-se a função *analogRead()*, essa leitura e a normalização é realizada para cada pino listado na seção 4.1.2.

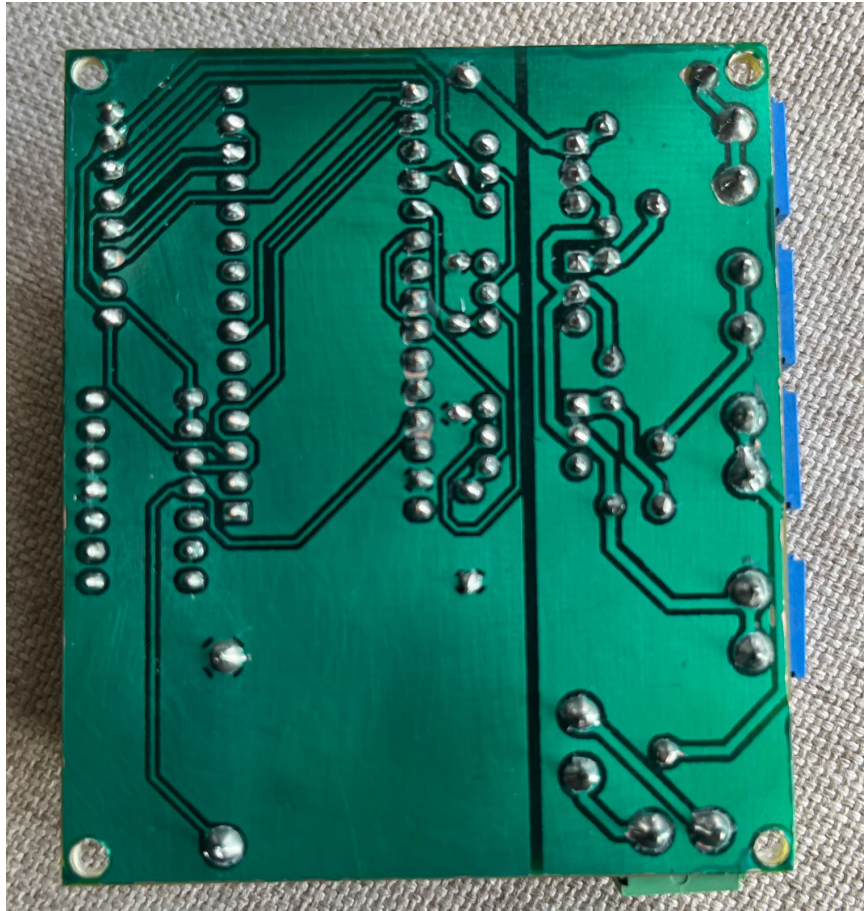


Figura 30 – Fotografia inferior do protótipo final.

Tabela 7 – Tabela de variáveis de controle utilizada no firmware.

NOME	TIPO	VALOR INICIAL	PROPÓSITO
Qtd_Amostras	int	$1 < \text{qtd_Amostras} \leq 40$	Quantidade de amostras a ser filtradas usando filtro média móvel
Intervalo_Amostragem	int	1	Intervalo de amostragem do firmware
fase1	float	0	variável que armazena os valores lido do detector de fase 1
fase2	float	0	variável que armazena os valores lido do detector de fase 2
fase3	float	0	variável que armazena os valores lido do detector de fase 3
timer1	long	0	determina o momento para acionar o filtro de média móvel
NotifyFase1	double	0	Armazena o valor da média da fase 1 para o gerenciamento de notificação
NotifyFase2	double	0	Armazena o valor da média da fase 2 para o gerenciamento de notificação
NotifyFase3	double	0	Armazena o valor da média da fase 3 para o gerenciamento de notificação

4.2.0.4 Rotina de Filtro de média móvel

A função de filtro de média móvel possui as seguintes variáveis locais apresentadas na Tabela 8.

Caso a variável zera_vetor seja igual a 1 (*Verdadeiro*), ocorre a zeragem do *Buffer* circular e o estado da variável zera_vetor muda para 0 (*Falso*)

Após isso ocorre a rotina de armazenar os valores analógicos normalizados nos *Buffers* circulares, somatório dos valores em cada posição do buffer circular, e depois a média ponderada.

A atualização da posição a ser utilizada do *Buffer* circular é atualizada a cada

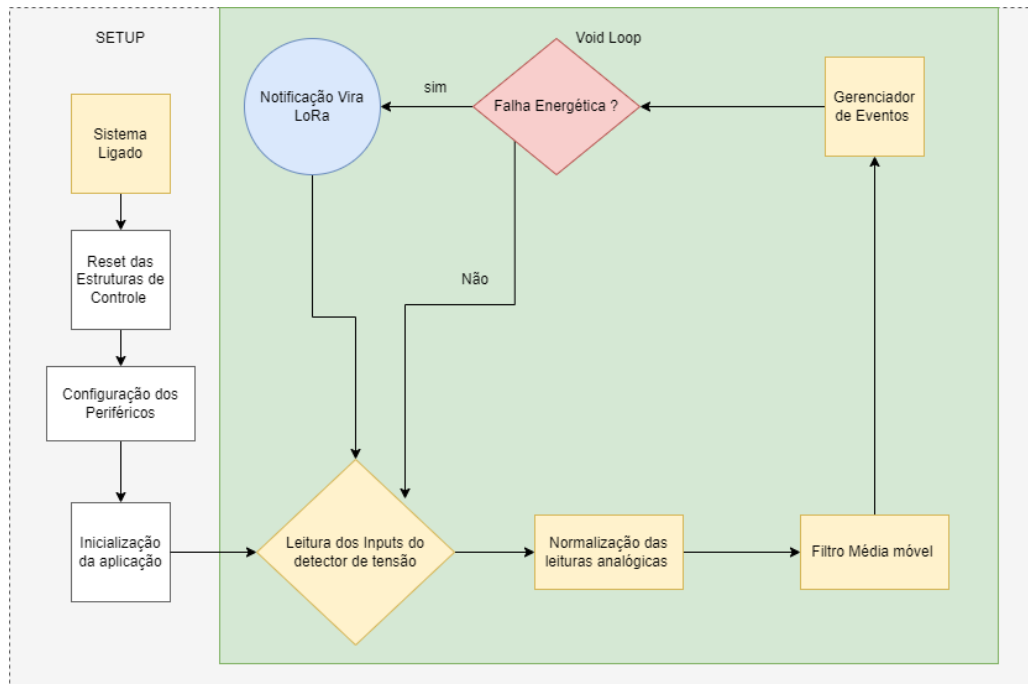


Figura 31 – Fluxograma global de execução do firmware.

```

fase1 = analogRead(A0)*(3.3/1023);
fase2 = analogRead(A1)*(3.3/1023);
fase3 = analogRead(A2)*(3.3/1023);
    
```

Figura 32 – Captura de tela da rotina de leitura e normalização do sinal analógico recebido.

Tabela 8 – Tabela de variáveis locais d função de filtro média móvel.

NOME	TIPO	VALOR INCIAL	PROPÓSOTO
Leituras_ anteriores1[Qtd_ Amostras]	int		Vector que funciona como Buffer circular para a fase 1
Leituras_ anteriores2[Qtd_ Amostras]	int		Vector que funciona como Buffer circular para a fase 2
Leituras_ anteriores3[Qtd_ Amostras]	int		Vector que funciona como Buffer circular para a fase 3
Posicao	int	0	posicao atual de leitura
Soma1	float	0	A soma do buffer circular da fase 1
Soma2	float	0	A soma do buffer circular da fase 2
Soma3	float	0	A soma do buffer circular da fase 3
Media1	float	0	é a saída do filtro referente a fase 1
Media2	float	0	é a saída do filtro referente a fase 2
Media3	float	0	é a saída do filtro referente a fase 3
zera_ctor	bool	1	variável auxiliar para saber se é a primeira execução. Se for, ele zera todo o buffer circular

rotina do algoritmo de filtragem do sinal e a função retorna os valores de média das leituras.

Durante a rotina do filtro as variáveis locais *NotifyFase1*, *NotifyFase2* e *NotifyFase3*, recebem os valores atuais das médias calculadas em cada ciclo para ser usada no gerenciamento de eventos.

```
Soma1 = fase1 - Leituras_anteriores1[Posicao%Qtd_Amostras] + Soma1;
Soma2 = fase2 - Leituras_anteriores2[Posicao%Qtd_Amostras] + Soma2;
Soma3 = fase3 - Leituras_anteriores3[Posicao%Qtd_Amostras] + Soma3;
Leituras_anteriores1[Posicao%Qtd_Amostras] = fase1;
Leituras_anteriores2[Posicao%Qtd_Amostras] = fase2;
Leituras_anteriores3[Posicao%Qtd_Amostras] = fase3;

Media1 = (float)Soma1/(float)(Qtd_Amostras);
Media2 = (float)Soma2/(float)(Qtd_Amostras);
Media3 = (float)Soma3/(float)(Qtd_Amostras);
```

Figura 33 – Rotina do algoritmo de média móvel.

```
Posicao = (Posicao+1)%Qtd_Amostras;
return((double)Media1,(double)Media2,(double)Media3);
```

Figura 34 – Atualização da posição a ser usada do Buffer circular.

```
NotifyFase1 = Media1;
NotifyFase2 = Media2;
NotifyFase3 = Media3;
```

Figura 35 – Atualização das variáveis locais para detectar o momento de notificação.

4.2.0.5 Gerenciamento de eventos

O gerenciamento de eventos é a verificação dos valores armazenados nas variáveis *NotifyFase1*, *NotifyFase2* e *NotifyFase3* a cada ciclo do firmware, quando os valores nas variáveis estão menor que 0.5 é disparado a rotina de notificação usando a rede LoRa.

```
if (NotifyFase1 < 0.5) {
    String message = "FALHA ENERGETICA NA FASE 1";
    LoraSender(message);
    delay(1000);
}
if (NotifyFase2 < 0.5) {
    String message = "FALHA ENERGETICA NA FASE 2";
    LoraSender(message);
    delay(1000);
}
if (NotifyFase3 < 0.5) {
    String message = "FALHA ENERGETICA NA FASE 3";
    LoraSender(message);
    delay(1000);
}
```

Figura 36 – Verificações dos valores de cada fase para notificação.

4.2.0.6 Notificação pela Rede LoRa

Para a rotina de notificação usando a rede Lora, utilizou-se a biblioteca *LoRa* e uma função nomeada de *LoraSender*, essa função recebe como parâmetro a mensagem passada no gerenciamento de evento, depois disso a uma interrupção de 1 segundo para retornar ao *loop* principal.

```
void LoraSender(String message) {  
  
    LoRa.beginPacket();  
    LoRa.print(message);  
    Serial.println(message);  
    LoRa.endPacket();  
}
```

Figura 37 – Função de envio das informações usando a rede LoRa.

4.2.1 Análise de Desempenho do Sistema

Para análise de desempenho do sistema projetado, nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios referente a detecção de tensão, filtragem dos sinais e alertas de interrupção. Foram realizadas algumas adaptações no firmware para visualizar o funcionamento do sistema.

4.2.1.1 Detecção de tensão

Para a validação da detecção de tensão em fase, o sistema foi conectado a uma fonte de 220Vca. Os resultados são apresentados a seguir.

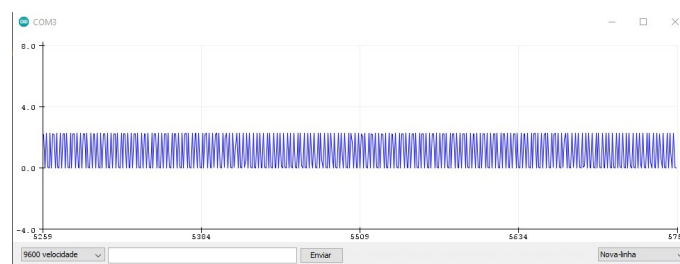


Figura 38 – Leitura do detector de tensão usando o microcontrolador com leitura a cada 1 milissegundo.

Note, que nas Figuras 38 e 39 o sinal não apresenta cerca quantidade de perca da qualidade pois é possível detectar os uma quantidade relativamente alta picos positivos e negativos da onda quadrada. Porém, na Figura 40 ao aumentar o intervalo de leitura para 100ms é possível realmente ver que o sinal lido é uma onda quadrada porém a leitura apresenta atraso podendo ocasionar erros de detecção durante o processo de filtragem, logo o período de leitura do sinal é de 1ms a 10ms.

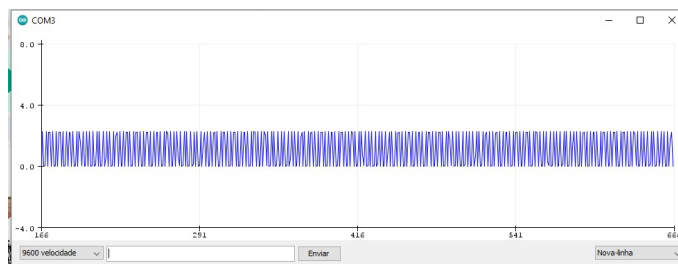


Figura 39 – Leitura do detector de tensão usando o microcontrolador com leitura a cada 10 milissegundos.

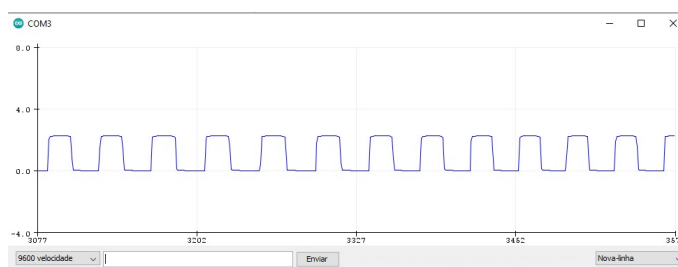


Figura 40 – Leitura do detector de tensão usando o microcontrolador com leitura a cada 100 milissegundos.

4.2.1.2 Filtragem do sinal

Para a validação da filtragem de sinal foi utilizada a leitura do sinal referente a uma fase a cada 1ms, e foi alternando a quantidade de amostras filtradas em, 20 unidades, 50 unidades e 100 unidades. Os resultados são apresentados a seguir onde o sinal lido é a onda de cor azul e o sinal filtrado é o de cor vermelha.

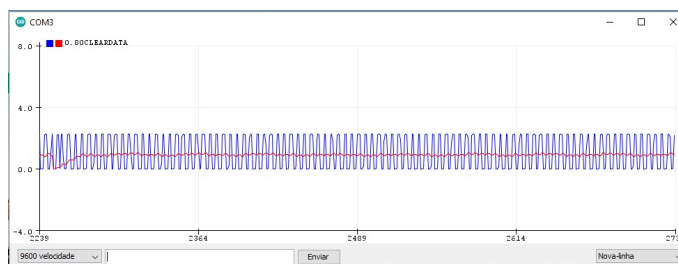


Figura 41 – Filtragem do sinal utilizando 20 amostras no filtro média móvel.



Figura 42 – Filtragem do sinal utilizando 50 amostras no filtro média móvel.

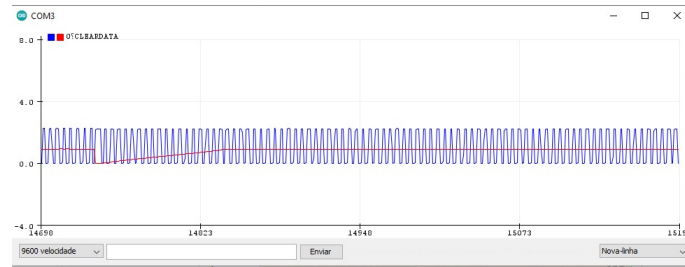


Figura 43 – Filtragem do sinal utilizando 100 amostras no filtro média móvel.

Note, na Figura 43, o sinal filtrado tende a demorar mais tempo para se estabilizar comparado com os finais filtrados utilizando menores quantidades de amostras, quando maior a quantidade de amostras mais estável é o sinal filtrado. Porém para não consumir toda a memória disponível no microcontrolador, optou-se por utilizar o sistema filtrando 20 amostras para cada fase.

4.2.1.3 Envio de Alertas

Para a validação do envio de alertas para simulou-se a interrupção de tensão em cada fase do sistema. Os resultados são apresentados a seguir.

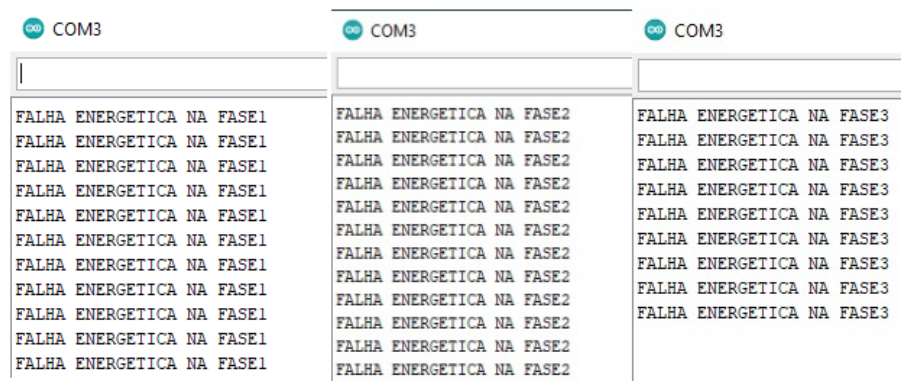


Figura 44 – Alerta de falha referente a cada fase.

A Figura 44, apresenta as mensagens de falhas para cada fase utilizando LoRa.

4.2.1.4 Detecção de Falhas

Para o teste de detecção de interrupções, foi utilizado o seguinte sistema apresentado na Figura 45, usando o protótipo para envio das falhas energéticas e um microcontrolador ATmega328 utilizando LoRa como receptor. Utilizou-se uma fase de 220Vca como sinal de entrada do protótipo.

A Figura 46, apresenta a alimentação e aquisição do sinal do protótipo para o ensaio de detecção de interrupções. Para simular as falhas o conector referente a fase foi ligado e desligado da tomada.

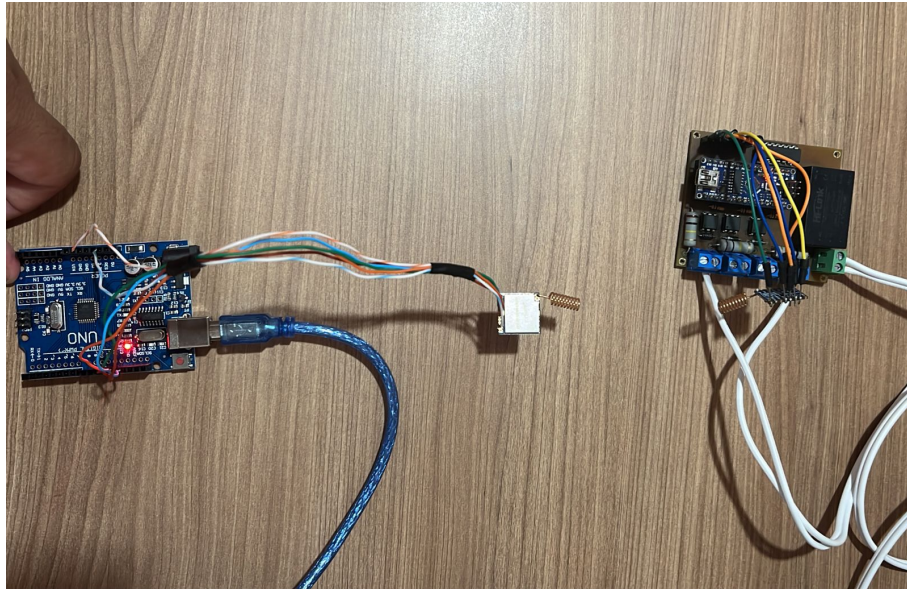


Figura 45 – Sistema de teste para detecção de interrupções.

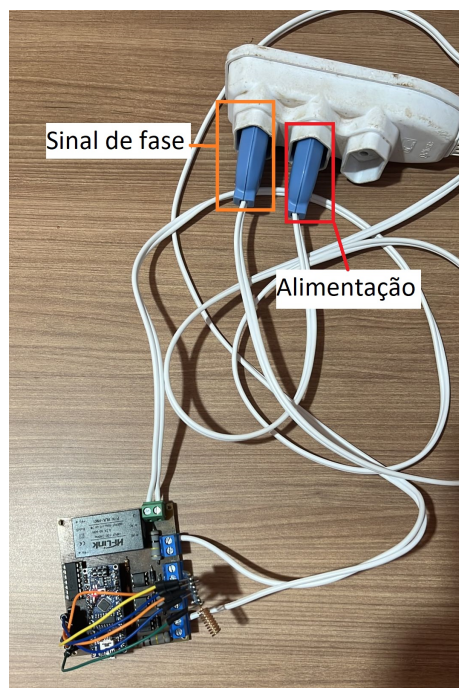


Figura 46 – Alimentação do protótipo e sinal de fase.

O resultado do primeiro teste não foi satisfatório, conforme apresentado na Figura 47, o receptor não processou os dados recebidos corretamente, esse erro pode ter sido ocasionado pela posição das antenas emissor e quando do receptor que não estavam direcionadas uma para outra corretamente e ruídos além do tamanho da informação a ser transmitida.

No segundo teste os resultados foram satisfatório, a posição das antenas foi ajustado, a antena do receptor ficou na mesma direção do emissor. Conforme apresentado na

Tabela 9 – Custos dos desenvolvimento do protótipo.

Componentes	Preço unitário
Conector	R\$ 0,80
Optoacoplador 4n35	R\$ 1,80
Diodo 1N4007	R\$ 0,50
Resistor de $100k\Omega$	R\$ 0,50
Resistor de $10k\Omega$	R\$ 0,50
Fonte de alimentação	R\$ 65,00
Microcontrolador	R\$ 60,00
Módulo Lora1276	R\$ 65,00
Produção da PCI	R\$ 35,00

5 Conclusão e prospecções

Os sistemas de geração fotovoltaica tem apresentado um vasto crescimento nos últimos anos, com isso as necessidades de automação, controle e monitoramento tem surgido. Tendo em vista as diversas ações de eficiência energética implementadas na UnB, e os novos desafios advindos do amadurecimento e uso do SIGE, o desenvolvimento de um protótipo para adicionar uma redundância à identificação de interrupções de energia se mostrou promissor na questão de detecção das interrupção, o uso do protocolo LoRa é viável para utilização por meio de adequação na arquitetura da rede atual.

Assim, neste trabalho de conclusão de curso, abordou-se o desenvolvimento de um protótipo embarcado de baixo custo para monitorar interrupções de tensão nos pontos de acoplamento de sistema fotovoltaico da UnB, utilizando rede LoRa. Na parte de *hardware*, foram apresentados as características do projeto, diagramas, esquemáticos dos circuitos e placa de circuito impresso para validação do sistema. Na parte de *firmware*, visando o baixo custo do sistema, desenvolveu um software para leitura dos sinais de tensão, tratamento e notificação de eventos (falhas energéticas) usando módulo LoRa. A utilização da plataforma de desenvolvimento Arduíno Nano, com o microcontrolador ATmega328P, e um módulo LoRa1276, viabilizou o desenvolvimento de um protótipo de acordo com os requisitos. Validou-se o protótipo utilizado por meio de experimentos, para a caracterização do circuito e validação do funcionamento do sistema.

Tendo em vista a continuidade e aprimoramento do sistema, sugere-se os seguintes trabalhos futuros:

- Continuidade de desenvolvimento do firmware, empregando melhores práticas de engenharia de software;
- Integração do sistema de mensagens do protótipo ao sistema de notificações do SIGE;

Por fim, todos os respectivos arquivos estão disponibilizados no repositório do trabalho na plataforma [GitHub](#).

Referências

- 3GLTEINFO. *LoRa Architecture*. Disponível em <<https://www.3glteinfo.com/lora/lora-architecture/>>. Acessado em 11 de outubro 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 22.
- ADELANTADO, F. et al. "*Understanding the limits of LoRaWAN*". 2017. Disponível em <<https://arxiv.org/abs/1607.08011>>. Acessado em 11 de outubro 2022. Citado na página 22.
- ARDUINO. Arduíno nano. In: . [s.n.]. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 30.
- ASCOM, G. da R. *Universidade inaugura usina de energia solar no Gama*. 2019. Disponível em: <<https://noticias.unb.br/76-institucional/3752-universidade-inaugura-usina-de-energia-solar-no-gama>>. Citado na página 13.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16690: Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos — requisitos de projeto*. Rio de Janeiro, 2019. Citado na página 17.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10899: Energia solar fotovoltaica - terminologia*. Rio de Janeiro, 2020. Citado na página 15.
- BARRETTO, A. costa. *Circuito integrado de condicionamento de sinais analógicos utilizando tecnologia 0,5 um para sinais industriais e biomédicos*. 2011. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/3165>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 23.
- CARNEIRO, J. MÓdulos fotovoltaicos - características e associações. 2010. Citado na página 15.
- ELÉTRICA, A. N. de E. Resolução normativa nº 482/2012. 2012. Citado na página 12.
- ELÉTRICO, O. N. do S. Resultados da operação - geração e fator de capacidade médios mensais. 2022. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao-fator-capacidade-medios-mensais.aspx>>. Citado 3 vezes nas páginas 7, 13 e 15.
- EMBARCADOS. *Aprenda sobre modulação FM*. 2016. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/aprenda-sobre-modulacao-fm/>>. Acessado em 18 de Abril de 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 20.
- FLORIDA, U. O. C. *Cells, Modules and Arrays*. 2014. Disponível em: <<https://energyresearch.ucf.edu/consumer/solar-technologies/solar-electricity-basics/cells-modules-panels-and-arrays/>>. Acessado em: 03 de maio 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 17.

- GASPAR, J. *Boost.Circular Buffer*. 2015. Disponível em <https://www.boost.org/doc/libs/1_58_0/doc/html/circular_buffer.html>. Acessado em 02 de Setembro 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 32.
- GHOSLYA, S. *lora Decoding*. 2011. Disponível em: <<https://www.sghoslya.com/p/lora-is-chirp-spread-spectrum.html>>. Citado 3 vezes nas páginas 7, 21 e 22.
- HILINK. *Ultra-compact power module HLK-PM01*. Disponível em <<https://www.filipeflop.com/img/files/download/Datasheet-HLK-PM01.pdf>>. Acessado em 03 de Setembro 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 31.
- LATHI, B. *Sinais e Sistemas Lineares - 2.ed.* Bookman, 2007. ISBN 9788560031139. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=ySxoo2TVeeYC>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- LIANDO, J. et al. Known and unknown facts of lora: Experiences from a large-scale measurement study. *ACM Transactions on Sensor Networks*, v. 15, p. 1–35, 02 2019. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 22.
- LIMA, C. B. de. *TÉCNICAS DE PROJETOS ELETRÔNICOS COM OS MICROCONTROLADORES AVR*. 1. ed. [S.l.: s.n.], 2010. ISBN 9788591140008. Citado 4 vezes nas páginas 9, 38, 39 e 40.
- MME, M. D. M. E. E. Boletim mensal de energia. 08 2021. Citado na página 12.
- MOURA, J. M. *What Is Signal Processing?* 2009. Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5230869>>. Acessado em 01 de Setembro 2022. Citado na página 24.
- ORACLE. *O que é IoT?* 2022. Disponível em: <<https://www.oracle.com/br/internet-of-things/what-is-iot/>>. Acessado em 11 de Abril 2022. Citado na página 19.
- RAY, P. A survey on internet of things architectures. *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, v. 2, p. 151714, 12 2016. Citado na página 19.
- REIS, A. et al. "aspectos da implantação de sistema de gestão energética (sige) da universidade de brasília. in: Sergio de oliveira frontin. (org.). ações de eficiência energética associadas à geração distribuída - estudo de caso: Campus darcy ribeiro da universidade de brasília. ". p. 186–242, 2020. Citado 5 vezes nas páginas 7, 9, 25, 26 e 27.
- SIGNH, Y.; TRIPATHI, S.; PANDEY, M. Analysis of digital iir filter with labview. 2010. Citado na página 24.
- SOLAR, P. *Como Funciona o Painel Solar Fotovoltaico (Placas Fotovoltaicas)*. 2022. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-o-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acessado em: 27 de Abril 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 18.
- SURICHAQUI, R. C. C. valiação teórica e experimental do uso de conversores cc-cc na eficiência da conversão fotovoltaica em condições adversas de operação. 2015. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/26425/26425.PDF>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 16.

-
- USF. *Processamento Digital de Sinais*. 2014. Disponível em <<http://pds-usf.blogspot.com/2014/05/sinais-e-sistemas-discretos.html>>. Acessado em 18 de Agosto 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 23.
- VEGA, A. S. de la. Tutorial sobre sistema de média móvel para fundamentos de processamento digital de sinais. 2018. Citado na página 24.
- XU, L.; HE, W.; LI, S. Internet of things in industries: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 10, p. 2233–2243, 11 2014. Citado na página 19.

ANEXO A – Esquemático Completo

