



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ERIKA REBECA PEREIRA OLIVEIRA
PEDRO HENRIQUE BORGES DO AMARAL**

**PROTÓTIPO DE MEDIDOR DE BAIXO CUSTO PARA ANÁLISE DA QUALIDADE DA
TENSÃO EM REGIME PERMANENTE**

**PALMAS - TO
2021**

**ERIKA REBECA PEREIRA OLIVEIRA
PEDRO HENRIQUE BORGES DO AMARAL**

**PROTÓTIPO DE MEDIDOR DE BAIXO CUSTO PARA ANÁLISE DA QUALIDADE DA
TENSÃO EM REGIME PERMANENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, *Campus* Palmas, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Doutor Marcos Balduino de Alvarenga.

**PALMAS -TO
2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

O48p Oliveira, Erika Rebeca Pereira; Amaral, Pedro Henrique Borges do
Protótipo de medidor de baixo custo para análise da qualidade da
tensão em regime permanente / Erika Rebeca Pereira Oliveira, Pedro
Henrique Borges do Amaral. – Palmas, TO, 2021.
88 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, *Campus* Palmas, Palmas, TO, 2021.

Orientador: Dr. Marcos Balduino de Alvarenga

1. Qualidade de energia elétrica. 2. Protótipo. 3. PRODIST. I.
Protótipo de medidor de baixo custo para análise de qualidade da
tensão em regime permanente

CDD 621

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de
estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a).

**ERIKA REBECA PEREIRA OLIVEIRA
PEDRO HENRIQUE BORGES DO AMARAL**

**PROTÓTIPO DE MEDIDOR DE BAIXO CUSTO PARA ANÁLISE DA QUALIDADE DA
TENSÃO EM REGIME PERMANENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Elétrica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins,
Campus Palmas, como exigência à obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA AVALIADORA

Doutor Marcos Balduino de Alvarenga (Orientador)
IFTO – *Campus* Palmas

Doutor Marcus André Pereira Oliveira
IFTO – *Campus* Palmas

Doutor Márcio Augusto Tamashiro
IFTO – *Campus* Palmas

*Ao nosso orientador, aos nossos familiares e aos
nossos namorados.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos aos nossos familiares, que nunca negaram palavras de força, incentivo, amor, carinho e otimismo ao longo da nossa jornada acadêmica. Obrigado por entenderem nossos momentos de ausência.

Agradecemos ao professor Dr. Marcos Balduino, por ter acreditado em nosso trabalho, pelo exemplo de profissionalismo e por suas orientações.

Ao professor Dr. Marcus André, que sempre atendeu aos nossos chamados com muita atenção, algo que foi de fundamental importância para este trabalho.

Somos gratos à divindade, que encheu nossos corações de luz e contribuiu com a nossa cumplicidade.

Agradecemos, também, um a outro pela paciência, compreensão e companheirismo.

Por fim, agradecemos a todos aqueles que nos apoiaram nessa jornada.

RESUMO

A apuração e investigação aprofundada das propriedades que caracterizam as condições e operações dos sistemas elétricos são imprescindíveis para uma avaliação adequada. Para tanto, foram desenvolvidas diversas técnicas, análises, procedimentos e equipamentos que podem identificar parâmetros detalhados sobre grandezas e fenômenos elétricos. Em especial, os analisadores e medidores de qualidade de energia elétrica, que possuem capacidade de fornecer monitoramento constante das instalações elétricas e apresentar relatórios de várias características de operação. No entanto, esses equipamentos exigem um complexo manuseamento e seu custo pode ser inacessível para os técnicos e profissionais na área. Diante disso, este trabalho foi desenvolvido com intuito de analisar os parâmetros que definem qualidade de energia elétrica, de forma a respaldar o desenvolvimento de um protótipo que possua capacidade de medir tensão em regime permanente da rede e apresentar suas propriedades. Através da utilização da plataforma de prototipagem da família STM32 (*Blue Pill*), foi realizada a confecção de um protótipo que atenda às condições necessárias para garantir a medição. Um circuito de condicionamento de sinal analógico foi dimensionado para manipulação das características do sinal de tensão da rede de energia elétrica e um algoritmo de programação foi desenvolvido para processar os dados de medição. Os resultados apontaram que o protótipo permitiu a análise das características da rede, proporcionando avaliar aspectos da qualidade do fornecimento de tensão.

Palavras-chave: Qualidade de energia elétrica. Protótipo. PRODIST.

ABSTRACT

The acquisition and investigation of properties that characterize conditions and operations of electrical systems is essential for their appropriate evaluation. Therefore, several techniques, analysis, procedures and equipment have been developed to identify detailed parameters on electrical quantities and phenomena. Power quality analysers and meters have the capacity to provide constant monitoring of electrical installations and present reports of various operating characteristics. However, this equipment requires complex handling and its cost may be inaccessible to technicians and professionals in field. Therefore, this work was established to analyse parameters that define power quality, in order to develop a prototype, which has ability to measure the electrical grid voltage and present its properties. Taking advantage of the STM32F103C8T6 (Blue Pill) prototyping platform, a prototype was created that meets the necessary conditions to guarantee appropriate measurement. An analog front-end circuit was designed to manipulate the voltage signal characteristics of electrical grid and a programming algorithm was developed to process data measured. The results pointed out that the prototype allowed investigation of characteristics of electrical grid, allowing to evaluate aspects of quality in voltage supply.

Keywords: Power quality. Prototype. PRODIST.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Custo médio de perdas por interrupção de energia elétrica.....	22
Figura 2 - Diversas perturbações que afetam o sinal de tensão alternada	23
Figura 3 - Faixas de níveis de tensão	27
Figura 4 - Exemplos de equipamentos de monitoramento e análise de qualidade de energia elétrica.....	40
Figura 5 - Diagrama típico da arquitetura de um analisador de qualidade de energia elétrica.....	41
Figura 6 - Gráfico do processo de quantização.....	45
Figura 7 - Sinal reconstituído para diferentes taxas de amostragem	47
Figura 8 - Efeito <i>aliasing</i> na reconstituição de um sinal	48
Figura 9 - Comparação do desempenho de diferentes arquiteturas de conversores analógicos-digitais.....	49
Figura 10 - Arduino UNO utilizado nas versões iniciais do protótipo.....	51
Figura 11 - <i>Blue Pill</i> utilizado na versão final no desenvolvimento do protótipo	51
Figura 12 - Diagrama dos pinos da família dos STM32F103	52
Figura 13 - Configurações disponíveis para o tempo de conversão de uma amostra....	54
Figura 14 - Circuito abaixador de tensão	55
Figura 15 - Configuração dos pinos do AMC1100.....	56
Figura 16 - Circuito de condicionamento analógico completo	57
Figura 17 - Módulo adaptador MicroSD juntamente do Cartão SD	58
Figura 18 - <i>Design</i> da vista superior da PCB (<i>top layer</i>)	62
Figura 19 - Protótipo produzido com auxílio da fresadora CNC (versão intitulada Power2dot 1.0). a) Vista inferior (<i>bottom layer</i>); b) Vista superior (<i>top layer</i>).....	63
Figura 20 - Gráfico que demonstra as características de operação do circuito.....	64
Figura 21 - Gráfico de um período da onda através das 500 amostras	65
Figura 22 – Reprodução do sinal da fonte com as amostras convertidas	66
Figura 23 - Diagrama da operação de conversão analógico-digital	80
Figura 24 - Composição do ADCSRA	81
Figura 25 - Diagrama de níveis do processo de conversão simples	82

Figura 26 - Transformador de tensão 220/15 V.....	83
Figura 27 - Circuito abaixador de tensão	84
Figura 28 - Circuito DC offset.....	84
Figura 29 - Circuito de condicionamento analógico da primeira versão do protótipo	85
Figura 30 - Primeira versão do protótipo	85
Figura 31 - Gráfico de comparação dos sinais de tensão	86
Figura 32 - Reconstituição do sinal através das 500 amostras	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorização dos principais fenômenos.....	24
Tabela 2 - Pontos de conexão em tensão nominal ou inferior a 1kV (220/127)	28
Tabela 3 - Terminologia dos Indicadores de distorções harmônicas.....	29
Tabela 4 - Limites das distorções harmônicas totais.....	31
Tabela 5 - Terminologia de cálculo para cintilação luminosa	32
Tabela 6 - Limites para a flutuação de tensão.....	33
Tabela 7 - Classificação das variações de tensão de curta duração.....	34
Tabela 8 - Terminologia de cálculo das variações curtas de tensão	35
Tabela 9 - Especificações de operação básicas do AMC1100.....	56
Tabela 10 - Orçamento do protótipo.....	68
Tabela 11 - Registro das 30 primeiras amostras e memória de cálculo dos sinais analisados	79
Tabela 12 - Seleção do Prescaler do ADC.....	82

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Determinação do fator de potência	28
Equação 2 - Cálculo da DITh	29
Equação 3 - Cálculo da DTT%	30
Equação 4 - Cálculo da DTTP%	30
Equação 5 - Cálculo do DTTI%	30
Equação 6 - Cálculo do DTT3%	30
Equação 7 - Cálculo do fator de desequilíbrio de tensão	31
Equação 8 - Equação alternativa para o cálculo do desequilíbrio de tensão	31
Equação 9 - Cálculo do valor de β	32
Equação 10 - Cálculo da Pst	33
Equação 11 - Cálculo da Plt	33
Equação 12 - Cálculo do indicador DIC	36
Equação 13 - Expressão para o indicador FIC	36
Equação 14 - Cálculo do indicador DMIC	36
Equação 15 - Expressão do indicador DICRI	37
Equação 16 - Cálculo do indicador DEC	37
Equação 17 - Cálculo do indicador FEC	37
Equação 18 - Determinação da resolução na quantização	46
Equação 19 - Critério de Nyquist para taxa de amostragem	46
Equação 20 - Determinação da frequência de recobrimento (<i>aliasing</i>)	48
Equação 21 - Resultado de uma conversão simples no STM32	53
Equação 22 - Determinação da frequência de amostragem no <i>Blue Pill</i>	54
Equação 23 - Tensão entre os nós 1 e 2 em função do divisor de tensão	55
Equação 24 - Valor eficaz para sinais amostrados (discretos)	66
Equação 25 - Resultado de uma conversão simples no Arduino UNO	81
Equação 26 - Determinação da taxa de amostragem	83
Equação 27 - Tensão de saída em função do divisor de tensão	83

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Considerações Gerais.....	15
1.1.1	Qualidade de energia elétrica.....	15
1.1.2	Parâmetros de Investigação do Trabalho	16
1.2	Justificativa.....	18
1.3	Objetivos	18
1.3.1	Objetivo Geral.....	18
1.3.2	Objetivos Específicos	18
1.4	Estrutura do Trabalho	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Conceitos de Qualidade de Energia Elétrica.....	20
2.2	A Importância de Fornecer Energia Elétrica de Qualidade.....	20
2.3	Fenômenos que Influenciam Negativamente a Qualidade de Energia Elétrica	22
2.4	Os Critérios que Tornam uma Energia Elétrica de Qualidade.....	25
2.4.1	Normatizações e Regularizações	25
2.4.2	Definições e Especificações do PRODIST	26
2.4.2.1	Tensão em Regime Permanente.....	27
2.4.2.2	Fator de Potência	28
2.4.2.3	Harmônicos	29
2.4.2.4	Desequilíbrio de tensão.....	31
2.4.2.5	Flutuação de Tensão.....	32
2.4.2.6	Variação de Frequência	34
2.4.2.7	Variação de tensão de curta duração.....	34
2.4.2.8	Indicadores de Continuidade	35

2.4.2.9	Crítérios para Medição de Tensão em Regime Permanente	38
2.5	Arquitetura dos Equipamentos para Monitoramento de Qualidade de Energia Elétrica	39
2.5.1	Sistema de Processamento.....	41
2.5.2	Circuitos de Condicionamento de Sinais Analógicos.....	42
2.5.3	Interfaces de Comunicação	42
2.5.4	Fontes de Alimentação	42
2.5.5	Sensores de Tensão	43
2.5.6	Memória e <i>Clock</i>	43
2.6	Processamento dos Sinais Analógicos e Digitais.....	44
2.6.1	Conversão Analógico-Digital	44
2.6.2	Quantização e Resolução	45
2.6.3	Taxa de Amostragem	46
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	50
3.1	Desenvolvimento do Protótipo.....	50
3.1.1	Determinação do Microcontrolador.....	50
3.1.2	Características Básicas do STM32 para Conversão Analógico-Digital	53
3.1.3	Dimensionamento do Circuito de Condicionamento Analógico	54
3.1.4	Determinação do Sistema de Armazenamento das Amostras	58
3.2	Desenvolvimento do Algoritmo de Programação.....	59
3.2.1	Determinação da Metodologia de Amostragem	59
3.2.2	Código de Programação para o Microcontrolador	60
3.3	Desenvolvimento da Placa de Circuito Impressa	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1	Operação do Circuito	64

4.2	Tratamento das Amostras	65
4.2.1	Abordagem e Análise Gráfica.....	65
4.2.2	Cálculo da Tensão Eficaz	66
4.3	Avaliação do Custo do Protótipo	67
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
5.1	Medições e Verificação da Operação do Circuito.....	69
5.2	Avaliação das Características e do Custo do Protótipo em Relação aos Produtos Existentes no Mercado.....	70
5.3	Propostas e Sugestões para Trabalhos Futuros	70
5.3.1	Investigação e Aprofundamento de Temas	70
5.3.2	Aprimoramento do Protótipo.....	71
5.3.3	Procedimentos para Análises e Medidas	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
	ANEXOS	77
	Anexo A - Código desenvolvido para o protótipo	77
	Anexo B - Tabela das amostras utilizadas para apresentação dos resultados	79
	APÊNDICES.....	80
	Apêndice A - Desenvolvimento do protótipo utilizando o Arduino UNO e Análise de seu Desempenho.....	80
	Arquitetura do ATmega328p para Conversão Analógico-Digital	80
	Dimensionamento do Circuito de Condicionamento Analógico	83
	Operação do Circuito.....	86
	Medições e Análise da Operação do Circuito.....	87

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

1.1.1 Qualidade de energia elétrica

O tema qualidade de energia elétrica vem ganhando notoriedade em paralelo à evolução dos sistemas de fornecimento de energia e demanda dos consumidores. Uma vez que o consumo de energia está se tornando mais prevalente em instalações residenciais, comerciais e industriais, os estudos e trabalhos nesse aspecto tornaram-se significativos nos últimos anos. Em particular, os preços crescentes de energia estão estimulando avanços de padrões mais elevados de eficiência energética, o que requer uma quantificação e gestão precisa do consumo de energia (VICIANA et al., 2018).

Nesse sentido, é possível encontrar artigos, livros e diversos regulamentos que buscam determinar quais são os parâmetros necessários para definir o que é uma energia de qualidade. Muitos desses parâmetros estão relacionados com as condições de continuidade do fornecimento e características técnicas do fornecimento de energia elétrica, buscando definir limites aceitáveis e compreender os diversos distúrbios encontrados na operação de sistemas elétricos. Para tanto, existem diversas medidas, técnicas, instrumentos e equipamentos que visam mitigar efeitos prejudiciais causados por esses distúrbios.

Os equipamentos dedicados para o monitoramento da qualidade de energia elétrica registram em tempo real os parâmetros de operação de um sistema elétrico. Além disso, registram as eventuais ocorrências de distúrbios e anomalias para avaliações futuras. Através desses registros, os analisadores de qualidade de energia elétrica fornecem dados essenciais que garantem o monitoramento efetivo da confiabilidade do sistema elétrico. Logo, esses equipamentos podem atuar como um agente decisivo para mitigar o custo de solucionar os problemas causadores dos distúrbios, fazendo com que seja de grande relevância tanto para o fornecedor quanto para o consumidor (MAZLUMI, 2011).

Construtivamente, esses equipamentos variam significativamente. A variação dos componentes constituídos nos analisadores de qualidade de energia elétrica é determinada em função da quantidade de parâmetros analisados, dos recursos fornecidos pelo equipamento e, principalmente, devido ao tipo de sistema elétrico a ser aplicado. O mercado conta com uma variedade de modelos disponíveis. A grande maioria desses produtos conta com uma grande quantidade de recursos e funcionalidades, fazendo com que possuam um alto valor agregado.

Logo, os analisadores de qualidade de energia elétrica ainda se encontram inacessíveis para o consumidor médio, tanto pelo custo quanto pela sua complexidade na utilização. Isso faz com que esses equipamentos sejam reduzidos ao uso por engenheiros e técnicos para realizar atividades de manutenção ou auditorias de energia (TOMESC; DOBRA; ABRUDEAN, 2007).

Um equipamento com linguagem simplificada e de baixo custo é indicado para que técnicos e até mesmo o consumidor médio possam analisar alguns aspectos básicos e essenciais de qualidade de energia elétrica e, a partir disso, reivindicarem a qualidade mínima da energia elétrica adquirida, favorecendo a tomada de decisões para o aumento da vida útil de seus equipamentos.

1.1.2 Parâmetros de Investigação do Trabalho

Na física, a energia é definida como um produto da potência ao longo do tempo. Para averiguar sua qualidade, é preciso analisar os parâmetros que a compõem. Como o tempo é uma grandeza de incremento constante, a energia está fortemente atrelada à potência. Portanto, para a energia elétrica, é necessário que sejam estudados os parâmetros de corrente e tensão, cujo produto define a potência elétrica.

Por sua vez, a tensão é a diferença de potencial elétrico entre dois pontos. Nas unidades consumidoras, ela é fornecida pela concessionária, a qual é responsável por suas características de fornecimento. O consumidor não determina o nível de tensão do seu sistema. Ele tem a necessidade de obter tensão estável no ponto de acesso comum (PAC). O PAC é o ponto no qual as instalações deixam de ser

responsabilidade da concessionária e passam a ser de responsabilidade do consumidor, ou seja, o ponto no qual a energia é entregue. Nesses termos, a concessionária tem a responsabilidade de entregar tensão de boa qualidade, já que a corrente é determinada pelas cargas conectadas ao PAC.

A corrente é de responsabilidade do cliente que a consome de acordo com a carga instalada. Entretanto, a tensão fornecida deve se manter constante independentemente da carga. Por isso, a tensão deve ser determinada por parâmetros estabelecidos por unidades reguladoras de energia. Como o consumidor tem direito à determinada potência, a tensão fornecida a ele deve seguir parâmetros estabelecidos pela agência reguladora responsável. Nesse momento, a responsabilidade da concessionária de fornecer tensão é desvinculada da responsabilidade do consumidor de absorver corrente adequadamente. Todos esses fatores levantam uma relevância ao monitoramento da tensão fornecida em relação ao monitoramento de corrente.

Neste cenário, este trabalho visa apresentar uma proposta, produzindo um protótipo para medir a tensão fornecida pela rede elétrica, atuando como ferramenta para que o consumidor tenha condições de verificar se a concessionária está cumprindo com suas obrigações de fornecer tensão de boa qualidade.

Ao se concentrar apenas nesse parâmetro (tensão), o equipamento proposto obtém vantagem econômica em relação aos seus competidores disponíveis no mercado, simplificando a necessidade de componentes e possibilitando um custo acessível. Dessa maneira, o consumidor médio dispõe de meios, que não sejam aplicados pela concessionária de energia, para verificação da qualidade da energia elétrica fornecida.

Por sua vez, este equipamento seguirá princípios estabelecidos pelas normas vigentes, mas a quantidade de parâmetros analisados será reduzida em relação aos equipamentos analisadores de qualidade de energia existentes no mercado. Levando-se em consideração que os níveis de tensão são critérios importantes de qualidade de energia, uma vez que níveis de tensão inadequados podem causar perdas no sistema elétrico (ROCHA, 2016).

Portanto, a análise se estabelecerá sobre a tensão em regime permanente, tendo como objetivo classificá-la com critérios determinados pelas agências reguladoras.

1.2 Justificativa

O desenvolvimento de um equipamento para a medição de tensão em regime permanente com custo reduzido pode propiciar aos profissionais que trabalham com pequenos reparos elétricos uma assertiva ferramenta para medição de distúrbios no fornecimento de tensão. Distúrbios estes com possibilidade de interferência em seu trabalho. Além disso, o consumidor médio torna-se ciente sobre aspectos da qualidade de energia elétrica fornecida à sua unidade de consumo.

Nessa perspectiva, a elaboração do presente estudo sobre o tema juntamente com um protótipo faz-se justificável por ser uma fonte de auxílio e orientação tanto para pessoas como para organizações que tenham o intuito de fabricar o equipamento para ser comercializado, disponibilizando um produto acessível e de qualidade.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Produzir um protótipo de baixo custo e uso simplificado que disponibilize informações sobre a qualidade de energia elétrica, através de medidas da tensão em regime permanente e apuração de suas principais características.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho estão listados a seguir:

- Compreender as normas e regulamentos que regem a qualidade de energia elétrica;

- Analisar os aspectos e técnicas de qualidade do fornecimento e continuidade da energia elétrica;
- Compreender o funcionamento dos equipamentos medidores e analisadores de qualidade de energia elétrica disponíveis no mercado;
- Analisar os processos e características dos dispositivos e componentes associados a estes equipamentos;
- Desenvolver um equipamento que apresente medições da tensão em regime permanente fornecida pela rede monofásica (220 V);
- Analisar o desempenho e características de operação deste equipamento confeccionado.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em 5 (cinco) capítulos. No primeiro capítulo, é apresentada a introdução, sendo constituída por considerações gerais, objetivos e justificativas. O segundo capítulo, de fundamentação teórica, tem por objetivo analisar a literatura existente sobre o tema, fazendo um apanhado dos fenômenos que prejudicam a qualidade de energia elétrica e explicando seu conceito e definições. Também é propósito deste capítulo abordar as normas existentes para regulamentação e relatar os princípios de funcionamento e composição de medidores comerciais de qualidade da energia elétrica existentes.

Em seguida, no capítulo 3, estão esclarecidos os procedimentos metodológicos, no qual são abordados os aspectos necessários e medidas adotadas para o desenvolvimento do protótipo. No capítulo 4, são discutidos os resultados da operação e comportamento do protótipo. Já no capítulo 5, estão contidas as considerações finais, no qual são abordadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros. Ao final deste trabalho, estão incluídos, como elementos pós-textuais: referências bibliográficas organizadas em ordem alfabética, anexos que servem de fundamentação para o conteúdo do texto e apêndices que complementam o desenvolvimento do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Conceitos de Qualidade de Energia Elétrica

O conceito de qualidade de energia elétrica pode assumir diferentes definições e atributos, e outros termos e conceitos podem estar diretamente associados com as definições de qualidade de energia elétrica. No entanto, Bollen (2010) estabelece o que essas diferentes definições para qualidade de energia elétrica têm em comum: elas tratam das características de interação entre a utilidade e o usuário, ou tratando de termos técnicos, entre um sistema de fornecimento de energia e a carga.

Em geral, todas as definições de qualidade de energia elétrica estão associadas com a capacidade de um sistema de fornecimento de energia, ou de um equipamento que consome esta energia, operar com condições de estabilidade específicas e com suprimento constante. Nesse sentido, a principal base nos estudos e trabalhos de qualidade de energia elétrica é compreender, analisar e solucionar os inúmeros fenômenos e defeitos que surgem ao longo do processo de fornecer energia elétrica, e que podem comprometer as condições de estabilidade e suprimento (DECKMANN; POMILIO, 2020).

2.2 A Importância de Fornecer Energia Elétrica de Qualidade

A evolução dos sistemas elétricos de potência acompanhou e possibilitou o padrão de consumo de energia elétrica atual, promovendo diversos benefícios e alcançando diversos setores da sociedade. Nas últimas décadas, a preocupação em fornecer energia de qualidade vem se acentuando progressivamente (KHETARPAL; TRIPATHI, 2020).

Nessa perspectiva, a eletrônica de potência transformou os equipamentos de consumo e fornecimento de energia elétrica. Com isso, as cargas elétricas evoluíram de modo a possuir características não-lineares (dispositivos possuindo semicondutores, como transistores e diodos) em contrapartida das características lineares (resistivas, indutivas e capacitivas), e passaram a gerar distorções no fluxo de potência dos

sistemas elétricos, provocando a circulação de harmônicos, que, por sua vez, produz perdas por efeito Joule nas instalações elétricas. Além disso, os mesmos equipamentos eletrônicos são sensíveis às variações nas condições de fornecimento de energia (BAROS et al., 2019).

A perspectiva sobre o fornecimento de energia elétrica também se transformou ao longo das décadas. A energia elétrica se tornou um produto com uma alta competitividade atuante em um mercado livre (Bollen, 2010). Logo, de forma a regulamentar a confiabilidade e responsabilidade do fornecimento de energia aos contratos entre concessionárias e o Estado, levantou-se o interesse para estabelecer padrões e normatizações sobre a qualidade de energia elétrica fornecida ao consumidor.

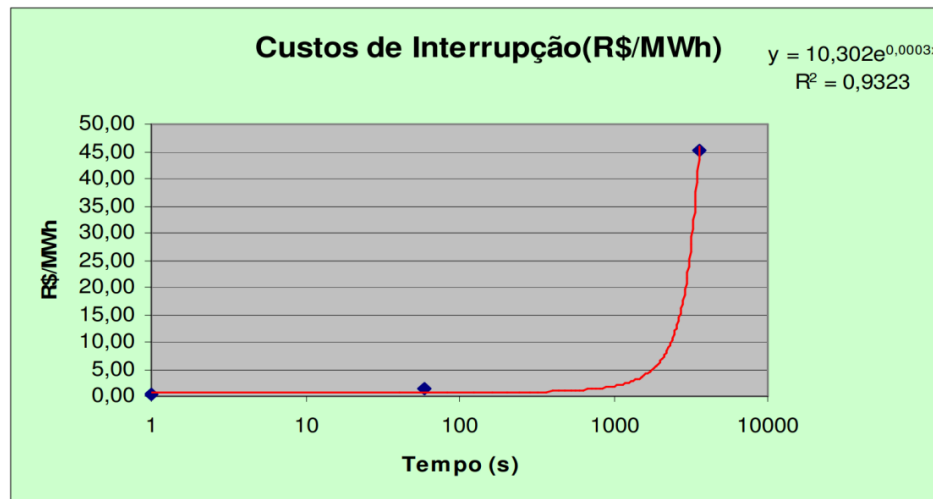
Os impactos econômicos causados por deficiências na qualidade de energia elétrica foram também fatores determinantes que levantaram o interesse na regulamentação e no desenvolvimento de padrões e medidas. Essas perturbações do fornecimento de energia provocam perdas significativas na eficiência e produtividade em todos os setores da sociedade (industrial, comercial e residencial), sobretudo as interrupções, que cessam as cadeias produtivas nos processos industriais (TOMESC; DOBRA; ABRUDEAN, 2007).

Melo e Cavalcanti (2008) realizaram um estudo de forma a introduzir uma metodologia para levantar dados de custos de perdas relacionadas às interrupções de energia. O gráfico da Figura 1 apresenta um dos resultados da pesquisa. No gráfico está relacionado o custo médio de perdas por interrupção de energia elétrica com a potência instalada das empresas. A equação da curva demonstra que a relação entre o tempo de interrupção é exponencial em relação às perdas por interrupção.

É importante ressaltar que os estudos de Melo e Cavalcanti (2008) abordam somente os custos diretos ocasionados pelas interrupções no fornecimento de energia. Outros problemas da qualidade de energia elétrica também afetam a produtividade. Esses problemas não estão relacionados com a duração e a quantidade de interrupções, mas possuem o potencial de levar a operação incorreta ou danificar equipamentos elétricos.

No entanto, os custos relacionados a esses problemas ainda não são bem quantificados para a análise de seus efeitos. Apesar disso, todos esses fatores levantaram um interesse e conscientização geral sobre a relevância e contribuição da qualidade de energia elétrica nas instalações elétricas, além de suas influências no panorama econômico.

Figura 1 - Custo médio de perdas por interrupção de energia elétrica



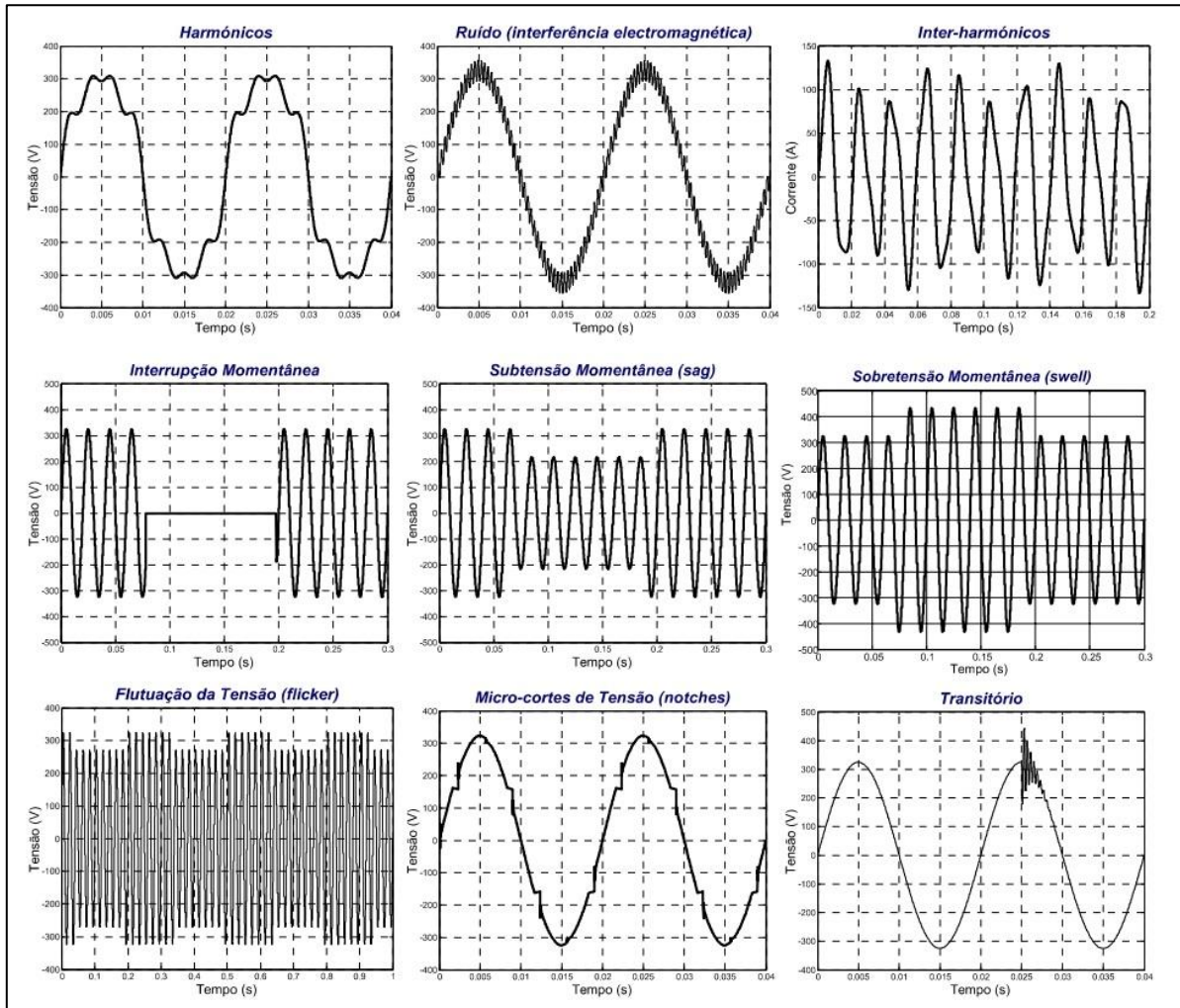
Fonte: Melo e Cavalcanti (2008).

2.3 Fenômenos que Influenciam Negativamente a Qualidade de Energia Elétrica

As perturbações elétricas ocorrem em todas as etapas de fornecimento de energia elétrica e possuem diferentes características em determinadas ocasiões. A maioria dessas perturbações está relacionada a eventos de distorção nas ondas senoidais dos sinais de tensão ou corrente das instalações elétricas. Esses eventos podem possuir diferentes classificações quanto à intensidade, duração e formato de deformação da onda (KHETARPAL; TRIPATHI, 2020).

A Figura 2, a seguir, apresenta algumas dessas perturbações que afetam a qualidade do sinal.

Figura 2 - Diversas perturbações que afetam o sinal de tensão alternada



Fonte: Martins, Couto e Afonso (2003).

Os diversos fenômenos que distorcem a forma de onda podem estar relacionados a diferentes causas. A falta de manutenção ou investimentos em tecnologias mais avançadas pode estar diretamente ligada à origem desses problemas. No entanto, eles ainda podem ter causas específicas, assim como soluções que ajudam a minimizar a ocorrência desses problemas ou até mesmo extingui-los (BAROS et al., 2019).

A Tabela 1, a seguir, categoriza os principais fenômenos e seus métodos de caracterização, além de apontar causas típicas e soluções para esses problemas.

Tabela 1 - Categorização dos principais fenômenos

Categoria do Fenômeno	Métodos de Caracterização	Causas Típicas	Exemplos de Soluções
Transitórios por indução eletromagnética.	Amplitude; Tempos de subida; Duração.	Descargas Atmosféricas; Chaveamento de Cargas.	Supressores de Surto; Filtros; Transformador Isolador.
Transitórios por condução	Formas de Onda; Amplitude; Componentes da Frequência.	Chaveamento e Manobras de Cargas, Banco de Capacitores.	Supressores de Surto; Filtros; Transformador Isolador.
Quedas e Picos de Tensão Interrupções	Proporção entre o período e a Tensão Eficaz; Duração; Amplitude.	Falhas Remotas do Sistema; Falta de Manutenção da Proteção da Rede.	Geradores de Retaguarda; Estabilizadores Ferrossonantes; Fontes de Alimentação Alternativas.
Sobretensões Sob tensões	Proporção entre o período e a Tensão Eficaz; Estatísticas de Medição.	Partida de Motores Elétricos; Variações de Carga.	Reguladores de Tensão; Estabilizadores Ferrossonantes.
Distorções harmônicas	Espectro Harmônico; Distorção Total Harmônica.	Carga Não-Lineares; Ressonâncias do Sistema.	Filtros passivos e ativos;
Flutuações de tensão	Modulação de Frequência; Variações da Amplitude; Frequência de Ocorrência.	Cargas Intermitentes; Partida de Motores Elétricos;	Compensadores Estáticos Reativos.

Fonte: Adaptado de Melhorn e McGranaghan (1995) e BAROS et al. (2019).

De forma a mitigar esses fenômenos prejudiciais à qualidade de energia elétrica, diversas organizações privadas e públicas publicaram regulamentações e normatizações para estabelecer parâmetros de identificação e classificação dos fenômenos. Para mais, diversos padrões internacionais e nacionais são reconhecidos para a análise de qualidade de energia elétrica.

2.4 Os Critérios que Tornam uma Energia Elétrica de Qualidade

Sankaran (2001) explica que por volta da década de 1950, a era industrial estimulou a competitividade dos produtos, o que fez com que as máquinas elétricas se tornassem menores e mais eficientes e que fossem projetadas sem margens de desempenho. Ao mesmo tempo, outros fatores estavam entrando em jogo. O aumento da demanda por eletricidade criou extensas redes de geração, transmissão e distribuição de energia.

Nesse sentido, as indústrias demandam parcelas cada vez maiores da energia gerada, o que, junto com o uso crescente da eletricidade no setor residencial, levou à geração de eletricidade ao limite. Atualmente, as concessionárias de eletricidade não são mais entidades operadas de forma independente. Elas fazem parte de uma grande rede de serviços unidos em uma rede complexa. A combinação desses fatores, por sua vez, criou sistemas elétricos que exigem mais qualidade de energia elétrica.

2.4.1 Normatizações e Regularizações

Na década de 90, o Brasil já possuía grupos de pesquisas na área de qualidade de energia elétrica, porém não havia qualquer tipo de regulamento para o setor (COLNAGO, 2006). Somente em 2008, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) elaborou o PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), que em seu Módulo 8, trata de recomendações para fornecimento de uma energia de qualidade.

A norma NBR IEC 61000-4-30 dita sobre medições de qualidade de energia elétrica, porém várias dessas medidas poderiam ser tomadas para o aperfeiçoamento da qualidade. A Federação das Indústrias (2016), nesse sentido, sugere as seguintes: *(i)* estímulo à geração distribuída, *(ii)* intensificação dos programas de eficiência energética para as indústrias e *(iii)* aumento de ações de combate às perdas.

As regulamentações brasileiras podem ser especificadas no que diz respeito à rede básica (sistema interligado nacional) e à distribuição de energia. A

regulamentação para rede básica pode ser resumida nos submódulos 2.8 e 3.6 nos procedimentos de rede, elaborado sob a coordenação do Operador Nacional do Sistema Elétrico com supervisão da ANEEL. No âmbito da distribuição, estão disponíveis os módulos 3 e 8 nos procedimentos de distribuição (OLIVEIRA; MACEDO; DELAIBA, 2014).

É importante salientar que os parâmetros de qualidade de energia elétrica não são universais. Esses parâmetros podem variar de acordo com as características dos sistemas elétricos dos diversos países (DECKMANN; POMILIO, 2020). Dessa forma, as diversas regiões do mundo apresentam normas específicas. Na Europa, a norma técnica EN 50160:2010 estabelece os procedimentos comuns a serem aplicados nesta região.

No contexto do continente americano, é possível citar as normas NTCE e ENRE 465/96 para os países Peru e Argentina, respectivamente, que apresentam aspectos relevantes para os países da América do Sul. Podem-se destacar, também, as normas de países como Estados Unidos (IEC's), Japão (JISC's) e China (GB/T's) (OLIVEIRA; MACEDO; DELAIBA, 2014).

2.4.2 Definições e Especificações do PRODIST

O Módulo 8 do PRODIST estabelece os procedimentos relativos à qualidade do produto (energia elétrica), ao serviço prestado e à qualidade do tratamento de reclamações (ANEEL, 2021).

A seguir, são explanados os parâmetros da qualidade do produto determinados pelo PRODIST.

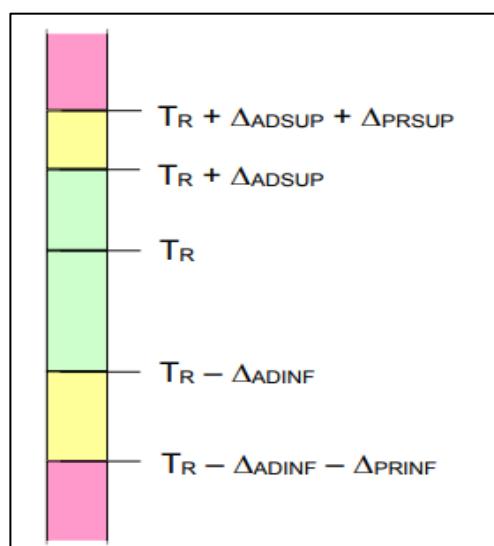
- I. Tensão em regime permanente;
- II. Fator de potência;
- III. Harmônicos;
- IV. Desequilíbrio de tensão;
- V. Flutuação de tensão;
- VI. Variação de frequência.
- VII. Variações de tensões de curta duração.

2.4.2.1 Tensão em Regime Permanente

Para avaliação da tensão em regime permanente, é considerado o critério de conformidade de tensão elétrica. Esse critério corresponde à comparação do valor de tensão obtido através de medição apropriada, em relação aos valores considerados adequados, precários e críticos. A conformidade deve ser verificada nos pontos de conexão à Rede de Distribuição, nos pontos de conexão entre distribuidoras e nos pontos de conexão com as unidades consumidoras. A tensão de referência é definida pela tensão nominal ou por uma tensão contratada.

Os valores nominais são definidos pela rede de distribuição em função dos níveis de planejamento do sistema de distribuição, observando a compatibilidade com os níveis de projeto dos equipamentos de uso final. Para tensão entre distribuidoras com valor superior ou igual a 230 kV e para tensão entre distribuidoras e clientes com valor inferiores ou igual a 1kV, a tensão contratada deve ser a tensão nominal do sistema. Já para tensão entre distribuidoras com valor inferior a 230 kV e para tensão entre distribuidores e clientes superior a 1kV, a tensão contratada deve estar limitada entre 95% e 105% da tensão nominal de operação do sistema. A Figura 3 apresenta a classificação dos níveis de tensão.

Figura 3 - Faixas de níveis de tensão



Fonte: ANEEL (2021).

Na qual T_R é a tensão de referência. A faixa adequada está indicada na cor verde ($T_R - \Delta_{ADINF}$, $T_R + \Delta_{ADSUP}$), faixa precária na cor amarela ($T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$, $T_R - \Delta_{ADINF}$ ou $T_R + \Delta_{ADSUP}$, $T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{APRSUP}$) e a faixa crítica na cor rósea ($>T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{APRSUP}$ ou $<T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$). Logo, os valores de tensão podem ser avaliados de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Pontos de conexão em tensão nominal ou inferior a 1kV (220/127)

Tensão de Atendimento	Faixa de variação de tensão de leitura (volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) / (110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$

Fonte: ANEEL (2021).

2.4.2.2 Fator de Potência

O valor do fator de potência deve ser calculado utilizando os valores registrados de potência ativa e reativa (P, Q) ou de seus respectivos valores de energia (EA, ER). A Equação 1 exemplifica o cálculo:

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad \text{ou} \quad fp = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}}$$

Equação 1 - Determinação do fator de potência

Para tensão inferior a 230 kV, tanto entre distribuidoras como em unidades consumidoras, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 (noventa e dois centésimos) e 1,00 (um) indutivo ou 1,00 (um) e 0,92 (noventa e dois centésimos) capacitivo, de acordo com regulamentação vigente.

2.4.2.3 Harmônicos

As distorções harmônicas são fenômenos associados à deformação das formas de onda de tensões e correntes em relação à onda de frequência fundamental. A Tabela 3, a seguir, trata da terminologia dos parâmetros utilizados nos cálculos dos indicadores desse fenômeno e as equações referentes aos indicadores estão discriminadas pelas equações de 2 a 6.

Tabela 3 - Terminologia dos Indicadores de distorções harmônicas

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$
Tensão harmônica de ordem h	V^h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	hmáx
Ordem harmônica mínima	hmín
Tensão fundamental medida	V_1
Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{95\%}$
Valor do indicador $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{p,95\%}$
Valor do indicador $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{i,95\%}$
Valor do indicador $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{3,95\%}$

Fonte: ANEEL (2021).

$$DIT_h = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100$$

Equação 2 - Cálculo da DIT_h

Em que h é igual a ordem harmônica individual.

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \cdot 100$$

Equação 3 - Cálculo da DTT%

Em que h é igual a todas as ordens harmônicas de 2 até h_{máx}; no qual h_{máx} é igual conforme a classe A ou S.

$$DTT_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \cdot 100$$

Equação 4 - Cálculo da DTT_p%

Em que h é igual a todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 (h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, 26, 28, 32, 34, 38, ...); e h_p é igual à máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3.

$$DTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \cdot 100$$

Equação 5 - Cálculo do DTT_i%

Em que h é igual a todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 (h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37,...); e h_i é igual à máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3.

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \cdot 100$$

Equação 6 - Cálculo do DTT₃%

Em que h é igual a todas as ordens harmônicas múltiplas de 3 ($h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, \dots$); e h_3 é igual a máxima ordem harmônica múltipla de 3.

Os limites das distorções harmônicas são apresentados na Tabela 4. Esses valores são o máximo desejado a ser observado em um sistema de distribuição.

Tabela 4 - Limites das distorções harmônicas totais

Indicador	Tensão Nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT _{95%}	10%	8,0%	5,0%
DTT _{p95%}	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _{i95%}	7,5%	6,0%	4,0%
DTT _{395%}	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: ANEEL (2021).

2.4.2.4 Desequilíbrio de tensão

Desequilíbrio de tensão é um fenômeno caracterizado por qualquer diferença na amplitude das três fases de um sistema de tensão trifásico e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as fases do mesmo sistema.

O desequilíbrio de tensão pode ser calculado pelas expressões discriminadas na Equação 7 e Equação 8.

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100$$

Equação 7 - Cálculo do fator de desequilíbrio de tensão

$$FD\% = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \cdot 100$$

Equação 8 - Equação alternativa para o cálculo do desequilíbrio de tensão

Em que $FD\%$ é o fator de desequilíbrio de tensão; V_- é a Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa; e V_+ é a magnitude da tensão eficaz de sequência positiva. E β é dado pela Equação 9.

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2}$$

Equação 9 - Cálculo do valor de β

Em que V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} são as magnitudes das tensões eficazes de linha. Para referência, é utilizado o $FD5\%$ que corresponde ao valor do indicador $FD\%$. Para que os valores sejam aceitáveis, o $FD5\%$ deve ser 3%, para tensões nominais menores que 1kv e 2% para tensões nominais entre 1kv e 230kv.

2.4.2.5 Flutuação de Tensão

Flutuação de tensão é um fenômeno caracterizado pela variação de tensão aleatória, esporádica ou repetitiva do valor eficaz ou do pico da tensão instantânea. Na Tabela 5 é apresentada a terminologia para o cálculo da sensação de cintilação luminosa. A expressão para o cálculo do Pst está apresentada na Equação 10.

Tabela 5 - Terminologia de cálculo para cintilação luminosa

Identificação da Grandeza	Símbolo
Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração	Pst
Severidade de Flutuação de Tensão de Longa Duração	Plt
Valor do indicador Pst que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	Pst95%

Fonte: ANEEL (2021).

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}}$$

Equação 10 - Cálculo da Pst

Em que P_i ($i = 0,1; 1; 3; 10; 50$) corresponde ao nível de flutuação de tensão, o qual foi ultrapassado durante i % do tempo, obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, de acordo com o procedimento estabelecido nas Normas IEC (*International Electrotechnical Commission*): IEC 61000-4-15. *Flickermeter – Functional and Design Specifications*.

A partir do Pst, o Plt é calculado conforme a Equação 11.

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (P_{st_i})^3}$$

Equação 11 - Cálculo da Plt

O valor de Pst corresponde à severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 10 (dez) minutos. Da mesma forma, a Plt representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 2 (duas) horas.

A Tabela 6 fornece os limites utilizados para a avaliação do sistema quanto à flutuação de tensão. Esses limites determinam o valor desejável para o sistema.

Tabela 6 - Limites para a flutuação de tensão

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0\text{kV}$	$1,0\text{kV} < V_n < 69\text{kV}$	$69\text{kV} \leq V_n < 230\text{kV}$
Pst95%	1,0 pu	1,5 pu	2,0 pu

Fonte: ANEEL (2021).

2.4.2.6 Variação de Frequência

O PRODIST determina que os sistemas de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência entre 59,9 Hz e 60,11Hz. Na ocorrência de distúrbios nos sistemas de distribuição, as instalações devem assegurar que a frequência retorne, no intervalo de trinta segundos após a transgressão, para a faixa de 59,5Hz a 60,5 Hz. Se houver necessidade de corte de geração ou de carga, durante os distúrbios, a frequência deve assumir as seguintes condições:

- Não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz em condições extremas;
- Pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 (trinta) segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos;
- Pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 05 (cinco) segundos.

2.4.2.7 Variação de tensão de curta duração

Variações de tensão de curta duração (VTCD) são desvios significativos na amplitude da tensão eficaz em um intervalo inferior a três minutos. As tensões de curta duração são classificadas de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação das variações de tensão de curta duração

Classificação	Denominação	Duração do VTCD (Δt_e) [ms]	Amplitude da tensão eficaz em relação à tensão de referência [pu]
Variação momentânea de tensão	Interrupção Momentânea de Tensão (IMT)	$\Delta t_e \leq 3000$	$V < 0,1$
	Afundamento Momentâneo de Tensão (AMT)	$16,67 \leq \Delta t_e \leq 3000$	$0,1 \leq V < 0,9$
	Elevação Momentânea de Tensão (EMT)	$16,67 \leq \Delta t_e \leq 3000$	$V > 1,1$

Variação temporária de tensão	Interrupção Temporária de Tensão (ITT)	$3000 < \Delta t_e < 180000$	$V < 0,1$
	Afundamento Temporário de Tensão (ATT)	$3000 < \Delta t_e < 180000$	$0,1 \leq V < 0,9$
	Elevação Temporária de Tensão (ETT)	$3000 < \Delta t_e < 180000$	$V > 1,1 \text{ p.u.}$

Fonte: ANEEL (2021).

A Tabela 8 sintetiza a terminologia aplicável ao cálculo das variações curtas de tensão.

Tabela 8 - Terminologia de cálculo das variações curtas de tensão

Definição	Símbolo
Variação de Tensão de Curta Duração	VTCD
Interrupção Momentânea de Tensão	IMT
Afundamento Momentâneo de Tensão	AMT
Elevação Momentânea de Tensão	EMT
Interrupção Temporária de Tensão	ITT
Afundamento Temporário de Tensão	ATT
Elevação Temporária de Tensão	ETT
Amplitude do evento de VTCD	V_e
Duração do evento de VTCD	Δt_e
Frequência de ocorrência de eventos de VTCD	f_e
Fator de Impacto	FI
Fator de Impacto base	FI_{BASE}

Fonte: ANEEL (2021).

2.4.2.8 Indicadores de Continuidade

Os indicadores de continuidade são cruciais para avaliação da qualidade do serviço prestado e para o desempenho da energia elétrica (ANEEL, 2021). De acordo

com o PRODIST - Módulo 8, os indicadores de continuidade podem ser individuais ou de conjunto de unidades consumidoras. Por sua vez, esses são definidos em relação à duração e frequência de interrupção.

Os indicadores de continuidade individuais são calculados por unidade consumidora ou por ponto de conexão conforme indicado a seguir:

- DIC: É a duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão. Ele é expresso pela Equação 12, na qual n representa o número de interrupções, i é o índice de interrupções (variando de 1 a n) e $t(i)$ é o tempo de duração de interrupção. Todos esses parâmetros são considerados no período de apuração.

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i)$$

Equação 12 - Cálculo do indicador DIC

- FIC: É a frequência de interrupção individual no período da apuração. É dada pelo número de interrupções (n), expresso na Equação 13.

$$FIC = n$$

Equação 13 - Expressão para o indicador FIC

- DMIC: Duração máxima de interrupção contínua. É calculada por meio da Equação 14. Na qual $t(i)_{\max}$ corresponde ao valor do tempo de máxima interrupção, expresso em horas ou centésimos de horas.

$$DMIC = t(i)_{\max}$$

Equação 14 - Cálculo do indicador DMIC

- DICRI: Duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico. É expressa pela Equação 15, na qual $t_{\text{crítico}}$ é a duração da interrupção ocorrida em dia crítico.

$$DICRI = t_{\text{crítico}}$$

Equação 15 - Expressão do indicador DICRI

Os indicadores relatados a seguir deverão ser apurados para cada conjunto de unidades consumidoras:

- DEC: Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora. É calculada pela Equação 16, na qual C_c é o número total de unidades consumidoras do conjunto no período de apuração, atendidas em média ou baixa tensão; $t(i)$ é o tempo de duração de interrupção; i é o índice de interrupções (variando de 1 a n) e DIC é a duração de interrupção individual

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} DIC(i)}{C_c}$$

Equação 16 - Cálculo do indicador DEC

- FEC: Frequência equivalente de interrupções por unidade consumidora. É calculada por meio da Equação 17, na qual C_c é o número total de unidades consumidoras do conjunto no período de apuração, atendidas em média ou baixa tensão; $t(i)$ é o tempo de duração de interrupção; i é o índice de interrupções (variando de 1 a n) e FIC é a frequência de interrupção individual.

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} FIC(i)}{C_c}$$

Equação 17 - Cálculo do indicador FEC

Os indicadores são importantes ferramentas para avaliar a qualidade de energia elétrica. Através dos indicadores coletivos de continuidade, DEC e FEC, é possível acompanhar a evolução do fornecimento de energia por meio da evolução da continuidade do serviço.

2.4.2.9 Critérios para Medição de Tensão em Regime Permanente

Segundo o Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2021), é dever da concessionária se dotar de tecnologias com o intuito de garantir que a tensão em regime permanente se mantenha nos padrões adequados. Logo, um dos parâmetros fundamentais e relevantes para análise de qualidade de energia elétrica é a tensão fornecida pela concessionária. Essa tensão deve ser analisada com a finalidade de averiguação dos parâmetros também definidos pelo PRODIST.

A seção 5.2 do Módulo 5 do PRODIST trata dos procedimentos de medição da tensão e outros parâmetros que devem ser apresentados em um relatório de qualidade de energia elétrica. Essa seção determina responsabilidades que a distribuidora acessada¹ deve ter em relação aos sistemas de medição dos parâmetros, compreendendo os requisitos mínimos e a instalação desses sistemas (ANEEL, 2021).

O requisito da seção 5.2 a ser destacado para este trabalho é a exigência de que o equipamento de medição deve apurar as leituras segundo o princípio da amostragem digital. Também convém destacar que equipamentos que realizarem exclusivamente medição de tensão elétrica em regime permanente devem fornecer as seguintes informações (ANEEL 2021):

- Valores dos indicadores individuais associados à tensão em regime permanente;
- Tabela de medição de tensão em regime permanente;
- Histograma de tensão em regime permanente.

Com o objetivo de obter essas informações, é necessário realizar a coleta das amostras de tensão a serem lidas adequadamente. O Módulo 8 do PRODIST possui itens que regulamentam a metodologia de medição; e, segundo o item 9.1, a leitura dos indicadores deve proceder da seguinte forma:

¹ Segundo o Glossário da ANEEL, a distribuidora acessada é aquela detentora das instalações em que o acessante conecta suas instalações próprias. Sendo o acessante: central geradora, importador, exportador ou distribuidora, que conecta suas instalações próprias a instalações de propriedade de distribuidora.

O conjunto de leituras para gerar os indicadores da qualidade do produto de regime permanente (distorções harmônicas, flutuação de tensão e desequilíbrio de tensão) deve compreender o registro de 1008 (mil e oito) leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de agregação) de 10 minutos cada, salvo as que eventualmente sejam expurgadas conforme item 9.1.10.1. No intuito de se obter 1008 (mil e oito) leituras válidas, intervalos adicionais devem ser agregados, sempre consecutivamente. (ANEEL, 2021, p. 24)

Esse item especifica que é necessário que o aparelho colete 1008 leituras válidas a cada dez minutos, ou seja, é necessário que o equipamento permaneça conectado à rede elétrica por cerca de sete dias ininterruptos. Caso ocorram variações temporárias de tensão e interrupções de longa duração, o intervalo de dez minutos deve ser desconsiderado, sendo substituído por igual número de leituras válidas. No caso de variações momentâneas de tensão, é opcional o procedimento de desconsiderar a leitura obtida a cada dez minutos.

De posse das leituras válidas, é possível calcular os indicadores individuais, produzir a tabela de medição, o histograma de tensão em regime permanente e, ainda, realizar a classificação das leituras de tensão. Como exemplifica a Figura 3, a tensão é classificada em faixas, sendo essas: adequada, precária e crítica. Dessa maneira, obtêm-se critérios determinantes para examinar a qualidade do fornecimento da tensão em regime permanente.

2.5 Arquitetura dos Equipamentos para Monitoramento de Qualidade de Energia Elétrica

Os Analisadores de Qualidade de Energia Elétrica são equipamentos de alto nível e complexidade tecnológica que têm ganhado cada vez mais abrangência e utilização em suas aplicações. São comumente empregados quando é necessário um monitoramento e análise metódica das características de consumo, transformação ou geração de energia elétrica de pequenos equipamentos a grandes instalações elétricas de alta potência (POOLE, 2020). Eles estão disponíveis em diversos fabricantes no mercado (Figura 4) e com uma variedade de funções e aplicações, dependendo do seu modelo.

Figura 4 - Exemplos de equipamentos de monitoramento e análise de qualidade de energia elétrica



Fonte: a) 438-II, Fluke Corporation (2020); b) SICAMQ100, Siemens AG (2020); c) oZm Single-Phase v2, OpenZmeter (2021).

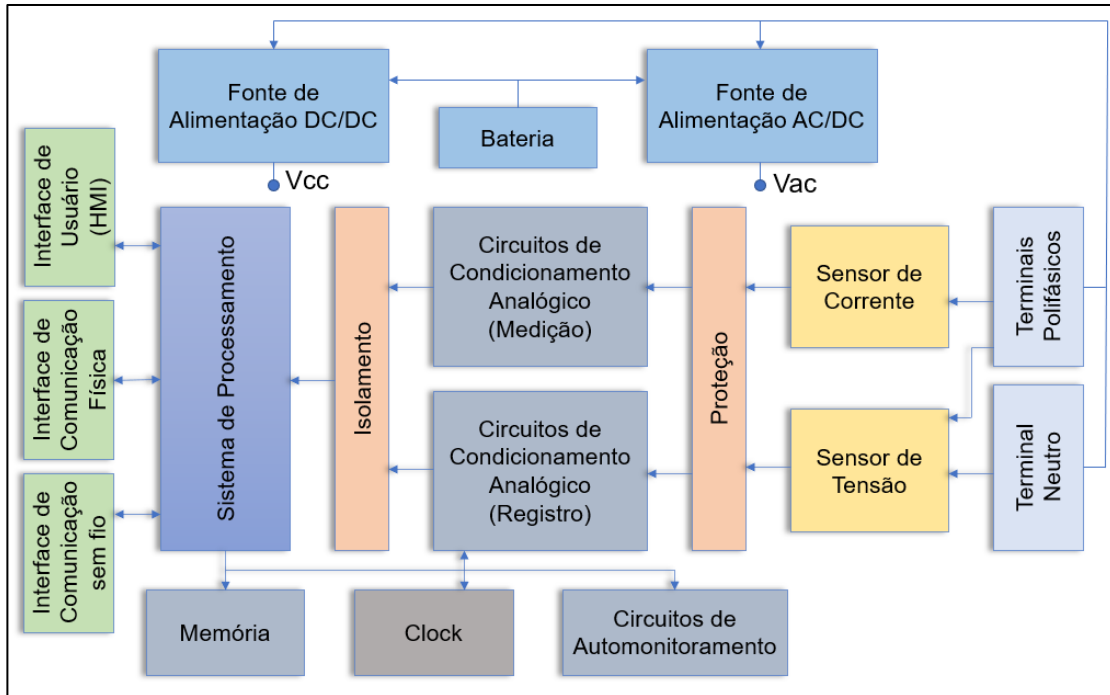
Esses analisadores são capazes de medir uma variedade de parâmetros, como: tensão, corrente, potência, frequência, fator de potência, ângulos de fase, valores de pico e eficaz e frequências de ressonância (harmônicos). A partir desses parâmetros, consegue-se identificar diversos problemas relacionados à qualidade de energia, como: oscilações transientes no nível de tensão, distorções harmônicas ou desbalanceamento de fases (POOLE, 2020).

Tendo em vista a grande variedade de aplicações, é comum encontrar recursos integrados de comunicação remota nos analisadores de qualidade de energia elétrica. Esses recursos permitem os registros dos dados analisados e são capazes de fornecer ao usuário final um diagnóstico detalhado da qualidade da energia. Além disso, todas as informações medidas podem ser apresentadas em tempo real e em diferentes tipos de interfaces, podendo ser integradas a um display acoplado ao analisador ou enviadas através de canais de comunicação físicos ou *wireless* a um computador ou aparelho de celular (VICIANA et al., 2018).

Devido a grande variedade de modelos e funções, os analisadores de qualidade de energia elétrica podem apresentar diferenças significativas nos seus aspectos construtivos. A quantidade de funções e recursos estabelece a quantidade de componentes necessários. A Figura 5, a seguir, apresenta um diagrama que

exemplifica os principais componentes que podem constituir a arquitetura do equipamento.

Figura 5 - Diagrama típico da arquitetura de um analisador de qualidade de energia elétrica



Fonte: Adaptado de Texas Instruments (2020).

2.5.1 Sistema de Processamento

Processadores dedicados e microcontroladores são elementos essenciais dos analisadores de qualidade de energia elétrica. Sua utilização possibilita a computação de milhões de instruções por segundo, realizando todas as operações lógicas e aritméticas necessárias para desempenhar as funções do equipamento (Deshmukh, 2005). Logo, o sistema de processamento faz o papel central entre os demais elementos da arquitetura. Através da execução de um programa, os microcontroladores e processadores manipulam uma sequência de instruções armazenadas na memória, efetuando todas as ações de controle e comunicação entre os demais componentes.

2.5.2 Circuitos de Condicionamento de Sinais Analógicos

De forma a ser possível a medição e análise dos parâmetros dos equipamentos de qualidade de energia elétrica, é necessário manipular o sinal elétrico a ser medido aos níveis e condições aceitáveis pelo processador ou microcontrolador. Para tanto, utiliza-se um conjunto de dispositivos eletrônicos que incluem: amplificadores operacionais, filtros, multiplexadores, circuitos integrados específicos e dispositivos discretos como resistores, capacitores e indutores (BELFORT, 2007). Todos esses componentes integram-se em um circuito de condicionamento de sinal analógico.

2.5.3 Interfaces de Comunicação

Os dispositivos de interface de comunicação permitem que o analisador de qualidade de energia elétrica seja capaz de exibir os dados de medição e as análises efetuadas, além de possibilitar a operação do equipamento pelo usuário. Dependendo do tipo de interface incluída no analisador, ela também possui a capacidade de transmitir os dados através de diferentes tipos de comunicação para um dispositivo externo, como um computador, para que seja feita a análise e controle do equipamento remotamente (POOLE, 2020). As comunicações podem ser através de redes de curto alcance como Wi-Fi e BLE (*Bluetooth Low-Energy*), ou redes físicas, como comunicação Serial ou Ethernet.

2.5.4 Fontes de Alimentação

Tendo em vista a grande variedade de diferentes dispositivos incluídos em um analisador de qualidade de energia elétrica, e cada um contendo requisitos de alimentação distintos, uma fonte de alimentação DC/DC é necessária para fornecer níveis diferentes de energia. Essa fonte deve manter o nível de tensão estável sobre quaisquer condições e variações de carga, dentro dos limites impostos pela arquitetura do sistema (CRECRAFT; GERGELY, 2002, p. 324). Os analisadores também podem

contar com uma Fonte DC/AC, caso conte com dispositivos que necessitem de alimentação em tensão alternada. Além disso, é primordial que o equipamento conte com baterias ou até mesmo supercapacitores, que fornecem fonte de energia durante eventuais interrupções da rede, de forma a guardar os registros de dados e interromper a operação do equipamento de forma adequada.

2.5.5 Sensores de Tensão

Os sensores de tensão são dispositivos que possuem a função de medir tensão alternada. Eles possuem diferentes componentes que variam de acordo com a faixa de tensão que se deseja medir. No entanto, eles são essencialmente constituídos de transformadores de tensão e divisores resistivos. A isolação desses sensores também é crucial e determinante para assegurar que o analisador de qualidade de energia elétrica seja robusto. Alguns equipamentos incluem supressores de surtos de tensão, que garantem a proteção do circuito de condicionamento de sinal analógico e, principalmente, do microcontrolador, os quais são elementos sensíveis e fundamentais para a operação do sistema.

2.5.6 Memória e *Clock*

Dependendo da arquitetura do analisador de qualidade de energia elétrica, que pode ser constituído de um microcontrolador ou processador dedicado, o emprego de memórias pode variar em cada modelo. No caso do microcontrolador, diferentes tipos podem estar incluídos como elementos integrantes desse componente. Entretanto, em todas as arquiteturas, são encontradas pelo menos um tipo de memória RAM (Memória de Acesso Aleatório, do inglês *Read Access Memory*), uma memória volátil, que permite que dados sejam lidos e escritos, possibilitando que o sistema de processamento armazene instruções e registros que estejam em processamento (RAM, 2007).

As memórias não voláteis também são encontradas na arquitetura e são essenciais para armazenar registros de medições quando o equipamento não está

energizado. Em geral, os microcontroladores contam com uma EEPROM e, tendo em vista as limitações de vida útil e capacidade da EEPROM, memórias do tipo Flash também são encontradas para substituir ou expandir a capacidade de armazenamento.

Os circuitos integrados e cristais geradores de um sinal Clock também são encontrados já integrados aos microcontroladores. No entanto, um gerador de Clock externo pode ser necessário para sincronizar os demais componentes e subsistemas encontrados na arquitetura (POOLE, 2020).

2.6 Processamento dos Sinais Analógicos e Digitais

Em um analisador de qualidade de energia elétrica, o processamento e manipulação dos sinais analógicos medidos são essenciais para permitir a análise das características dos sistemas elétricos. Tendo em vista que o microcontrolador ou processador apenas processa grandezas digitais e os sistemas elétricos a serem analisados possuem sinais analógicos, é necessário converter o sinal a fim de ser processado. Os microcontroladores modernos já contam com conversor analógico-digital.

No entanto, sua faixa de operação é frequentemente menor que a amplitude do sinal analógico a ser medido. Portanto, é necessário ajustar o sinal de forma a ser detectável (BELFORT, 2007). Os circuitos de condicionamento coletam amostras de corrente e tensão, fragmentando os sinais analógicos medidos, a fim de posteriormente serem processadas pelo microcontrolador que reconstitui o sinal com todas suas características originais para ser analisado.

2.6.1 Conversão Analógico-Digital

A conversão analógico-digital (ADC) pode ser realizada com diferentes técnicas e com vários tipos de conversores com características distintas na sua arquitetura. A determinação do tipo e propriedades ideais na utilização em um sistema é definida pela sua aplicação.

Em geral, os ADCs possuem as seguintes especificações, que são determinantes em sua escolha: (i) velocidade de conversão; (ii) taxa de amostragem;

resolução do número de bits; (iii) potência de operação; (iv) *anti-aliasing*; e (v) latência (ZAHRAI; ONABAJO, 2018).

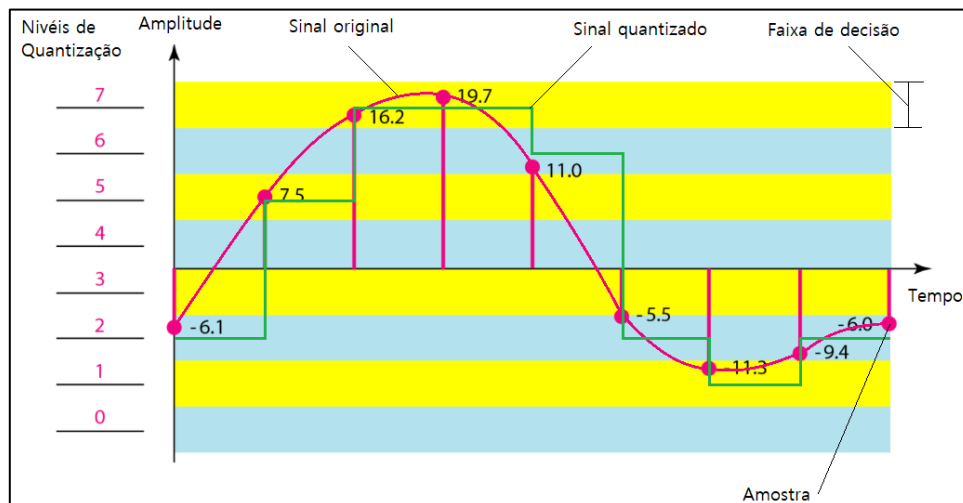
2.6.2 Quantização e Resolução

O primeiro conceito que define um processo de conversão de analógico para digital é a quantização de um sinal. Widrow e Kollár (2010) definem quantização como o processo de representação aproximada dos infinitos valores de amplitude de um sinal analógico em uma quantidade finita de valores discretos.

Os valores discretos são definidos como níveis de quantização. Tendo em vista que esses valores são aproximados e não correspondem igualmente ao sinal original, surge, então, uma diferença que gera uma imprecisão no sinal convertido, denominado erro de quantização. Esse erro será minimizado quando existir o maior número possível de níveis de quantização.

A Figura 6, a seguir, apresenta um gráfico exemplificando o processo.

Figura 6 - Gráfico do processo de quantização



Fonte: Autores (2021).

Em um conversor analógico-digital, os níveis de quantização assumem valores binários de forma a serem interpretados por um microcontrolador ou processador. A quantidade de valores binários depende da resolução de bits do próprio ADC, de forma que a quantidade de níveis será igual a 2^n , sendo n a resolução de bits.

Portanto, um conversor de 8 bits possui 256 níveis de quantização, assumindo valores binários de 00000000_2 a 11111111_2 . A resolução de um conversor analógico-digital pode ser calculada pela Equação 18.

$$R = \frac{V_{REF}}{2^n}$$

Equação 18 - Determinação da resolução na quantização

Em que R é a resolução, V_{REF} é o valor de referência do sinal a ser quantizado, e n é a resolução de bits.

2.6.3 Taxa de Amostragem

Outro fator determinante para garantir uma alta resolução na conversão analógico-digital é a taxa de amostragem. De acordo com o Teorema de Nyquist, a taxa de amostragem mínima para reconstituir adequadamente o sinal deverá ser maior que o dobro da maior componente de frequência do sinal a ser medido (OPPENHEIM; SCHAFER, 2010), conforme Equação 19.

$$f_s > 2 \cdot f_n$$

Equação 19 - Critério de Nyquist para taxa de amostragem

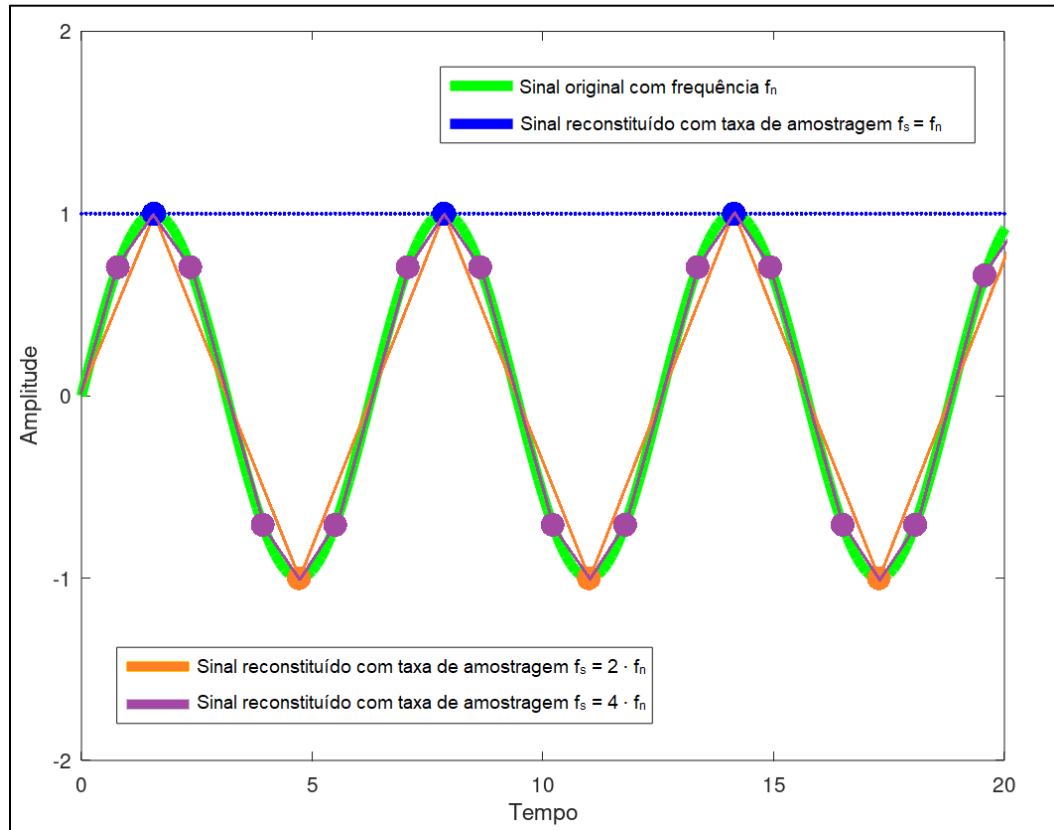
Em que a taxa de amostragem é f_n e a frequência do sinal de interesse é f_s (também chamada de frequência de Nyquist).

A Figura 7 exemplifica a reconstituição do sinal por um conversor analógico-digital. No gráfico, está representado um sinal senoidal e três cenários de reconstituição do sinal amostrado: nas condições em que a taxa de amostragem se torna igual a frequência do sinal (em azul), ao dobro (em laranja) e quádruplo da original (em roxo).

Observa-se, pela análise do gráfico da Figura 7, que ao realizar uma conversão em uma taxa de amostragem que não atende os critérios de Nyquist ocorre uma perda significativa das características do sinal. Em particular para quando a taxa

de amostragem é igual à frequência, transformando a onda senoidal em uma linha contínua.

Figura 7 - Sinal reconstituído para diferentes taxas de amostragem



Fonte: Autores (2021).

Portanto, é fundamental, que durante o processo de conversão analógico-digital, tenha-se o conhecimento das características do conversor e do sinal medido, para que não seja realizada uma interpretação incorreta da sua reconstrução. A Figura 8 apresenta um efeito resultante (*aliasing*) que pode ocorrer quando uma taxa de amostragem baixa reconstitui um sinal composto de várias frequências.

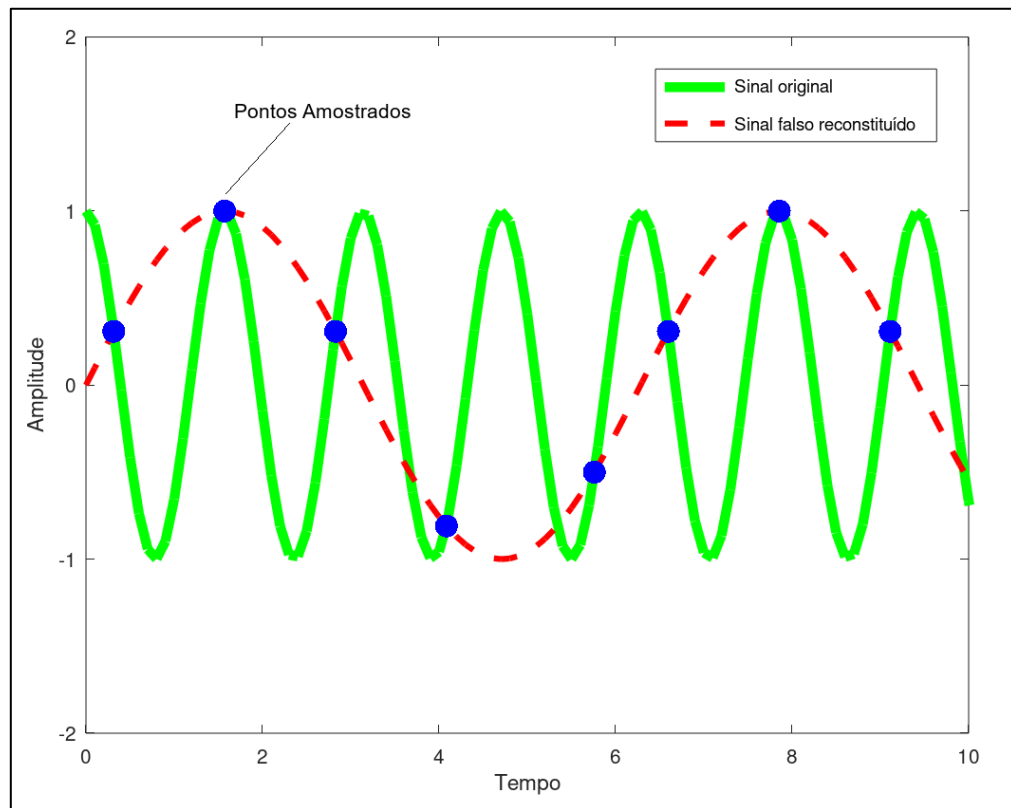
No gráfico da Figura 8, é possível observar que os pontos amostrados reconstroem um sinal que aparenta ser o original. No entanto, ele possui uma frequência que é apenas uma componente da fundamental. Essa frequência também pode ser denominada como frequência de recobrimento, a qual pode ser determinada conforme a Equação 20 (OPPENHEIM; SCHAFER, 2010).

$$f_a = |(\text{múltiplo mais próximo de } f_s) \cdot f_s - f|$$

Equação 20 - Determinação da frequência de recobrimento (*aliasing*)

Em que f_a é a frequência de recobrimento, f_s é a taxa de amostragem e f é a frequência do sinal analisado.

Figura 8 - Efeito *aliasing* na reconstituição de um sinal



Fonte: Autores (2021).

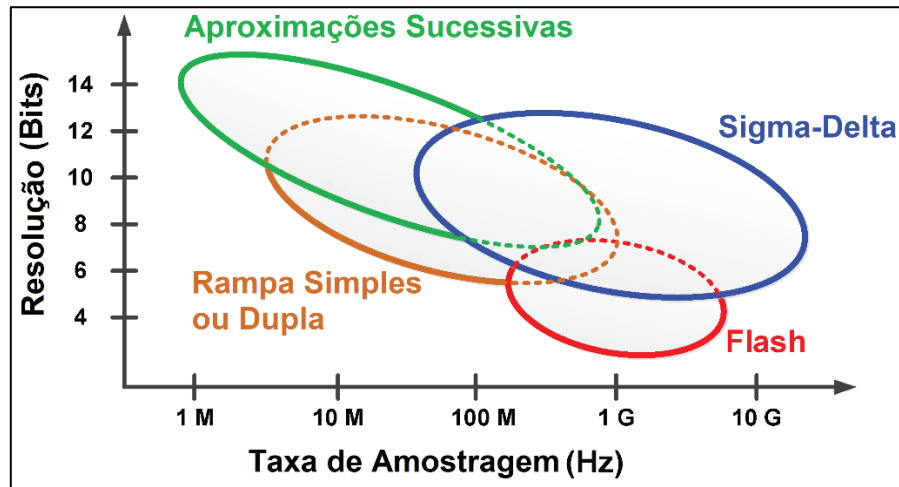
Os conversores analógico-digitais são definidos conforme suas arquiteturas, podendo ser divididos nos seguintes tipos: conversão por aproximações sucessivas, conversor sigma-delta, conversor tipo flash e conversor em rampa simples ou dupla.

Dentre essas arquiteturas disponíveis, cada uma apresenta uma eficiência em relação a um parâmetro no processamento dos sinais analógicos. Os ADCs por aproximações sucessivas e rampa oferecem as maiores taxas de resolução de bits e possuem a tendência de serem mais eficientes em termos de energia. Já os ADC do

tipo Flash alcançam altas taxas de amostragem permitindo alta resolução dos sinais convertidos.

A Figura 9 apresenta um gráfico conceitual que permite visualizar uma comparação que relaciona a taxa de amostragem e resolução de bits entre as principais arquiteturas.

Figura 9 - Comparação do desempenho de diferentes arquiteturas de conversores analógicos-digitais



Fonte: Adaptado de ZAHRAI; ONABAJÓ (2018).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Desenvolvimento do Protótipo

De forma a atender os objetivos deste trabalho, iniciou-se a investigação dos componentes necessários para compor um protótipo com capacidade de apresentar medições da tensão em regime permanente de uma instalação monofásica de tensão alternada (220 V).

3.1.1 Determinação do Microcontrolador

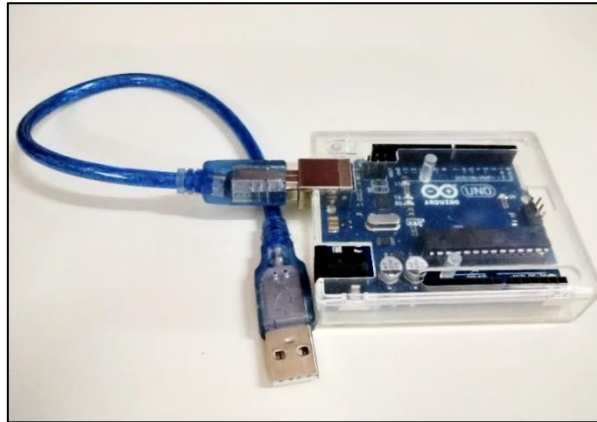
Para conferir o processamento necessário para amostragem digital dos valores medidos pelo protótipo, foi realizada uma avaliação das aplicações de microcontroladores que atendam aos requisitos propostos.

O Arduino™ UNO Rev3 foi a alternativa inicial para o desenvolvimento do protótipo. Essa placa fornece uma plataforma flexível de prototipagem e seus recursos de programação possuem acessibilidade e simplicidade. O Arduino possui interface USB para comunicação e transferência dos códigos de programação com um computador através de comunicação serial, no qual também pode ser utilizada para alimentação (MICROCHIP TECHNOLOGY, 2020).

O principal componente do Arduino UNO (Figura 10) é o microcontrolador produzido atualmente pela Microchip Technology: o ATmega328p. Ele possui uma arquitetura de 8-bits do tipo RISC (Computador com um Conjunto Reduzido de Instruções, do inglês: *Reduced Instruction Set Computer*), com operação máxima de até 20MHz.

Além disso, possui 32 kilobytes de memória do tipo Flash, 2 kilobytes de memória RAM e uma EEPROM com 1 kilobyte (MICROCHIP TECHNOLOGY, 2020). Esse Arduino conta com 23 pinos que podem ser configurados como entradas e saídas, nos quais 6 são analógicas com resolução de 10-bits.

Figura 10 - Arduino UNO utilizado nas versões iniciais do protótipo



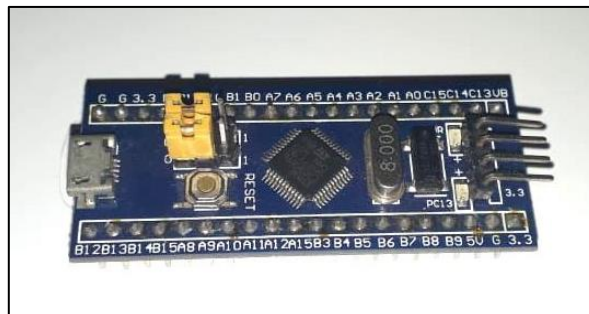
Fonte: Autores (2021).

Durante o desenvolvimento do protótipo, também foi utilizado mais uma alternativa de plataforma de prototipagem, o STM32F103C8T6 (Figura 11), também conhecido pelo apelido: *Blue Pill*. Essa placa possui um chip baseado na família de processadores de 32-bits com arquitetura do tipo ARM (*Advanced RISC Machines*), produzido pela STMicroelectronics.

A família de processadores STM32F103 pode operar com uma frequência máxima de até 72 MHz. O microcontrolador possui 64 kilobytes de memória do tipo Flash e 20 kilobytes do tipo SRAM. Além disso, conta com 16 entradas analógicas com resolução de 12-bits (STMICROELECTRONICS, 2015).

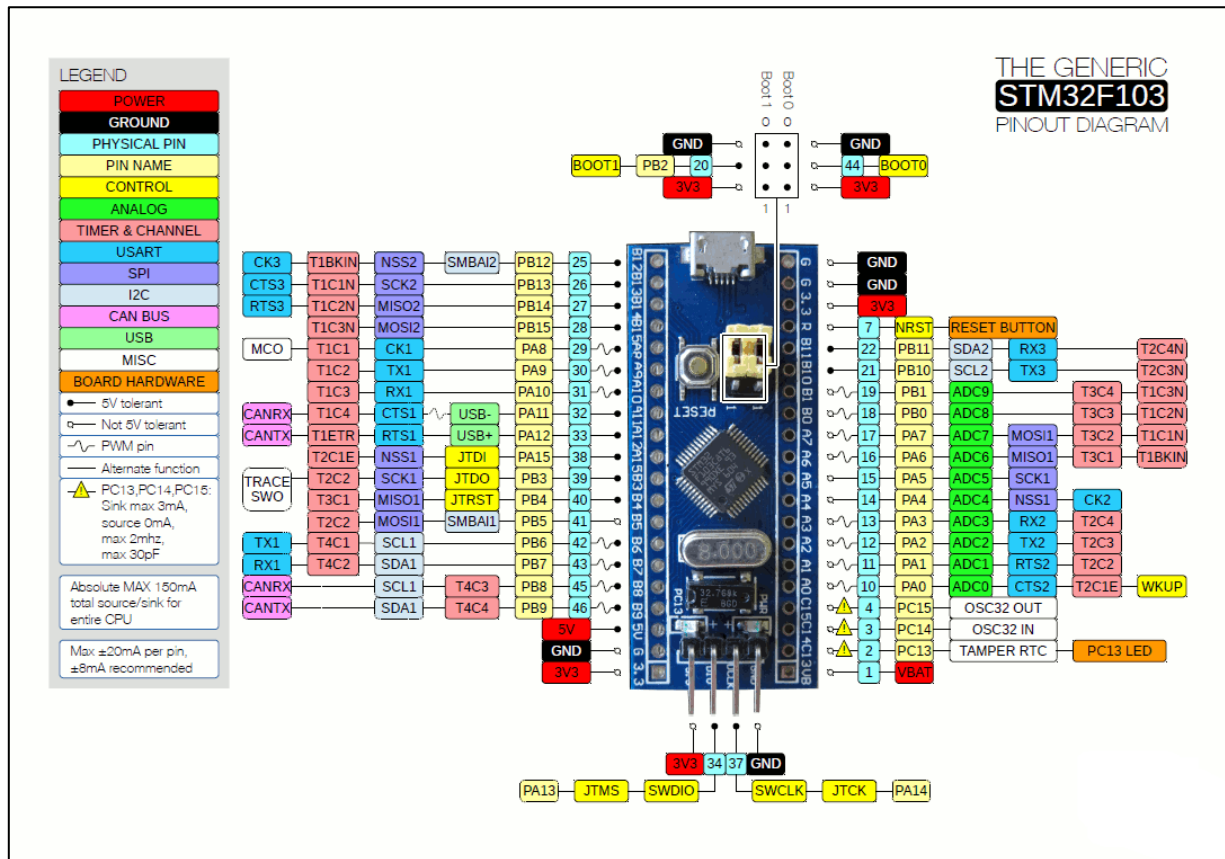
Na Figura 12, é apresentando um diagrama com a configuração dos pinos do *Blue Pill* com suas funcionalidades e características básicas.

Figura 11 - *Blue Pill* utilizado na versão final no desenvolvimento do protótipo



Fonte: Autores (2021).

Figura 12 - Diagrama dos pinos da família dos STM32F103



Fonte: Eletronics Hub (2020).

Ao longo do desenvolvimento do trabalho, foram elaboradas versões do protótipo utilizando ambas alternativas para o sistema de processamento. No entanto, todas as características da arquitetura do *Blue Pill* demonstram superioridade em relação ao Arduino Uno, sobretudo na resolução do conversor analógico-digital, que é uma das características mais relevantes para determinação do desempenho do protótipo.

Além disso, o *Blue Pill* possui compatibilidade na programação com a IDE (Ambiente Integrado de Desenvolvimento, do inglês, *Integrated Development Environment*) do Arduino, o que facilitou a transição das plataformas. Em vista disso, a versão final do protótipo contou com a utilização do STM32F103C8. Portanto, serão abordados, neste capítulo, apenas os procedimentos metodológicos referentes ao

desenvolvimento com o *Blue Pill*. O desenvolvimento com Arduino UNO está contido no Apêndice A - Desenvolvimento do protótipo utilizando o Arduino UNO.

3.1.2 Características Básicas do STM32 para Conversão Analógico-Digital

O STM32F103C8T6 possui um ADC do tipo de aproximação sucessivas com resolução de 12-bits, ou seja, possui 4096 níveis de quantização e possui 18 canais multiplexados, sendo 16 dedicados a fontes externas (MICROCHIP TECHNOLOGY, 2020). O módulo de conversão analógico-digital possui uma fonte alimentação dedicada que pode ser conectada à alimentação do microcontrolador.

Além disso, o ADC pode ser programado para uma fonte de referência externa através de pinos dedicados (V_{REF+} e V_{REF-}). Caso não seja configurado, o ADC assume o valor de referência padrão de 3,3 V (EMBEDDS, 2020).

Um bloco registrador de 16-bits é dedicado para armazenar o resultado de uma conversão simples. Para mais, o mesmo bloco armazena o valor da tensão de referência que é utilizado na leitura do valor analógico. O resultado de uma conversão será determinado pela Equação 21.

$$ADC = \frac{V_{IN} \cdot 4096}{V_{REF}}$$

Equação 21 - Resultado de uma conversão simples no STM32

Em que V_{IN} é igual a tensão de entrada aplicada no pino selecionado e V_{REF} é a tensão de referência selecionada.

O *Blue Pill* conta com um Prescaler que configura a frequência do clock de entrada do ADC. O Prescaler é um dispositivo programável que altera uma determinada frequência, dividindo-a por um fator de divisão. A frequência do clock influencia diretamente no tempo de conversão de uma amostra do sinal analógico, que, por sua vez, influencia na taxa de amostragem.

O tempo de conversão de uma amostra será determinado pela resolução do próprio ADC. Para a resolução de 12-bits, são necessários 12,5 ciclos. Além disso, registradores dedicados podem ser ajustados de forma a configurar o tempo de

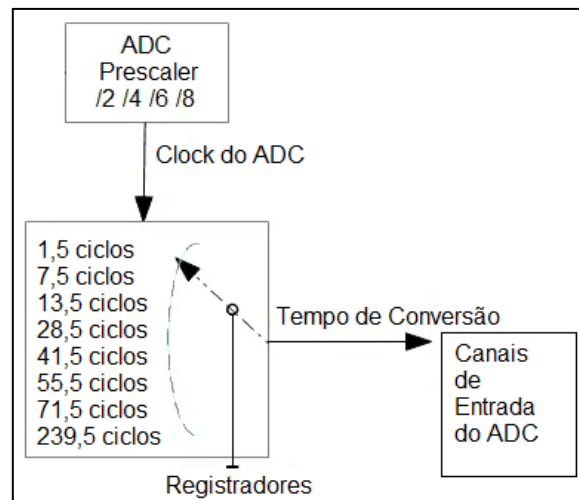
conversão de uma amostra. Logo, a partir da seleção do Prescaler, juntamente com os bits setados nos registradores, é possível determinar a taxa de amostragem do ADC, conforme a Equação 22 (MAGDY, 2020).

$$F_A = \frac{1}{(T_P + 12,5) \cdot \frac{1}{F_{ADC}}}$$

Equação 22 - Determinação da frequência de amostragem no *Blue Pill*

Em que F_A é a taxa de amostragem, T_P corresponde à quantidade de ciclos ajustada pelos registradores do ADC e F_{ADC} é a frequência do clock ajustada pelo Prescaler. O diagrama da Figura 13 apresenta as possíveis configurações para o tempo de conversão de uma amostra ajustáveis no microcontrolador.

Figura 13 - Configurações disponíveis para o tempo de conversão de uma amostra



Fonte: Adaptado de Embedds (2020).

3.1.3 Dimensionamento do Circuito de Condicionamento Analógico

Um circuito de condicionamento de sinal analógico foi dimensionado de forma a manipular o sinal para que fosse ajustado a condições aceitáveis e detectáveis pelo conversor analógico-digital. O valor de tensão na entrada do ADC não deve

ultrapassar 3,3 V (V_{CC}), que é o valor da tensão de referência ajustado para o STM32 (V_{REF+}). Além disso, o ADC não é capaz de medir os valores negativos da onda senoidal. Assim, foi projetado um circuito capaz de atender essas condições.

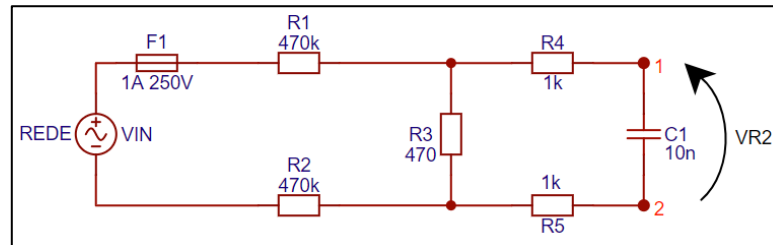
A Figura 14 apresenta o circuito projetado. Por sua vez, o circuito é composto de um divisor resistivo em conjunto de um filtro RC. Além disso, um fusível (F1) foi incluído de forma a proteger o circuito de sobrecorrente.

A partir da análise do circuito, é possível calcular a diferença de potencial V_{R2} entre os nós 1 e 2, utilizando-se da regra do divisor de tensão com resistências, dada pela Equação 23.

$$V_{R2} = \frac{R3}{R3+R1+R2} \cdot V_{IN}$$

Equação 23 - Tensão entre os nós 1 e 2 em função do divisor de tensão

Figura 14 - Circuito abaixador de tensão



Fonte: Autores (2021).

Aplicando os valores dos resistores e da tensão eficaz da rede na Equação 23, determina-se o valor eficaz de V_{R2} aproximadamente igual a 110 mV, com valores de pico aproximadamente a ± 1554 mV. Isso garante a primeira condição da amplitude do sinal para a entrada do ADC.

Com o intuito de possibilitar que o ADC realizasse a leitura dos valores negativos da tensão, além de garantir a segurança e isolamento adequadas do circuito, foi utilizado um circuito integrado capaz de fornecer uma isolamento que pudesse proteger o *Blue Pill* de qualquer influência do sinal da rede monofásica, prevenindo, assim,

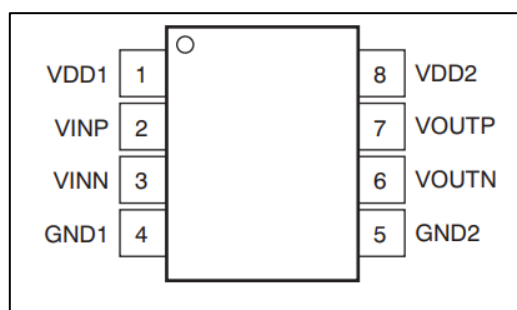
eventuais variações na corrente que possam causar danos nos circuitos sensíveis a distúrbios.

Para tanto, foi utilizado o AMC1100DWVR, um amplificador operacional isolador de alta precisão fabricado pela Texas Instruments Inc. O AMC1100 foi otimizado para aplicações de medição de energia, tanto para medições de corrente ou tensão. Seu isolamento separa o circuito de entrada e saída através de uma barreira de dióxido de silício (SiO_2), que é altamente resistente à interferências eletromagnéticas (TEXAS INSTRUMENTS, 2019).

Além disso, ele oferece naturalmente um deslocamento do sinal aplicado em sua entrada (Polarização CC), permitindo a leitura dos valores de amplitude negativa do sinal senoidal.

A Figura 15 apresenta a configuração dos pinos do AMC1100 com a vista superior do dispositivo. A Tabela 9 apresenta as características principais de operação do circuito integrado.

Figura 15 - Configuração dos pinos do AMC1100



Fonte: Texas Instruments (2019).

Tabela 9 - Especificações de operação básicas do AMC1100

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Unidade
Faixa de Temperatura ambiente recomendada	- 40	105	°C
Fornecimento de tensão do lado de alta potência	4,5	5,5	V
Fornecimento de tensão do lado de baixa potência	2,5	5,5	V
Tensão diferencial de Entrada ($V_{INP} - V_{INN}$)	- 250	250	mV

Tensão máxima de entrada	- 320	320	mV
--------------------------	-------	-----	----

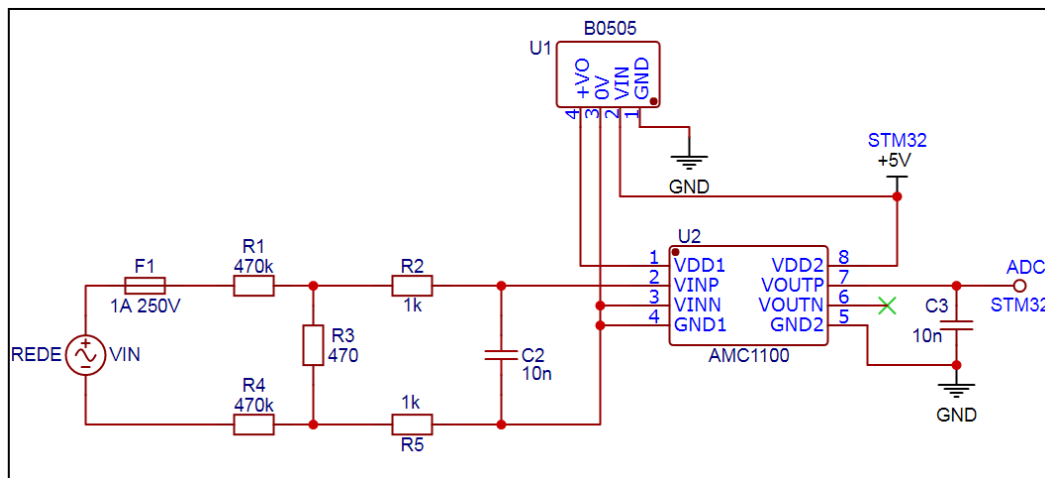
Fonte: Texas Instruments (2019).

Conforme a Tabela 9, o AMC1100 requer uma alimentação adequada tanto na entrada quanto na saída. Para tanto, foi utilizado os pinos dedicados a alimentação de circuitos externos do *Blue Pill*, fornecendo uma tensão de 5 V tanto para o lado de alta potência quanto para o de baixa.

Para garantir a isolamento adequada entre os dois domínios, foi utilizado outro circuito integrado, o B0505S-1W, fabricado pela Mornsun Guangzhou S& T, sendo um conversor CC/CC isolador. Este conversor admite alimentação entre 4,5 V e 5,5 V e fornece em sua saída tensão igual a 5 V.

Logo, foi possível aplicar o sinal de tensão entre os nós 1 e 2 do circuito da Figura 14 à entrada não inversora (VINP) do AMC1100, que, por sua vez, produz na saída um sinal com características detectáveis à entrada do conversor analógico-digital do *Blue Pill*. Os valores de amplitude desse sinal aplicado ao ADC podem ser previstos com valor de deslocamento do AMC1100, igual a 2,55 V. Somando esse valor com os valores de pico gerados pelo circuito abaixador de tensão, a faixa que será lida pelo microcontrolador será entre 2,394 V e 2,706 V. Na Figura 16, é apresentado o circuito de condicionamento analógico completo com a adição dos circuitos integrados.

Figura 16 - Circuito de condicionamento analógico completo



Fonte: Autores (2021).

3.1.4 Determinação do Sistema de Armazenamento das Amostras

Para conferir o registro adequado das amostras lidas pelo conversor analógico-digital do STM32, optou-se pela utilização de um módulo adaptador de cartão MicroSD (Figura 17). Isso forneceu flexibilização e capacidade de memória praticamente ilimitada para a coleta dos dados de tensão.

A comunicação entre o cartão SD e o microcontrolador utiliza o protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*). O *Blue Pill* fornece três grupos de pinos reservados para esse tipo de comunicação (MISO, MOSI, SCK e NSS), conforme Figura 12. O módulo adaptador requer uma alimentação com tensão igual 3,3 V. Para tanto, foram utilizados os pinos disponíveis dedicados para a alimentação de circuitos externos do *Blue Pill*, fornecendo o nível de tensão adequado.

A IDE do Arduino conta com bibliotecas nativas que oferecem suporte para comunicação SPI e para a leitura e escrita de dados em cartões do tipo SD e SDHC, suportando sistema de arquivos FAT16 e FAT32. Logo, através do uso do módulo adaptador e um cartão MicroSD de 16 GB, foi possível guardar permanentemente as amostras para serem posteriormente tratadas.

Figura 17 - Módulo adaptador MicroSD juntamente do Cartão SD



Fonte: Autores (2021).

3.2 Desenvolvimento do Algoritmo de Programação

Utilizando a IDE do Arduino, foi desenvolvida a lógica computacional necessária para adquirir as amostras do sinal de tensão.

3.2.1 Determinação da Metodologia de Amostragem

Para atender aos critérios de medição em tensão de regime permanente definidos pelo PRODIST, foi estabelecida uma metodologia de amostragem que pudesse satisfazer o registro de uma leitura válida, que compreende as 1008 leituras ao longo de uma semana.

As configurações padrões do *Blue Pill* para o tempo de conversão de uma amostra (sem o ajuste na programação nos registradores e no Prescaler do clock) conferem ao conversor analógico-digital uma frequência de clock igual a 14 MHz e um acréscimo de 1,5 ciclos para conversão de uma amostra. Logo, pela Equação 22, é possível obter uma frequência de amostragem igual a 1,0 MHz, condição que garante plenamente o critério de Nyquist, pela Equação 19.

Multiplicando a frequência de amostragem pelo período da frequência da rede analisada (16,67 ms), obtém-se o número de amostras que serão registradas em um período da onda, que será aproximadamente a 16.666,67 amostras. Essa quantidade abundante de amostras é desnecessária para reconstituição do sinal em análise (60 Hz), ocupando espaço em excesso na memória para o registro de apenas uma leitura.

Logo, procurou-se ajustar a quantidade de amostras por período para reconstituir adequadamente a frequência do sinal de 60 Hz até a sua 40ª harmônica (2.400 Hz), critério estabelecido pelo item 3.3.6 do Módulo 5 do PRODIST, que define que o sistema de medição deve apurar no mínimo até a quadragésima ordem harmônica.

Para atender ao critério do PRODIST, ao critério de Nyquist e levando em conta a frequência de recobrimento, adotou-se uma frequência de amostragem 12,5 vezes igual a 40ª harmônica, resultando em 30 kHz e totalizando 500 amostras por

período. Essa quantidade de amostras pode ser facilmente atingida com a manipulação do registro de uma amostra para a seguinte, através da aplicação de um atraso (*delay*) no código de programação.

No caso, mantém-se a taxa de amostragem padrão da conversão analógico-digital (1,0 MHz). Contudo, limita-se a quantidade de amostras utilizadas para reconstituir um período de sinal de tensão e calcular a tensão eficaz que contabiliza como uma leitura de tensão em regime permanente.

Em relação à periodicidade dos registros das leituras, procurou-se satisfazer os critérios do PRODIST, registrando uma leitura a cada 10 minutos. No entanto, foi definida a medição de um novo indicador, criado para os fins de apresentação dos dados do protótipo, que exibe a leitura da tensão eficaz a cada $\frac{1}{4}$ de minuto (15 segundos), aproximando-se de uma análise em tempo real.

3.2.2 Código de Programação para o Microcontrolador

O código desenvolvido na íntegra pode ser verificado no Anexo A - Código desenvolvido para o protótipo. De forma a conter todas as condições e processos para a aquisição de amostras do protótipo, foram estabelecidos os seguintes passos para o código de programação:

- Iniciam-se as bibliotecas necessárias e variáveis globais, com o parâmetro de definição da entrada a ser utilizada pelo conversor analógico-digital, o parâmetro de amostra e o parâmetro que define o arquivo que será armazenado ao registro de amostras;
- Definição das configurações de taxa de transferência para transmissão serial;
- Inicia-se comandos de teste de comunicação com o cartão MicroSD;
- Verificação da integridade do arquivo do tipo txt e teste de sua possibilidade de escrita;
- Definição de um vetor com 500 elementos, que armazena as amostras do sinal analógico e de uma variável que armazena o conteúdo da amostra;

- Definição de um laço que armazena uma amostra no vetor a cada incremento da variável do parâmetro;
- Aplicação do *delay* necessário para registrar 500 amostras por período (1/30 ms);
- Registro das 500 amostras no cartão SD, com identificação da ordem de medição;
- Aplicação do *delay* de intervalo de 15 segundos entre uma leitura e a próxima.

3.3 Desenvolvimento da Placa de Circuito Impressa

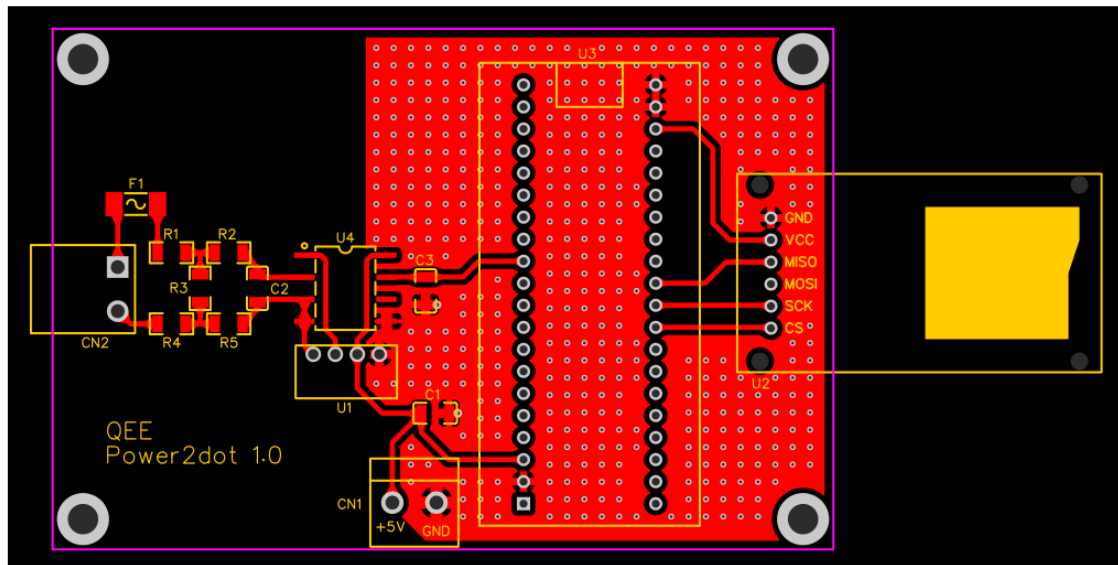
Após análises iniciais e verificações do funcionamento do circuito e do seu desempenho no registro das amostras, seguiu-se com o desenvolvimento de uma placa de circuito impresso (denominado com a sigla PCB, do inglês: *printed circuit board*). A construção do circuito em uma PCB fornece mais confiabilidade e qualidade ao protótipo, garantindo os contatos elétricos das interligações entre componentes do circuito, conferindo segurança e robustez com os dispositivos soldados em uma placa.

Em contrapartida, têm-se componentes inseridos em uma matriz de contatos (protoboard), que podem apresentar ineficiência conforme a complexidade do circuito e quantidade de componentes. Além disso, confeccionando uma placa de circuito impresso, o protótipo se aproxima mais de um produto final.

Para o design da PCB, foi utilizado o EasyEDA, um conjunto de ferramentas de projeto de circuitos eletrônicos, que inclui o esquema, simulação e *design* de placas disponibilizado gratuitamente, com acesso e utilização através de um navegador de rede.

A Figura 18 apresenta a vista da camada superior da PCB projetada através do EasyEDA. Para alimentação do *Blue Pill*, foi acrescentado um bloco terminal (CN1), a fim de ser alimentado por uma fonte externa de 5 V. Foi inserido, também, outro bloco terminal (CN2) para a conexão com a rede monofásica.

Figura 18 - *Design da vista superior da PCB (top layer)*



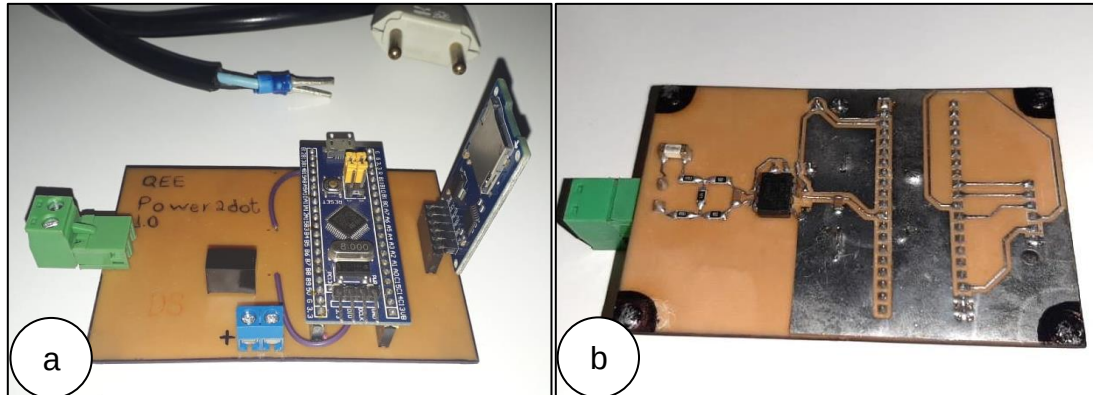
Fonte: Autores (2021).

Através de uma micro fresadora de bancada com comando numérico computadorizado (CNC), especializada para confecção de placas de circuito impresso, foi confeccionada a PCB do projeto. A utilização da fresadora CNC foi uma contribuição da empresa Simemap Sistemas de Monitoramento e Automação Eletrônica Ltda, que ofereceu o empréstimo do equipamento para o desenvolvimento deste trabalho.

As fresadoras CNC são máquinas que executam uma sequência de comandos precisos e programáveis através de microcontroladores, possuindo comunicação através de uma interface com o computador. Logo, utilizando *softwares* específicos para o reconhecimento do *design* da placa pela máquina, foi possível desenhar as trilhas conforme a Figura 18 em uma placa de fenolite virgem com camada de cobre.

A Figura 19, a seguir, apresenta o protótipo produzido com todos seus componentes soldados.

Figura 19 - Protótipo produzido com auxílio da fresadora CNC (versão intitulada Power2dot 1.0). a) Vista inferior (*bottom layer*); b) Vista superior (*top layer*)



Fonte: Autores (2021).

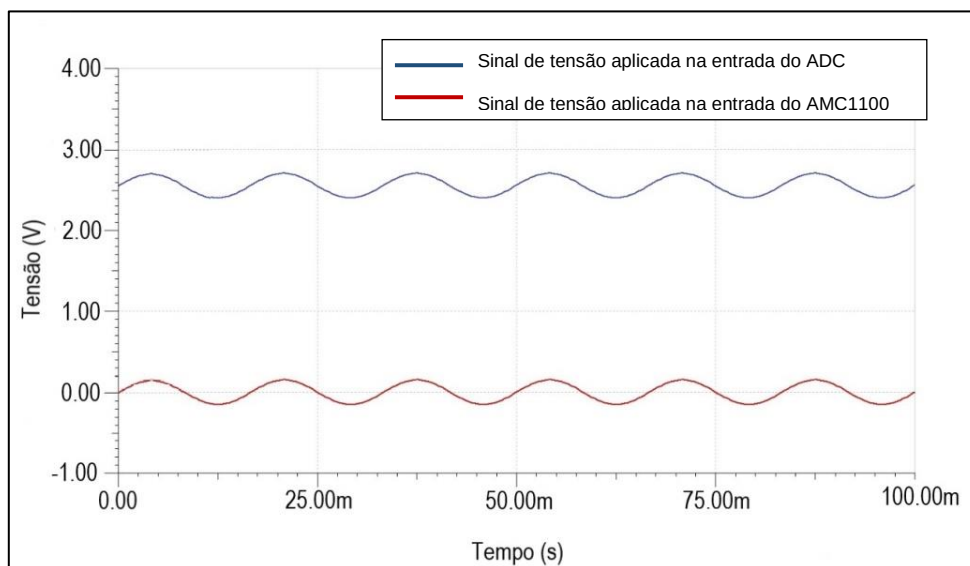
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Operação do Circuito

A Figura 20 apresenta um gráfico produzido no *software* de simulação de circuitos eletrônicos analógicos. Esse *software* permite simular fielmente as características de operação do AMC1100. No gráfico, é possível observar a forma de onda do sinal de tensão que é aplicado na entrada do AMC1100 (onda em azul) e na entrada do conversor analógico-digital do STM32 (onda em vermelho).

Através da Equação 21, é possível prever os valores registrados no Monitor Serial do Arduino, aplicando os valores de pico (2,394 V e 2,706 V) a V_{IN} , e o valor de referência V_{REF} (3,3 V). Observa-se que as amostras lidas estão compreendidas entre 2971,46 e 3358,72. No entanto, deve-se destacar que os valores do sinal de tensão são quantizados, e que os valores de amostras assumirão valores de acordo com os níveis de quantização (discretos).

Figura 20 - Gráfico que demonstra as características de operação do circuito



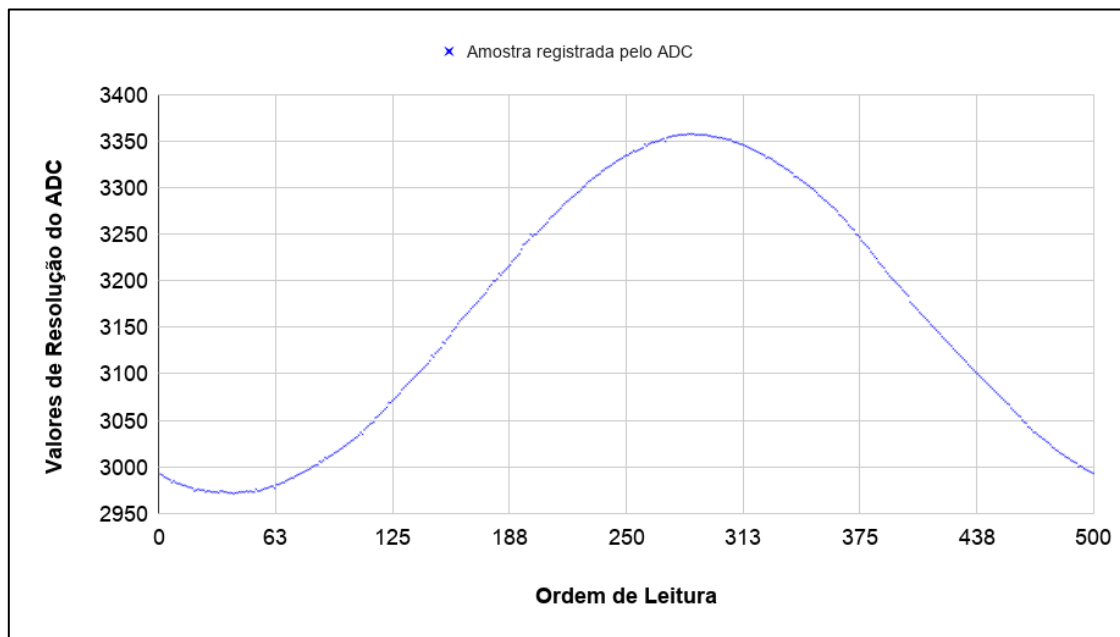
Fonte: Autores (2021).

4.2 Tratamento das Amostras

4.2.1 Abordagem e Análise Gráfica

Após a compilação e execução do código de programação pelo microcontrolador, obteve-se o conjunto de 500 amostras lidas pelo conversor analógico-digital, através do arquivo do tipo txt gerado no MicroSD. Utilizando-se de uma ferramenta gráfica associada a uma planilha eletrônica, gerou-se um gráfico apresentado na Figura 21, que demonstra um conjunto de amostras geradas em função da ordem de leitura. O eixo das ordenadas apresenta o valor convertido pelo ADC, que são determinados por sua resolução (0 a 4095). Das abscissas, apresenta-se a ordem de cada amostra lida pelo ADC.

Figura 21 - Gráfico de um período da onda através das 500 amostras



Fonte: Autores (2021).

Através da planilha eletrônica, é possível converter o conjunto de amostras para o seu valor correspondente à faixa do sinal tensão da fonte, retornando ao sinal original. Utilizando a Equação 18, é possível determinar que a resolução da conversão

é aproximadamente a 0,805 mV, multiplicando esse valor com as amostras, subtraindo o valor de deslocamento da onda (2,55 V) e utilizando a Equação 23, é possível obter os valores correspondentes da amplitude do sinal original medido pelo protótipo.

O gráfico da Figura 22 apresenta o resultado dessa conversão dos valores. No Anexo B, é possível conferir a Tabela 11, que apresenta as primeiras 30 amostras utilizadas para elaboração dos gráficos produzidos nesta seção.

Figura 22 – Reprodução do sinal da fonte com as amostras convertidas



Fonte: Autores (2021).

4.2.2 Cálculo da Tensão Eficaz

Para determinar o valor eficaz (RMS) do período do sinal analisado, utilizando-se das 500 amostras, foi utilizado a Equação 24.

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{1}^n v_{[n]}^2}$$

Equação 24 - Valor eficaz para sinais amostrados (discretos)

Em que V_{RMS} é a tensão eficaz, n é a quantidade de valores discretos (amostras) e $v_{[n]}$ são os valores discretos. Para realizar o cálculo da Equação 24, também foi utilizada a planilha eletrônica para determinar a tensão eficaz com as amostras da Tabela 11, que resultou no valor de **219,45 V**.

Logo, observando o gráfico da Figura 22, no qual as amostras registradas produziram uma aproximação satisfatória da forma de onda do sinal de tensão original, é possível constatar que os valores medidos se encontram em sua maioria dentro dos limites calculados (entre 2971 e 3359).

Além disso, pode-se verificar que o valor de tensão eficaz calculado também se aproxima do valor nominal fornecido pela rede monofásica (220 V), podendo classificá-la como adequada de acordo com a Tabela 2. Portanto, pode-se afirmar que o protótipo juntamente do algoritmo de programação satisfaz a proposta do trabalho.

4.3 Avaliação do Custo do Protótipo

De forma a verificar o preço do protótipo e comprovar seu preço reduzido, sendo um dos critérios que definem o objetivo geral deste trabalho, foi investigado o custo de produção da PCB e dos componentes para determinação do preço do protótipo.

O EasyEDA, plataforma que foi desenvolvida a PCB, fornece integração direta com o JLCPCB (JiaLiChuang (HongKong) Co., Ltda.), uma das maiores empresas da China especializada na fabricação de protótipos de PCB em pequenos lotes. Essa integração possibilita orçar o custo de produção de um design desenvolvido na plataforma.

Além disso, o EasyEDA também possui integração com LCSC Eletronics, uma rede varejista chinesa atuante no comércio de produtos eletrônicos. Logo, através da integração oferecida, foi possível produzir a Tabela 10, a qual relaciona os itens que compõem o custo do protótipo. Faz-se importante ressaltar que a tabela relaciona os preços para janeiro de 2021 e, por isso, avaliações futuras devem levar em conta as eventuais flutuações de preço dos componentes.

Tabela 10 - Orçamento do protótipo

Descrição do Insumo	Referência LCSC	Quantidade/ Consumo	Preço Unitário (USD)	Preço Parcial (USD)	Peso (%)
Fabricação de PCB - JLCPCB	-	1	5,00	5,00	28,92
Resistor 1k $\pm 0,1\%$ 60mW SMD	C328418	2	0,1149	0,2298	1,33
Resistor 470k $\pm 0,1\%$ 1/8W SMD	C136922	2	0,047	0,094	0,54
Resistor 470 $\pm 1\%$ 1/10W SMD	C235008	1	0,0155	0,0155	0,09
B0505S-1W	C500271	1	1,1055	1,1055	6,40
Capacitor 10nF $\pm 10\%$ SMD	C314216	3	0,0017	0,0051	0,03
AMC1100DUBR	C962070	1	2,191	2,191	12,67
STM32F103C8T6 – LQFP48	C8734	1	7,6478	7,6478	44,24
Fusível 4A 250V SMD	C187540	1	0,5266	0,5266	3,05
Bloco conector terminal 2P=5.08mm tipo <i>Covered</i>	C505806	1	0,0399	0,0399	0,23
Bloco conector terminal 2P=5.08mm tipo <i>Wiring Board</i>	C89120	1	0,431	0,431	2,49
Protótipo Power2dot 1.0	-	1	-	17,2862	100

Fonte: LCSC Eletronics (2021).

Também é importante ressaltar que na Tabela 10 foi considerado apenas o preço unitário da compra de uma unidade de cada produto. Dependendo do componente, o preço unitário poderá ser menor em função da quantidade adquirida. Além disso, a maioria desses componentes exige uma quantidade mínima para efetuação da compra. Logo, variações do custo final podem existir dependendo da quantidade de unidades do protótipo a ser produzido.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Medições e Verificação da Operação do Circuito

Os resultados da operação do circuito apontaram que o protótipo possui capacidade de apresentar medições de tensão em regime permanente de um sinal de tensão de rede monofásica. No entanto, diferentemente dos equipamentos analisadores de qualidade de energia elétrica disponíveis no mercado, o protótipo não apresenta os dados de medição de forma independentemente, ou seja, ainda é necessário o tratamento das amostras lidas por intermédio de outros equipamentos ou recursos.

Logo, a introdução de um método de apresentação dos resultados da medição é importante para que o usuário do equipamento possa visualizar os dados de maneira mais direta. O protótipo já conta com um meio de registro das amostras que pode ser facilmente transferido para um computador ou aparelho de celular através do cartão MicroSD. Assim sendo, é indicada a elaboração de um *software* ou aplicativo que possua capacidade de tratar as amostras registradas no arquivo txt e apresentar em uma interface os dados de forma concisa.

Além disso, o desenvolvimento de um *software* possibilita apresentar nessa interface informações ainda mais detalhadas do fornecimento de tensão da rede, exibindo as informações exigidas pelo PRODIST às concessionárias, tais como: os indicadores individuais, tabela de medição e o histograma de tensão em regime permanente, produzindo um relatório completo das características de fornecimento.

Como proposta para a complementação ou substituição do sistema de aquisição de dados, a adição de um recurso de comunicação remota do protótipo com o computador eliminaria a necessidade do cartão *MicroSD* como transmissor dos registros das medições, aplicando comunicação *wireless*, possibilitando transferência e coleta de dados através da rede de internet, aliado ao conceito IoT (*Internet of Things*).

No entanto, para incrementar esta funcionalidade são necessárias mudanças significativas tanto na configuração e quantidade de componentes quanto no algoritmo de programação.

5.2 Avaliação das Características e do Custo do Protótipo em Relação aos Produtos Existentes no Mercado

Conforme a Tabela 10, o preço final para produzir um protótipo resultou em 17,28 dólares, o que na cotação do dia 16 de janeiro de 2021 equivale a R\$ 91,52. É importante mencionar que o custo de produção não envolve o custo do transporte do protótipo, tendo em vista que ele é produzido internacionalmente.

Mesmo com esse cenário e critérios que possam variar o custo final do protótipo, fazendo uma comparação com os analisadores de qualidade de energia elétrica mais populares do mercado, percebe-se uma diferença significativa em relação ao preço, mesmo avaliando apenas o preço de venda.

Por exemplo, o analisador de qualidade de energia PQA824 da HT-Instruments, disponível pela varejista TEquipment (TEQUIPMENT, 2021), o analisador de qualidade de energia da Fluke 438-III, disponível na loja online Dimensional (DIMENSIONAL, 2021) e o oZm Single-phase v2 (OPENZMETER, 2021), custam, respectivamente, R\$28.557,74, R\$ 113.391,00 e R\$3.133,12 na cotação de 16 de janeiro de 2021.

No entanto, os equipamentos citados possuem funcionalidade que difere da quantidade de parâmetros medidos pelo protótipo deste trabalho, como, por exemplo, a análise de parâmetros de potência ativa e reativa, corrente, componentes DC de tensão etc. Portanto, a comparação do protótipo com as referências atuais do mercado deve ser feita com atenção a estas ressalvas, tendo em vista que elas apresentam características e funcionalidades distintas.

5.3 Propostas e Sugestões para Trabalhos Futuros

5.3.1 Investigação e Aprofundamento de Temas

De forma a enriquecer os fundamentos teóricos e ampliar os temas desenvolvidos, além de adquirir mais entendimento sobre técnicas e padrões dos

equipamentos de análise e medição de qualidade de energia elétrica, podem-se citar os seguintes temas e referências a serem desenvolvidos para trabalhos futuros:

- Cenários e padrões de qualidade de energia elétrica, analisando perspectivas nacionais e internacionais;
- Relatórios técnicos com análises da qualidade de energia elétrica do Tocantins e do Brasil, assim como o panorama de consumo de energia;
- Diferentes medidas, técnicas e procedimentos existentes que vão além de equipamentos dedicados à análise de qualidade de energia elétrica.

5.3.2 Aprimoramento do Protótipo

Em relação ao protótipo, podem ser adotadas as seguintes considerações com o intuito de aprimorar seu desempenho, recursos e funcionalidades:

- Apresentar um relatório de qualidade do fornecimento da tensão em regime permanente completo conforme critérios do PRODIST;
- Desenvolver ferramentas de interface gráficas ao usuário, de forma a apresentar todos os dados analisados;
- Incorporar tecnologias de comunicação e transferências dos dados com rede *wireless*, para análise em outros dispositivos, como computador e celular;
- Aprimorar o protótipo para medição de outros parâmetros de qualidade de energia elétrica, descritos neste trabalho;
- Eliminar a fonte secundária necessária para alimentar o *Blue Pill*, utilizando a própria alimentação da rede;
- Implementar a utilização de baterias para conferir a capacidade de medições e registro de interrupções quando o equipamento estiver sem o suprimento de energia.
- Adoção de envasamento ou confecção de um molde para encapsulamento do protótipo, protegendo-o contra danos mecânicos e conferindo melhor isolamento elétrico

5.3.3 Procedimentos para Análises e Medidas

Diferentes metodologias de medição e verificação da operação e desempenho do protótipo podem ser adotadas, a fim de comprovar seu funcionamento. Abaixo estão relacionados os procedimentos que podem ser empregados para obter análises e medidas:

- Submeter o protótipo a diferentes testes de medição, com duração e condições de carga variáveis;
- Definir um público alvo para utilização do protótipo, realizando uma pesquisa de opinião para estabelecer características e recursos desejados em um produto com funções similares ao protótipo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 863/2019 e Resolução Normativa nº 871/2020. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**, Revisão 12, 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>. Acesso em: 11 jan. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 863/2019 e Resolução Normativa nº 888/2020. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 5 – Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura**, Revisão 6, 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-5>. Acesso em: 12 jan. 2021.

BAROS, Jan et al. Wireless Power Quality Analyser based on Virtual Instrumentation. **IFAC - PapersOnLine**, [s. l.], v. 57, ed. 27, p. 465-472, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319326564>. Acesso em: 13 ago. 2020.

BELFORT, Diomadson Rodrigues. **Circuito de Condicionamento de Sinais Analógicos Programável para Sistemas Integrados**. Orientador: Prof. Dr. Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Eletricidade) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Maranhão, Brasil, 2007. p. 1-3. Disponível em: <https://tede2.ufma.br>. Acesso em: 9 ago. 2020.

BOLLEN, Math H. J. OVERVIEW of Power Quality and Power Quality Standards. *In: Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. 3. ed. 2000: Wiley, 2010. cap. 1, ISBN 0780347137.

COLNAGO, Guilherme P; VIERA, José L. F.; SOUSA, Gilberto C. D.; JÚNIOR, José R Macedo. **A nova norma de qualidade de energia elétrica brasileira e um medidor de baixo custo**, p. 1-2, 10 maio 2006. Disponível em: scholar.google.com.br. Acesso em: 11 ago. 2020.

CRECRAFT, D.I.; GERGELY, S. Power supplies. *In: Analog Electronics: Circuits, Systems and Signal Processing*. Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2002. cap. 13, p. 324-368. ISBN 978-0-7506-5095-3. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750650953500131>. Acesso em: 9 ago. 2020.

DECKMANN, Sigmar Maurer; POMILIO, José Antenor. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. [S. l.]: UNICAMP, 2020. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a1.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2020.

DESHMUKH, Ajay V. Introduction to Microcontrollers. *In: Microcontrollers: Theory and Applications*. 1. ed. India: Mc Graw Hill India, 2005. cap. 1, p. 3-4. ISBN 978-0070585959. Disponível em: <https://books.google.com.br/>. Acesso em: 9 ago. 2020.

DIMENSIONAL. **Instrumento Portátil Digital Analisador De Qualidade De Energia E De Motor 1v A 1000v - 438IIINTL - Fluke**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.b2c dimensional.com.br/instrumento-portatil-digital-analisador-de-qualidade-de-energia-e-de-motor-1v-a-1000v-438iiintl-fluke/p>. Acesso em: 16 jan. 2021.

ELETRONICS HUB. Getting Started with STM32F103C8T6 Blue Pill. **STM32**, [S. l.], 3 fev. 2020. Disponível em: <https://www.electronicshub.org/getting-started-with-stm32f103c8t6-blue-pill/>. Acesso em: 11 jan. 2021.

EMBEDDS. **Introducing to STM32 ADC programming. Part1**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://embedds.com/introducing-to-stm32-adc-programming-part1/>. Acesso em: 11 jan. 2021.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS (Rio de Janeiro). Propostas para melhorar a qualidade da energia elétrica para a indústria no Brasil. **Pesquisas e estudos socioeconômicos**, [S. l.], p. 1-5, dez. 2006. Disponível em: <https://www.firjan.com.br/publicacoes/>. Acesso em: 11 ago. 2020.

FLUKE CORPORATION. **Fluke 438-II: Power Quality Analyzer & Motor Analyzer**. [S. l.], 201-. Disponível em: <https://www.fluke.com/en/products/electrical-testing/power-quality>. Acesso em: 9 ago. 2020.

KHETARPAL, Poras; TRIPATHI, Madan Mohan. A critical and comprehensive review on power quality disturbance detection and classification. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, [s. l.], v. 26, ed. 100393, 10 jul. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221053792030144X#!>. Acesso em: 13 ago. 2020.

LCSC Eletronics. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://lcsc.com/en>. Acesso em: 16 jan. 2021.

MAGDY, Khaled. STM32 ADC Tutorial: Complete Guide With Examples. *In: DEEP BLUE. STM32 ARM*. [S. l.], 27 jun. 2020. Disponível em: <https://deepbluembedded.com/stm32-adc-tutorial-complete-guide-with-examples/>. Acesso em: 11 jan. 2021.

MARTINS, Júlio S.; COUTO, Carlos; AFONSO, João Luiz. Qualidade de Energia Elétrica. **Anais do 3º Congresso Luso-Moçanbicano de Engenharia: Engenharia e Inovação para o Desenvolvimento**, Maputo, Moçambique, p. 219-231, 19 jul. 2003. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/>. Acesso em: 11 ago. 2020.

MAZLUMI, Kazem. Power Quality Monitoring. *In: ZOBAA, Ahmed Faheem; CANTELI, Mario Mañana; BANSAL, Ramesh (ed.). Power Quality Monitoring, Analysis and Enhancement*. Rijeka, Croácia: InTech, 2011. cap. 1, p. 3-20. ISBN 978-953-307-330-

9. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/power-quality-monitoring-analysis-and-enhancement/power-quality-monitoring>. Acesso em: 7 jan. 2021.

MELHORN, C. J.; MCGRANAGHAN, Mark. **Interpretation and analysis of power quality measurements**. IEEE Transactions on Industry Applications, [s. l.], v. 31, ed. 6, p. 1363-1370, 1995. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/475727>. Acesso em: 10 ago. 2020.

MELO, Miguel Otávio Barreto Campelo de; CAVALCANTI, Guilherme. Avaliação do Impacto da Qualidade de Energia Elétrica na Produção Industrial: Proposta de Metodologia. **Anais do XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Rio de Janeiro, Brasil, 2008. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/>. Acesso em: 12 ago. 2020.

MICROCHIP TECHNOLOGY. **ATmega328**: Device Overview. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/atmega328>. Acesso em: 13 ago. 2020.

MICROCHIP TECHNOLOGY. **MegaAVR® Data Sheet**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/atmega328>. Acesso em: 13 ago. 2020.

OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W. **Discrete-Time Signal Processing**. 3. ed. [S. l.]: Pearson, 2010. ISBN 0132067099.

OPENZMETER. **What is openZmeter?**: Smart metering and power quality analysis for the people. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://openzmeter.com/>. Acesso em: 16 jan. 2021.

OLIVEIRA, José Carlos de; MACEDO, José Rubens; DELAIBA, Antônio Carlos. **Relatório Técnico 1/8**: Regulamentos e normais nacionais ou internacionais e principais pesquisas realizados no Brasil e exterior. Uberlândia: [s. n.], 2014.

POOLE, Ian. **What is a Power Analyzer**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.electronics-notes.com>. Acesso em: 9 ago. 2020.

RAM, B. INTRODUCTION. In: **Computer Fundamentals, Architecture & Organisation**. 7. ed. [S. l.]: New Age International Pvt., 2007. cap. 1. Disponível em: <https://books.google.com.br/>. Acesso em: 14 ago. 2020.

RAMSDEN, Edward. HALL-EFFECT Physics. In: **Hall-Effect Sensors**: Theory and Application. [S. l.]: Elsevier, 2011. cap. 1, p. 1-10. ISBN 9780080523743. Disponível em: <https://books.google.com.br>. Acesso em: 9 ago. 2020.

ROCHA, Joaquim Eloir. **QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**. UTFPR, Curitiba, p. 3-36, 2016. Disponível em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/joaquimrocha/qualidade-da-energia-eletrica/Qualidade%20da%20Energia%20Eletrica%20_%20Apostila.pdf/view. Acesso em: 15 jan. 2021.

SANKARAN, C. Introduction to power quality: power quality progression. *In: Power Quality*. [S. l.: s. n.], 2001. cap. 1, p. 1-2. ISBN 0849310407. Disponível em: books.google.com.br. Acesso em: 12 ago. 2020.

SIEMENS AG. **Power quality recorder**: SICAM Q100. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://new.siemens.com/global/en/products.html>. Acesso em: 9 ago. 2020.

STMICROELECTRONICS. **Datasheet - STM32F103x8, STM32F103xB**: Medium-density performance line ARM®-based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash, USB, CAN, 7 timers, 2 ADCs, 9 com. interfaces. 17rev. [S. l.: s. n.], 2015. 117 p. Disponível em: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2021.

TEQUIPMENT. **HT Instruments - PQA824 (USA) - Power Quality Analyzer**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.tequipment.net/HT-Instruments/PQA-824-USA/Power-Quality-Analyzer/>. Acesso em: 16 jan. 2021.

TEXAS INSTRUMENTS. **Datasheet - AMC1100 Fully-Differential Isolation Amplifier**. 19. ed. rev. [S. l.: s. n.], 2019. 37 p. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/amc1100.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2021.

TEXAS INSTRUMENTS. **Power quality analyzer**: Power quality analyzer integrated circuits and reference designs. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.ti.com/applications/industrial/grid-infrastructure/overview.html>. Acesso em: 13 ago. 2020.

TOMESC, Liviu; DOBRA, Petru; ABRUDEAN, Mihail. **Low-Cost Power Quality Analyzer. International Federation of Automatic Control**: Workshop, Cluj-Napoca, Romania, ed. 07, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 13 ago. 2020.

VICIANA, Eduardo *et al.* OpenZmeter: An Efficient Low-Cost Energy Smart Meter and Power Quality Analyzer. **Sustainability in Mediterranean Climate**, Almeria, Espanha, n. 11, 4 nov. 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/11/4038/htm#B6-sustainability-10-04038>. Acesso em: 9 ago. 2020.

WIDROW, Bernard; KOLLÁR, Istán. **Quantization Noise**: Roundoff Error in Digital Computation, Signal Processing, Control, and Communications. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press., 2008. 778 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/>. Acesso em: 14 ago. 2020.

ZAHRAI, Seyed Alireza; ONABAJO, Marvin. Review of Analog-To-Digital Conversion Characteristics and Design Considerations for the Creation of Power-Efficient Hybrid Data Converters. **Journal of Low Power Electronics and Applications**, [s. l.], v. 12, ed. 8, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em: 14 ago. 2020.

ANEXOS

Anexo A - Código desenvolvido para o protótipo

```

/*
  QEE - Power2dot 1.0
  Desenvolvido para o Trabalho de Conclusão de Curso Intitulado:
  PROTÓTIPO DE MEDIDOR DE BAIXO CUSTO PARA ANÁLISE DA QUALIDADE DA TENSÃO
  EM REGIME PERMANENTE
  Com Autoria de:
  ERIKA REBECA PEREIRA OLIVEIRA
  PEDRO HENRIQUE BORGES DO AMARAL

  Criado em 20 de Outubro de 2019
  Modificado em 10 de Janeiro de 2020

  Configuração da pinagem do STM32 para comunicação SPI com o cartão MicroSD
  ** MOSI - pino PA7
  ** MISO - pino PA6
  ** SCK - pino PA5
  ** CS(NSS) - pino PA4

  Entrada analógica projetada para leitura do sinal de tensão pelo STM32
  ** ADC - pino PA12
*/

#include <SPI.h>
#include <SD.h>

File TCC;
const int leitura = PA12;
int a;
int vetor[500];
int valor;

void setup() {

  // Habilita a comunicação serial caso seja utilizado o monitoramento serial:
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial) {
  }
  Serial.print("Inicializando cartão SD...");

  if (!SD.begin(PA12)) {
    Serial.println("Inicialização falhou!");
    while (1);
  }
  Serial.println("Inicialização completa.");
}

```

```
void loop() {  
  
    //Abertura de um arquivo para o registro das 500 amostras.  
  
    TCC = SD.open("Registro" , FILE_WRITE);  
  
    // Se o arquivo abrir, escrever os dados no cartão MicroSD:  
    if (TCC) {  
        Serial.print("Escrevendo no Cartao SD...");  
  
        for (a=0; a<500; a++){  
            TCC.println("Leitura:");  
            TCC.print(a);  
            valor=analogRead(leitura);  
            vetor [a]=valor;  
            TCC.println(vetor[a]);  
            delay(1/30);  
        }  
  
        // Fecha o arquivo:  
        TCC.close();  
        Serial.println("Feito.");  
        delay(15000);  
  
    } else {  
        // Se o arquivo não abrir escrever ao monitor:  
        Serial.println("Erro ao abrir arquivo");  
    }  
}
```

Anexo B - Tabela das amostras utilizadas para apresentação dos resultados

Tabela 11 - Registro das 30 primeiras amostras e memória de cálculo dos sinais analisados

Amostra	Ordem de Leitura	Sinal Aplicado no ADC (V)	Sinal Aplicado no AMC1100 (V)	Sinal de tensão da fonte (V)
A	B	$C = A * 0,0008805664$	$D = C - 2,55$	$E = D * ((470000 * 2 + 470) / 470)$
2992	1	2,410546875	-0,139453125	-279,0457031
2991	2	2,409741211	-0,1402587891	-280,6578369
2989	3	2,408129883	-0,1418701172	-283,8821045
2988	4	2,407324219	-0,1426757813	-285,4942383
2987	5	2,406518555	-0,1434814453	-287,1063721
2986	6	2,405712891	-0,1442871094	-288,7185059
2983	7	2,403295898	-0,1467041016	-293,5549072
2985	8	2,404907227	-0,1450927734	-290,3306396
2983	9	2,403295898	-0,1467041016	-293,5549072
2982	10	2,402490234	-0,1475097656	-295,167041
2982	11	2,402490234	-0,1475097656	-295,167041
2981	12	2,40168457	-0,1483154297	-296,7791748
2980	13	2,400878906	-0,1491210938	-298,3913086
2980	14	2,400878906	-0,1491210938	-298,3913086
2979	15	2,400073242	-0,1499267578	-300,0034424
2978	16	2,399267578	-0,1507324219	-301,6155762
2978	17	2,399267578	-0,1507324219	-301,6155762
2977	18	2,398461914	-0,1515380859	-303,22771
2974	19	2,396044922	-0,1539550781	-308,0641113
2975	20	2,396850586	-0,1531494141	-306,4519775
2976	21	2,39765625	-0,15234375	-304,8398438
2975	22	2,396850586	-0,1531494141	-306,4519775
2975	23	2,396850586	-0,1531494141	-306,4519775
2975	24	2,396850586	-0,1531494141	-306,4519775
2973	25	2,395239258	-0,1547607422	-309,6762451
2974	26	2,396044922	-0,1539550781	-308,0641113
2974	27	2,396044922	-0,1539550781	-308,0641113
2973	28	2,395239258	-0,1547607422	-309,6762451
2973	29	2,395239258	-0,1547607422	-309,6762451
2973	30	2,395239258	-0,1547607422	-309,6762451

Fonte: Autores (2021).

O resultado de conversão de 10 bits é armazenado no bloco ADCH/ADCL (Registador de Dados do ADC), esse resultado é dado pela Equação 25.

$$ADC = \frac{V_{IN} \cdot 1024}{V_{REF}}$$

Equação 25 - Resultado de uma conversão simples no Arduino UNO

Em que V_{IN} é igual a tensão de entrada aplicada no pino selecionado e V_{REF} é a tensão de referência selecionada.

O bloco ADCSRA - *Control and Status Register* (Registrador de Estado e Controle) possui 8 bits que define as principais características ajustáveis nos parâmetros de conversão. A Figura 24 apresenta cada um dos bits que compõem o registrador.

Figura 24 - Composição do ADCSRA

Bit (0x7A)	7	6	5	4	3	2	1	0	
	ADEN	ADSC	ADATE	ADIF	ADIE	ADPS2	ADPS1	ADPS0	ADCSRA
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Fonte: Microchip Technologies (2018).

O bit mais significativo (ADEN) possui a função de habilitar o ADC, de forma que se for setado em 0 durante o processo, a conversão cessará. O bit ADSC possui a função de retornar ao nível zero quando o processo de conversão se encerra, quando ele é setado em 1 no primeiro processo de conversão. Os bits ADATE, ADIF E ADIE permitem manipular diferentes parâmetros que podem influenciar o término ou início do processo de conversão (MICROCHIP TECHNOLOGY, 2018).

A configuração dos níveis lógicos dos três bits menos significativos de ADCSRA manipulam a seleção do Prescaler ligado ao sistema de Clock de entrada para o ADC.

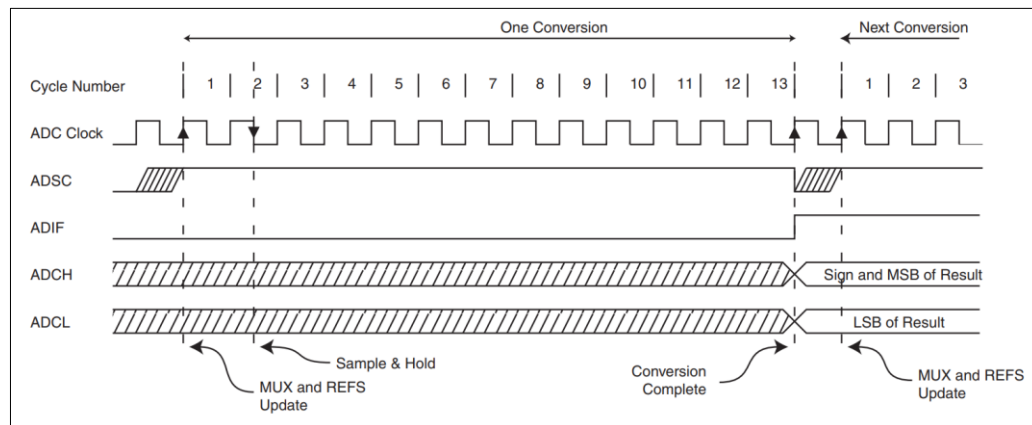
A Tabela 12 apresenta os valores possíveis para o fator de divisão.

Tabela 12 - Seleção do Prescaler do ADC

ADPS2	ADPS1	ADPS0	Fator de Divisão
0	0	0	2
0	0	1	2
0	1	0	4
0	1	1	8
1	0	0	16
1	0	1	32
1	1	0	64
1	1	1	128

Fonte: Microchip Technologies (2018).

O Clock do conversor AD possui um cristal de 16 MHz. Logo, a partir do ajuste do nível lógico dos bits ADSP2, ADSP1 e ADSP0, é possível regular a frequência do Clock. Esse fator é determinante para garantir uma alta resolução na conversão, porque está diretamente associado com a taxa de amostragem do ADC. A partir da análise da Figura 25, é possível constatar essa relação.

Figura 25 - Diagrama de níveis do processo de conversão simples

Fonte: Microchip Technologies (2018).

Observa-se na Figura 25 que para um processo de conversão simples do ADC ser realizado, são necessários 13 ciclos do Clock. Logo, a taxa de amostragem

será igual a frequência de Clock dividida pela quantidade de ciclos, conforme a Equação 26.

$$F_a = \frac{16 \times 10^6}{F_{dc} \cdot 13}$$

Equação 26 - Determinação da taxa de amostragem

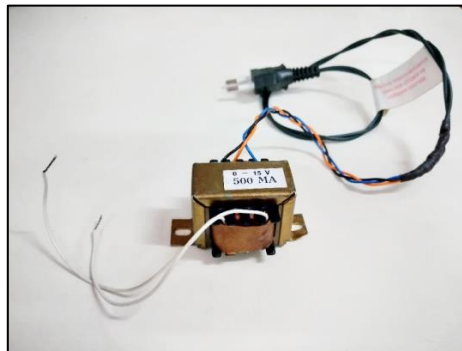
Em que F_a é a taxa de amostragem e F_{dc} corresponde ao fator de divisão definido pelos bits de ADCSRA.

- Dimensionamento do Circuito de Condicionamento Analógico

Um transformador de tensão (Figura 26) em conjunto do circuito divisor resistivo foi utilizado para reduzir o nível de tensão da rede de forma que não ultrapasse o valor de tensão de alimentação digital do Arduino (5 V).

A Figura 27 apresenta o circuito projetado. A partir da análise do circuito, é possível calcular a tensão V_{R2} sobre o resistor R2 a partir da regra do divisor de tensão com resistências, dada pela Equação 27.

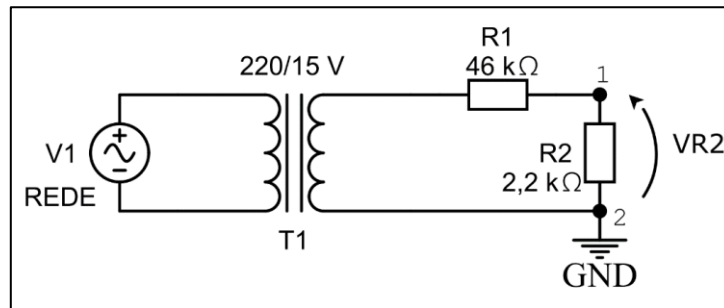
Figura 26 - Transformador de tensão 220/15 V



Fonte: Autores (2021).

$$V_{R2} = \frac{R2}{R2+R1} \cdot V_1$$

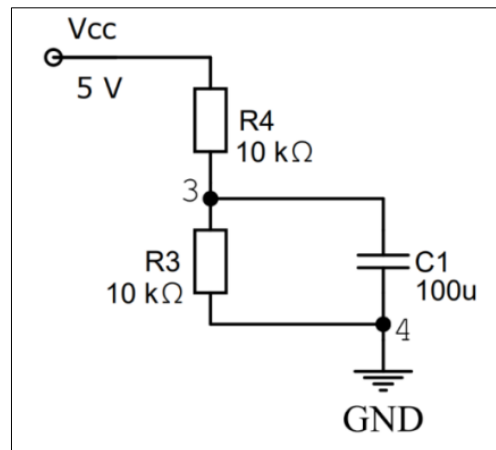
Equação 27 - Tensão de saída em função do divisor de tensão

Figura 27 - Circuito abaixador de tensão

Fonte: Autores (2021).

Aplicando os valores dos resistores e da tensão do secundário do transformador na Equação 27, determina-se o valor de V_{R2} aproximadamente igual a 0,68464 V. Logo, com o valor eficaz de tensão, é possível determinar os valores de amplitude do sinal alternado. Multiplicando este valor por $\sqrt{2}$, obtêm-se os valores de pico igual a $\pm 0,9682$ V. O que garante a primeira condição da amplitude do sinal para a entrada do ADC.

Outro circuito foi dimensionado, o qual permite deslocar o sinal de forma a compreender toda amplitude da onda no quadrante positivo do sinal, denominado Circuito DC Offset (Deslocamento por Corrente Contínua). A Figura 28 apresenta o circuito dimensionado para o protótipo.

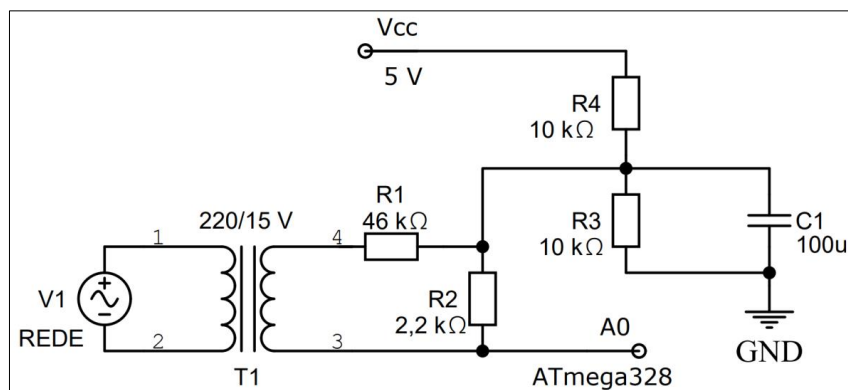
Figura 28 - Circuito DC offset

Fonte: Autores (2021).

O mesmo cálculo pode ser realizado para determinar a tensão sobre o resistor R3. Tendo em vista que os resistores são iguais, a tensão sobre os resistores será metade de V_{cc} , igual a 2,5 V, ou seja, com o deslocamento, os valores de pico resultantes serão iguais a 3,4682 V e 1,5317 V.

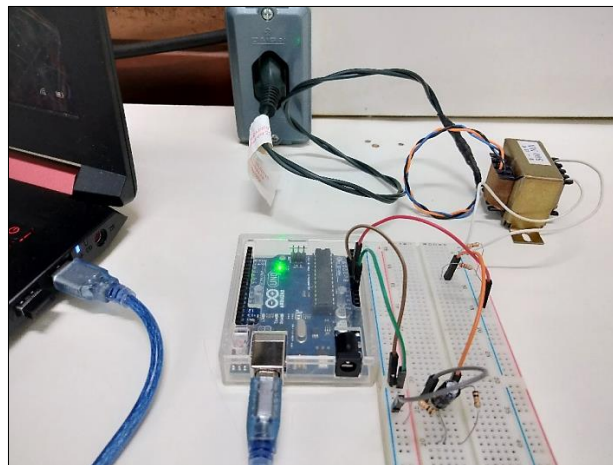
A combinação dos dois circuitos (Figura 29), através da conexão entre os nós 1 e 3, resulta em um circuito de condicionamento analógico que atende às condições do conversor analógico-digital. Logo, através de um ramal, é possível conectar a entrada do ADC (A0) ao nó 2, permitindo que ele converta o sinal alternado. A Figura 30 apresenta o protótipo montado já em operação.

Figura 29 - Circuito de condicionamento analógico da primeira versão do protótipo



Fonte: Autores (2021).

Figura 30 - Primeira versão do protótipo



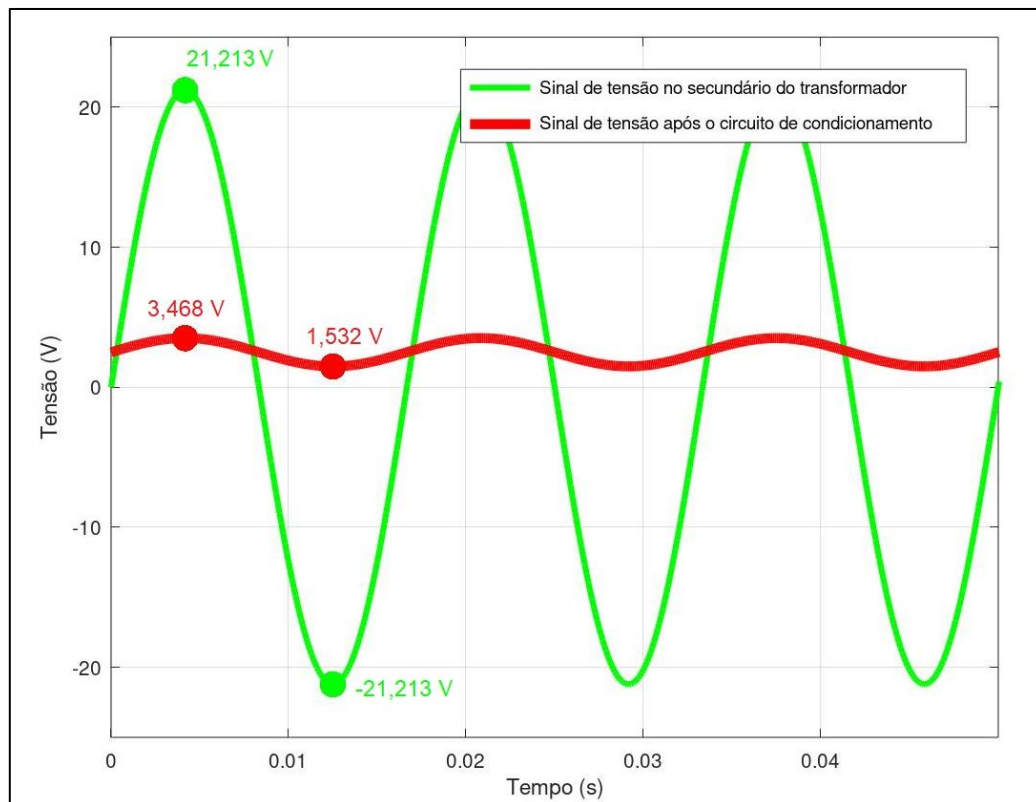
Fonte: Autores (2021).

- Operação do Circuito

A Figura 31 apresenta um gráfico das formas de onda do sinal de tensão no secundário do transformador e do sinal de tensão, o qual é medido pela entrada do conversor analógico-digital. Através da Equação 25, é possível prever o valor apresentado no Monitor Serial do Arduino, aplicando os valores de pico a V_{IN} e o valor de referência V_{REF} que foi ajustado ao valor padrão de V_{CC} do Arduino (5 V). Observa-se que as amostras lidas são compreendidas entre 710,295 e 313,705.

No entanto, deve-se destacar que os valores do sinal de tensão são quantizados e que os valores de amostras assumirão valores de acordo com os níveis de quantização. Através da utilização da Equação 18, é possível determinar que a resolução da conversão é aproximadamente igual a 4,883 mV.

Figura 31 - Gráfico de comparação dos sinais de tensão

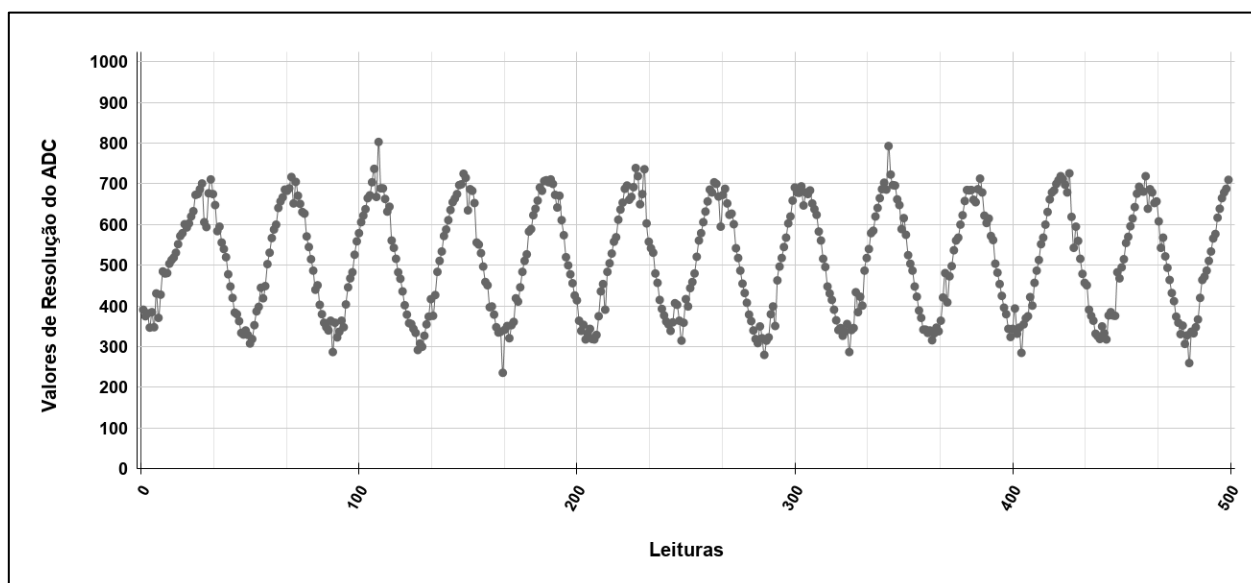


Fonte: Autores (2021).

- Medições e Análise da Operação do Circuito

O gráfico apresentado na Figura 32 foi construído utilizando uma ferramenta gráfica associada a uma planilha eletrônica, ele demonstra as amostras obtidas em função da ordem de leitura do ADC.

Figura 32 - Reconstituição do sinal através das 500 amostras



Fonte: Autores (2021).

Observa-se, no gráfico da Figura 32 que as amostras registradas pelo Monitor Serial produziram uma aproximação da forma de onda do sinal de tensão lido na entrada do ADC. É possível constatar que os valores medidos se encontram em sua maioria dentro dos limites calculados (entre 310,705 e 710,295).

No entanto, para obter as análises dos parâmetros de qualidade de energia elétrica, é necessária uma reconstrução mais precisa do sinal original. É possível constatar que a taxa de amostragem do conversor atende os critérios de Nyquist, através da Equação 26. Ao aplicar o fator de divisão do Prescaler ajustado no algoritmo, igual a 16, obtém-se uma taxa de amostragem aproximadamente igual a 76.923,08 amostras por segundo (Hz), o que assegura plenamente as condições de Nyquist, tendo em vista que o sinal analisado possui a frequência da rede (60 Hz).

Portanto, pode-se concluir que o método de obtenção das amostras, através da leitura em tempo real da comunicação serial, faz com que algumas amostras sejam perdidas durante o processo. O tratamento posterior dos dados registrados seria prejudicado com a quantidade reduzida de amostras. Consequentemente, é indispensável a investigação e aplicação de um método alternativo para obter as amostras lidas.