

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ITAJAÍ
DEPARTAMENTO DE ELETROELETRÔNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Marcelo Antonio Rodrigues Filho

**DESENVOLVIMENTO DE UM ANALISADOR TRIFÁSICO DE ENERGIA
ELÉTRICA DE BAIXO CUSTO EM PLATAFORMA ARDUINO**

Itajaí

2022

Marcelo Antonio Rodrigues Filho

**DESENVOLVIMENTO DE UM ANALISADOR TRIFÁSICO DE ENERGIA
ELÉTRICA DE BAIXO CUSTO EM PLATAFORMA ARDUINO**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Saimon Miranda Fagundes

Itajaí

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca do IFSC.

Rodrigues Filho, Marcelo Antonio

Desenvolvimento de um analisador trifásico de energia elétrica de baixo custo em plataforma Arduino / Marcelo Antonio Rodrigues Filho ; orientador, Saimon Miranda Fagundes, 2022.

68 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Itajaí, Graduação em Engenharia Elétrica , Itajaí, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica . 2. Qualidade de energia. 3. Instrumentação eletrônica. 4. Analisador de energia. 5. Engenharia elétrica. I. Miranda Fagundes, Saimon. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica . III. Título.

DESENVOLVIMENTO DE UM ANALISADOR TRIFÁSICO DE ENERGIA ELÉTRICA DE BAIXO CUSTO EM PLATAFORMA ARDUINO

MARCELO ANTONIO RODRIGUES FILHO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do curso de engenharia elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Itajaí, 08 de setembro de 2022

BANCA EXAMINADORA:

Dr. Saimon Miranda Fagundes

Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC

Dr. Daniel dos Santos Matos

Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC

M.Sc. João Paulo Camelo Cunha

Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC

Este trabalho é dedicado a Deus, aos meus professores e aos meus queridos pais por nunca terem medido esforços para me proporcionar um ensino de qualidade durante todo o meu período escolar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter permitido que eu tivesse saúde e determinação para não desanimar durante os anos de estudos fazendo com que meus objetivos fossem alcançados. Aos meus pais, Marcelo e Zélia, e irmão, João, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho. Aos amigos de vida e os que fiz durante meu período de estágio na empresa TK Elevadores, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado. Aos professores, por todos os conselhos, pela ajuda e pela paciência com a qual guiaram o meu aprendizado, em especial ao meu professor orientador, Saimon, que guiou este trabalho de forma a que ele chegasse à excelência. Aos meus colegas de turma, por compartilharem comigo tantos momentos de descobertas e aprendizado e por todo o companheirismo ao longo deste percurso. Ao técnico do laboratório de projetos, Bernardo, que em tantos momentos me acompanhou, incentivou e passou seus conhecimentos.

Eu não falhei. Apenas descobri 10 mil maneiras que não funcionam.

(THOMAS EDISON, 1910)

RESUMO

Em indústrias, grandes consumidoras de energia, o grande número de cargas indutivas devido a quantidade de motores, máquinas pesadas, equipamentos eletrônicos, entre outros, faz com que surjam problemas de baixo fator de potência, desbalanço de cargas e variações de tensão entre as fases. Sabendo disso, um grande problema pode ser criado caso estas instalações não se preocupem com a qualidade de energia elétrica, no que tange o controle do fator de potência e o desbalanço de cargas, pois isso pode prejudicar o sistema de distribuição, transmissão e geração elétrica, além de gerar multas aplicadas pela concessionária de energia. O controle destes fatores é necessário para que se evite os problemas citados, pensando nisso, este trabalho objetivou construir um analisador trifásico de qualidade de energia elétrica de baixo custo capaz de realizar medições de tensão, corrente, fator de potência e potência aparente, ativa e reativa. Para este feito realizou-se um estudo teórico acerca das definições de grandezas elétricas e as normativas aplicáveis. Para provar o seu funcionamento foram realizadas medições das grandezas citadas para cada fase em várias cargas trifásicas e os resultados comparados aos valores de um analisador de energia comercial tido como referência. No melhor cenário, o analisador construído apresentou percentagens de erro inferiores a 2,92%, onde foi possível atestar seu bom funcionamento. Em outros testes, com cargas diferentes foi obtido um erro máximo de leitura de 16,59%, onde, a partir deste valor, foram encontrados problemas de desajuste e erro na aquisição dos dados de leitura de corrente. Estas percentagens de erro não invalidaram o analisador construído, já que os problemas que levaram a estes valores podem ser resolvidos em trabalhos futuros.

Palavras-chave: Análise de energia. Analisador trifásico. Fator de potência. Potência ativa. Potência reativa.

ABSTRACT

In industries, large energy consumers, the large number of inductive loads due to the amount of motors, heavy machinery, electronic equipment, among others, causes low power factor problems, unbalanced loads, and voltage variations between phases. Knowing this, a big problem can be created if these facilities are not concerned with the quality of electrical energy, regarding the control of the power factor and the unbalance of loads, because this can harm the distribution system, transmission and generation, besides generating fines applied by the energy concessionaire. The control of these factors is necessary to avoid the problems mentioned above. With this in mind, this work aimed to build a low cost three-phase power quality analyzer capable of measuring voltage, current, power factor, and apparent, active, and reactive power. To this end, a theoretical study was conducted on the definitions of electrical quantities and the applicable standards. In order to prove its operation, measurements of the quantities mentioned above were taken for each phase in several three-phase loads and the results were compared to the values of a commercial power analyzer taken as a reference. In the best case scenario, the analyzer built presented error percentages of less than 2,92%, where its good functioning could be attested. In other tests, with different loads, a maximum reading error of 16,59% was obtained, where, from this value, calibration problems and errors in the acquisition of current reading data were found. These error percentages did not invalidate the built analyzer, as the problems that led to these values can be solved in future work.

Keywords: Power analysis. Three-phase analyzer. Power factor. Active power. Reactive power.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ligação do tipo estrela	18
Figura 2 – Ligação do tipo triângulo	18
Figura 3 – Triângulo de potências.	19
Figura 4 – TC SCT-013 50A	27
Figura 5 – Sensor de tensão CA ZMPT101B	28
Figura 6 – LCD 20x4 com módulo I2C	29
Figura 7 – Conversor de tensão CC-CC <i>Step-Down</i> LM2596	30
Figura 8 – Fonte de alimentação 12V.....	31
Figura 9 – Arduino Nano.....	32
Figura 10 – Relação das portas no Arduino Nano.....	32
Figura 11 – Módulo cartão SD	33
Figura 12 – Módulo RTC DS1307	34
Figura 13 – Circuito de <i>offset</i> para a aquisição dos dados de corrente.....	35
Figura 14 – Sensor de tensão desajustado	36
Figura 15 – Sensor de tensão ajustado	36
Figura 16 – Módulo I2C	37
Figura 17 – Circuito projetado para o módulo cartão SD.....	39
Figura 18 – Projeto da PCI no Proteus	39
Figura 19 – Parte de baixo da PCI.....	40
Figura 20 – Parte de cima da PCI.....	40
Figura 21 – Analisador De Energia Trifásico Fluke 1735.....	42
Figura 22 – Frente do analisador construído	44
Figura 23 – Parte superior do analisador construído	45
Figura 24 – Parte interna do analisador construído	45
Figura 25 – Plaqueta do motor VOGES de 1 cv.....	47
Figura 26 – Plaqueta do motor WEG de 3 cv.....	47
Figura 27 – Motor VOGES acoplado ao gerador MOTRON.....	48
Figura 28 – Motor WEG conectado ao Variac	48
Figura 29 – Plaqueta do motor VOGES de 5 cv.....	50
Figura 30 – Motor VOGES de 5 cv ligado ao circuito.....	51
Figura 31 – Resistor de 64 Ω e 800 W	53
Figura 32 – Resistor equivalente de 40 Ω e 1500 W	53

Figura 33 – Ligação em estrela dos resistores	53
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 230 kV	38
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 230 kV	23
Tabela 2 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV	23
Tabela 3 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 2,3 kV e inferior a 69 kV	23
Tabela 4 – Pontos de conexão em Tensão Nominal inferior a 2,3 kV (220/127)	23
Tabela 5 – Pontos de conexão em Tensão Nominal inferior a 2,3 kV (380/220)	24
Tabela 6 – Tabela de gastos.....	46
Tabela 7 – Valores medidos no primeiro teste com o analisador construído	49
Tabela 8 – Valores medidos no primeiro teste com o analisador Fluke 1735.....	49
Tabela 9 – Erro de medição do analisador construído para o primeiro teste	49
Tabela 10 – Valores medidos no segundo teste com o analisador construído	51
Tabela 11 – Valores medidos no segundo teste com o analisador Fluke 1735	51
Tabela 12 – Erro de medição do analisador construído para o segundo teste	52
Tabela 13 – Valores medidos no terceiro teste com o analisador construído.....	54
Tabela 14 – Valores medidos no terceiro teste com o analisador Fluke 1735	54
Tabela 15 – Erro de medição do analisador construído para o terceiro teste	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CELESC	Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A
FD95%	Fator de Desequilíbrio de Tensão
FP	Fator de potência
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
LabMAQ	Laboratório de Máquinas Elétricas
LCD	Display de cristal líquido
PCI	Placa de circuito impresso
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade da energia elétrica
SDAT	Sistema de Distribuição de Alta Tensão
SDMT	Sistema de Distribuição de Média Tensão
SI	Sistema Internacional
TC	Transformador de corrente
TP	Transformador de potência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo Geral.....	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	DEFINIÇÕES	17
2.1.1	Tensão de fase e de linha	17
2.1.2	Corrente de fase e de linha.....	19
2.1.3	Fator de potência	19
2.1.4	Potências aparente, ativa e reativa.....	20
2.2	NORMATIVAS VIGENTES	22
2.3	TRABALHOS REALIZADOS	25
3	DESENVOLVIMENTO.....	27
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	27
3.1.1	Sensor de corrente TC SCT-013.....	27
3.1.2	Sensor de tensão CA ZMPT101B.....	28
3.1.3	LCD 20x4 com módulo I2C	28
3.1.4	Conversor de tensão CC-CC step down LM2596.....	29
3.1.5	Fonte de alimentação 12V	30
3.1.6	Arduino Nano.....	31
3.1.7	Módulo cartão SD.....	33
3.1.8	Módulo RTC DS1307	33
3.2	CIRCUITO PROJETADO.....	34
3.2.1	Aquisição de dados de corrente	34

3.2.2	Aquisição de dados de tensão	35
3.2.3	Endereçamento dos LCDs 20x4.....	37
3.2.4	Alimentação do circuito	38
3.2.5	Circuito do módulo cartão SD	38
3.3	PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	39
3.4	CÓDIGO IMPLEMENTADO	41
3.5	MÉTODO DE ANÁLISE DE RESULTADOS	41
3.5.1	Analisador Fluke 1735.....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
4.1	PRIMEIRA CONFIGURAÇÃO DE TESTE	46
4.2	SEGUNDA CONFIGURAÇÃO DE TESTE	50
4.3	TERCEIRA CONFIGURAÇÃO DE TESTE.....	52
4.4	TESTE DESCONSIDERADO	55
4.5	SALVAMENTO DOS DADOS ADQUIRIDOS	56
5	CONCLUSÃO.....	57
	REFERÊNCIAS.....	59
	APÊNDICE A – Código implementado na IDE do Arduino.....	62

1 INTRODUÇÃO

Quando falamos em qualidade da energia elétrica (QEE) estamos nos referindo a um assunto que aborda uma grande variedade de nomenclaturas e áreas do sistema de energia elétrica, desde geração, transmissão, distribuição e consumo. No caso do consumo, é possível observar alguns problemas ocasionados pela baixa QEE, dentre eles podemos citar o mau funcionamento de equipamentos e problemas em comunicação, telefonia, dados, etc.. O termo “baixa qualidade de energia elétrica” é utilizado em sua essência para caracterizar qualquer variação e/ou deformação na forma de onda de grandezas elétricas, seja em amplitude, frequência etc., em condições de regime permanente ou transitório, o que pode ocasionar falhas no funcionamento dos equipamentos elétricos (MARTINHO, 2009).

A alteração do padrão de energia elétrica fornecida, ou seja, a variação das grandezas elétricas geradas percebidas pelo consumidor, seja ela na senoide de frequência constante ou na amplitude, está diretamente ligada à QEE. Tais variações podem ser geradas por ruídos provenientes de equipamentos, interrupções de fornecimento e presença de outras frequências diferentes da fundamental, as chamadas harmônicas.

Na análise de controle de gastos com energia elétrica é imprescindível levar em consideração a QEE, pois existem alguns fatores de qualidade que têm grande influência sobre seu custo, dentre eles podemos citar principalmente o fator de potência (FP), a presença de frequências harmônicas e o desbalanço de cargas entre as fases.

Em indústrias, grandes consumidoras de energia, o grande número de cargas indutivas devido a quantidade de motores, máquinas pesadas, equipamentos eletrônicos, entre outros, faz com que o problema de baixo FP, presença de harmônicas e desbalanço de cargas entre as fases se agrave. Sabendo disso, um grande problema pode ser criado caso estas instalações não se preocupem com a QEE, no que tange o controle do FP e o desbalanço de cargas, pois isso pode prejudicar o sistema de distribuição, transmissão e geração elétrica (SILVA, 2017).

Existem no mercado alguns dispositivos capazes de medir e analisar os parâmetros de QEE supracitados, mas estes equipamentos apresentam custos elevados (SANTOS, 2018). Tendo em vista os pontos elencados, nesse trabalho, se propõe o projeto e a construção de um analisador de QEE de baixo custo, em plataforma aberta, capaz de medir algumas grandezas elétricas fundamentais como corrente e tensão alternadas, FP e potências aparente, ativa e reativa.

1.1 JUSTIFICATIVA

O baixo FP de uma instalação, causado pela existência de cargas indutivas no circuito, pode acarretar problemas como o aumento na intensidade da corrente no circuito, levando a uma perda adicional por calor na fiação e conseqüentemente a queda na tensão; o aumento de forma geométrica das perdas na fiação levando ao aquecimento dos condutores por efeito Joule; e sobrecargas perigosas levando a impossibilidade de se usar uma rede em sua plena capacidade (BRAGA, 20--). A concessionária de energia do estado de Santa Catarina, Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A (CELESC), determina que o valor mínimo aceitável do FP é de 0,92, de acordo com a norma DPSC/NT-02, não sendo cumprida esta norma o consumidor fica sujeito a receber multa aplicada pela concessionária.

Tendo em vista todos os problemas supracitados, que podem ser acarretados pelo baixo FP, é de suma importância que seja realizada a correta medição e análise deste fator. Existem no mercado alguns equipamentos capazes de obter estas análises, porém grande parte possuem um alto valor. Portanto se faz necessária a construção de um analisador de QEE capaz de obter dados referentes aos problemas abordados anteriormente, com base em Arduino, o que o torna mais acessível financeiramente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Construir um analisador trifásico de qualidade de energia elétrica de baixo custo capaz de realizar medições de tensão, corrente, fator de potência e potência aparente, ativa e reativa.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar um estudo teórico acerca das definições de grandezas elétricas e as normativas aplicáveis.
- Realizar medições de fator de potência, tensão, corrente e potência aparente, ativa e reativa de cada fase em um equipamento trifásico com o auxílio do analisador trifásico de qualidade de energia elétrica construído.

- Verificar a partir das medições realizadas o correto funcionamento do equipamento construído.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o projeto e construção do analisador foram realizadas pesquisas referentes a definições de grandezas elétricas, normativas referentes a consumo e fiscalização de energia elétrica e uma revisão nos projetos de analisadores já construídos na área.

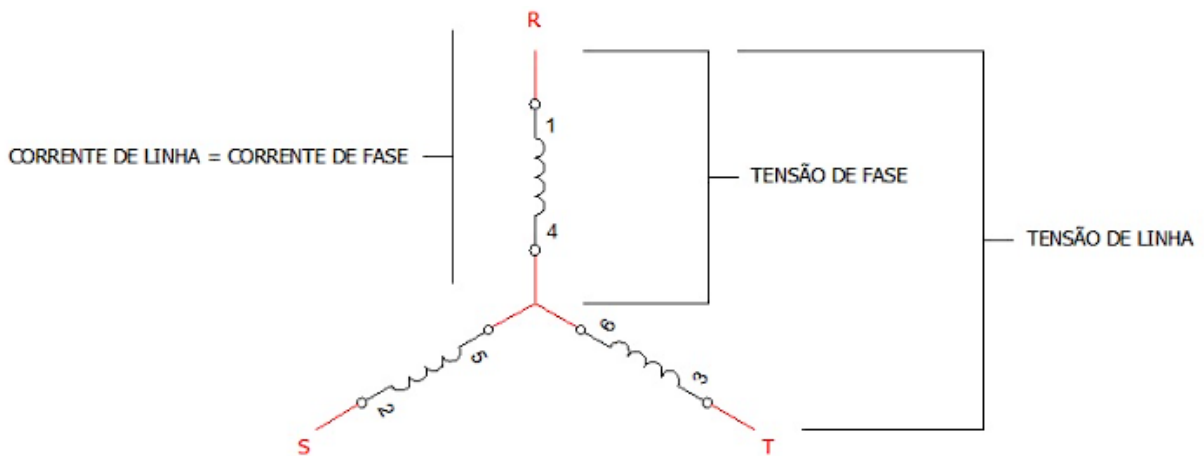
2.1 DEFINIÇÕES

Para um bom entendimento do projeto se fez necessário rever algumas definições importantes de grandezas elétricas, grandezas estas que serão medidas e analisadas com o equipamento construído.

2.1.1 Tensão de fase e de linha

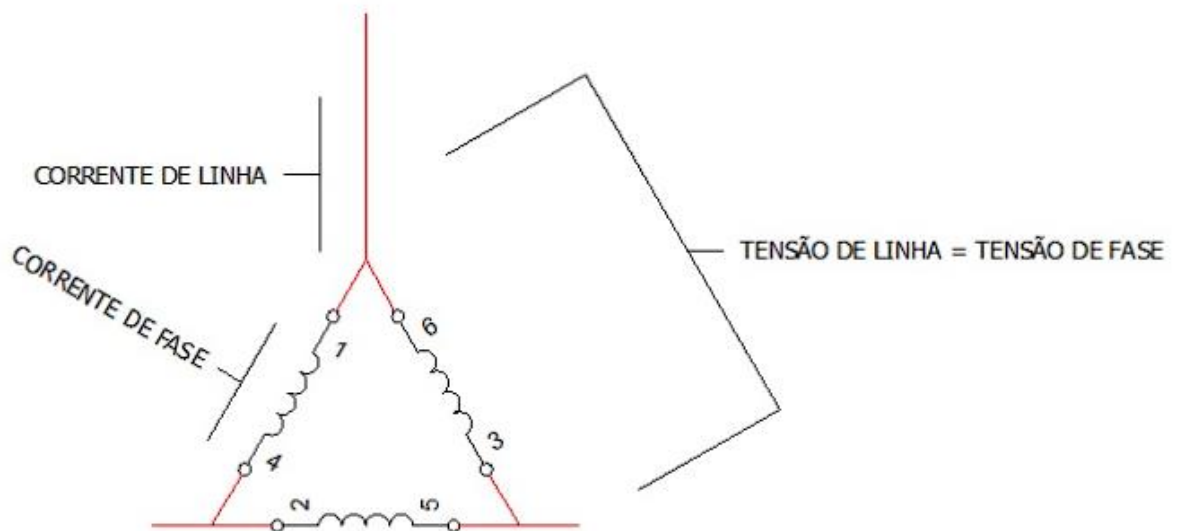
Um sistema trifásico permite até dois níveis de tensão, mas não em qualquer situação, pois depende de onde serão obtidos estes níveis, ou seja, qual o referencial será utilizado. Em sistemas trifásicos cujo a ligação é feita em estrela (figura 1) é possível obter dois níveis de tensão, mas quando a ligação é em triângulo (figura 2) só é possível obter um nível de tensão. Apesar dessas diferenças, os conceitos de tensão de fase e tensão de linha não mudam para cada tipo de ligação.

Figura 1 – Ligação do tipo estrela



Fonte: Site Aprendendo Elétrica (2019)

Figura 2 – Ligação do tipo triângulo



Fonte: Site Aprendendo Elétrica (2019)

É correto afirmar que a tensão de linha é a tensão medida em uma fase com relação a tensão de outra fase, ou seja, é a diferença de potencial entre duas fases. Desta forma a tensão de linha também é conhecida como tensão fase-fase (MATTEDE, [201-]). Em uma ligação do tipo estrela a tensão de linha é sempre $\sqrt{3}$ vezes maior que a de fase.

De acordo com Mattede ([201-]), a tensão de fase é a tensão medida entre uma das fases em relação ao neutro, ou seja, é a diferença de potencial entre fase e neutro. Vale destacar que nem sempre um circuito trifásico terá o ponto de neutro, como no caso dos circuitos cujo a

ligação é em triângulo. Neste caso a tensão de fase e tensão de linha são a mesma, ou seja, possuem o mesmo valor.

2.1.2 Corrente de fase e de linha

A corrente de fase em um sistema trifásico é a corrente medida em uma das cargas do circuito. Já a corrente de linha é a corrente medida em uma das fases do circuito.

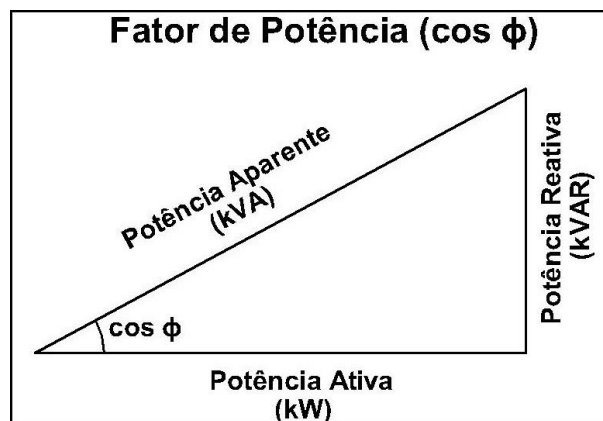
Para uma ligação trifásica do tipo estrela a corrente de fase tem o mesmo valor que a corrente de linha, pois há somente uma carga por fase. Já para a ligação trifásica do tipo triângulo a corrente de linha difere da corrente de fase, sendo que a corrente de linha é sempre $\sqrt{3}$ vezes maior que a de fase.

2.1.3 Fator de potência

O FP de uma instalação é um parâmetro adimensional que indica como está sendo aproveitada a energia elétrica da unidade consumidora ou como está o balanço entre energia ativa, a qual realiza efetivamente trabalho, e energia reativa, necessária apenas para a magnetização de motores (MAMEDE FILHO, 2017).

Segundo ANEEL (2010), FP é “a razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétricas ativa e reativa, consumidas num mesmo período especificado” e pode variar entre zero e um, como pode ser observado na figura 3 e na equação 1.

Figura 3 – Triângulo de potências



Fonte: Site Sultech (2021)

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} = \frac{P}{S} = \cos\varphi \quad (1)$$

em que:

P = potência ativa;

Q = potência reativa;

S = potência aparente;

$\cos\varphi$ = cosseno do ângulo de defasagem entre tensão e corrente.

Além de evitar o pagamento de multas, existem outros motivos pelos quais se deseja controlar o FP, entre eles:

- i. Liberação de potência instalada em transformação;
- ii. Liberação da capacidade de carga em circuitos terminais e de distribuição;
- iii. Redução de perdas;
- iv. Melhoria do nível de tensão.

O controle do FP pode ser feito por um controlador automático de modo autônomo, este é um dispositivo elétrico que opera dentro de um limite de atuação desejado realizando o chaveamento de bancos capacitivos em estágios. Com a inserção de bancos capacitivos, certo valor de potência reativa é injetada na instalação, compensando a potência reativa solicitada por motores (SANTOS, 2018).

2.1.4 Potências aparente, ativa e reativa

A carga de um circuito elétrico é o componente responsável por fazer consumo de corrente elétrica, sua capacidade de transformar corrente em trabalho e chamada de potência elétrica, por exemplo um resistor que faz o consumo de energia elétrica e produz calor, assim o resistor transformou a energia elétrica em energia térmica (denominado como efeito Joule). Existem diversos tipos de cargas diferentes, elas consomem energia e o produto deste consumo pode ser emissão de luz, calor, movimento, entre outros (SILVA, 2017).

Vale ressaltar que na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma (LAVOISIER, apud BRAGA, 2000, p. 46), então é correto dizer que a corrente que entra em

um circuito é a mesma que sai dele, ou seja, a potência na entrada é igual a soma de todas as potências de um circuito.

Para o entendimento da potência aparente, deve-se primeiro explicitar a expressão para o cálculo da potência ativa, que é dada pela equação 2, onde θ_v é o ângulo referente a tensão, enquanto que θ_i é referente a corrente (FERRAZ; FERRAZ; SANTOS, 2018). Na equação 3 pode-se observar a potência ativa para um sistema trifásico simétrico, neste caso os valores de tensão e corrente são os de fase. Sua unidade no sistema internacional (SI) é o *watt* (W).

$$P_{1\varphi} = V_{RMS} * I_{RMS} * \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (2)$$

$$P_{3\varphi} = 3 * V_{RMS} * I_{RMS} * \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (3)$$

Já a potência aparente é definida como o produto dos valores eficazes da tensão e da corrente, sendo a unidade no SI, o *volt – ampère* (VA). Na equação 4, pode-se observar a expressão referente a potência aparente para uma fase e na equação 5 para um sistema trifásico simétrico, sendo que para este cálculo é necessário utilizar os valores da tensão e corrente de fase.

$$S_{1\varphi} = V_{RMS} * I_{RMS} \quad (4)$$

$$S_{3\varphi} = 3 * V_{RMS} * I_{RMS} \quad (5)$$

A potência reativa se faz presente quando características indutivas e/ou capacitivas existem em um determinado circuito, essa potência é devolvida ao circuito, logo não há transformação de energia por parte dos indutores ou capacitores.

Em âmbitos de tensão e corrente o capacitor proporciona um avanço temporal da corrente em relação a tensão, ou seja, adianta a corrente em relação a tensão. Um indutor presente em um circuito elétrico alternado é capaz de defasar a corrente em relação a tensão. Em circuitos predominantemente indutivos a corrente se atrasa em relação a tensão.

Nestes componentes, chamados de reativos, percebe-se que ambos têm características próprias de trocando energia com sua fonte com certa regularidade, ou seja, em alguns períodos consumindo energia e em outros devolvendo essa energia com a mesma magnitude, essa energia

transitando é o que chamamos de potência reativa. Ela pode ser calculada em sistemas monofásicos conforme a equação 6 e em sistemas trifásicos simétricos conforme a equação 7, neste caso são utilizados os valores da tensão e corrente de fase. Sua unidade no SI é o *volt – ampère reativo (VAr)*. Esta potência não é interessante para o sistema elétrico, pois consome corrente sem a realização de trabalho (SILVA, 2017).

$$Q_{1\phi} = V_{RMS} * I_{RMS} * \text{sen} (\theta_v - \theta_i) \quad (6)$$

$$Q_{3\phi} = 3 * V_{RMS} * I_{RMS} * \text{sen} (\theta_v - \theta_i) \quad (7)$$

2.2 NORMATIVAS VIGENTES

Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) é um conjunto de documentos elaborados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que regulamentam as atividades da distribuição de energia elétrica no Brasil. Ele é importante, pois normatiza ações de planejamento para expansão dos sistemas de distribuição e estabelece regras para os sistemas de medição.

Para regular os padrões de qualidade exigidos das concessionárias e manter o setor elétrico em constante evolução, o módulo 8 do PRODIST estabelece os procedimentos relativos à QEE, considerando aspectos como produto, serviço e atendimento ao consumidor. Este módulo estabelece valores bem definidos para todos os parâmetros relativos ao fornecimento ou consumo da energia elétrica, permitindo que a QEE deixe de ser apenas um conceito para se transformar em objetivo mensurável (FLUKE ACADEMY, 2019).

O módulo 8 do PRODIST traz definições sobre as variações de tensão em regime permanente, onde segundo a ANEEL (2021) conformidade de tensão em regime permanente refere-se à comparação do valor de tensão especificado como adequado, precário ou crítico em relação aos valores obtidos por medição apropriada, no ponto de conexão.

As tabelas 1, 2, 3, 4 e 5 trazem os níveis aceitáveis de tensão no ponto de conexão entre consumidor e distribuidora de energia elétrica, em TL lê-se faixa de variação da tensão de leitura e em TR lê-se tensão de referência, ou seja, aquela que foi contratada.

Tabela 1 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 230 kV

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,95TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,93TR \leq TL \leq 0,95TR$
Crítica	$TL < 0,93TR$ ou $TL > 1,07TR$

Fonte: Módulo 8 do PRODIST

Tabela 2 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,95TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL \leq 0,95TR$ ou $1,05TR < TL < 1,07TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,07TR$

Fonte: Módulo 8 do PRODIST

Tabela 3 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 2,3 kV e inferior a 69 kV

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL \leq 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Fonte: Módulo 8 do PRODIST

Tabela 4 - Pontos de conexão em Tensão Nominal inferior a 2,3 kV (220/127)

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL \leq 202$ ou $231 < TL \leq 233) /$ $(110 \leq TL < 117$ ou $133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191$ ou $TL > 233) /$ $(TL < 110$ ou $TL > 135)$

Fonte: Módulo 8 do PRODIST

Tabela 5 - Pontos de conexão em Tensão Nominal inferior a 2,3 kV (380/220)

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399) / (202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL \leq 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403) /$ $(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403) /$ $(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: Módulo 8 do PRODIST

O módulo 8 do PRODIST define o desequilíbrio de tensão, o documento traz que este é o fenômeno é caracterizado por qualquer diferença verificada na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase ou nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico. Para categorizar o nível de desequilíbrio de tensão de um sistema, o módulo 8 do PRODIST faz uso do Fator de Desequilíbrio de Tensão (FD95%), este fator define limites que correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição, para consumidores alimentados com tensão nominal menor que $2,3kV$ o valor máximo de FD95% é de 3%, para consumidores alimentados em tensão nominal entre $2,3kV$ e $230kV$ o limite cai para 2%. Com as medidas no analisador de energia elétrica a ser construído, torna-se possível fazer a análise do desequilíbrio de tensão de um circuito trifásico.

Segundo a ANEEL (2021), no caso de unidades consumidoras atendidas pelo Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT) e pelo Sistema de Distribuição de Alta Tensão (SDAT) e nas conexões entre distribuidoras, o controle do FP deve ser efetuado por medição permanente e obrigatória.

As unidades consumidoras de energia são classificadas em dois grupos: A e B. O grupo A é composto por aqueles que recebem energia em tensão igual ou superior a $2,3 kV$ ou são atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, são caracterizadas por terem consumo e demanda faturável. O grupo A é subdividido em seis subgrupos e neles geralmente se enquadram indústrias e estabelecimentos comerciais de médio ou grande porte. O grupo B é caracterizado por unidades consumidoras atendidas em tensão inferior a $2,3 kV$, sua tarifação é aplicada apenas ao consumo (TELECO, 2022).

Quanto os limites aceitáveis do FP, o Módulo 8 do PRODIST diz o seguinte:

Para unidade consumidora do Grupo A, ou ponto de conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo, ou 1,00 e 0,92 capacitivo, de acordo com as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica. (ANEEL, 2021, p.8).

A ANEEL (2021) no módulo 8 do documento PRODIST define que o valor do FP deve ser calculado conforme os valores registrados das potências ativa e reativa do circuito, de acordo com a equação 1. De acordo com a citação feita anteriormente, o valor do FP deve estar entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo, isto apenas para os consumidores do Grupo A, os demais não necessitam do controle deste fator. Com um analisador de energia elétrica é possível adquirir o valor do FP para cada fase e utilizar estes dados para fazer o seu controle utilizando banco de capacitores, no caso de FP indutivo.

2.3 TRABALHOS REALIZADOS

Diversos artigos, relatórios e projetos já foram realizados acerca do tema abordado neste trabalho. Antes de projetar o equipamento foi necessário revisar os trabalhos já feitos para que fosse possível projetar um equipamento eficiente, observando as formas de construção, coleta e análise de dados de outros autores.

Ferraz, Ferraz e Santos (2018) desenvolveram um analisador de energia em plataforma aberta, capaz de realizar medições de tensão alternada de 127 V ou de 220 V e corrente alternada de até 100 A em sistema monofásico. Este dispositivo tem capacidade de armazenar os dados e visualizá-los através de um display de cristal líquido (LCD) com erros inferiores a 2,4% quando comparados com os medidos com o multímetro. Eles utilizaram um sensor de corrente SCT-013 de 100 A e um sensor de tensão comercial capaz de realizar medições de apenas 127 V a 220 V, sendo necessário dividir o código implementado em duas partes para ambas as tensões.

Santos (2018) projetou e construiu um protótipo de um equipamento de baixo custo responsável pelo controle de FP, aliado ao controle da demanda. Este projeto atua por meio de sensores de tensão e corrente, relés eletromecânicos e um microcontrolador ATmega2560, que faz parte da plataforma Arduino Mega 2560. Na faixa operacional do controlador, o erro relativo apresentado nas medições de FP foi inferior a 2% e para a potência ativa menor que 6%. Ele fez uso do sensor de corrente SCT-013-000, que possui relação de transformação de corrente de 100 A:50mA, ou seja, possui saída de sinal em corrente, necessitando do uso de

um resistor de carga para realizar a leitura do sinal. Para a aquisição dos valores de tensão ele projetou um circuito com um transformador abaixador de tensão de 220 V para 9 V alternados, um divisor de tensão para atenuar o sinal e outro divisor de tensão para dar um *offset* de 2,5 V no sinal, possibilitando a leitura pelo microcontrolador, e na saída inseriu um capacitor para atenuar as interferências de outras frequências.

Outro trabalho que deve ser comentado foi elaborado por Lordello (2018). Ele implementou um controlador do FP utilizando o microcontrolador Atmega328 que visou manter o FP dentro de limites aceitáveis. Este dispositivo é capaz de adquirir os sinais de tensão e corrente de uma fase, calcular o FP a partir de um conjunto de amostras e atuar sobre um banco de capacitores. Para a obtenção do sinal de tensão, ele projetou um circuito capaz de detectar o início da curva de tensão e para isso foi utilizado o CI 4N25, que é um acoplador óptico. Já para a obtenção do sinal da curva de corrente o autor utilizou um transformador de corrente (TC) em conjunto com um circuito projetado por ele, onde o componente principal é um amplificador operacional LM358, assim ele consegue também detectar o início da curva de corrente. Tendo a diferença de tempo entre o início de ambas as curvas ele consegue calcular o ângulo de defasamento entre elas e assim chegar em um valor para o FP.

Silva (2017) desenvolveu um sistema baseado em Arduino para fazer o controle automático do FP indutivo. A validação do desempenho do sistema se deu o comparando com os sistemas já consolidados no mercado, seu maior erro foi de 7,05% e o menor de 0%. Para a leitura dos valores de tensão o autor utilizou um transformador de potência (TP) acoplado a um circuito que faz o *offset* do sinal alternado, para que seja possível a leitura do sinal pelo Arduino. O mesmo aconteceu para a aquisição dos dados de corrente, o autor utilizou um TC SCT-013-000 que tem relação de transformação de corrente de 100 A:50m A, necessitando de um resistor de carga em sua saída para transformar o sinal de corrente em tensão, e posteriormente um circuito de *offset* para elevar a curva de tensão e possibilitar a leitura pelo Arduino.

3 DESENVOLVIMENTO

Na sequência é possível tomar nota do desenvolvimento do protótipo, todas as etapas de definição de materiais, montagem e métodos de coleta de dados.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Tendo em mente as formas de coleta de dados se deu início ao projeto, definindo quais materiais seriam utilizados para a construção do analisador.

3.1.1 Sensor de corrente TC SCT-013

O sensor de corrente SCT-013 (figura 4) tem como principal vantagem não precisar de contato elétrico com o circuito para medir a corrente elétrica alternada que passa pelo condutor. Ou seja, não se faz necessário abrir o circuito para ligá-lo em série com o amperímetro, basta apenas “abraçar” um dos cabos de alimentação ligados ao equipamento a ser monitorado.

Figura 4 – TC SCT-013 50A



Fonte: Site Casa da robótica (2022)

Este sensor faz uso de duas propriedades da corrente alternada descritas pelas leis de Ampère e da indução de Faraday. De acordo com Halliday (2016) a lei de Ampère diz que um condutor percorrido por uma corrente induz a formação de um campo magnético ao seu redor

de valor proporcional à corrente; já a lei da indução de Faraday diz que um campo magnético variante no tempo induz uma tensão numa espira, e por consequência uma corrente elétrica, proporcional à intensidade do campo magnético.

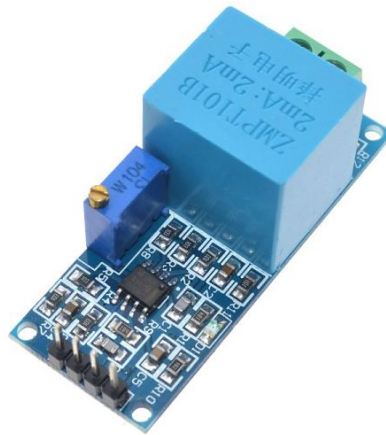
Com estas definições é possível entender melhor como funciona um TC que nada mais é do que um conjunto de espiras que são colocadas ao redor de um condutor ao qual se necessita medir a corrente.

Para este projeto foi escolhido um modelo de TC que possui capacidade máxima de leitura de até 50 A de valor eficaz em corrente alternada, sendo que o sinal de saída vai de 0 V_{pp} a 1 V_{pp} também alternados.

3.1.2 Sensor de tensão CA ZMPT101B

O sensor de tensão CA ZMPT101B (figura 5) é um módulo de alta precisão que tem como finalidade detectar a existência de tensão alternada em um circuito ou fazer a medição do valor de tensão. Permite medir tensões de 0 V_{RMS} a 250 V_{RMS} com precisão de $\pm 1\%$.

Figura 5 – Sensor de tensão CA ZMPT101B



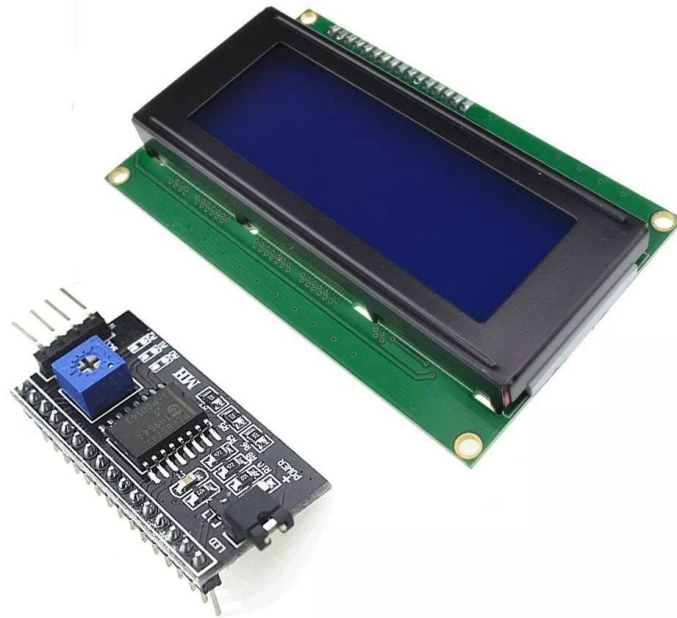
Fonte: Site Blog *MasterWalker* Shop (OLIVEIRA, 2018)

3.1.3 LCD 20x4 com módulo I2C

Comumente um projeto que envolve a utilização de *LCDs* utiliza 6 pinos digitais mais os pinos de alimentação para o seu funcionamento o que implica na utilização de muitas portas do microprocessador. Mas com o módulo I2C é possível reduzir este número para apenas duas

portas de alimentação (5 V e GND) mais duas de sinal que são as portas analógicas seriais de clock (A5) e dados (A4) do Arduino.

Figura 6 – LCD 20x4 com módulo I2C



Fonte: Site Casa da Robótica (2022)

3.1.4 Conversor de tensão CC-CC *Step-Down* LM2596

O conversor CC-CC *Step-Down* LM2596 (figura 7) é um conversor de tensão, que converte um nível de tensão CC em outro nível de tensão CC. Possui topologia Buck (ou popularmente chamado de conversor *Step-Down*), que reduz a tensão de saída em relação a de entrada. Esse conversor CC-CC tem como base o circuito integrado LM2596, que suporta tensões de entrada de 4,5 V a 40 V, e consegue fornecer, de forma ajustável (através de um trimpot), de 1,2 V a 36 V com até 3 A de corrente, tendo um rendimento de até 90%.

Figura 7 – Conversor de tensão CC-CC step down LM2596



Fonte: Site FilipeFlop Componentes Eletrônicos (2022)

Esse conversor usa o método do conversor chaveado, que são circuitos que trabalham com a comutação de tensão em conjunto de um indutor e capacitor para fazer a regulação da tensão de saída. Ele tem vantagem sobre o regulador linear, principalmente pela eficiência na sua conversão, no qual tem perda típica de 12% da potência de entrada enquanto o regulador linear pode perder até 50%.

Neste projeto, o este conversor CC-CC está sendo utilizado para rebaixar a tensão contínua da fonte de alimentação de 12 V para 5 V também contínuos, possibilitando a alimentação do Arduino, sensores e módulos.

3.1.5 Fonte de alimentação 12V

Para alimentar todos os componentes do circuito foi utilizada uma fonte chaveada de tensão, ela pode ser observada na figura 8. Sua entrada pode receber tensões alternadas de 50 Hz ou 60 Hz de 100 V a 240 V e consome até 0,45 A; entrega na saída uma tensão contínua de 12 V com no máximo 1 A.

Figura 8 – Fonte de alimentação 12V



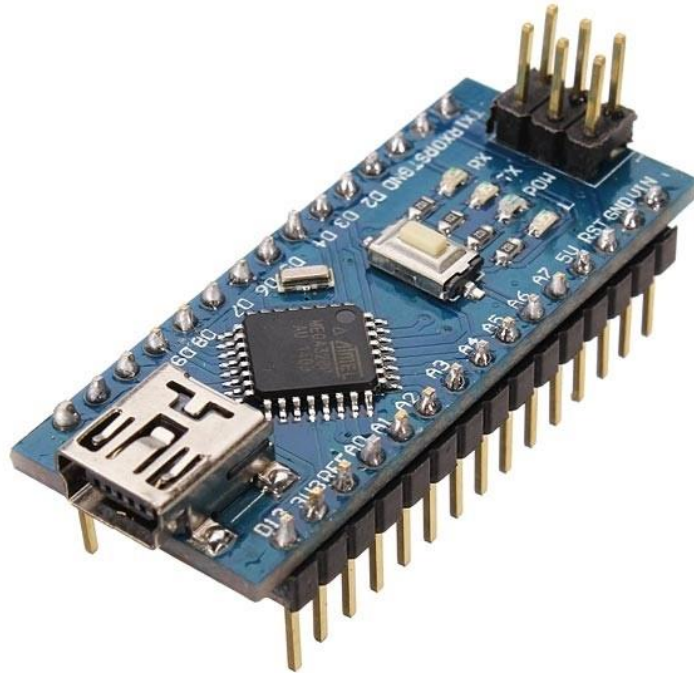
Fonte: Autor

3.1.6 Arduino Nano

O Arduino Nano (figura 9) é uma plataforma de prototipagem de hardware livre e de placa única, projetada com um microcontrolador Atmel AVR com circuitos de entrada e saída embutidos que podem ser facilmente conectados à um computador e programada via IDE utilizando uma linguagem baseada em C/C++, sem a necessidade de equipamentos extras além de um cabo mini-USB.

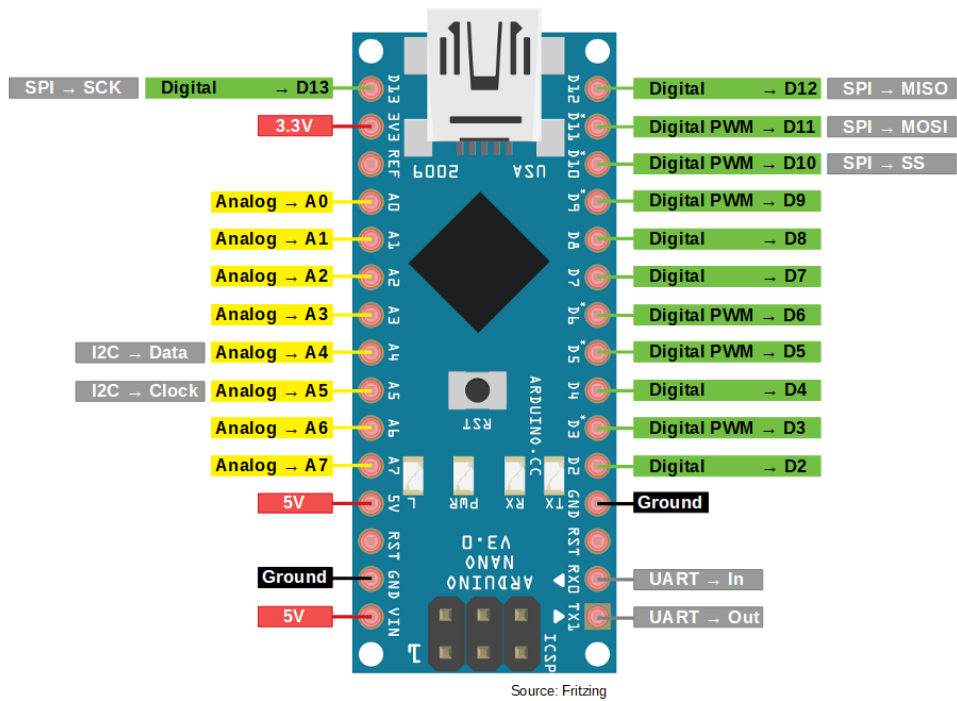
Este microcontrolador é baseado no ATmega328. Ele possui 14 pinos de entradas/saídas digitais, 8 entradas analógicas sendo duas seriais, 1 UARTs (porta serial de hardware), um oscilador de cristal de 16 MHz, uma conexão mini-USB, uma entrada de alimentação, uma conexão ICSP e um botão de reset. Sua tensão de operação é de 5 V e possui memória *flash* de 32 KB dos quais, 2 KB são usados pelo bootloader.

Figura 9 – Arduino Nano



Fonte: Site FilipeFlop Componentes Eletrônicos (2022)

Figura 10 – Relação das portas no Arduino Nano



Fonte: Site Lobo da Robótica (2022)

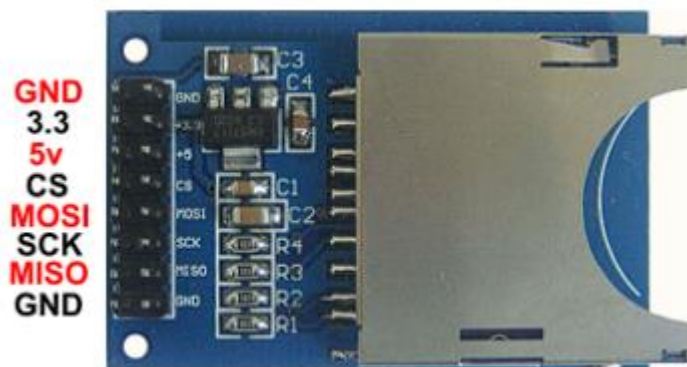
3.1.7 Módulo cartão SD

Dependendo do projeto que se deseja implementar se faz necessário guardar informações e/ ou dados por um determinado período de tempo, elaborar gráficos após a coleta de dados, ou mesmo verificar quando um determinado sensor foi acionado. Isso se faz possível gravando os dados em um cartão de memória utilizando o módulo cartão SD com Arduino.

O módulo aceita cartões formatados em FAT16 ou FAT32, e utiliza a comunicação via interface SPI por meio dos pinos MOSI, SCK, MISO e CS como mostrado na figura 11.

Este módulo foi aplicado no analisador construído a fim de guardar os dados adquiridos por meio das medições realizadas.

Figura 11 – Módulo cartão SD

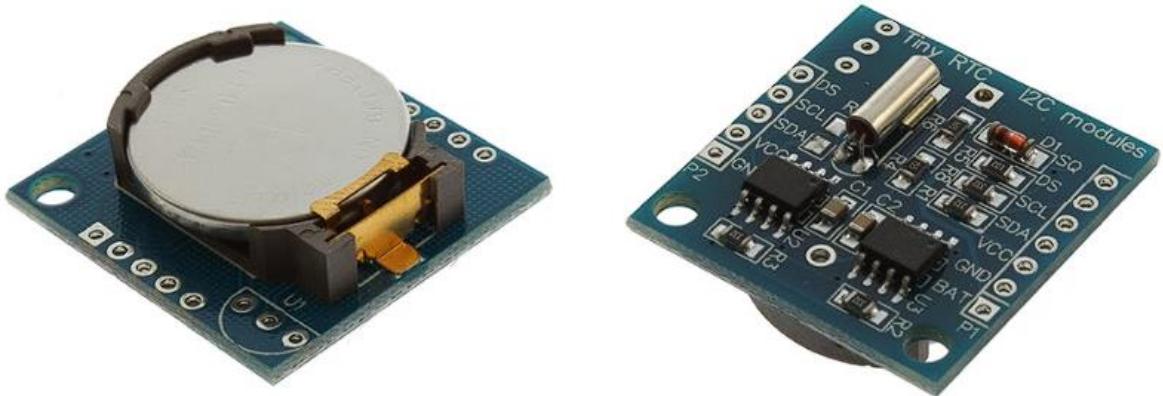


Fonte: Site FilipeFlop Componentes Eletrônicos (2015)

3.1.8 Módulo RTC DS1307

A sigla RTC significa Real Time Clock, ou seja, um relógio de tempo real. Esse módulo armazena e fornece informações completas de data como dia da semana, dia do mês, mês, ano, horas, minutos e segundos, nos formatos de 12 ou 24 horas. Anos bissextos e meses com menos de 31 dias são ajustados automaticamente. Ele possui uma bateria de lítio que garante que os dados sejam preservados mesmo sem alimentação externa. O módulo RTC DS1307 pode ser observado na figura 12.

Figura 12 – Módulo RTC DS1307



Fonte: Site FilipeFlop Componentes Eletrônicos (2014)

3.2 CIRCUITO PROJETADO

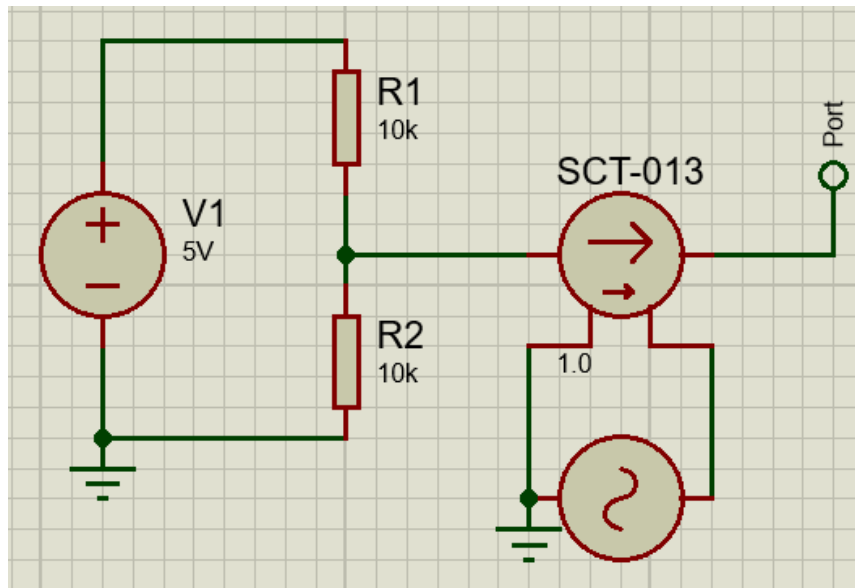
Tendo em mãos todos os materiais, foi iniciada a montagem do projeto. Para adquirir os dados e mostra-los de forma clara foi necessário pesquisar de que forma os sensores e módulos funcionam.

3.2.1 Aquisição de dados de corrente

Para a aquisição dos dados de corrente foram utilizados três sensores TCs SCT-013 50A, ou seja, um por fase. Sua capacidade máxima de leitura é de 50 A de valor eficaz em corrente alternada, sendo que o sinal de saída vai de $0 V_{pp}$ a $1 V_{pp}$ também alternados.

O Arduino não tem capacidade de ler sinais negativos em suas portas analógicas, somente sinais positivos de $0 V$ a $5 V$, o que impossibilitou a simples conexão do SCT-013 na porta analógica, pois este sensor entrega um sinal de tensão alternado que varia entre $-0,5 V$ e $0,5 V$. Foi necessário projetar um circuito de *offset*, ou seja, um amplificador para elevar o valor de tensão do sinal do sensor para níveis positivos. Na figura 13 pode-se observar de que forma o circuito de aquisição dos dados de corrente foi projetado, necessitando apenas de dois resistores de $10 k\Omega$.

Figura 13 – Circuito de *offset* para a aquisição dos dados de corrente



Fonte: Autor

Isso possibilitou que o sinal de saída do TC tivesse um *offset* de 2,5 V, ou seja, passou a oscilar entre 2 V e 3 V, possibilitando a correta leitura do sinal pelo Arduino.

Também foi necessário inserir ao circuito três capacitores de $1\mu F$ em paralelo aos sensores, ou seja, um por sensor. Este capacitor desempenha a função de filtrar ruídos no sinal de leitura dos sensores.

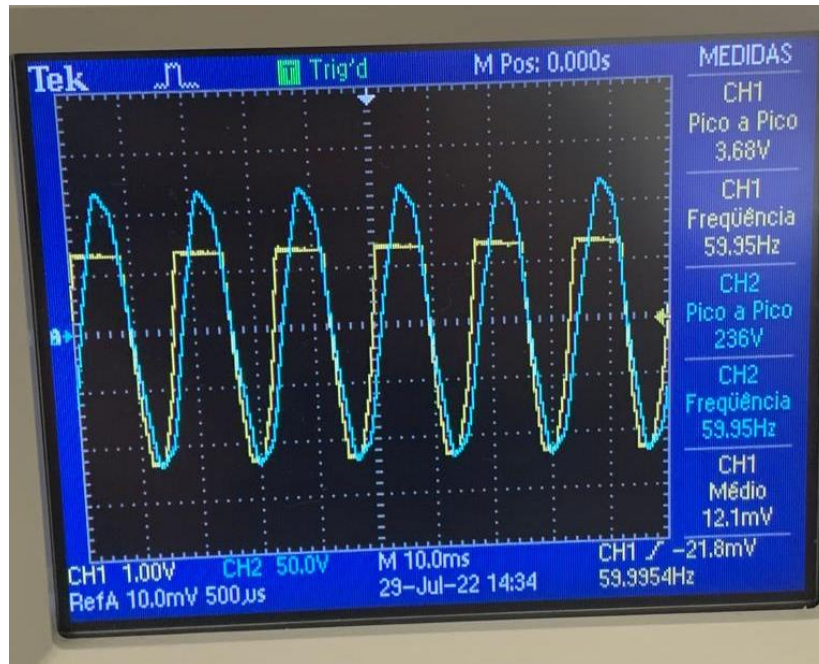
3.2.2 Aquisição de dados de tensão

Para adquirir os dados de tensão das fases foram utilizados três sensores de tensão CA ZMPT101B, ou seja, um por fase. Em cada um dos bornes de entrada de sinal foi conectada uma fase da instalação e o neutro, que é comum aos três sensores. Nos pinos de saída foram conectados os cabos de alimentação do sensor (5 V contínuos e *GND*) e o cabo que leva o sinal de saída ao Arduino.

Para que o Arduino possa ter o máximo de precisão nas medições de tensão AC, foi necessário fazer o ajuste da forma de onda na saída do sensor a partir de um osciloscópio. O sensor pode vir de fábrica com parte da forma de onda cortada no semiciclo positivo (figura 14), tendendo a formar uma onda quadrada e isto vai comprometer a leitura feita pelo pino analógico do Arduino. Com o uso de um osciloscópio foi possível ver a forma da onda de saída e através do trimpot que se encontra no sensor e fazer o ajuste para que ela ficasse o mais

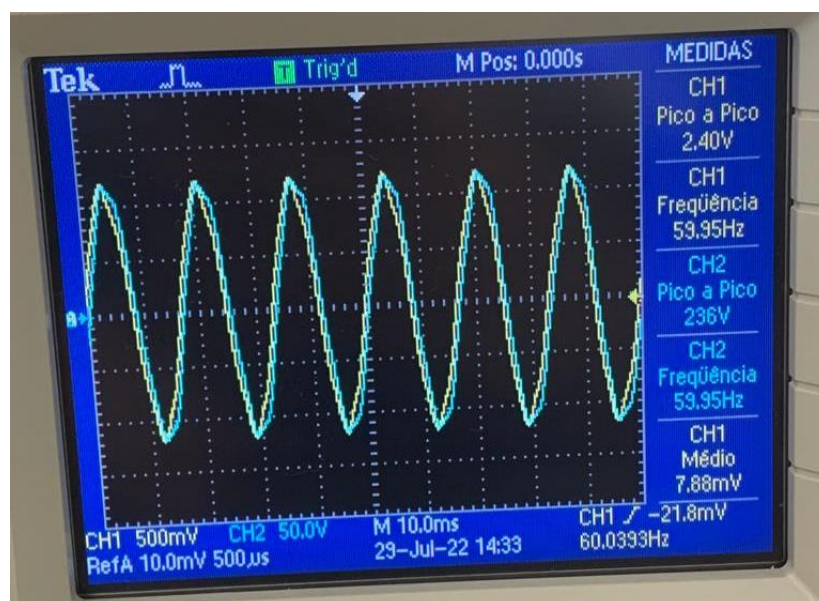
próximo possível de uma senoide (figura 15). Nas figuras 14 e 15 é possível observar o sinal de saída do sensor em amarelo e a curva de tensão de um *varivolt*, utilizado com referência, em azul. O sinal de saída foi ajustado para que entregasse $2,4 V_{pp}$, máximo valor onde não há distorção do sinal e que o Arduino consegue ler.

Figura 14 – Sensor de tensão desajustado



Fonte: Autor

Figura 15 – Sensor de tensão ajustado

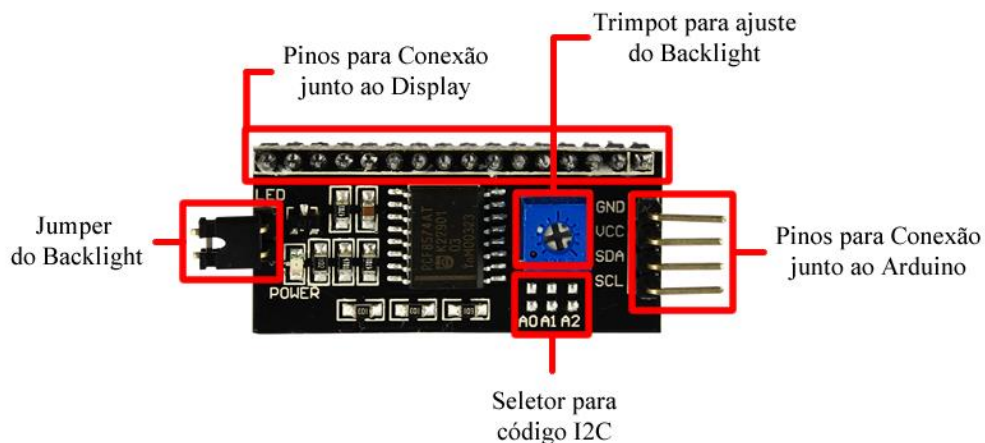


Fonte: Autor

3.2.3 Endereçamento dos *LCDs* 20x4

Para um melhor entendimento do funcionamento do módulo I2C empregado junto aos *LCDs* 20x4, foi necessário entender suas funções e particularidades. Na figura 16 é possível observar uma explicação dos componentes de conexão e ajuste do módulo. O jumper do *backlight* é responsável por permanecer com o *backlight* do display aceso quando conectado ao módulo ou apaga-lo quando desconectado. Os pinos para conexão junto ao display devem ser soldados na parte de trás do display para garantir a comunicação e interpretação dos sinais. O trimpot para ajuste do *backlight* é responsável por regular o contraste dos caracteres do display, tornando-os mais amostra ou menos. Os pinos para conexão junto ao Arduino são: *GND*, *VCC* (5 V), *SDA* (pino de dados da comunicação serial) e *SCL* (pino de clock da comunicação serial).

Figura 16 – Módulo I2C



Fonte: Site Usinainfo (STRAUB, 2018)

Neste projeto foram utilizados dois *LCDs* 20x4, cada um com um módulo I2C. Cada módulo precisou ser conectado nas portas seriais do Arduino Nano que são a A4 e A5, conforme a figura 10. Cada módulo I2C possui um endereço para comunicação serial, que por padrão de fábrica sempre é 0x27, este endereço precisa ser passado como parâmetro no código do programa. Na figura 16 pode-se observar que existe um seletor para código I2C, foi necessário modificar o endereço de um dos displays neste seletor para 0x25 respeitando o quadro 1. Para modificar o endereço foi necessário soldar apenas um jumper entre os conectores da placa. Assim se tornou possível utilizar as mesmas portas A4 e A5 para os dois displays passando informações diferentes em simultâneo.

Quadro 1 – Quadro de endereçamento serial de módulo I2C

Endereço	A0	A1	A2
0X20	0	0	0
0X21	1	0	0
0X22	0	1	0
0X23	1	1	0
0X24	0	0	1
0X25	1	0	1
0X26	0	1	1
0X27	1	1	1

Fonte: Site Usinainfo (STRAUB, 2018)

3.2.4 Alimentação do circuito

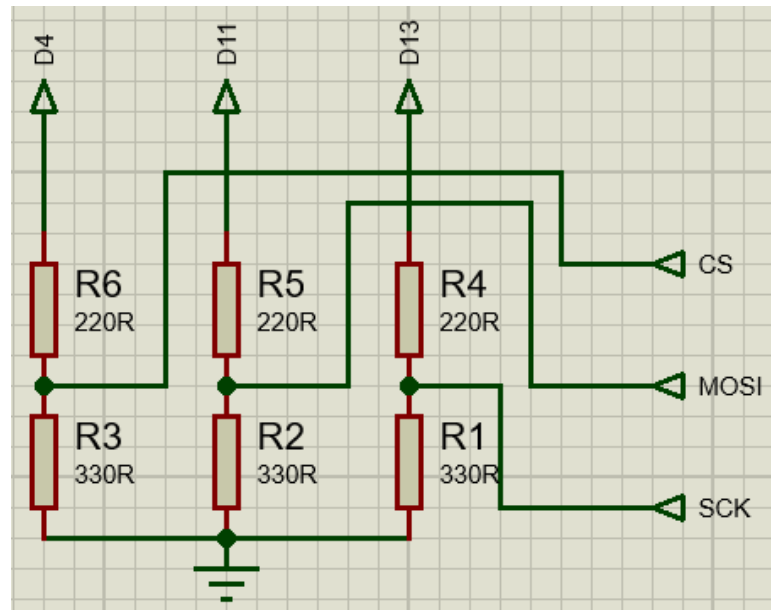
Todos os módulos e sensores do analisador necessitam ser alimentados com tensão de 5 V contínuos, menos os TCs SCT013 que são componentes passivos, mas mesmo assim precisam do sinal de 5 V contínuos para o *offset* do sinal, como explicado na subseção 3.2.1.

Como não dispunha de uma fonte de tensão de CA-CC de 5 V contínuos de saída, somente de uma fonte de 12 V contínuos de saída, fez-se necessária a utilização do módulo conversor de tensão CC-CC *Step-Down* LM2596, que recebe a tensão de 12 V contínuos da fonte e a rebaixa para 5 V contínuos, tornando possível a alimentação dos módulos e sensores.

3.2.5 Circuito do módulo cartão SD

Para alimentar o módulo foi utilizada a tensão contínua de 5 V e a malha de *GND* do circuito. Para os pinos de sinal, foi necessário um divisor de tensão, já que o módulo trabalha com níveis de sinal de 3,3 V. Foi utilizado o divisor de tensão apenas nos pinos SCK, MOSI e CS. O pino MISO foi ligado diretamente ao Arduino. Para os divisores de tensão foram utilizados resistores de 220 Ω e 330 Ω . O circuito utilizado pode ser visualizado na figura 17.

Figura 17 – Circuito projetado para o módulo cartão SD

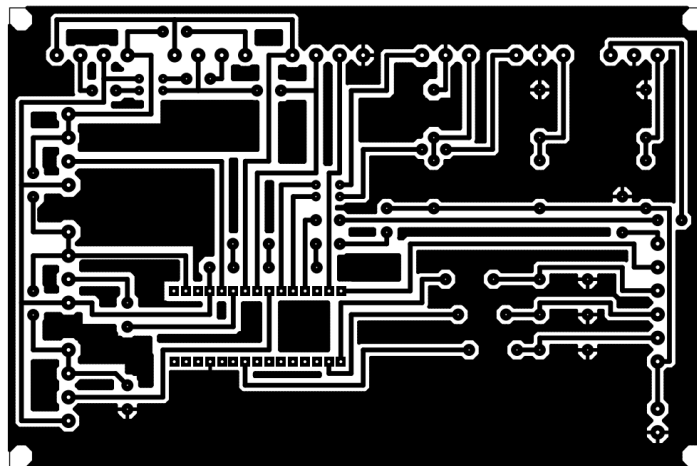


Fonte: Autor

3.3 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

Para facilitar a conexão dos cabos entre sensores e microprocessador e integrar as partes do hardware do equipamento foi projetada uma placa de circuito impresso (PCI). Seu projeto foi realizado no software *Proteus* e pode ser visualizado na figura 18.

Figura 18 – Projeto da PCI no *Proteus*



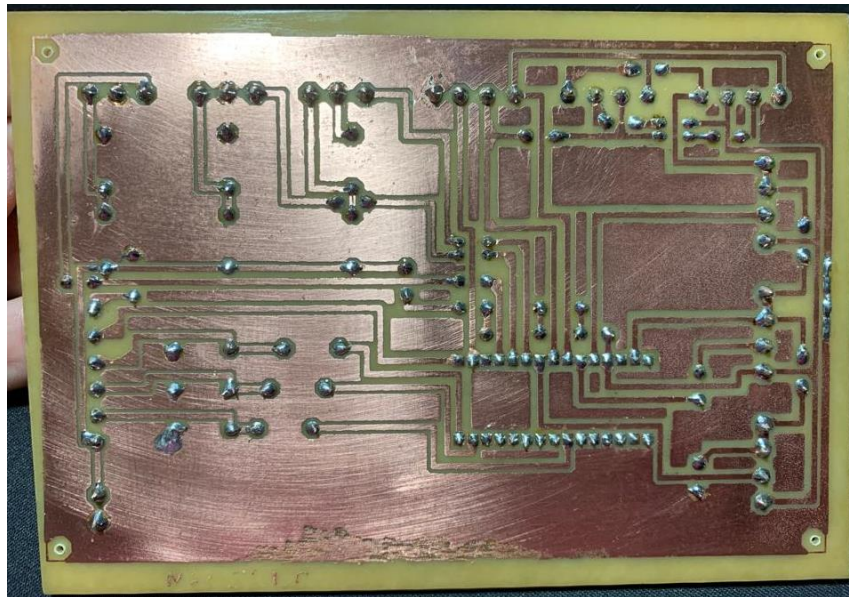
Fonte: Autor

Algumas pesquisas foram feitas e no fim foi possível chegar à conclusão que a melhor forma de realizar a PCI seria imprimir o projeto da figura 18 em papel *couché* com uma

impressora a laser. O próximo passo seria passar a tinta da impressão para a placa de cobre por método térmico utilizando um ferro de passar e posteriormente corroer a placa em perclorato de ferro, onde somente o cobre protegido pela tinta ficaria na placa, assim formando as trilhas.

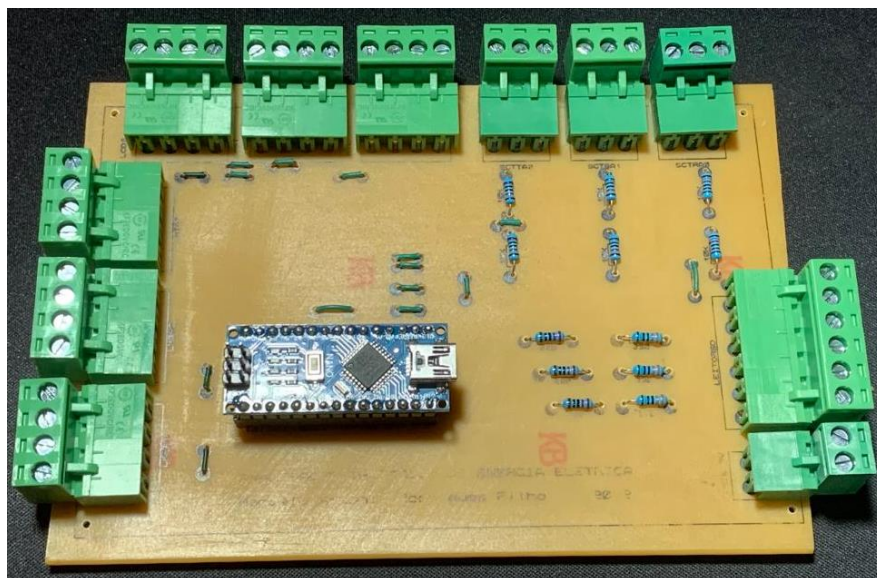
O resultado da confecção da PCI, já com os componentes soldados, pode ser observado nas figuras 19 e 20.

Figura 19 – Parte de baixo da PCI



Fonte: Autor

Figura 20 – Parte de cima da PCI



Fonte: Autor

3.4 CÓDIGO IMPLEMENTADO

O código implementado para o projeto foi feito na IDE do Arduino e pode ser encontrado em inteiro teor no apêndice A.

O cálculo dos valores de tensão, corrente e FP foi realizado utilizando a biblioteca Emonlib.h, ela utiliza do poder de processamento do Arduino para analisar os dados coletados pelos sensores e assim retornar com os valores requisitados. Esta é uma biblioteca de código aberto para o monitoramento de energia elétrica. Para o cálculo das grandezas citadas anteriormente, a biblioteca utiliza de 20 semiciclos, ou seja, 10 ciclos completos ou 10 períodos, das curvas de tensão e corrente de cada fase e a partir desses dados ela tem o tempo máximo de dez segundos para retornar com o valor eficaz da grandeza solicitada. Caso o tempo máximo de 10 segundos para o cálculo seja ultrapassado, o código é reiniciado, para que não ocorra um bug no microprocessador. As informações de número de semiciclos e tempo máximo de cálculo podem ser observadas no código do apêndice A nas linhas 59 para os valores da fase R, 70 para os da fase S e 81 para os da fase T.

Para o cálculo das potências aparente, ativa e reativa, são utilizados os valores de tensão, corrente e FP lidos pelos sensores, estes são aplicados as equações 4 para aparente, 2 para ativa e 6 para reativa.

O código do apêndice A utiliza 32% da memória do Arduino reservada para programas e 38% de memória dinâmica, ou seja, a memória utilizada por variáveis globais. O código também traz trechos comentados, estes trechos dizem respeito a uma tentativa de implementação de salvamento dos dados adquiridos por meio do módulo cartão SD e um módulo RTC que informa data e hora.

3.5 MÉTODO DE ANÁLISE DE RESULTADOS

Após a construção do equipamento se fez necessário um período de testes para comprovação do funcionamento do mesmo. Foram realizadas medições das grandezas e análises da QEE. As medições foram realizadas no Laboratório de Máquinas Elétricas (LabMAQ) do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) campus Itajaí.

Para verificar a funcionabilidade e exatidão do analisador construído suas medições foram confrontadas com os dados de um analisador de energia comercial da marca *Fluke* modelo 1735 (figura 21) disponibilizado pelo IFSC. As análises foram realizadas medindo as

grandezas elétricas de tensão, corrente, FP e potências aparente, ativa e reativa em três tipos diferentes de cargas.

3.5.1 Analisador *Fluke* 1735

Como comentado anteriormente, foi utilizado um analisador de energia comercial da marca *Fluke* modelo 1735 para validar e comparar os resultados do analisador construído. De acordo com o site do fabricante do equipamento, o analisador de energia trifásico *Fluke* 1735 (figura 21) é uma ferramenta de QEE que possui como principais recursos registrar valores de potências, tensão, corrente, FP e parâmetros associados; demonstrar os benefícios de melhoramentos de eficiência energética com testes de consumo de energia; medir a distorção harmônica causada por cargas eletrônicas; visualizar gráficos e criar relatórios com o software *PowerLog*; é capaz de gravar dados de medições durante 45 dias consecutivos; e possui precisão de $\pm 0,15\%$ para valores de tensão e $\pm 0,5\%$ para valores de corrente.

Figura 21 - Analisador De Energia Trifásico *Fluke* 1735



Fonte: Site RS Components Ltd. (2022)

Em uma pesquisa rápida no site de vendas Ebay, o menor preço para um equipamento usado do mesmo modelo é de R\$ 10.306,77, já o mais caro também usado custa R\$ 18.509,95.

Como este modelo foi descontinuado, não foram encontrados valores para um equipamento novo, mas o seu sucessor, o *Fluke* modelo 1736, foi encontrado novo por R\$ 24.688,66.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado final do hardware do analisador trifásico de energia elétrica construído pode ser observado nas figuras 22, 23 e 24.

Figura 22 – Frente do analisador construído



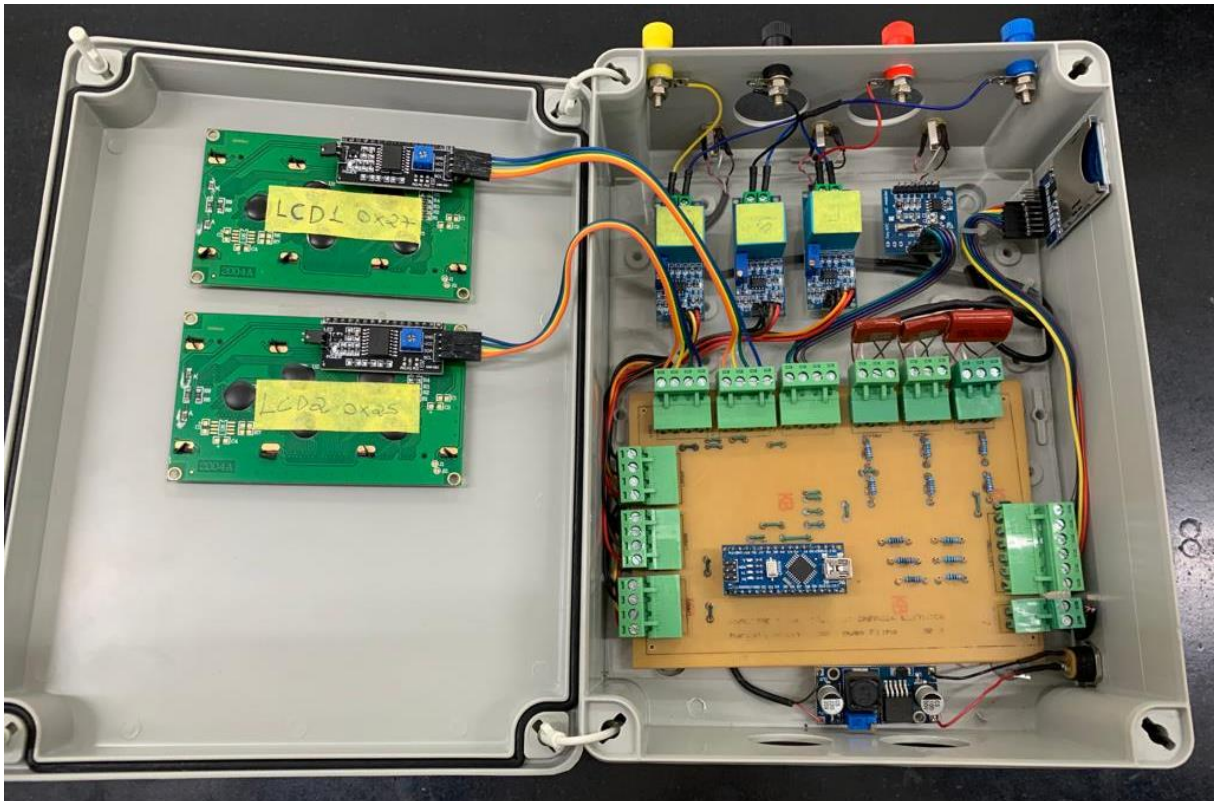
Fonte: Autor

Figura 23 – Parte superior do analisador construído



Fonte: Autor.

Figura 24 – Parte interna do analisador construído



Fonte: Autor

Para a construção do analisador de energia foram gastos um total de R\$ 602,09. O valor por item e o total gasto em material pode ser visualizado na tabela 6.

Tabela 6 – Tabela de gastos

DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	VALOR UNITÁRIO (R\$)	VALOR TOTAL (R\$)
10 Bornes 4mm	1	48,30	48,30
SCT013 50A	3	48,27	144,81
3 Sensores ZMPT101B	1	55,28	55,28
40 Jumper Macho/Fêmea	1	22,80	22,80
Display LCD 20x04	2	64,28	128,56
Conversor DC DC Step Down	1	22,08	22,08
Placa Arduino Nano V3	1	56,92	56,92
Barra De Pinos Macho	1	7,04	7,04
Sensor RTC DS1307	1	16,76	16,76
Módulo Cartão SD Card	1	13,40	13,40
Barra De Pinos 1x40 Fêmea	1	6,90	6,90
Bornes Macho/Fêmea Para Placa	1	74,74	74,74
Plug P2 Fêmea Para Painel	3	1,50	4,50
TOTAL (R\$)			602,09

Fonte: Autor

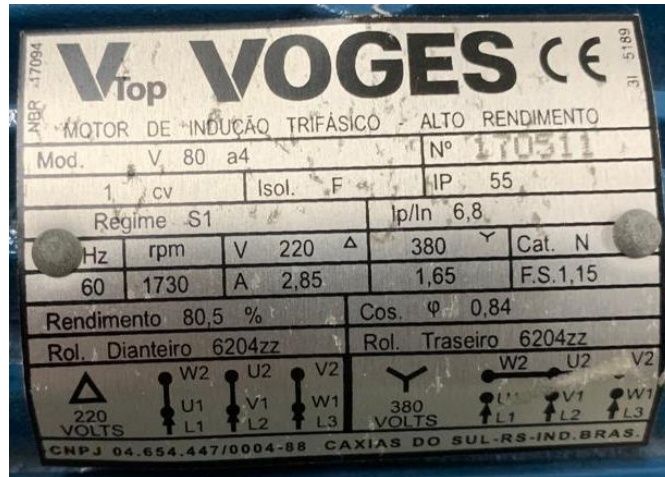
Como comentado anteriormente foram realizados três testes com configurações de cargas diferentes. Para o primeiro teste foram medidas as grandezas de dois motores trifásicos ligados em paralelo, no segundo foi adicionado mais um motor em paralelo aos dois, para que houvesse um aumento na corrente e nas potências, e no último foram ligadas três cargas resistivas em estrela, com valores diferentes de resistência, causando um desbalanço de cargas entre as fases. Por se tratarem de valores em regime, para cada teste foi coletada apenas uma amostra dos valores em análise.

4.1 PRIMEIRA CONFIGURAÇÃO DE TESTE

Para o primeiro teste foi ligado, na configuração estrela, um motor trifásico da marca VOGES de 1 cv, sua plaqueta pode ser observada na figura 25, que possui um gerador da marca MOTRON também de 1 cv acoplado ao seu eixo que funciona como um disco de inércia, aumentando a carga acoplada a ele, e em paralelo ao motor VOGES foi ligado um motor trifásico WEG de 3 cv, sua plaqueta pode ser observada na figura 26, também em estrela, para

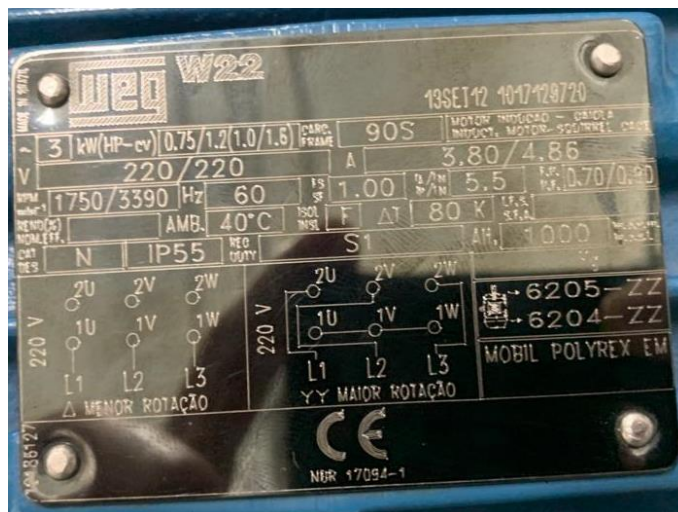
este motor foi necessário utilizar um transformador de tensão trifásico Variac para a redução de tensão de 380 V para 220 V, esta configuração pode ser observada na figura 28.

Figura 25 – Plaqueta do motor VOGES de 1 cv



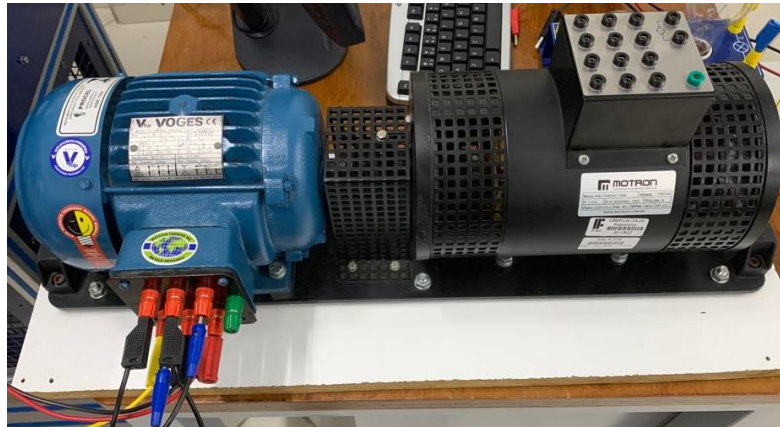
Fonte: Autor

Figura 26 – Plaqueta do motor WEG de 3 cv



Fonte: Autor

Figura 27 – Motor VOGES acoplado ao gerador MOTRON



Fonte: Autor

Figura 28 – Motor WEG conectado ao Variac



Fonte: Autor

Na tabela 7 é possível observar os valores das grandezas medidas com o analisador construído.

Tabela 7 – Valores medidos no primeiro teste com o analisador construído

Fase	Tensão (V)	Corrente (A)	FP	P. Aparente (VA)	P. Ativa (W)	P. Reativa (VAr)
R	222,4	2,24	0,25	495,8	126	479,4
S	225,6	2,2	0,3	498	149,4	475,2
T	223,6	2,4	0,27	536,4	143	516,6

Fonte: Autor

A tabela 8 traz os valores das grandezas medidas com o analisador *Fluke 1735*.

Tabela 8 – Valores medidos no primeiro teste com o analisador *Fluke 1735*

Fase	Tensão (V)	Corrente (A)	FP	P. Aparente (VA)	P. Ativa (W)	P. Reativa (VAr)
R	224,2	2,24	0,25	501,6	126	484
S	226,1	2,27	0,31	513	158	488
T	224,4	2,34	0,26	525,8	138,8	505

Fonte: Autor

Observando os valores medidos é possível calcular o erro de medição do analisador construído. Na tabela 9 observa-se os erros para cada grandeza, levando em consideração a confiabilidade dos valores do analisador *Fluke 1735*.

Tabela 9 – Erro de medição do analisador construído para o primeiro teste

Fase	Tensão	Corrente	FP	P. Aparente	P. Ativa	P. Reativa
R	0,8%	0,18%	1,44%	1,15%	0%	0,95%
S	0,2%	2,91%	2,41%	2,92%	5,44%	2,62%
T	0,35%	2,74%	1,82%	2,01%	3,02%	2,3%

Fonte: Autor

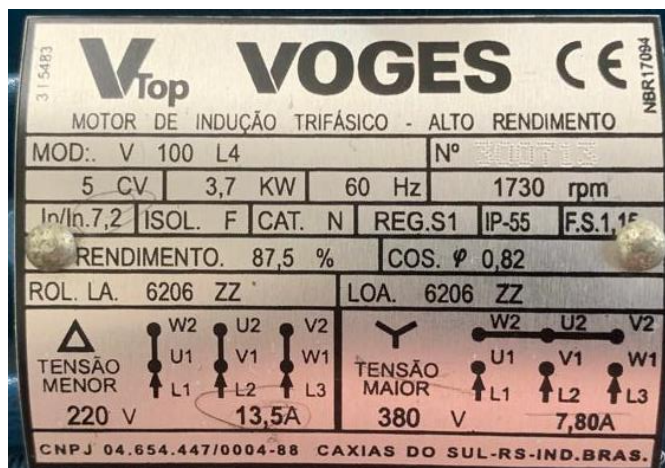
Ficou claro, a partir dos resultados obtidos, que os valores de tensão, corrente, FP e as três potências medidos pelo analisador construído ficaram consideravelmente próximos do valor medido com o analisador *Fluke 1735* para este primeiro teste, já que o erro relativo apresentou valores inferiores a 5,44%. O erro ultrapassou 3% em apenas dois casos sendo estes

na medição da potência ativa das fases S e T. O menor erro foi observado no valor da potência ativa da fase R. Também é possível afirmar que os sensores de tensão são os que menos apresentam instabilidade em suas leituras, já que possuem os menores erros e seus valores são muito próximos.

4.2 SEGUNDA CONFIGURAÇÃO DE TESTE

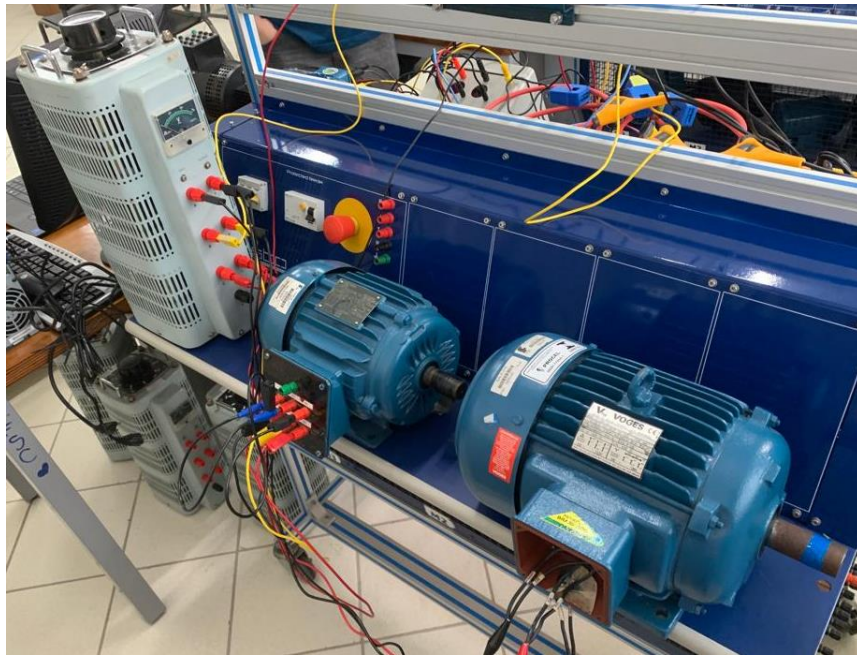
Para o segundo teste foi utilizada a mesma configuração do primeiro, com uma única diferença, foi adicionado mais um motor, este da marca VOGES com potência de 5 cv em paralelo ao circuito, este ligado em triângulo, sua plaqueta pode ser analisada na figura 29. Os resultados das medições podem ser observados nas tabelas 10, para o analisador construído e 11 para o analisador *Fluke* 1735.

Figura 29 – Plaqueta do motor VOGES de 5 cv



Fonte: Autor

Figura 30 – Motor VOGES de 5 cv ligado ao circuito



Fonte: Autor

Tabela 10 – Valores medidos no segundo teste com o analisador construído

Fase	Tensão (V)	Corrente (A)	FP	P. Aparente (VA)	P. Ativa (W)	P. Reativa (VAr)
R	227,6	4,6	0,18	1052	187,6	1035
S	218,8	4,3	0,22	951	223,2	923
T	223,2	4,9	0,26	1060	303	1028

Fonte: Autor

Tabela 11 – Valores medidos no segundo teste com o analisador *Fluke 1735*

Fase	Tensão (V)	Corrente (A)	FP	P. Aparente (VA)	P. Ativa (W)	P. Reativa (VAr)
R	222,54	5,16	0,16	1153	184,6	1135
S	224,3	4,95	0,19	1109	214	1065
T	223,16	5,22	0,22	1168	262	1137

Fonte: Autor

Observando os valores medidos é possível calcular o erro de medição do analisador construído para o segundo teste. Na tabela 12 observa-se os erros para cada grandeza, levando em consideração a confiabilidade dos valores do analisador *Fluke 1735*.

Tabela 12 – Erro de medição do analisador construído para o segundo teste

Fase	Tensão	Corrente	FP	P. Aparente	P. Ativa	P. Reativa
R	2,27%	10,85%	12,5%	8,76%	1,62%	8,81%
S	2,45%	13,13%	13,99%	14,25%	4,3%	13,33%
T	0,02%	6,13%	16,59%	9,24%	15,65%	9,58%

Fonte: Autor

Observando os resultados obtidos para o segundo teste podemos observar que o maior erro relativo foi na leitura do FP da fase T apresentando 16,59% de erro, sendo que, para este caso, a leitura do analisador construído foi de 0,26 e a do analisador *Fluke* 1735 foi de 0,22. Também podemos observar que o segundo maior erro relativo foi na leitura da potência ativa da fase T, com 15,65%, o que destoava com os erros de leitura da mesma grandeza das fases R e S, já que estes foram pequenos.

O menor erro foi o da leitura de tensão da fase T, 0,02%, sendo que as leituras de tensão das fases R e S também foram pequenos, confirmando a afirmação feita na seção 4.1, que os sensores de tensão são os que menos apresentam instabilidade em suas leituras, já que possuem os menores erros e seus valores são muito próximos.

Outro ponto que foi observado é que os sensores de corrente apresentaram erros maiores em relação ao teste da seção 4.1, provavelmente isto se deve ao fato da atenuação do sinal lido causada pelos capacitores de filtro colocados em paralelo aos sensores.

Os valores de FP e das três potências dependem dos valores lidos pelos sensores de tensão e corrente, como para este teste os erros das medidas de tensão e corrente foram maiores, muito provavelmente houve uma propagação de erro, fazendo com que os erros de leitura de FP e cálculo das três potências fossem maiores também.

4.3 TERCEIRA CONFIGURAÇÃO DE TESTE

Para a terceira e última configuração de teste foram medidos os valores das grandezas elétricas em análise para um circuito formado por três resistores de potência ligados em estrela. Foram utilizados dois resistores de 64Ω com potência máxima de dissipação de $800 W$ (figura 31) e dois resistores de 20Ω com potência máxima de dissipação de $1500 W$, sendo que estes dois últimos foram conectados em série fazendo com que sua resistência equivalente passasse a ser de 40Ω (figura 32).

A ligação dos resistores foi feita em estrela (figura 33), sendo que duas fases ficaram com os resistores de 64Ω e uma com o resistor equivalente de 40Ω , tornando possível um teste com uma das fases desbalanceada. Foi utilizado o transformador Variac da figura 28 para rebaixar a tensão de $380 V$ entre fases para $220 V$, diminuindo assim a corrente que flui pelos resistores, tornando os testes mais seguros.

Figura 31 – Resistor de 64Ω e $800 W$



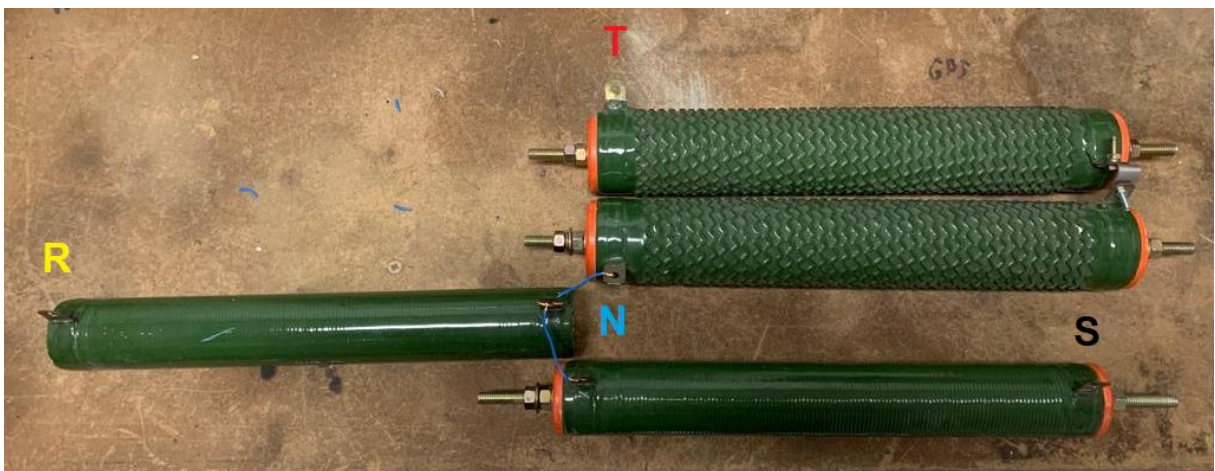
Fonte: Autor

Figura 32 – Resistor equivalente de 40Ω e $1500 W$



Fonte: Autor

Figura 33 – Ligação em estrela dos resistores



Fonte: Autor

Os resultados das medições podem ser observados nas tabelas 13, para o analisador construído e 14 para o analisador *Fluke 1735*.

Tabela 13 – Valores medidos no terceiro teste com o analisador construído

Fase	Tensão (V)	Corrente (A)	FP	P. Aparente (VA)	P. Ativa (W)	P. Reativa (VAr)
R	154	2,4	0,96	372	371	1
S	140	2,3	0,93	316	316	1
T	117	3,2	0,93	375	374	1

Fonte: Autor

Tabela 14 – Valores medidos no terceiro teste com o analisador *Fluke 1735*

Fase	Tensão (V)	Corrente (A)	FP	P. Aparente (VA)	P. Ativa (W)	P. Reativa (VAr)
R	156,4	2,50	0,99	389	389	1
S	140,7	2,28	0,99	321	320	1
T	118,6	3,16	1	369	369	1

Fonte: Autor

Observando os valores medidos é possível calcular o erro de medição do analisador construído para o terceiro teste. Na tabela 15 observa-se os erros para cada grandeza, levando em consideração a confiabilidade dos valores do analisador *Fluke 1735*.

Tabela 15 – Erro de medição do analisador construído para o terceiro teste

Fase	Tensão	Corrente	FP	P. Aparente	P. Ativa	P. Reativa
R	1,83%	3,2%	3,81%	4,41%	4,75%	0%
S	0,78%	0,87%	6,45%	1,49%	1,43%	0%
T	1,68%	1,9%	6,8%	1,73%	1,35%	0%

Fonte: Autor

Analisando os valores de erro obtidos a partir das medições das grandezas em análise na terceira configuração de teste pode-se observar que as menores taxas de erro foram nas leituras das potências reativas das três fases, nestes casos os erros foram nulos. Deve-se atentar que para cargas puramente resistivas o valor da potência reativa deve ser nulo, assim como o

valor do FP deve ser 1, como não existem cargas ideais e os próprios analisadores têm suas taxas de erro de leitura, os valores lidos foram de 1 VA, o que pode ser desconsiderado.

Excetuando os erros nulos nas leituras das potências reativas, as menores taxas de erro foram nas leituras dos valores de tensão e corrente da fase S, 0,78% e 0,87% respectivamente. Os maiores erros foram nas leituras do FP das fases S e T, 6,8% e 6,45%, respectivamente.

Novamente observa-se os baixos valores de erros nas leituras de tensão, o que reafirma o que foi dito na seção 4.1, de que os sensores de tensão são os que menos apresentam instabilidade em suas leituras, já que possuem os menores erros e seus valores são muito próximos.

Também se observa que a carga de menor resistência que foi conectada na fase T causou um desequilíbrio de tensão entre as fases, como mostram as tabelas 13 e 14. Teoricamente, já que a resistência da carga é menor, se comparada as outras cargas, a queda de tensão e a potência dissipada nela é maior, causando um aumento no seu valor de corrente, o que foi confirmado pelos valores obtidos com os dois analisadores de acordo com as tabelas 13 e 14.

Para este teste foram utilizados resistores de frenagem de elevadores, cedidos pela empresa TK Elevadores, pois o IFSC não dispõe de cargas resistivas de alta potência em seus laboratórios.

4.4 TESTE DESCONSIDERADO

Foi realizado um teste que teve como carga somente o motor VOGES de 1 cv acoplado ao gerador MOTRON, estes podem ser visualizados na figura 27, sendo este motor ligado em estrela.

Este teste foi desconsiderado, pois o analisador construído apresentou muita instabilidade e erros na leitura dos valores de corrente, e por conseguinte no FP, potências aparente, ativa e reativa. Esta instabilidade se deveu ao fato de a corrente do circuito ser muito baixa, abaixo dos 0,85 A. Tal instabilidade impossibilitou a aquisição dos dados para construção dos resultados e cálculo de erros.

Levando em consideração este fato, é possível afirmar que o analisador construído não é capaz de medir de forma satisfatória correntes abaixo de 0,85 A.

4.5 SALVAMENTO DOS DADOS ADQUIRIDOS

Como foi comentado da subseção 3.4, foi realizada a tentativa de salvar os dados adquiridos com informações de data e hora em um cartão SD, por meio do módulo cartão SD e um módulo RTC DS1307.

Ao adicionar os comandos necessários no código implementado ocorreu um erro já na compilação do mesmo. A adição dos comandos de salvamento de dados, data e hora fizeram com que o código ocupasse 68% de espaço de armazenamento para programas do Arduino e as variáveis globais 84% de memória dinâmica, o que pode causar problemas de estabilidade, já que há pouca memória disponível.

Optou-se por deixar essa parte do código comentada, como é possível observar no apêndice A, desativando o salvamento dos dados adquiridos.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi projetado e construído um protótipo de um analisador trifásico de energia elétrica de baixo custo na plataforma Arduino. Ele tem a finalidade de obter dados de tensão, corrente, FP e potências aparente, ativa e reativa, tornando possível a utilização destes dados para o controle dessas grandezas.

Para o primeiro teste, onde a corrente por fase medida não ultrapassou os 2,4 A o analisador construído apresentou uma exatidão nas leituras de tensão, corrente, FP e de potências aparente, ativa e reativa com erros máximos de 5,44%. Neste caso o analisador apresentou desempenho satisfatório, se considerada a faixa de operação, o propósito deste trabalho e o custo 17 vezes inferior ao modelo comercial utilizado como referência.

No segundo teste, o analisador construído apresentou percentagens de erros bastante altas, principalmente nas leituras dos valores de corrente, FP e potências aparente, ativa e reativa, chegando, nos piores casos, a 16,59% para o FP da fase T, 15,65% para a potência ativa da fase T e 14,25% para a potência aparente da fase S. Neste teste o valor da corrente por fase do circuito foi maior que o dos demais testes, tendo em mente este fator e observando que as percentagens de erro na leitura de corrente deste teste foram maiores que as do primeiro e último chegou-se à conclusão que provavelmente os sensores de corrente TC SCT-013 não possuem boa acurácia e são muito sensíveis a ruídos e perturbações no sinal, também podem estar desajustados, o que se faz difícil testar já que o IFSC não dispõe de cargas de alta potência para que se possa testar os sensores em correntes mais altas. Também existe a possibilidade de os capacitores de filtro colocados em paralelo a estes sensores estarem atenuando o sinal lido, o que faz com que quanto maior for a amplitude do sinal lido, maior será a atenuação do sinal de saída.

Outro ponto que reforça a possibilidade de os sensores TC SCT-013 serem muito sensíveis a perturbações e ruídos é o fato de que no decorrer das medições o hardware reinicia algumas vezes devido ao fato de a biblioteca Emon.lib possuir um *watchdog* em sua programação. O *watchdog* serve para reiniciar o hardware caso não haja mais resposta, ou seja, quando ocorra um travamento. Muito provavelmente, devido as perturbações e ruídos capturados pelos sensores TC SCT-013, o sinal de corrente lido pelo Arduino possui valores fora do padrão causando um *bug* no momento de calcular as grandezas solicitadas, fazendo com que o *watchdog* reinicie o hardware.

A utilização de uma fonte de alimentação chaveada de 12 V em série com um conversor *Buck Step-Down* que rebaixa os 12 V da fonte para 5 V também utilizando chaveamento, pode ter ocasionado problemas de ruído e interferência nas leituras, o mais correto seria a utilização de uma fonte de tensão linear para alimentar o circuito.

O analisador construído obteve ótimos valores de erro para as leituras de tensão em todos os testes, variando entre 0,02% e 2,45%. Com esta observação se conclui que os sensores de tensão CA ZMPT101B estão devidamente ajustados, pois apresentaram leituras fieis ao medido com o analisador comercial *Fluke 1735*, utilizado como parâmetro.

Para trabalhos futuros se visa aprimorar a aquisição de dados, ou seja, melhorá-la para que se diminua as percentagens de erro nas medidas, para isto é necessário um melhor ajuste do sensor de corrente TC SCT-013, também existe a possibilidade de se projetar um filtro passa baixas para estes sensores, diminuindo a atenuação dos sinais de baixa frequência e eliminando as altas frequências. Também se faz necessária a implementação do sistema de salvamento de dados, para que isto possa ocorrer é preciso trocar o microprocessador utilizado no projeto, muito provavelmente será necessário inserir um Arduino Mega ao invés do Arduino Nano, pois o Mega possui mais memória reservada para variáveis globais, o que elimina os problemas de instabilidade que foram observados com o Arduino Nano.

Em relação ao aprendizado, este projeto possibilitou o desenvolvimento de competências em diferentes áreas da engenharia elétrica como programação, elétrica de potência, eletrônica, além da familiarização com o uso de instrumentos de medição e ambientes de testes.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL: **Módulo 8 – Qualidade Do Fornecimento De Energia Elétrica**: Procedimentos De Distribuição De Energia Elétrica No Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Distrito Federal: Diário Oficial da União, 2021. 25 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL: **Resolução Normativa N 418**. Distrito Federal: Diário Oficial da União, 2010.

APRENDENDO ELÉTRICA. **Fechamentos de motores elétricos trifásicos**. 2019. Disponível em: <https://aprendendoeletrica.com/fechamentos-de-motores-eletricos-trifasicos/>. Acesso em: 02 maio 2022.

BALADI, Carolina. **O que é Distorção Harmônica, quais seus riscos e como evitá-la**. 2019. Disponível em: <https://blog.4partner.com.br/distorcao-harmonica-seus-riscos-como-evita/>. Acesso em: 26 fev. 2022.

BOYLESTAD, Robert L.. **Introdução à Análise De Circuitos**. 12. ed. [S. L.]: Pearson, 2012. 980 p.

BRAGA, Newton C.. **Fator de potência - A necessidade da correção (ART111)**. 20--. Publicada por Instituto NCB. Disponível em: [https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/artigos/54-dicas/819-fator-de-potencia-a-necessidade-da-correcao-art111.html#:~:text=Os%20Problemas%20de%20Um%20Baixo%20Fator%20de%20Pot%C3%Aancia&text=Com%20um%20rendimento%20menor%2C%20devido,e%20consequente%20queda%20na%20tens%C3%A3o](https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/artigos/54-dicas/819-fator-de-potencia-a-necessidade-da-correcao-art111.html#:~:text=Os%20Problemas%20de%20Um%20Baixo%20Fator%20de%20Pot%C3%Aancia&text=Com%20um%20rendimento%20menor%2C%20devido,e%20consequente%20queda%20na%20tens%C3%A3o.). Acesso em: 26 fev. 2022.

CASA DA ROBÓTICA (Bahia). **Sensor De Corrente Não Invasivo 50A : 1v Sct013 Yhdc**. 2022. Disponível em: <https://www.casadarobotica.com/sensores-e-modulos/sensores/corrente/sensor-de-corrente-nao-invasivo-50a-50ma-sct013-yhdc>. Acesso em: 03 maio 2022.

CENTRAIS ELÉTRICAS DE SANTA CATARINA. **DPSC/NT-02**: Norma Para Instalação De Capacitores. Florianópolis: Celesc, 2002. 32 p. Disponível em: <https://www.celesc.com.br/arquivos/normas-tecnicas/padrao-entrada/NT02.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2022.

FERRAZ, R. S. F.. FERRAZ, R. S. F.. SANTOS, B. L. M. **Analizador De Energia De Baixo Custo Empregando Arduino**. Revista Científica Semana Acadêmica. Fortaleza, ano MMXVIII, N°. 000134, 03/10/2018. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/artigo/analizador-de-energia-de-baixo-custo-empregando-arduino>. Acesso em: 12 mai. 2022.

FILIFELOP COMPONENTES ELETRÔNICOS (Santa Catarina). **Regulador de Tensão LM2596 Conversor DC-DC Step Down**. 2022. Disponível em:

<https://www.filipeflop.com/produto/regulador-de-tensao-lm2596-conversor-dc-dc-step-down/>. Acesso em: 02 maio 2022.

FLUKE ACADEMY. **Você conhece o módulo 8 do PRODIST?** 2019. Disponível em: https://www.flukeacademy.com.br/blog/post/20/voc%C3%AA_conhece_o_m%C3%B3dulo_8_do_prodist. Acesso em: 05 jun. 2022.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: eletromagnetismo**. 10. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2016. 3 v.

LOBO DA ROBÓTICA. **Arduino Nano Pinout**. 2022. Disponível em: <https://lobodarobotica.com/blog/arduino-nano-pinout/>. Acesso em: 30 abr. 2022.

LORDELLO, Igor Martins. **Controlador De Fator De Potência Utilizando Arduino**. 2018. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro Universitário Augusto Motta, Rio de Janeiro, 2018

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. [S. L.]: Ltc, 2017. 976 p.

MATTEDE, Henrique. **O que é tensão de fase e de linha?** [201-]. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com/o-que-e-tensao-de-fase-e-de-linha/>. Acesso em: 02 jun. 2022.

MCALLISTER, Willy. **Grandezas Elétricas Básicas: corrente, tensão, potência**. 2017. Disponível em: <https://pt.khanacademy.org/science/physics/circuits-topic/circuits-resistance/a/ee-voltage-and-current>. Acesso em: 12 maio 2022.

MARTINHO, Edson. **Distúrbios da Energia Elétrica**. São Paulo: Editora Saraiva, 2013. 9788536518398. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536518398/>. Acesso em: 24 fev. 2022.

OLIVEIRA, Euler. **Como usar com Arduino – Sensor de Tensão AC 0 a 250V Voltímetro ZMPT101B**. 2018. Disponível em: <https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/como-usar-com-arduino-sensor-de-tensao-ac-0-a-250v-voltmetro-zmpt101b>. Acesso em: 03 maio 2022.

RS COMPONENTS LTD. (Reino Unido). **Fluke 1735 Data Logger**. 2022. Disponível em: <https://uk.rs-online.com/web/p/data-loggers/6362809>. Acesso em: 15 jul. 2022.

SADIKU, Matthew; ALEXANDER, Charles K.. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. ed. [S.L.]: Amgh, 2013. 896 p.

SANTOS, Glauber Almino Ferreira Ramalho dos. **Controlador Automático De Fator De Potência E De Demanda**. 2018. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica, Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

SILVA, Vinícius Lopes da. **Controlador De Fator De Potência Utilizando Arduino**. 2017. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2017.

STRAUB, Matheus Gebert. **Projeto Arduino Com Display Lcd E Adaptador I2c**. 2018. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/blog/projeto-arduino-com-display-lcd-e-adaptador-i2c/>. Acesso em: 10 maio 2022.

SULTECH (Porto Alegre). **Dez questões sobre Fator de Potência**. 2021. Disponível em: <https://sultech.com.br/dez-questoes-sobre-fator-de-potencia/>. Acesso em: 05 maio 2022.

TELECO. **Data Center I: Consumo energético**. 2022. Disponível em: https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialdatacenter1/pagina_5.asp. Acesso em: 18 jun. 2022.

APÊNDICE A – Código implementado na IDE do Arduino

```
1  #include <Wire.h> //Incluindo biblioteca Wire.h
2  #include "EmonLib.h" //Incluindo biblioteca Emonlib.h (Monitor de energia)
3  //#include <DS1307.h> //Incluindo biblioteca DS1307.h (Módulo de data e hora)
4  #include <LiquidCrystal_I2C.h> //Incluindo biblioteca LiquidCrystal_I2C.h (LCD)
5  //#include <SdFat.h> //Incluindo biblioteca SdFat.h (Módulo cartão SD)
6
7  EnergyMonitor em_R; //Monitor de energia da fase R
8  EnergyMonitor em_S; //Monitor de energia da fase S
9  EnergyMonitor em_T; //Monitor de energia da fase T
10
11 //DS1307 rtc(A4, A5); //Nomeia a chamada do RTC e indica em quais portas o módulo está
12 ligado
13
14 LiquidCrystal_I2C lcd1(0x27,20,4); //Inicializa o display 1 no endereço 0x27
15 LiquidCrystal_I2C lcd2(0x25,20,4); //Inicializa o display 2 no endereço 0x25
16
17 //SdFat sdCard; //Nomeia a chamada do cartão SD
18 //SdFile meuArquivo; //Nomeia a chamada do arquivo
19 //const int chipSelect = 4; // CS do módulo ligado ao Digital 4
20
21 void setup()
22 {
23     em_R.current(A0, 82); //Parâmetros do sensor de corrente da fase R (Pino analógico, Valor
24 de calibração)
25     em_R.voltage(A3, 251, 1.7); //Parâmetros do sensor de tensão da fase R (Pino analógico,
26 Valor de calibração, Mudança de fase)
27
28     em_S.current(A1, 78); //Parâmetros do sensor de corrente da fase S (Pino analógico, Valor
29 de calibração)
30     em_S.voltage(A6, 251, 1.7); //Parâmetros do sensor de tensão da fase S (Pino analógico,
31 Valor de calibração, Mudança de fase)
```

```

32
33     em_T.current(A2, 92); //Parâmetros do sensor de corrente da fase T (Pino analógico, Valor
34 de calibração)
35     em_T.voltage(A7, 249, 1.7); //Parâmetros do sensor de tensão da fase T (Pino analógico,
36 Valor de calibração, Mudança de fase)
37
38     //rtc.halt(false); //Aciona o relógio
39     //rtc.setSQWRate(SQW_RATE_1); //Definições do pino SQW/Out
40     //rtc.enableSQW(true);
41
42     lcd1.init();
43     lcd1.backlight();
44     lcd2.init();
45     lcd2.backlight();
46
47     // if(!sdCard.begin(chipSelect,SPI_HALF_SPEED))sdCard.initErrorHalt(); // Inicializa o
48 modulo SD
49     // if (!meuArquivo.open("dados_de_leitura.txt", O_RDWR | O_CREAT | O_AT_END)) //
50 Abre o arquivo dados_de_leitura.txt
51     // {
52     //     sdCard.errorHalt("Erro na abertura do arquivo dados_de_leitura.txt!");
53     // }
54
55 }
56
57 void loop()
58 {
59     em_R.calcVI(20,10000); //FUNÇÃO DE CÁLCULO (20 SEMICICLOS, TEMPO LIMITE
60 PARA FAZER A MEDIÇÃO)
61     float Urms_R = em_R.Vrms; //Calcula o valor da tensão RMS da fase R
62     float Irms_R = em_R.Irms; //Calcula o valor da corrente RMS da fase R
63     float FP_R = (em_R.powerFactor); //Calcula o fator de potência da fase R
64     float PotS_R = (Urms_R) * (Irms_R); //Calcula a potência aparente da fase R

```

```

65     float PotP_R = (PotS_R) * (FP_R); //Calcula a potência ativa da fase R
66     float ang = acos(FP_R); //Calcula o ângulo de defasagem da fase R
67     float PotQ_R = PotS_R * sin(ang); //Calcula a potência reativa da fase R
68     ang = 0;
69
70     em_S.calcVI(20,10000); //FUNÇÃO DE CÁLCULO (20 SEMICICLOS, TEMPO LIMITE
71     PARA FAZER A MEDIÇÃO)
72     float Urms_S = em_S.Vrms; //Calcula o valor da tensão RMS da fase S
73     float Irms_S = em_S.Irms; //Calcula o valor da corrente RMS da fase S
74     float FP_S = (em_S.powerFactor); //Calcula o fator de potência da fase S
75     float PotS_S = (Urms_S) * (Irms_S); //Calcula a potência aparente da fase S
76     float PotP_S = (PotS_S) * (FP_S); //Calcula a potência ativa da fase S
77     ang = acos(FP_S); //Calcula o ângulo de defasagem da fase S
78     float PotQ_S = PotS_S * sin(ang); //Calcula a potência reativa da fase S
79     ang = 0;
80
81     em_T.calcVI(20,10000); //FUNÇÃO DE CÁLCULO (20 SEMICICLOS, TEMPO LIMITE
82     PARA FAZER A MEDIÇÃO)
83     float Urms_T = em_T.Vrms; //Calcula o valor da tensão RMS da fase T
84     float Irms_T = em_T.Irms; //Calcula o valor da corrente RMS da fase T
85     float FP_T = (em_T.powerFactor); //Calcula o fator de potência da fase T
86     float PotS_T = (Urms_T) * (Irms_T); //Calcula a potência aparente da fase T
87     float PotP_T = (PotS_T) * (FP_T); //Calcula a potência ativa da fase T
88     ang = acos(FP_T); //Calcula o ângulo de defasagem da fase T
89     float PotQ_T = PotS_T * sin(ang); //Calcula a potência reativa da fase T
90     ang = 0;
91
92     lcd1.clear();
93     lcd2.clear();
94
95     lcd1.setCursor(0,0);
96     lcd1.print("FASE");
97     lcd1.setCursor(4,0);

```

```
98     lcd1.print("| R | S | T |");
99     lcd1.setCursor(0,1);
100    lcd1.print("U(V)|");
101    lcd1.print(Urms_R, 0);
102    lcd1.setCursor(9,1);
103    lcd1.print("|");
104    lcd1.print(Urms_S, 0);
105    lcd1.setCursor(14,1);
106    lcd1.print("|");
107    lcd1.print(Urms_T, 0);
108    lcd1.setCursor(19,1);
109    lcd1.print("|");
110    lcd1.setCursor(0,2);
111    lcd1.print("I(A)|");
112    lcd1.print(Irms_R, 1);
113    lcd1.setCursor(9,2);
114    lcd1.print("|");
115    lcd1.print(Irms_S, 1);
116    lcd1.setCursor(14,2);
117    lcd1.print("|");
118    lcd1.print(Irms_T, 1);
119    lcd1.setCursor(19,2);
120    lcd1.print("|");
121    lcd1.setCursor(0,3);
122    lcd1.print("FP |");
123    lcd1.print(FP_R, 2);
124    lcd1.setCursor(9,3);
125    lcd1.print("|");
126    lcd1.print(FP_S, 2);
127    lcd1.setCursor(14,3);
128    lcd1.print("|");
129    lcd1.print(FP_T, 2);
130    lcd1.setCursor(19,3);
```

```
131     lcd1.print("|");
132
133     lcd2.setCursor(0,0);
134     lcd2.print("FASE");
135     lcd2.setCursor(4,0);
136     lcd2.print("| R | S | T |");
137     lcd2.setCursor(0,1);
138     lcd2.print("S VA|");
139     lcd2.print(PotS_R, 0);
140     lcd2.setCursor(9,1);
141     lcd2.print("|");
142     lcd2.print(PotS_S, 0);
143     lcd2.setCursor(14,1);
144     lcd2.print("|");
145     lcd2.print(PotS_T, 0);
146     lcd2.setCursor(19,1);
147     lcd2.print("|");
148     lcd2.setCursor(0,2);
149     lcd2.print("P(W)|");
150     lcd2.print(PotP_R, 0);
151     lcd2.setCursor(9,2);
152     lcd2.print("|");
153     lcd2.print(PotP_S, 0);
154     lcd2.setCursor(14,2);
155     lcd2.print("|");
156     lcd2.print(PotP_T, 0);
157     lcd2.setCursor(19,2);
158     lcd2.print("|");
159     lcd2.setCursor(0,3);
160     lcd2.print("QVAr|");
161     lcd2.print(PotQ_R, 0);
162     lcd2.setCursor(9,3);
163     lcd2.print("|");
```

```
164     lcd2.print(PotQ_S, 0);
165     lcd2.setCursor(14,3);
166     lcd2.print("|");
167     lcd2.print(PotQ_T, 0);
168     lcd2.setCursor(19,3);
169     lcd2.print("|");
170
171     // meuArquivo.print("Data: ");
172     // meuArquivo.print(rtc.getDOWStr(FORMAT_SHORT));
173     // meuArquivo.print(" ");
174     // meuArquivo.print(rtc.getDateStr(FORMAT_SHORT));
175     // meuArquivo.print(" Hora: ");
176     // meuArquivo.println(rtc.getTimeStr());
177     // //Gravando dados da fase R
178     // meuArquivo.print("|R|: Tens.=");
179     // meuArquivo.print(Urms_R);
180     // meuArquivo.print(" / Corr.=");
181     // meuArquivo.print(Irms_R);
182     // meuArquivo.print(" / FP=");
183     // meuArquivo.print(FP_R);
184     // meuArquivo.print(" / Pot. Ap.=");
185     // meuArquivo.print(PotS_R);
186     // meuArquivo.print(" / Pot. At.=");
187     // meuArquivo.print(PotP_R);
188     // meuArquivo.print(" / Pot. Re.=");
189     // meuArquivo.println(PotQ_R);
190     // //Gravando dados da fase S
191     // meuArquivo.print("|S|: Tens.=");
192     // meuArquivo.print(Urms_S);
193     // meuArquivo.print(" / Corr.=");
194     // meuArquivo.print(Irms_S);
195     // meuArquivo.print(" / FP=");
196     // meuArquivo.print(FP_S);
```

```
197 // meuArquivo.print(" / Pot. Ap.");
198 // meuArquivo.print(PotS_S);
199 // meuArquivo.print(" / Pot. At.");
200 // meuArquivo.print(PotP_S);
201 // meuArquivo.print(" / Pot. Re.");
202 // meuArquivo.println(PotQ_S);
203 // //Gravando dados da fase T
204 // meuArquivo.print("|T|: Tens.");
205 // meuArquivo.print(Urms_T);
206 // meuArquivo.print(" / Corr.");
207 // meuArquivo.print(Irms_T);
208 // meuArquivo.print(" / FP");
209 // meuArquivo.print(FP_T);
210 // meuArquivo.print(" / Pot. Ap.");
211 // meuArquivo.print(PotS_T);
212 // meuArquivo.print(" / Pot. At.");
213 // meuArquivo.print(PotP_T);
214 // meuArquivo.print(" / Pot. Re.");
215 // meuArquivo.println(PotQ_T);
216 // meuArquivo.println(".");
217
218     delay(2000);
219
220 }
```