



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**DESENVOLVIMENTO DE UM ANALISADOR DE ENERGIA
ELÉTRICA DE BAIXO CUSTO COM ARDUINO**

Paulo Josué Stapenhorst

Lajeado, novembro de 2021



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**DESENVOLVIMENTO DE UM ANALISADOR DE ENERGIA ELÉTRICA
DE BAIXO CUSTO COM ARDUINO**

Paulo Josué Stapenhorst

Lajeado, novembro de 2021

Paulo Josué Stapenhorst

DESENVOLVIMENTO DE UM ANALISADOR DE ENERGIA ELÉTRICA DE BAIXO CUSTO COM ARDUINO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Ms. Daniel Luis
Sechi

Lajeado, novembro de 2021

RESUMO

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um analisador de energia elétrica portátil de baixo custo, com a utilização da plataforma arduino para a obtenção dos dados de tensão e corrente de forma constante, registrando as leituras em um cartão de memória. Os dados coletados são importados e disponibilizados para análise na forma de planilha eletrônica, se adequando a necessidade de cada medição. O uso de filtros oportuniza a formação de gráficos dinâmicos, contendo os parâmetros principais como tensão, corrente, potência consumida, picos, horários de consumo e indicação de demanda de energia.

Palavras-chave: Analisador de energia. Medição de tensão e corrente. Demanda de energia. Arduino. Coleta de dados.

ABSTRACT

This paper proposes the development of a low-cost portable electric power analyzer, using the Arduino platform to obtain voltage and current data constantly, recording the readings on a memory card. The collected data are imported and made available for analysis in the form of an electronic spreadsheet, adapting to the needs of each measurement. The use of filters allows the formation of dynamic graphs, containing the main parameters such as voltage, current, consumed power, peaks, consumption times and indication of energy demand.

Keywords: Energy analyzer. Measurement of voltage and current. Energy demand. Arduino. Data collect.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Integração dos sistemas de energia elétrica.....	25
Figura 2 - Transitório de corrente gerado por uma descarga atmosférica.....	29
Figura 3 - Formação de transitório de oscilação.....	30
Figura 4 - Potência com derivação de cargas de forma pura reativas.....	31
Figura 5 - Triângulo retângulo de potência.....	33
Figura 6 - Evolução dos equipamentos de medição de energia elétrica.....	34
Figura 7 - Multimetro de energia Schneider.....	35
Figura 8 - Analisador de qualidade de energia da marca Fluke	38
Figura 9 - Analisador de qualidade de energia da marca Minipa	39
Figura 10 - Analisador de qualidade de energia da marca Embrasul.....	40
Figura 11 - IDE de programação do Arduino.....	44
Figura 12 - Placa Arduino UNO.....	45
Figura 13 - Placa Arduino Nano.....	45
Figura 14 - Módulo Sensor de Tensão.....	47
Figura 15 - Transformador de corrente tipo janela para 100A.....	48

Figura 16 - Diagrama de blocos do analisador.....	52
Figura 17 - Protótipo ilustrativo do Analisador Trifásico.....	53
Figura 18 - Placa do módulo RTC.....	54
Figura 19 - Circuito de condicionamento de sinal de corrente utilizado no projeto....	55
Figura 20 - Adaptador de cartão micro SD.....	56
Figura 21 - Testes do módulo sensor de tensão.....	58
Figura 22 - Testes iniciais dos módulos	58
Figura 23 - Saída serial de data e hora	59
Figura 24 - Leituras de tensão nos três sensores.....	59
Figura 25 - Garra jacaré isolada e garra jacaré com sistema extensor.....	60
Figura 26 - Formato dos dados coletados.....	61
Figura 27 - Linha de código do Arduino com parametrização da biblioteca.....	62
Figura 28 - Teste de corrente com amperímetro.....	63
Figura 29 - Teste de corrente com amperímetro nos três TCs.....	64
Figura 30 - Comparação dos níveis de tensão lidos pelo circuito.....	65
Figura 31 - Visão geral dos testes de calibração.....	66
Figura 32 - Calibração e ajuste da forma de onda do sensor.....	66
Figura 33 - Erro de saída do sinal do sensor de tensão com níveis saturados.....	67
Figura 34 - Comparação da forma de onda da rede local com a saída do sensor....	68
Figura 35 - Testes de linearidade com variac.....	68
Figura 36 - Início da montagem da caixa do analisador.....	69

Figura 37 - Cabo montado com transformadores de corrente e resistor de carga....	70
Figura 38 - Garras tipo jacaré com os respectivos cabos de conexão.....	70
Figura 39 - Vista dos bornes para conexão dos cabos.....	71
Figura 40 - Organização interna dos componentes do analisador.....	72
Figura 41 - Placa base do circuito.....	73
Figura 42 - Vista do banco de capacitores da indústria.....	75
Figura 43 - Detalhe da fatura de energia da empresa.....	76
Figura 44 - Quadro de disjuntores durante o processo de coleta de dados.....	77
Figura 45 - Nome dos arquivos gerados diariamente.....	78
Figura 46 - Formato de dados lidos durante os testes.....	78
Figura 47 - Aba com dados coletados para realização das análises.....	80
Figura 48 - Aba de análises de tensão com organização das estruturas dos filtros..	81
Figura 49 - Aba de análises com organização das estruturas dos filtros.....	82
Figura 50 - Aba de <i>dashboard</i> com filtros interativos e gráficos dinâmicos	83
Figura 51 - Filtros de acordo com os dados coletados.....	84
Figura 52 - Gráficos da tensão.....	85
Figura 53 - Gráficos de potência.....	86
Figura 54 - Gráficos de consumo de energia no horário de ponta e total.....	87
Figura 55 - Tela principal planilha com resultados da coleta na máquina.....	89
Figura 56 - Gráficos dos níveis de tensão da máquina.....	90
Figura 57 - Gráficos dos níveis de tensão da máquina com ajuste do filtro.....	90

Figura 58 - Gráfico da distribuição de corrente entre as fases da máquina.....	91
Figura 59 - Gráficos de consumo de energia da máquina no dia 18/10/21.....	91
Figura 60 - Gráficos de consumo de energia da máquina no dia 19/10/21.....	92
Figura 61 - Gráfico de falta de energia.....	93
Figura 62 - Gráficos de afundamento de tensão.....	94
Figura 63 - Comparação prática de leituras dos sensores em uma mesma fase.....	94
Figura 64 - Comparação prática de leituras dos sensores em uma mesma fase.....	95
Figura 65 - Tela principal com gráficos (<i>dashboard</i>).....	99
Figura 66 -Vista geral da máquina do processo de <i>hot-stamp</i>	109
Figura 67 - Vista do comando da máquina.....	110
Figura 68 - Vista da chapa de aquecimento.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Separação de subestações por níveis de tensão.....	19
Tabela 02 - Consumo de energia da máquina.....	92
Tabela 03 - Lista de materiais utilizados no projeto e respectivos custos.....	97

LISTA DE ABREVIATURAS

kWh	kilowatt-hora
kV	kilovolt
ANEEL	Agência Nacional Energia Elétrica
kW	kilo -Watt
kvar	kilo volt-ampere reativo
kVA	kilo Volt Ampere
True RMS	<i>True Root Mean Square</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
RTC	<i>Real Time Control</i>
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i>
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memor.</i>
TC	Transformador de Corrente
SD	<i>Secure Digital</i>
EPI	Equipamento de Proteção Individual

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo geral	15
1.2 Objetivos específicos	16
1.3 Justificativa	16
1.4 Estrutura do Trabalho	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Sistema de energia elétrica	18
2.1.1 Subestações	19
2.1.2 Reguladores de tensão	21
2.1.3 Bancos de capacitores	21
2.2 A qualidade no fornecimento de energia	22
2.2.1 PRODIST	23
2.2.2 Indicadores e parâmetros de qualidade	24
2.2.3 Disposição de equipamentos	24
2.3 Grandezas elétricas	26
2.3.1 Tensão elétrica	26
2.3.2 Corrente elétrica	27
2.3.3 Harmônicas	28
2.3.4 Transitórios	28
2.3.5 Fator de potência	31
2.3.6 Potência ativa ou reativa	32
2.4 Medição	33
2.4.1 Voltímetro e Amperímetro	33
2.4.2 Multimetro	35
2.4.3 Analisador de energia	36
2.5 Qualímetros	37
2.6 Análise de demanda de energia elétrica	40

2.7	Análise de economia de energia	42
2.7.1	Horário de ponta	42
2.8	Plataforma Arduino	43
2.8.1	Sensores de tensão e corrente	46
2.9	Datalogger	48
2.9.1	Sensores dos dataloggers	49
2.9.2	Datalogger com Arduino	50
3	PROPOSTA	51
3.1	Diagrama de funcionamento do analisador	52
3.2	Protótipo do analisador	53
3.3	Plataforma Arduino	53
3.4	Controle de data e hora	54
3.5	Sensor de tensão	54
3.6	Sensor de corrente	55
3.7	Armazenamento dos dados	56
3.8	Processamento dos dados	56
4	RESULTADOS	57
4.1	Montagem experimental	57
4.2	Processo de operação	60
4.3	Formato dos dados	60
4.4	Processo de calibração e leitura das grandezas	62
4.4.1	Leitura e calibração da corrente	63
4.4.2	Leitura e calibração da tensão	65
4.5	Montagem da caixa e cabos de conexão	69
4.5.1	Detalhes construtivos	73
4.6	Teste prático em campo	74
4.7	Processo de coleta das medições de tensão e corrente	77
4.8	Planilha de análise e cálculos	79
5	ANÁLISES	88
5.1	Tabela de análise dinâmica do teste de campo	88
5.2	Simulação de falhas	93
5.3	Resultados da calibração e precisão	95
5.4	Grandezas registradas, calculadas e avaliadas	96
5.5	Tabela de custos	97
5.6	Método de coleta dos dados	98
5.7	Layout da Dashboard	98

6 CONCLUSÕES	100
6.1 Características da metodologia proposta	101
6.2 Melhorias para trabalhos futuros	101
REFERÊNCIAS	103
ANEXO I	109
ANEXO II	112

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Balanço Nacional de 2018, o consumo nacional de eletricidade na rede foi de 467 TWh no ano de 2017, sendo que, quase 30% desse total é pertencente à classe de consumo residencial, tendo representatividade de um aumento de 1,2% relacionado a 2016 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2017).

As redes elétricas não tiveram evolução suficiente para enfrentar as adversidades das transformações vindas da modernidade e do aumento gradual de consumo. Ameaças à segurança, possibilidade de utilização de energia alternativa e intermitente, objetivos de economia de energia para amenizar os picos de demanda e controle digitais para o aumento da confiabilidade são exemplos dos desafios do setor (MME, 2012).

Além do mais, as perdas totais da rede também tornam-se uma preocupação, sendo que estas perdas chegam a quase 18% no Sistema Interligado Nacional. Um exemplo do atraso tecnológico são os medidores de energia elétrica, sendo que, em sua maior parte, são eletromecânicos nas unidades consumidoras (EPE, 2015).

O consumidor acaba recebendo a informação de quantos KWh teve de consumo num período temporal fixo, entretanto, não tem conhecimento da qualidade da energia recebida e menos ainda do seu padrão de consumo diário. As distribuidoras, por sua vez, possuem mais informações sobre a qualidade de

energia, porém de forma generalizada que não expressa o real verificado nos consumidores.

As capacidades e funcionalidades dos medidores inteligentes são extensas e disponibilizam para os consumidores, informações acerca de seu hábito de consumo, para um melhor controle (LAMIN, 2009). É desejado um equipamento que cumpra diversas funções automaticamente e possa ter acesso pelo consumidor e pela distribuidora.

Neste contexto, os medidores inteligentes são consistentes numa conjuntura de componentes eletrônicos que aferem o consumo de energia elétrica, e atuam no fornecimento de mais informações em comparação com um medidor tradicionalista (ZHENG, 2013).

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho está no desenvolvimento de um analisador portátil de energia elétrica, capaz de registrar dados de tensão e corrente desde sistemas monofásicos até trifásicos, continuamente em um cartão de memória. A utilização por profissionais da área elétrica, possibilita uma posterior análise das grandezas elétricas, tanto para uso residencial, comercial ou industrial.

1.2 Objetivos específicos

São elencados como objetivos específicos:

- conectar e adequar o hardware do analisador para a coleta e leitura de tensão e corrente alternada.
- desenvolver a programação dos *scripts* da placa do Arduino que fazem a leitura e armazenamento dos dados em um cartão de memória.
- desenvolver uma planilha com macros para apresentar as leituras importadas no sistema de planilhas, e gerar gráficos de tensão e corrente, com picos ou faltas relacionadas ao horário de ocorrência.
- classificar e obter grandezas de potência consumida, obtida pela relação de tensão correlacionada a corrente de cada fase.

1.3 Justificativa

No ambiente residencial este analisador pode monitorar o consumo de certo aparelho ou circuito elétrico, monitorar falhas e quedas de energia, traçar um perfil de consumo do ambiente, auxiliar no diagnóstico de desarme involuntário de disjuntores e ainda justificar melhorias nas instalações, com o uso de um equipamento de baixo custo.

Na indústria, o analisador pode medir o consumo de energia elétrica de máquinas em específico, identificar a demanda real de equipamentos, auxiliar no planejamento de melhoria de eficiência nas instalações elétricas, monitorar e auxiliar no estudo de ampliação de quadros elétricos.

Também serve como apoio para a organização e distribuição das cargas por fase, buscando o melhor equilíbrio de distribuição de cargas, e assim reduzir a corrente pelo condutor neutro e atenuar o desequilíbrio de tensão entre fases.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi dividido em capítulos, onde o Capítulo 2 traz o Referencial Teórico, contendo uma síntese sobre o funcionamento de sistemas elétricos, qualidade da energia, analisadores de energia disponíveis no mercado, tecnologias utilizadas e grandezas monitoradas. Já o Capítulo 3 apresenta a Proposta e os componentes que serão utilizados na montagem e desenvolvimento do projeto. O Capítulo 4 mostra os resultados para a execução e construção do analisador, e o Capítulo 5 apresenta as análises realizadas com o propósito do estudo. As conclusões são apresentadas no Capítulo 6, e o Anexo I traz detalhes de um processo produtivo avaliado no decorrer da execução do projeto. O Anexo II traz o código fonte utilizado no Arduino.

Em relação ao objeto, este trabalho pode ser classificado como pesquisa exploratória, pela demanda de fundamentação bibliográfica para idealizar o projeto. Quanto aos procedimentos, a pesquisa é marcada como pesquisa bibliográfica, considerando que está amparada pela abordagem de outros estudos de diferentes áreas de trabalho de forma interdisciplinar, indicando-se como pesquisa-ação, onde o resultado final será um produto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistema de energia elétrica

No Brasil, a configuração do sistema de geração de energia elétrica é predominantemente oriunda de usinas hidrelétricas e, por conta da forma de geração e armazenamento, a melhor forma de transmissão dessa energia por longas distâncias ocorre mediante a elevação de tensão, uma vez que as quedas são menores e assim é alcançado o ponto distante com a tensão desejada, sendo transformada ao chegar no destino para ser entregue aos consumidores finais (SOUZA, 2008).

Os sistemas de distribuição ocorrem de duas maneiras, ou seja, em redes primárias (alta tensão) e secundária (baixa tensão). A padronização desta rede secundária está inserida no contexto 127/220 e 220/380 (módulo trifásico), com quatro condutores em ligação de rede monofásica, cujas redes atendem clientes de baixo consumo, como comércios e residências (PRODIST, 2012). Ainda se verifica a melhoria dos sistemas de distribuição de rede, com adoção do modelo de rede compacta, como afirma Souza (2008), pois o modelo tradicional é vulnerável a qualquer influência do meio e, conseqüentemente, as falhas na distribuição provocam a queda da relação produção/entrega.

Essa manobra de redução de tensão na chegada do ponto final da distribuição é efetivada nas subestações, que figuram como uma das partes mais importantes do sistema de distribuição de energia.

2.1.1 Subestações

A subestação é caracterizada por um conjunto de mecanismos e equipamentos que realizam as manobras de transformação de tensão de entrada e saída, elevando ou diminuindo a tensão de acordo com a necessidade (GARCIA & DUZZI, 2012).

As subestações são classificadas conforme a função que realizam e a sua finalidade, podendo ser subestações de manobra, elevação de tensão, diminuidora de tensão (abaixadora), distribuição de energia e regulação da tensão (SOUZA, 2008). Além de serem classificadas pelas suas funções, são diferenciadas também pela faixa de trabalho, conforme tabela 1, indicada abaixo:

Tabela 1 - Separação de subestações por níveis de tensão

Tipo de subestação	Faixa de tensão
Distribuição	13,8 a 34, 5 (kV)
Subtransmissão	69 a 138 (kV)
Transmissão	230 (kV)
Extra Alta Tensão (EAT)	345 a 500 (kV)
Ultra Alta Tensão (UAT)	765 (kV)

Fonte: do Autor, baseado em Souza (2008).

Souza (2008) explica que 80% dos sistemas de distribuição de energia elétrica trabalham numa faixa variável entre 115 e 765 kV, a fim de priorizar a qualidade na transmissão para longas distâncias, sobretudo em locais com pouca geração de energia, onde as perdas são significativamente observadas, optando pela forma de transmissão em malha.

Os sistemas de subtransmissão atuam numa faixa entre 69 e 138 kV, cujos consumidores principais são as indústrias, que necessitam receber a tensão de entrada nesses níveis, atuando com um sistema de subestação ou cabine primária dentro da própria empresa, realizando a comutação e adequação de tensão para alimentar a planta (CARVALHO, 2006). Este sistema pode, além do modelo de malha, trabalhar com a topologia radial, ainda que essa metodologia seja mais encontrada em linhas de distribuição, que operam entre 11,9 e 34,5 KV.

Souza (2008) explana acerca dos elementos/componentes presentes nos sistemas de subestações, classificando-os de acordo com a finalidade a que se destinam, tais como:

- Equipamentos de manobra, como chaves seccionadoras e disjuntores, que realizam a manobra de barragem da energia em caso de situações anormais, sendo alguns dos dispositivos de segurança possíveis de serem instalados em sistemas elétricos;
- Equipamentos de medição, cujos instrumentos são responsáveis por mensurar as grandezas observadas no sistema a fim de controlar o processo e verificar qualquer tipo de anormalidade, como a medição de tensão, corrente, potência do sistema, frequência e outros;
- Equipamentos de proteção, como fusíveis, relés para comutação e desarme do sistema em casos de curto-circuito, e o para-raios em caso de descargas atmosféricas, para proteção geral do sistema;
- Equipamentos de transformação, que realizam a elevação ou redução do nível de tensão, para receber ou distribuir a mesma, tendo como principais

equipamentos os transformadores de potência, transformadores de corrente e de potencial.

2.1.2 Reguladores de tensão

Dentro desses sistemas de subestação, alguns componentes executam funções indispensáveis para o bom funcionamento do sistema de transmissão e recepção de energia,

São caracterizados, segundo Carvalho (2006), como “equipamentos com a finalidade de manter o nível de tensão de um sistema quando este for submetido a uma variação de tensão fora dos limites”. Pode ser considerado um dos principais componentes do sistema de distribuição para as empresas concessionárias de energia, que visam manter a qualidade no fornecimento, reduzir as quedas de tensão e fornecer o produto corretamente até o fim da linha de transmissão.

2.1.3 Bancos de capacitores

Estes componentes, de acordo com Mamede (2011), normalmente são instalados em subestações e nos sistemas de distribuição das empresas de concessão de energia para reduzir a perda de carga e aumentar a tensão proveniente do sistema pela sua capacidade de armazenamento.

A aplicação de um banco de capacitores gera vantagens para todos os sistemas (geração, distribuição e transmissão), como a liberação dos geradores para uma capacidade maior de fornecimento, correção de fatores de potência, redução de perdas em distâncias, melhoria na regulação do sistema, elevação de tensão nas cargas, redução nas perdas do efeito Joule e outros. Souza (2008) elucida que estes podem ser do tipo de controle automático de tensão ou de potência, método mais

empregado pelas concessionárias em função da estabilidade fornecida ao sistema e a melhor apresentação na ideologia de elevação de tensão.

O sistema de distribuição de energia, em sua configuração original, possui diversos equipamentos que fazem com que haja uma proteção dentro do sistema contra alguns tipos de sinistros, seja por meio dos sistemas de seccionamento de energia, religamento automático ou reguladores de tensão, que fazem com que o sistema de distribuição e consumo de energia esteja protegido. Porém, é necessário que sejam avaliadas as possíveis falhas que podem ser ocasionadas por um funcionamento inadequado destas metodologias.

2.2 A qualidade no fornecimento de energia

Os conceitos relativos à qualidade de energia associam-se, primordialmente, ao fato do fornecimento da energia possuir vínculo com um determinado ponto de entrega (SOUZA, 2008). Como consequência, a consideração se dá então pela entrega de um produto, e não pela prestação de um serviço. Dessa forma, faz-se a necessidade de definição e objetivação da qualidade relacionada ao produto, no caso a eletricidade entregue, fornecendo-a dentro dos padrões que resultaram de acordo entre o provedor de energia e o consumidor final.

A qualidade na prestação desse serviço está intimamente ligada à operação da manutenção dentro dos processos e operações do sistema elétrico, que estabelecem níveis aceitáveis para quadros de interrupção do fornecimento, seja ele programado ou não, sendo este um fato intimamente ligado ao gerenciamento do sistema elétrico (TOLEDO, 2012). Parte dessa responsabilidade se dá pela capacitação dos profissionais envolvidos nos processos diários da concessionária de energia, além da existência de um canal efetivo de comunicação entre os consumidores e a concessionária, a título de informação sobre eventuais defeitos e para o contato para desligamentos programados.

Após a privatização dos sistemas de concessão de energia elétrica, as concessionárias passaram a ter a obrigatoriedade de controle de parâmetros relacionados ao produto entregue, garantindo a disposição da energia sempre na necessidade de utilização (PRAZERES, 2012). A metodologia de distribuição é caráter importantíssimo para a qualidade da energia, pois ela é quem faz o elo entre a geração e o consumo, sendo esse último o que mais sente os efeitos da falta de qualidade no fornecimento, ao passo que podem também ser os geradores de ocorrências e problemas do trato energético, gerando problemas para si e para outros consumidores, sendo parte integrante das obrigações da concessionária a fiscalização e a tomada de ações quando necessário com esses consumidores.

2.2.1 PRODIST

Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST são um conjunto de documentos desenvolvidos e atualizados pela ANEEL com o propósito de expor as normas e padrões relacionados às atividades dos sistemas de distribuição de energia elétrica (PRODIST, 2021).

Composto por 11 módulos, o PRODIST engloba as macro-áreas técnicas dos agentes de distribuição de energia elétrica (concessionárias, permissionárias, consumidores, transmissores e Operador Nacional do Sistema).

O objetivo das normas consiste em garantir que os sistemas envolvidos operem de forma segura, confiável, eficiente, com busca contínua pela qualidade. O empenho em disciplinar os procedimentos técnicos procura assegurar a correta operação, planejamento de expansão e a qualidade da energia elétrica.

2.2.2 Indicadores e parâmetros de qualidade

Estabelecidos pela ANEEL, os parâmetros da qualidade foram elaborados com a intenção de indicar os procedimentos relacionados à qualidade do serviço a ser prestado pelas empresas de distribuição aos consumidores, com o oferecimento de parâmetros bem definidos acerca da avaliação da atividade (MAMEDE, 2011).

Com a capacidade de controlar as interrupções de fornecimento, a qualidade pode ser avaliada mediante o cálculo de divulgação de indicadores, avaliando assim a qualidade do serviço prestado e o desempenho do sistema elétrico por meio dos consumidores junto a ANEEL (TOLEDO, 2012). Tais indicadores são demonstrados em períodos de apuração diferentes, sendo mensal, trimestral ou anual.

Com a regulamentação de valores a serem praticados pela ANEEL, pode-se observar que no período de 2006 a 2011 mais de um terço das concessionárias praticavam valores acima dos limites permitidos, de acordo com Prazeres (2012). Ainda segundo o autor, a qualidade do serviço prestado por elas mostra-se uma preocupação permanente das agências de regulamentação, onde pode haver a cassação da concessão de energia em empresas que insistam na prática de valores acima do delimitado pela agência reguladora, fazendo com que as empresas que detém intenção de renovar seus contratos de concessão, melhorem os serviços oferecidos.

2.2.3 Disposição de equipamentos

Há a possibilidade de inserção de diversos equipamentos para a finalidade de melhoria na prestação do serviço e execução da atividade (TOLEDO, 2012). A Figura 1 possibilita a observação acerca do sistema de integração de geração de

energia elétrica, englobando desde a geração na usina até o momento da distribuição nas residências.

Essa interligação de etapas corresponde à apresentação de muitas soluções relacionadas às redes inteligentes, que abrangem equipamentos, assim como redes de comunicação, protocolizações e softwares que possibilitam o recebimento da informação enviada pelo equipamento (PRAZERES, 2012).

Relacionado à distribuição, a arquitetura e a inserção das linhas elétricas, alguns equipamentos foram implementados em larga escala para melhor atendimento, cuja implementação de equipamentos mais inteligentes e de alta tecnologia pode colaborar para a melhora dos indicadores de qualidade.

Figura 1 - Integração dos sistemas de energia elétrica



Fonte: Toledo (2012)

2.3 Grandezas elétricas

Para o entendimento dos conceitos da área elétrica é fundamental saber relacionar e entender a interação entre as grandezas elétricas. As grandezas fundamentais deste campo são a tensão, a corrente, a resistência e a potência. Estas medidas estão sempre presentes em qualquer circuito elétrico, pois estão relacionadas diretamente e são como base para qualquer estudo.

2.3.1 Tensão elétrica

A tensão elétrica consiste na diferença de potencial elétrico perante dois pontos, cuja unidade de medida é o *volt*. A diferença de potencial tem igualdade no trabalho que precisa ocorrer, por unidade de carga contra um campo elétrico, para a movimentação de uma carga qualquer (PARIS E HURD, 2006).

Um voltímetro poderá ter utilização para a medição da tensão perante dois pontos num sistema, sendo que, normalmente, um ponto referencial comum é a terra. A tensão elétrica pode ter sua origem e produção através de campos elétricos estáticos, por uma corrente elétrica perante a ação de um campo magnético, por campo magnético variante, ou combinações dos três (PARIS E HURT, 2006).

2.3.2 Corrente elétrica

Todo aparelho eletrônico precisa de uma fonte que gere energia para ter funcionamento, seja de uma bateria ou uma tomada. Quando alimentado por essa fonte, receber a energia é fundamental para seu funcionamento devido a uma reação não visível dos elétrons, denominada de corrente elétrica (TECNOGERA, 2020).

Na física, a corrente elétrica tem definição de o movimento ordenado de partículas que portam cargas elétricas, os elétrons. Este fluxo tem ocorrência num condutor quando existe uma diferença de potencial perante suas extremidades, cuja diferença tem denominação de tensão, como visto anteriormente (TECNOGERA, 2020).

A medição da corrente elétrica num circuito elétrico tem realização por um aparelho com denominação de amperímetro. Existem dois tipos de corrente: contínua e alternada. Na primeira, elas possuem movimentação somente num sentido, isto é, do pólo positivo da fonte de tensão para o polo negativo. Já na segunda, as cargas elétricas possuem oscilação em todos os sentidos, o que gera uma corrente alternada (TECNOGERA, 2020).

Em corrente alternada de 50Hz, quando essa faz alimentação de cargas de forma pura resistivas, as ondas senoidais de tensão e correntes acabam coincidindo no tempo, ou seja, não são possuintes de nenhum desfasamento perante si. Nessa circunstância, a onda da potência é todavia positiva possuindo uma frequência de 100Hz, pelo que a energia flui apenas da rede para a carga. Nesse caso é dito que apenas tem consumo energia ativa (BARBOSA, 2012).

2.3.3 Harmônicas

Nas redes residenciais, comerciais e industriais, as harmônicas que são encontradas com maior frequência são as harmônicas de ordem ímpar, que ao mesmo tempo são consideradas as mais problemáticas. Com isso, uma previsão de medida com aceitação é obtida levando em conta as harmônicas até a ordem 30. As empresas de distribuição de energia elétrica fazem a medição, normalmente, das harmônicas de ordem 3, 5, 7, 11 e 13. Para realizar a compensação das harmônicas, considera-se interessante realizar o processo até a ordem 13, contudo, a execução até a ordem 25 garante a excelência da rede. (FLANDOLI, 2017).

A existência dos indicadores acaba permitindo a quantificação e avaliação da distorção harmônica das ondas de tensão e da corrente. Esses são: fator de potência; fator de crista; potência de distorção; espectro em frequência; taxa de distorção harmônica (FLANDOLI, 2017).

2.3.4 Transitórios

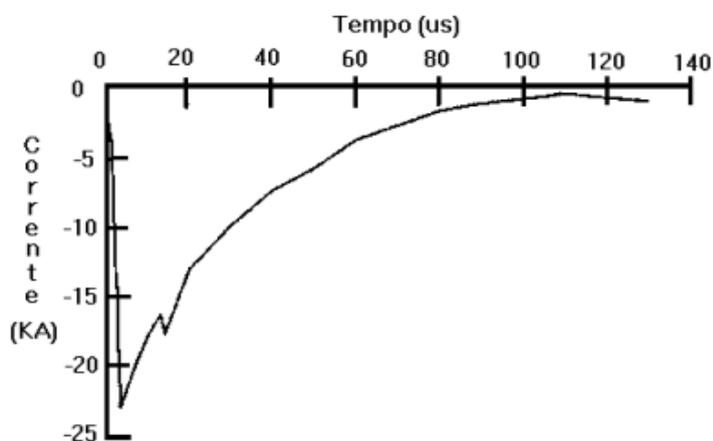
São chamados de efeitos transitórios os eventos ou respostas elétricas, ocasionados por mudanças súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica, cujo tempo de duração é bem pequeno. Mesmo sendo de pequeno período, são considerados relevantes quando os equipamentos presentes no sistema elétrico são submetidos a grandes solicitações de tensão ou corrente (DUGAN et al. 1996).

Geralmente causados por descargas atmosféricas, os transitórios impulsivos podem ter conceito como uma modificação repentina em condições de regime permanente da tensão, corrente ou ambas, tendo caracterização pela apresentação

de impulsos unidirecionais em polaridade e nível de frequência com grande diferenciação relacionado com a frequência da rede elétrica.

A Figura 2, mostra uma corrente gerada por uma descarga atmosférica, característica de um transitório impulsivo.

Figura 2 - Transitório de corrente gerado por uma descarga atmosférica



Fonte: Dugan et al. (1996)

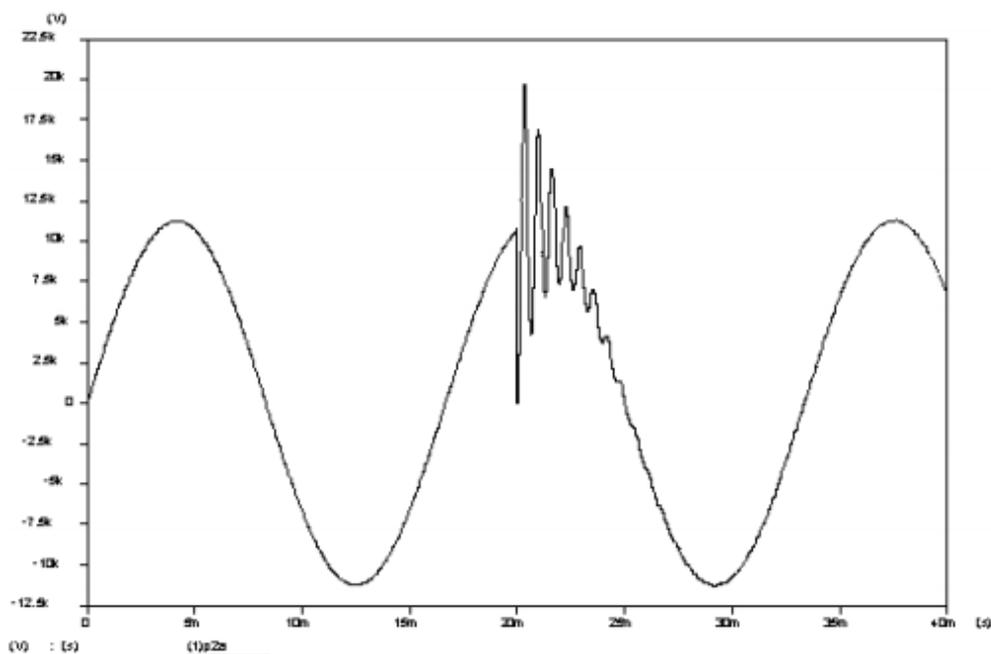
Uma alteração repentina das condições de regime de tensão ou corrente, com polaridades positivas e negativas, é considerado um transitório oscilatório. Estes podem ocorrer devido a energização de linhas de transmissão, corte de corrente indutiva e eliminação de faltas (DUGAN et al. 1996).

Os transitórios oscilatórios de baixa frequência são de forma frequente observados em sistemas de subtransmissão e distribuição, possuindo sua causa por vários tipos de eventos. Aquele com maior frequência é a energização dos bancos de capacitores, o qual normalmente causa oscilações de tensão.

Os distúrbios oscilatórios, por assim dizer, ocorrem através dessa transformação, de forma brusca (SILVA, 2008). Nos casos oscilatórios, essa ocorrência é vista nos dois sentidos, ocorrendo por meio de cortes de cargas

indutivas, energização de cargas capacitivas, aplicação de transformadores e eliminação de faltas. Essa energização, como é possível ser verificada na Figura 3, caracteriza a ocorrência de valores em linhas de frequência inferiores a 5 kHz, com períodos que variam de 0,3 a 50 ms, sendo esses os transitórios de baixa frequência.

Figura 3 - Formação de transitório de oscilação

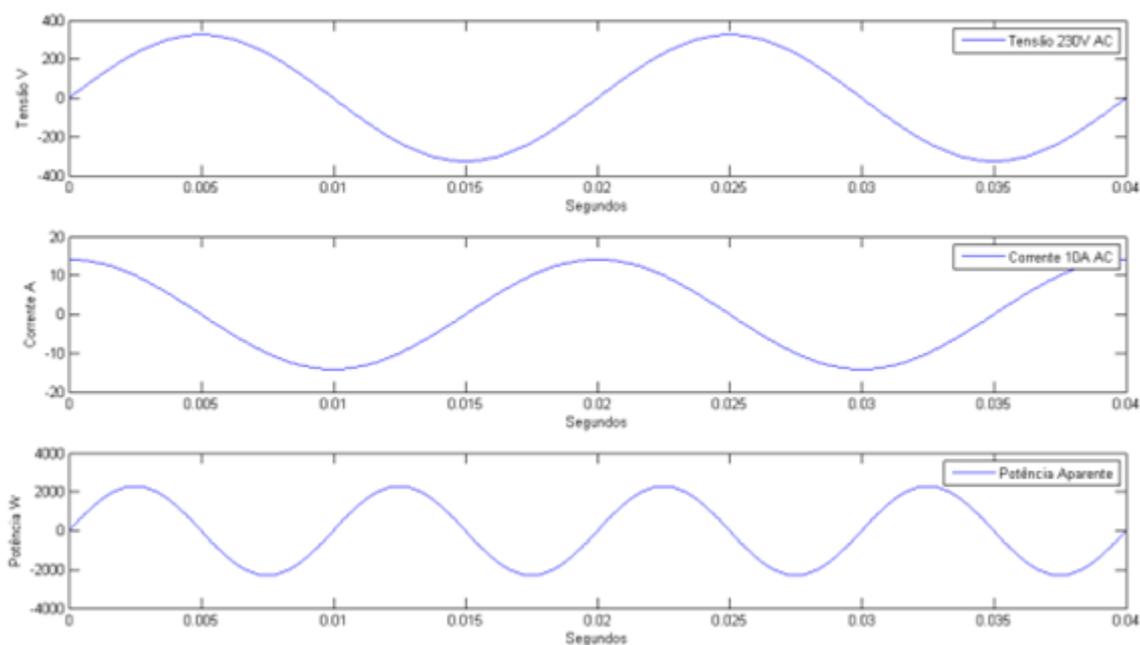


Fonte: Dias (2002)

2.3.5 Fator de potência

Se a carga com presença no circuito for de forma pura reativa, as ondas de tensão e correntes acabam apresentando um desfasamento de 90 graus. A energia que flui é durante metade do ciclo positiva, e em outra metade negativa, pelo que a contribuição energética líquida terá nulidade, o que causa somente perdas nas linhas. Como é possível visualizar na Figura 4, a média de energia que tem transferência para a carga é nula (BARBOSA, 2012).

Figura 4 - Potência com derivação de cargas de forma pura reativas



Fonte: Barbosa (2012)

Os equipamentos domésticos e industriais que fazem o consumo de energia elétrica poderão ser de forma pura resistivos como a apresentação de um componente reativo. Com isso, a potência com transferência possui uma forma

complexa, havendo todavia potência ativa e reativa a ter consumo (BARBOSA, 2012).

2.3.6 Potência ativa ou reativa

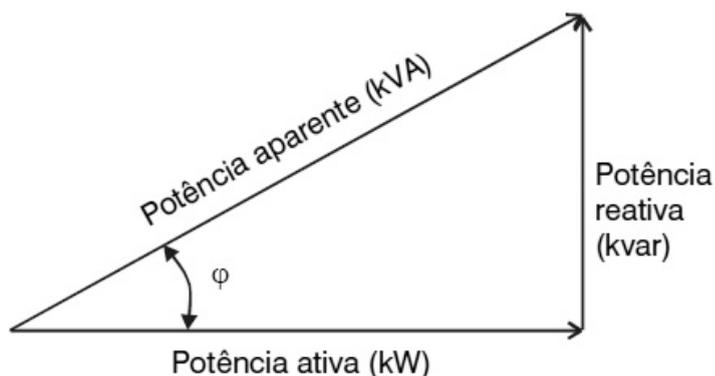
Além do mais, as cargas indutivas precisam de campo eletromagnético para que tenha funcionamento. Por este motivo, sua operação é requerente de dois tipos de potência segundo Engelétrica (2020):

- Ativa: potência que de forma efetiva acaba realizando trabalho na geração de calor, luz, movimento, etc. Tem sua medição em kW;
- Reativa: potência com utilização somente para a criação e mantimento dos campos eletromagnéticos das cargas indutivas. Tem sua medição em kvar.

Com isso, enquanto a potência ativa tem consumo todavia na execução de trabalho, a potência reativa, além de não fazer a produção de trabalho, tem circulação perante a carga e a fonte de alimentação, tendo ocupação de espaço no sistema elétrico que poderia ter utilização para fornecimento de mais energia ativa.

A definição do fator de potência é o movimento perante a potência ativa e a aparente. Ele faz indicações da eficiência da utilização de energia. Um alto fator de potência faz indicações de uma eficiência alta e de forma inversa, um fator de potência baixo faz indicações de baixa eficiência energética. Assim, um triângulo retângulo é habitualmente usado para a representação das relações perante kW, kvar e kVA, de acordo com Figura 5.

Figura 5 - Triângulo retângulo de potência



Fonte: Engelétrica (2020)

2.4 Medição

O fornecimento de energia elétrica pode ser feito por meio de três sistemas básicos: monofásico, bifásico e trifásico. Atendendo desde o ramo residencial, comercial e industrial, a determinação do tipo de fornecimento é decorrente da finalidade de uso, da classificação do consumidor, da potência total dos equipamentos da demanda e do regime de uso (SILVA JUNIOR, 2019). Em cada tipo, independente do número de fases, está presente o cabo de potencial neutro.

2.4.1 Voltímetro e Amperímetro

Os aparelhos que permitem fazer a medição das características da energia elétrica, acabam remontando dos primórdios do uso da própria energia elétrica. Desde o começo, houve a necessidade de medição de vários parâmetros, como a diferença de potencial perante dois pontos e a corrente elétrica. A Figura 6 mostra a evolução dos equipamentos de medição de energia elétrica.

Figura 6 - Evolução dos equipamentos de medição de energia elétrica



Fonte: Barbosa (2012)

Na atualidade, já são diversos os equipamentos de medição que são possíveis encontrar à venda no mercado. Possuem distinção de forma fundamental em suas funções de análise e em sua portabilidade.

Os equipamentos móveis possuem a vantagem de permitirem ter utilização por técnicos que realizam medições no local almejado sem dificuldades. Os fixos, são encontrados montados nos quadros elétricos de unidades fabris, e poderá ser encontrado nas instalações domésticas, entretanto, ainda há um número bastante reduzido (SILVA, 2017).

O valor desses equipamentos tem variância de acordo com suas capacidades de monitorização da rede elétrica. Via de regra, o valor tem associação com a capacidade do analisador fazer a medição do maior número de parâmetros da rede elétrica com um menor erro em associação (SILVA, 2017).

Em relação aos parâmetros com medição, há diversos que são transversais a todos os equipamentos do gênero como: tensão por fase, corrente por fase e potência consumida no instante de observação. Entretanto, há outros apenas encontrados nos equipamentos mais nobres, e com um custo mais alto. Um simples aparelho tem capacidade de medir de forma única o consumo de energia

instantâneo, é mais econômico do que um dispositivo que faz a análise da rede elétrica por forma a fazer garantia que diversas características da energia elétrica estão dentro dos parâmetros definidos pelas normas (SILVA, 2008).

2.4.2 Multimetro

De forma semelhante, a Figura 7 mostra um exemplo de multimetro de energia que existe no mercado. Este equipamento normalmente fica instalado de forma fixa, geralmente nas portas de painéis elétricos. Possuem capacidade para medir tensão e corrente, além de opções de monitoramento ou supervisão remota.

Figura 7 - Multimetro de energia Schneider



Fonte: Schneider Electric (2021)

2.4.3 Analisador de energia

Um analisador de energia tem utilização para a medição do fluxo de potência (w) num sistema elétrico. Isso tem relação com a taxa de transferência elétrica perante uma fonte de energia e um dissipador, daí a expressão alternativa de energia como energia por segundo (J/s) (HAFNER et al. 2015).

A medição do fluxo energético é considerada uma etapa crítica, mesmo que rudimentar, que poderá ter realização com facilidade fazendo o uso de um analisador de potência padrão. Sistemas mais avançados acabam adquirindo sinais elétricos, realizando cálculos integrados para análises adicionais e complexas (BAPTISTA et al. 2014).

Os analisadores de energia poderão ter utilização para a medição do fluxo energético em sistemas de corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC), com considerações diferentes para a medição dos circuitos CA (BARBOSA, 2012).

Um método que proporciona um valor mais preciso e que tem êxito em qualquer forma de onda, consiste em mapear uma determinada onda, marcando os pontos que retratam o valor eficaz naquele instante. Essa técnica é chamada de True-RMS, e que aufere valores de potência média dissipada, comparáveis com uma tensão contínua que dissiparia potência equivalente.

Os valores True RMS de um sinal elétrico são obtidos ao longo do ciclo da frequência CA. Além de envolver diversos cálculos realizados pelo instrumento de medição, o resultado exibe a frequência base do circuito. Os analisadores de energia realizam a detecção de forma digital dos ciclos de frequência para determinar os períodos RMS de forma confiável (BARBOSA, 2012). Uma vez que o analisador de energia tenha feito determinação de cada um desses valores, o poder do cálculo torna-se uma questão de matemática simples

Sistemas típicos adquirem de forma direta e individual tensões com o uso de divisores de tensão, enquanto um transformador de corrente é necessário para a medição da corrente. (SILVA, 2017).

Segundo Silva (2017), os analisadores de energia inovadores acabam fornecendo mais do que somente medições de energia. Eles são de forma frequente, fundamentais para a medição e obtenção de diversos valores de energia, como é o caso do torque, que engloba cálculos adicionais e métodos analíticos como:

- Mapeamento da eficiência;
- Transformada Rápida de Fourier (FFT) e análise harmônica;
- Valores de potência essencial e raiz quadrada média (RMS);
- Diagramas polares e componentes simétricos;

2.5 Qualímetros

Durante a extensão da rede, não é possível que a tensão seja mantida uniforme em todos os pontos, já que o fluxo de corrente gera uma queda de tensão na distribuição geral da rede. Outra condição que gera as oscilações de tensão refere-se à distância, característica presente em qualquer sistema por conta da resistência elétrica dos cabos, fazendo com que haja uma queda progressiva ao longo do trecho (BARBI, 2006).

As redes elétricas possuem uma grande suscetibilidade em apresentar problemas que podem causar danos em virtude de quedas e oscilações de tensão. As concessionárias responsáveis pela transmissão e distribuição se esforçam para entregar energia de qualidade e dentro das especificações exigidas, buscando

manter uma tensão e frequência constantes, com pouca variação ao longo de seu funcionamento (SILVA, 2008).

Por sua vez, o analisador de qualidade de energia, ou qualímetro, é um instrumento de medição, registro e análise de qualidade da energia elétrica. Pode contar com sistema de registro de oscilações, distorções e indicar componentes harmônicos, sendo utilizado como ferramenta para melhorar o fornecimento de energia e identificar falhas.

Há no mercado diversos fabricantes distintos, cada um com suas características, funções e preços distintos, adequado para a análise e adequação dos sistema de energia ao Módulo 8 do PRODIST, elaborado pela ANEEL, o qual relaciona normas e regras para a qualidade da energia elétrica.

O analisador de qualidade de Energia da marca Fluke modelo 435 – Série II (Figura 8) possui como características medições de qualidade de energia, trazendo os detalhes das formas de onda, com a captação e o registro dos eventos de distorção, além de equacionar eficiência e perda de energia. Também possui a facilidade de ter análise dos dados, com registro no equipamento partindo do aplicativo para smartphones e do *software* para computadores. O valor médio de mercado do aparelho gira em torno de R\$ 58.000,00.

Figura 8 - Analisador de qualidade de energia da marca Fluke



Fonte: Fluke (2020)

Já o analisador de qualidade de energia da marca Minipa modelo ET-5062C (Figura 9) possui como características a visualização em tempo real grandezas como: tensão, corrente, frequência, potências, energias, fator de potência, picos de tensão, transitórios, assimetria, distorções harmônicas totais, harmônicos, sequência de fase, apresentando ainda as formas de onda de tensão, corrente, histograma, harmônicos e diagramas vetoriais de tensões e correntes (MINIPA, 2021). No mercado é possível encontrar este analisador a partir de R\$ 31.000,00.

Figura 9 - Analisador de qualidade de energia da marca Minipa



Fonte: Minipa (2021)

A marca Embrasul dispõe do analisador de qualidade de energia modelo RE8000 (Figura 10), onde a principal característica do equipamento são as quatro entradas para monitoramento de tensão e corrente de forma simultânea. De maneira similar às outras marcas, além de tensão, corrente e frequência, realiza cálculo das grandezas secundárias segundo o que é estabelecido pelas normas. Este analisador parte de um custo médio de R\$ 30.000,00 .

Figura 10 - Analisador de qualidade de energia da marca Embrasul



Fonte: Embrasul (2020)

2.6 Análise de demanda de energia elétrica

É fundamental adotar técnicas que venham a proporcionar uma segurança para a previsão de demanda. Nesse ponto, entram diversos fatores como crescimento econômico, crescimento demográfico e desenvolvimento tecnológico. Também podem ser considerados aspectos relacionados ao momento político, planejamento do governo para investimentos futuros no mercado de energia, e na capacidade dos sistemas de geração e transmissão (MME,2020).

As características do modelo poderão ter definição nos aspectos a seguir:

- Completo: aborda os aspectos com relevância;
- Simples: nenhum aspecto supérfluo;
- Transparente: clareza para o usuário;
- Flexível: cobre uma diversidade útil de situações;
- Robusto: resultados que acabam resistindo a alterações;

Entre os principais modelos usados para prever o contexto histórico do planejamento da energia elétrica, são observados os tipos insumo-produtos e econométricos.

O modelo econométrico tem por base de que o futuro poderá ser antecipado pela linearização dos dados do passado, com perspectivas que não acarretam em alterações significativas em variáveis (ALMEIDA FILHO, 2011).

Esse modelo leva como base, a economia, indicadores socioeconômicos e dados demográficos, considerando os consumidores de forma homogênea, não levando em conta a tecnologia e a utilização final da energia. Usado até os anos 70 onde o consumo energético tinha o planejamento baseado em todos os dados do passado, usava como base preços e níveis de atividades econômicas, sendo considerado um método com pouca indicação (DOURADO, 2004).

Apesar da simplicidade e da pouca robustez, este modelo baseado em estatística não pode ser considerado obsoleto, sendo de grande importância para sistemas e organizações menores com menor risco, sendo adotado por pequenas empresas e distribuidoras de energia.

Enquanto isso, o modelo de insumo-produto faz proposição que, os coeficientes produtivos são dependentes não somente da estrutura e dos preços relativos, nem somente da tecnologia usada, mas ainda de limitações de abastecimento perante as atividades. A interação entre coeficientes técnicos adotados neste modelo faz implementação do quantitativo mínimo produtivo fundamental perante as áreas envolvidas, buscando um equilíbrio geral no período em avaliação (DOURADO, 2004).

É fundamental a utilização correta dos dados e da observância interativa entre as áreas e segmentações distintas relacionadas. A exclusão de variáveis externas pode acarretar uma previsão falha, pela não captação das evoluções de mercado (ALMEIDA FILHO, 2011).

2.7 Análise de economia de energia

Desde a privatização da maior parte das distribuidoras de energia elétrica do país na década de 1990, o setor energético nacional vem passando por reestruturações e mudanças constantes, com a criação de agências reguladoras e medidas de liberação vieram mudando de forma drástica e constante a dinâmica do setor, cuja mudança ocorreu após abertura da geração e comercialização da eletricidade em modo de concorrência (BALBINOT, BRUSAMARELLO, 2014).

Além das ações socioambientais, o crescimento exagerado de tributos e encargos sobre o valor final da geração energética impactam nas questões de eficiência energética. Isso faz com que sejam buscados meios de melhorar essa eficiência com objetivo de reduzir custos.

Existem diversos modos de diminuição do consumo de energia elétrica, que vão desde o aproveitamento da iluminação natural até a substituição de equipamentos por outros com menor consumo. A análise da rede elétrica como modo de compreender a estrutura de funcionamento, aliado à aplicação de equipamentos de análise de energia, possibilita entender e determinar a melhor ação efetiva economia e melhoria da eficiência.

2.7.1 Horário de ponta

Em seu portal *web*, a ANEEL esclarece sobre o funcionamento dos postos tarifários. Nas conexões do grupo A, que engloba os consumidores que recebem energia em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou nas instalações com sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, são aplicadas tarifas diferenciadas para horários de ponta e fora de ponta.

O horário de ponta consiste num período de 3 horas sequenciais, considerando somente dias úteis. Já o horário intermediário tem por definição um período de 1h a 1h30 antes e depois do horário de ponta, e por fim o horário fora de ponta, que são as horas fora da classificação de ponta e intermediária. Definidos por área de concessão/permissão, neste trabalho, é considerado o fornecimento pela Concessionária RGE Sul, com horário de ponta entre 18h e 21h, e demais horários classificados como fora de ponta.

2.8 Plataforma Arduino

Vista como uma plataforma de *hardware* livre, esse sistema de prototipagem eletrônica utiliza uma única placa que engloba um microcontrolador modelo Atmel. O objetivo consiste em fornecer ferramentas acessíveis à programação, facilitada por meio de entradas e saídas tanto analógicas e digitais, que garantem acessibilidade, custo reduzido de implementação e facilidade de uso. A sua facilidade está voltada ao público geral que tem dificuldades em sistemas de programação e necessitam de sistemas mais simplificados para tal atividade, haja vista que sua programação e implementação são facilitadas do ponto de vista técnico quando comparado com outros sistemas mais sofisticados (ROSÁRIO, 2009).

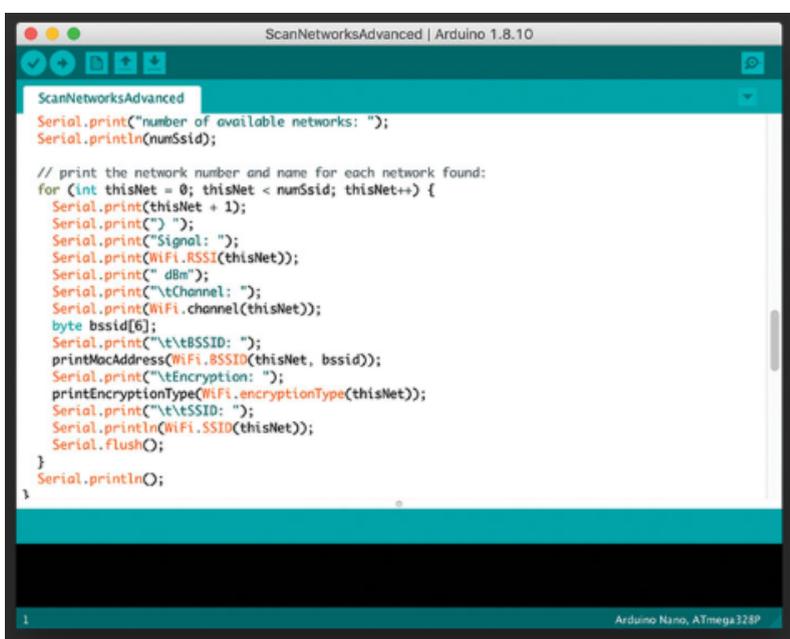
As placas Arduino levam como base um microcontrolador baseado no *chip* ATmega328P. Os kits contém todo o necessário para suportar o microcontrolador, e a conexão é realizada a um computador por meio de um cabo USB ou alimentada por uma fonte externa. Estão disponíveis vários modelos de placas, cada uma com suas particularidades e especificações próprias.

O microcontrolador traz algumas portas de entrada e saídas digitais, entradas analógicas, saída para modulação PWM e comunicação. Também são oferecidos uma gama de módulos de ampliações, que eleva o número de soluções oferecidas.

A configuração da placa é desempenhada na linguagem C, com uma IDE (*Integrated Development Environment*) simples, fornecida pelo fabricante e que proporciona o desenvolvimento dos códigos e *scripts*. A programação finalizada é transferida via comunicação serial para a placa desejada.

A figura 11 mostra a IDE do Arduino, que conta inclusive com a disponibilidade de um editor on-line.

Figura 11 - IDE de programação do Arduino

The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. The title bar reads "ScanNetworksAdvanced | Arduino 1.8.10". The main editor area contains the following C++ code:

```
ScanNetworksAdvanced
Serial.print("number of available networks: ");
Serial.println(numSsid);

// print the network number and name for each network found:
for (int thisNet = 0; thisNet < numSsid; thisNet++) {
  Serial.print(thisNet + 1);
  Serial.print(" ");
  Serial.print("Signal: ");
  Serial.print(WiFi.RSSI(thisNet));
  Serial.print(" dBm");
  Serial.print("\tChannel: ");
  Serial.print(WiFi.channel(thisNet));
  byte bssid[6];
  Serial.print("\t\tBSSID: ");
  printMacAddress(WiFi.BSSID(thisNet, bssid));
  Serial.print("\tEncryption: ");
  printEncryptionType(WiFi.encryptionType(thisNet));
  Serial.print("\t\tSSID: ");
  Serial.println(WiFi.SSID(thisNet));
  Serial.Flush();
}
Serial.println();
```

The status bar at the bottom indicates "Arduino Nano, ATmega328P".

Fonte: Arduino (2021).

Como características principais, traz a simplicidade e a capacidade do recebimento de módulos adicionais. Sua concepção foi feita de maneira a permitir que outros colaboradores possam fazer a ampliação das funcionalidades, pois além do mais, o microcontrolador base fabricado pela Atmel, é de fácil acesso no mercado (TAVARES, 2020). A figura 12 mostra a placa Arduino modelo UNO.

Figura 12 - Placa Arduino UNO



Fonte: Arduino (2021).

O arduino nano (Figura 13) é uma versão com tamanho reduzido. Bem como o arduino uno, o nano também poderá ter ampliações com a utilização de módulos de expansão.

Figura 13 - Placa Arduino Nano



Fonte: Arduino (2021).

Segundo dados do fabricante, o modelo UNO possui as seguintes características:

- tensão de operação de 5V via porta USB.
- conexão para fonte externa de 7 a 12 volts.
- clock interno de 16 MHz.
- 16 pinos analógicos de 10 bits.
- 54 pinos digitais, dentre eles, 15 para aplicações PWM.
- memória flash de 256 KB.
- SRAM de 8 KB.
- EEPROM de 4 KB.

O Arduino Nano possui características semelhantes ao modelo Uno, com diferença em relação ao tamanho. Outra diferença está na ausência do conector de alimentação externa e na forma de conexão dos terminais. Tais características conferem a aplicabilidade em projetos compactos e sem muito espaço (OLIVEIRA E ZANETTI, 2015).

2.8.1 Sensores de tensão e corrente

Segundo Abubakar et al. (2017), a tecnologia dos sensores acabou atingindo um nível avançado, onde as medições que não haviam possibilidades de obtenção, poderão ter medição de forma simples e fácil, com a disponibilidade de sensores e transdutores.

Para medir a tensão elétrica, poderá ter utilização o sensor para tensão modelo ZMPT101B, que tem operação em altas tensões, entretanto, precisa ter calibragem de maneira correta, por causa da calibração ser um aspecto de suma

importância na leitura realizada na medição. Na Figura 14, é possível visualizar a pinagem e a ilustração do sensor, junto com suas principais características.

Figura 14 - Módulo Sensor de Tensão



Fonte: Casa da Robótica (2021)

De acordo com os dados obtidos pelos sites de vendas, este sensor tem uma precisão de leitura de $\pm 0,5\%$, e uma linearidade de $0,2\%$.

De acordo com Fontes (2013), o arduino não consegue fazer o monitoramento das grandezas de alta intensidade, sendo que suas portas analógicas não acabariam suportando, e nem seria possível fazer a identificação de suas variações com uma equivalência proporcional. Nesse caso, é necessário o uso e conexão a um circuito divisor de tensão, para níveis que façam atendimento das limitações do hardware, possuindo como tensão positiva entre 0 V a uma tensão de referência de 5 V .

Leituras de correntes maiores podem ser realizadas de forma indireta, com a utilização de transformadores de corrente. Esse transformador reproduz em sua saída secundária uma corrente em proporção menor e isolada do montante que circula em sua passagem.

A figura 15 mostra um transformador de corrente bipartido, ou também chamado de tipo janela, que é acoplado ao cabo em que se deseja monitorar.

Possuem uma relação de transformação, que no caso do modelo apresentado para utilização para correntes de até 100A, é de 1000/1.

Figura 15 - Transformador de corrente tipo janela para 100A



Fonte: Micro Transformer (2021)

Os terminais deste transformador nunca podem ficar abertos, ou seja, sem que estejam conectados em algum circuito de carga, pois caso isso aconteça, toda a corrente do secundário circula pelo ramo magnetizante, que por possuir impedância elevada, faz surgir uma alta tensão que pode romper a isolação e danificá-lo.

2.9 Datalogger

Com a evolução dos sistemas de computadores, novos sistemas automáticos para aquisição de dados passaram a ser desenvolvidos, sendo assim os mais comuns para esse tipo de aplicação (BARRETO, 2015). Essa aquisição pode ser compreendida como uma coleta de dados de uma condição real e que possam ser manipulados através de sistemas computadorizados, envolvendo, em condições normais, a medição de sinais e análise de formas de ondas para o processamento de valores medidos, como forma de obter a informação desejada, como forma de

monitoramento de um certo equipamento ou processo. Esse equipamento que realiza a medição de parâmetros e o armazenamento das informações é chamado de *datalogger*.

O *datalogger* refere-se a um equipamento que coleta, converte e registra dados, sendo capaz de realizar a leitura de instrumentos de medição e realizar o armazenamento dessas leituras, desde que os instrumentos sejam capazes de transmitir a informação, seja de forma analógica ou digital, para futuro tratamento (BARROS, 2016). Esse sistema é composto basicamente por sensores e transdutores, condicionadores de sinal, conversores analógico/digital, uma memória para o armazenamento dos dados e um programa de interface para análise pós tratamento de dados.

2.9.1 Sensores dos *dataloggers*

Os sensores ou transdutores são elementos responsáveis por fazer a conversão de um fenômeno físico num sinal elétrico que possa ser mensurado, cuja saída pode variar entre uma característica de grandeza elétrica, como corrente, tensão, resistência ou outro atributo elétrico que varie com a grandeza que está sendo medida, sendo então escolhido entre um ou outro dependendo da precisão requerida (BARRETO, 2015).

Por sua vez, os condicionadores de sinais realizam a adequação dos sinais analógicos para a conversão digital, sendo composto por amplificadores, atenuadores, filtros e isoladores. Os conversores analógico/digital são responsáveis por realizar a tradução da grandeza elétrica medida em uma representação numérica capaz de ser tratada posteriormente (BARROS, 2016). Já o programa e a memória são usados para manipular e armazenar esses dados, havendo posterior representação numérica e/ou gráfica dos resultados obtidos.

2.9.2 Datalogger com Arduino

A aplicação do Arduino possibilita que os sistemas sejam compactados e possam ser armazenados dados de leitura de diversos períodos de alimentação da rede elétrica, monitorando as variações de corrente, tensão e frequência, possibilitando que seja realizada uma leitura futura por meio de armazenamento em memória não volátil (ROSÁRIO, 2009).

3 PROPOSTA

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um analisador de energia elétrica portátil, capaz de coletar dados de tensão e corrente desde sistemas monofásicos até trifásicos. As informações são apuradas individualmente para cada fase, e registradas continuamente em um cartão de memória. Os dados coletados serão importados em um sistema de planilhas que indicará parâmetros como tensão e corrente de cada fase, potência consumida e indicação de faltas ou anomalias, contendo gráficos, picos de consumo, e fará a relação dos dados com o horário de ocorrência.

O dispositivo relaciona duas grandezas principais: tensão e corrente. Operando de modo não invasivo, ou seja, não será necessário interromper ou alterar o circuito que será monitorado, a tensão é obtida com auxílio de garras jacaré e a corrente por meio de transformadores de corrente do tipo janela bipartido. Ocorre ainda, a correlação com o horário de coleta, sendo o intervalo dos dados de um segundo.

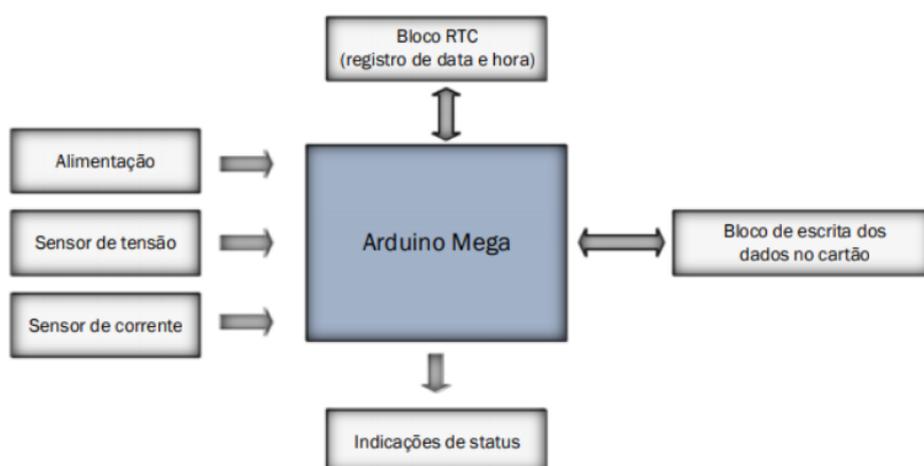
A coleta, delimitada em valores de tensão e corrente pelo fato de consistir em grandezas básicas e mais susceptíveis a problemas, procura demonstrar possíveis oscilações no fornecimento de energia, além de permitir o cálculo de potência consumida, potência média, indicar falhas e pontos críticos de operação.

Outro ponto a destacar é o fato do equipamento proposto ter como objetivo inicial ser de baixo custo.

3.1 Diagrama de funcionamento do analisador

A Figura 16 apresenta um diagrama de blocos que traz os principais blocos do analisador proposto. Após a montagem final, todo o conjunto será agrupado e acomodado em uma pequena caixa plástica.

Figura 16 - Diagrama de blocos do analisador

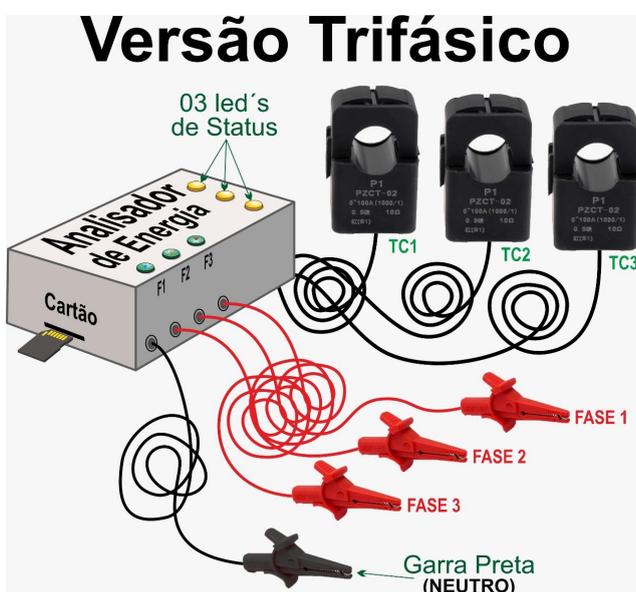


Fonte: do Autor.

3.2 Protótipo do analisador

Para este passo, foi realizado um estudo sobre equipamentos de análise de energia disponíveis no mercado, conforme Referencial Teórico. Tal estudo proporcionou a elaboração de um protótipo a ser desenvolvido (Figura 17), elaborado no *software* CorelDraw X8.

Figura 17 - Protótipo ilustrativo do Analisador Trifásico



Fonte: do Autor.

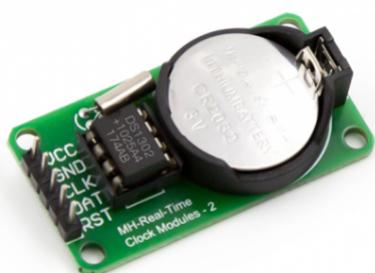
3.3 Plataforma Arduino

Para a montagem do analisador, será utilizado o modelo Arduino Nano. Tal escolha ocorre em função do número de entradas da placa (8 entradas analógicas), pois são registrados seis sinais, sendo tensão e corrente de cada uma das três fases em relação ao neutro. Esse hardware ainda permite futuras expansões e adição de outras funções, ou até mesmo, ampliação do número de registro de sinais.

3.4 Controle de data e hora

O controle de data e hora é realizado por intermédio de um módulo *Real Time Control RTC*, conforme figura 18. O módulo possui a capacidade de manter a data e hora atualizadas mesmo desligado ou durante uma interrupção do fornecimento de energia. Uma pilha de 3 volts garante o *clock* do módulo de forma contínua. Além do mais, o módulo ainda tem capacidade de realizar ajustes de forma automática no final dos meses que são possuintes de menos de 31 dias, faz a correção de ano bissexto e trabalha em formatação de 12 horas e 24 horas.

Figura 18 - Placa do módulo RTC



Fonte: Arduino (2021)

3.5 Sensor de tensão

Os valores de tensão são obtidos com o auxílio do módulo sensor de tensão que faz a leitura da tensão alternada de entrada, e já entrega um sinal condicionado para a placa do Arduino. O sensor de tensão é especificado para um range de entrada de 0 a 250 volts.

Devido a simplicidade e facilidade de ser encontrado no mercado, além de custo acessível, foram justificativas para a escolha deste modelo, referenciado no

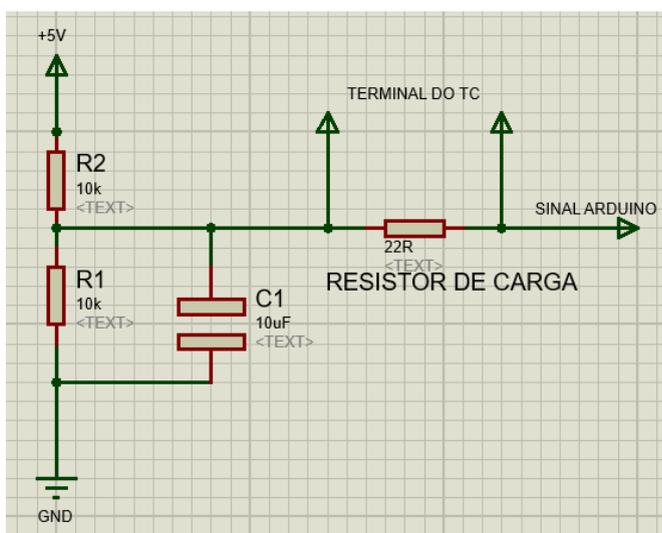
Item 2.8 deste trabalho, para a tarefa de condicionar os níveis de tensão AC para o Arduino.

3.6 Sensor de corrente

A leitura de corrente será realizada com o transformador de corrente. Esse transformador possui uma relação de transformação de 1000/1, com limite de 100 ampères no primário, e que cria no secundário, uma corrente de até 100 miliampères. Cabe ressaltar que a saída deste transformador não pode ser aplicada diretamente nas entradas analógicas do Arduino, sendo necessário o condicionamento do sinal de corrente para valores entre 0 a 5V.

Com o auxílio de um resistor de carga na saída do transformador de corrente, é criada uma queda de tensão proporcional à corrente do primário do TC. A utilização de um circuito com divisor de tensão, gera uma tensão média CC de 2,5v sobre a qual é mesclada a tensão gerada pelo TC, formando o sinal médio entre as leituras a cada segundo. O método utilizado é mostrado na figura 19.

Figura 19 - Circuito de condicionamento de sinal de corrente utilizado no projeto



Fonte: do Autor.

3.7 Armazenamento dos dados

A leitura e aquisição de dados irá ocorrer de forma constante em intervalos de um segundo, e simultaneamente, acontece a gravação dos valores acrescidos de data e hora, em um cartão de memória, com o apoio do módulo da figura 20. O formato do arquivo gerado é *.txt* e o nome de cada arquivo corresponde a data das leituras. Uma separação de ponto e vírgula entre os valores permite a interpretação e importação do arquivo para qualquer sistema de edição de planilhas ou banco de dados.

Figura 20 - Adaptador de cartão micro SD



Fonte: Casa da Robótica (2021)

3.8 Processamento dos dados

Os dados coletados com o analisador, como já colocado, ficam armazenados em um cartão de memória. Finalizado o processo de obtenção dos dados, o cartão deve ser retirado e conectado a um computador, para a cópia do arquivo.

Este arquivo será importado em um sistema de planilhas, onde automaticamente já apareceram gráficos contendo informações sobre picos de consumo, faltas registradas, oscilações de tensão, horários de maior e menor consumo, potência média e total. Também podem ser relacionados os custos de energia, desde que sejam configurados os valores pagos na fatura do local em análise.

4 RESULTADOS

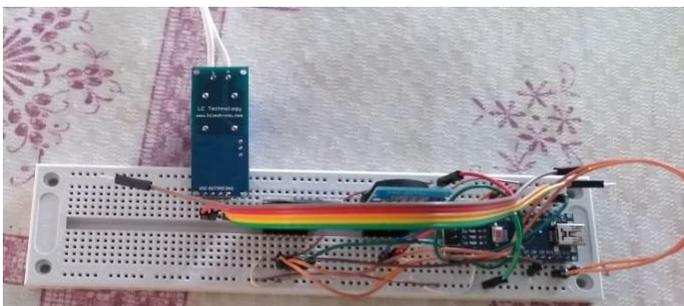
Para a construção do protótipo do analisador apresentado anteriormente, foram adquiridas todos os módulos, sendo eles: placa Arduino Nano, 03 módulos de sensor de tensão, 03 transformadores de corrente, módulo RTC, módulo cartão de memória, cartões de memória, e componentes para o condicionamento dos sinais de corrente.

4.1 Montagem experimental

A interligação dos módulos ocorre inicialmente de forma experimental, com auxílio de uma *proto-board*. Com a definição final das programações do Arduino, ocorre a montagem final, baseada no tamanho e organização dos componentes. É desejável que o conjunto final tenha o tamanho reduzido ao máximo, de maneira que possa ser acomodado dentro de máquinas e/ou quadros elétricos em análise.

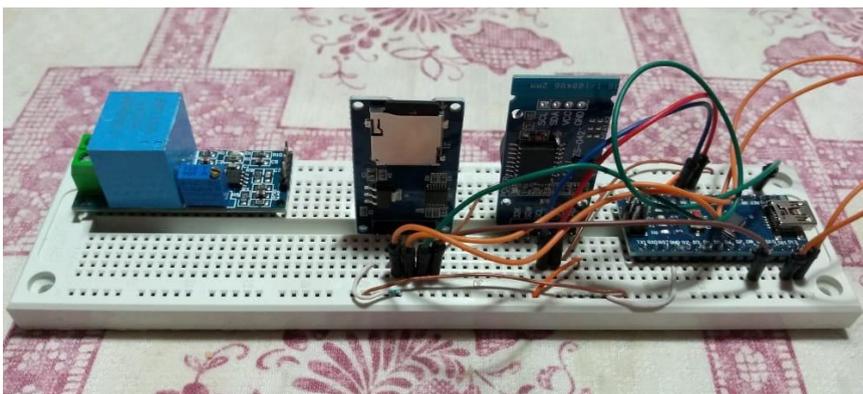
A figura 21 e a figura 22 exibem os testes em *protoboard*.

Figura 21 - Testes do módulo sensor de tensão



Fonte: do Autor.

Figura 22 - Testes iniciais dos módulos



Fonte: do Autor.

O registro constante de data e hora será acompanhado das leituras de tensão e corrente, e as informações gravadas sequencialmente no cartão de memória. A figura 23 apresenta a saída dos dados de forma experimental via comunicação serial.

Figura 23 - Saída serial de data e hora

```

compiled: Jun 13 2020 16:56:11
06/13/2020 16:56:11
RTC is newer than compile time. (this is expected)
06/13/2020 16:56:16
06/13/2020 16:56:17
06/13/2020 16:56:18
06/13/2020 16:56:19
06/13/2020 16:56:20
06/13/2020 16:56:21
06/13/2020 16:56:22
06/13/2020 16:56:23

```

Fonte: do Autor.

A figura 24 mostra as leituras de tensão, obtidas com o sensor de tensão após a elaboração do *script* no Arduino. O valor foi definido com uma casa decimal após a vírgula, sendo resultado de um cálculo efetuado pela biblioteca *Emonlib* do Arduino. O valor lido pelo pino de entrada de sinal do Arduino, é processado pela biblioteca junto com a informação de calibração do sensor, previamente configurada no Arduino, e apresentada no item 4.4.

Figura 24 - Leituras de tensão nos três sensores

2021;10;13;20;06;25	219.8	220.3	219.5	-
2021;10;13;20;06;26	219.4	219.9	219.6	-
2021;10;13;20;06;27	218.9	219.4	219.2	-
2021;10;13;20;06;29	219.4	219.9	219.4	-
2021;10;13;20;06;30	219.6	220.0	219.5	-
2021;10;13;20;06;31	219.4	219.9	219.5	-
2021;10;13;20;06;32	219.9	220.6	220.2	-
2021;10;13;20;06;34	219.5	220.3	220.0	-

Fonte: do Autor.

4.2 Processo de operação

Um detalhe a destacar está relacionado a segurança de operação do usuário final. Nesta etapa, está previsto o uso de garra jacaré, isoladas para até 1000V . O tipo mais comum é o apresentado na figura 25, disponível também em modelos com sistema extensor, para uso em locais de difícil acesso.

Figura 25 - Garra jacaré isolada e garra jacaré com sistema extensor



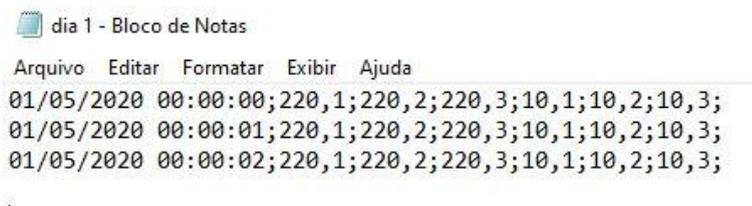
Fonte: Impac (2021)

4.3 Formato dos dados

Após o término das medições, o cartão será removido da caixa e inserido em um computador para a cópia dos arquivos gerados. Esses arquivos, em formato .txt, serão importados para a planilha de análise.

O formato de apresentação dos dados está representado na figura 26.

Figura 26 - Formato dos dados coletados

A screenshot of a Notepad window titled "dia 1 - Bloco de Notas". The window has a menu bar with "Arquivo", "Editar", "Formatar", "Exibir", and "Ajuda". The text content consists of three lines of data, each representing a timestamp followed by a list of values separated by semicolons. The first line is "01/05/2020 00:00:00;220,1;220,2;220,3;10,1;10,2;10,3;". The second line is "01/05/2020 00:00:01;220,1;220,2;220,3;10,1;10,2;10,3;". The third line is "01/05/2020 00:00:02;220,1;220,2;220,3;10,1;10,2;10,3;".

```
dia 1 - Bloco de Notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
01/05/2020 00:00:00;220,1;220,2;220,3;10,1;10,2;10,3;
01/05/2020 00:00:01;220,1;220,2;220,3;10,1;10,2;10,3;
01/05/2020 00:00:02;220,1;220,2;220,3;10,1;10,2;10,3;
```

Fonte: do Autor.

Empregando esse formato de armazenamento de dados, ocorre uma ocupação de um total de até 54 *bytes* para este modelo de resolução dos dados. Com a leitura ocorrendo a cada um segundo, se tem um total de 86.400 leituras diárias, o que resulta em aproximadamente 4,44 *Megabytes* de dados por dia. Numa análise de 10 dias, são consumidos em torno de 45 *Megabytes* de espaço do cartão de memória. Tamanhos menores de arquivos podem ocorrer pelo fato de algumas leituras utilizarem menos casas, e assim diminuir o tamanho da linha e consequentemente, consumindo menos *bytes*.

Como são coletados registros com intervalo de um segundo, além de monitorar todo o período, isso permite a criação de filtros que trazem como destaque em formato de alarmes, os momentos que a tensão estiver fora dos limites padrão.

No andamento da construção e utilização do analisador, foi utilizado um cartão de memória com capacidade de armazenamento de 16 GB.

4.4 Processo de calibração e leitura das grandezas

Uma etapa importante e relevante para o sucesso do projeto, consiste em calibrar o analisador, e garantir que os registros sejam fiéis aos sinais lidos em todo o *range* de cobertura. O *range* é definido em parte pela limitação dos componentes que fazem a leitura do sinal, onde o sensor de tensão tem seu limite fixado entre 0 e 250 volts e o transformador de corrente de 0 a 100A.

Um *script* no Arduino, que inclui a biblioteca *Emonlib*, faz a conversão e o cálculo do valor de tensão e corrente correspondente, mediante calibração pré definida, conforme mostra a figura 27.

Figura 27 - Linha de código do Arduino com parametrização da biblioteca

```
//PARÂMETROS TENSÃO (Pino analogico / Valor da calibracao / Mudança de fase)
emon1.voltage(0, VOLT_CAL1, 1.7);
emon2.voltage(1, VOLT_CAL2, 1.7);
emon3.voltage(2, VOLT_CAL3, 1.7);

//PARÂMETROS CORRENTE (Pino, calibracao - Cur Const= Ratio/BurdenR. 1000/22 = 45.45)
emon4.current(pino_sct4, 45.45);
emon5.current(pino_sct5, 45.45);
emon6.current(pino_sct6, 45.45);
```

Fonte: do Autor.

4.4.1 Leitura e calibração da corrente

O condicionamento do sinal dos transformadores de corrente foi realizado segundo descrito no Capítulo 3.6.

Para o teste e ajuste do Arduino para a monitoração de corrente, utilizou-se como carga uma lâmpada incandescente de 60W, segundo demonstra a figura 28 e 29. Com sete voltas do fio da lâmpada em torno do TC seria esperada uma corrente de 1,9 A, mesmo valor lido pelo instrumento durante o teste.

Figura 28 - Teste de corrente com amperímetro



Fonte: do Autor.

Para testar a linearidade do sensor de corrente, foram feitos testes com diferentes números de voltas do cabo ao redor do transformador de corrente e do alicate amperímetro. O processo precisa ser repetido para as outras duas entradas também (Figura 29).

Figura 29 - Teste de corrente com amperímetro nos três TCs

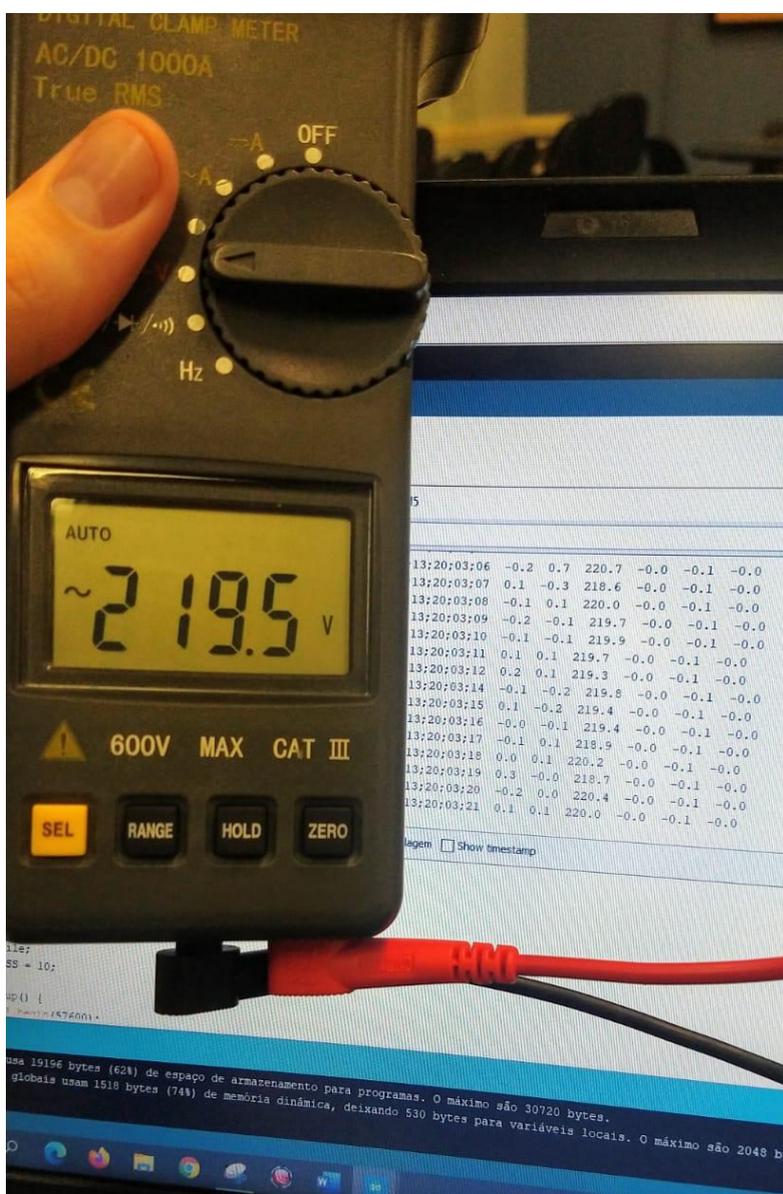


Fonte: do Autor.

4.4.2 Leitura e calibração da tensão

Já os valores de tensão foram ajustados com o auxílio de um multímetro True-RMS e osciloscópio. A figura 30 mostra os valores apresentados pelo monitor serial, cujas três fases foram unidas e testadas de forma conjunta.

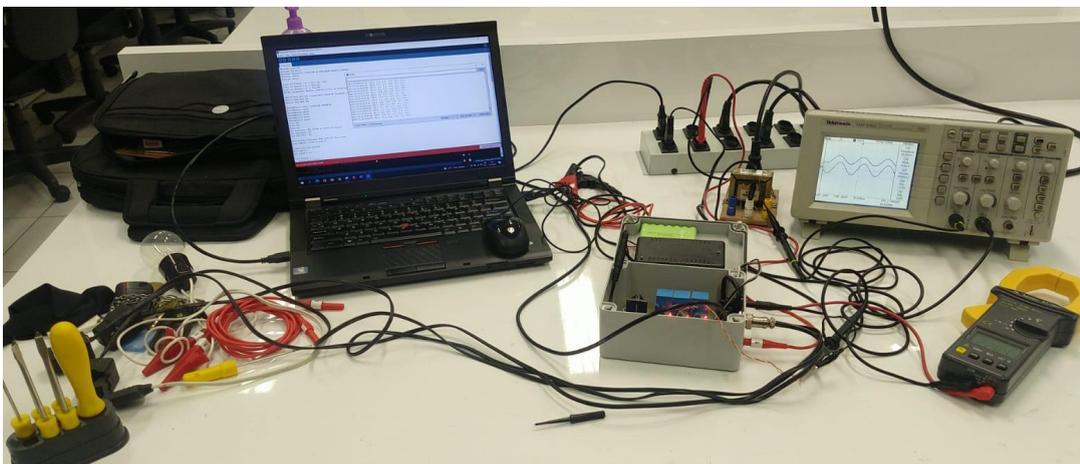
Figura 30 - Comparação dos níveis de tensão lidos pelo circuito



Fonte: do Autor.

A figura 31 mostra uma visão geral do momento dos testes em bancada.

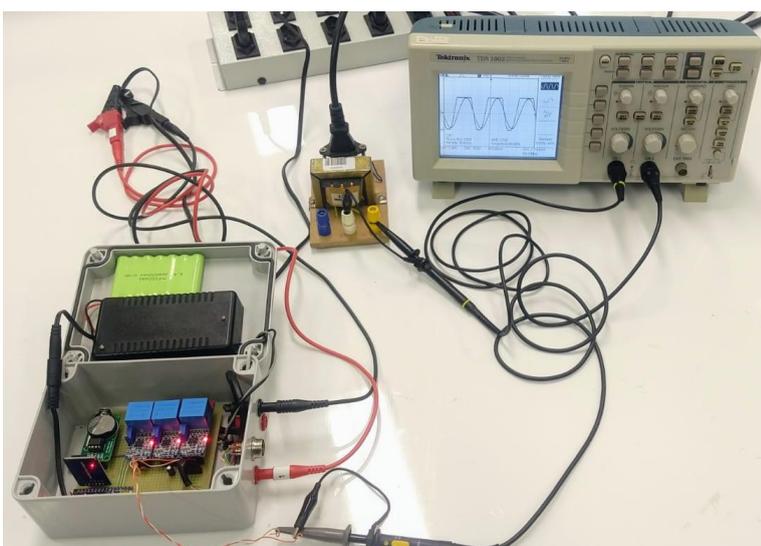
Figura 31 - Visão geral dos testes de calibração



Fonte: do Autor.

A figura 32 mostra o momento de calibração e comparação da forma de onda entregue pelo sensor para o Arduino.

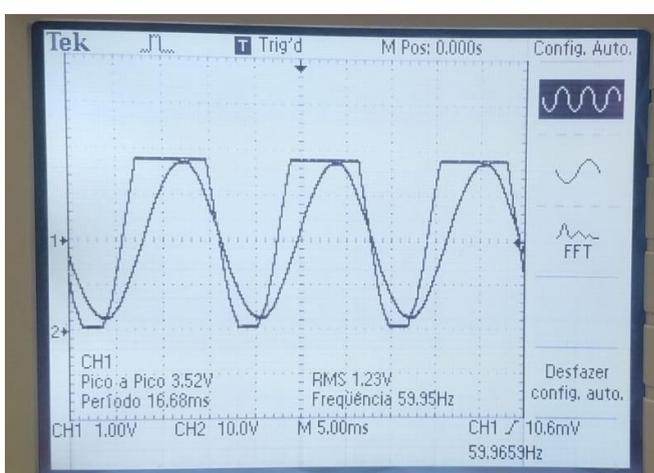
Figura 32 - Calibração e ajuste da forma de onda do sensor



Fonte: do Autor.

É necessário verificar a forma de onda de cada sensor, de maneira que a mesma não fique saturada, como é percebido o erro na figura 33. O nível de saturação da saída do sinal senoidal pode ser ajustado através de um potenciômetro localizado no próprio sensor. Com o ajuste, pode-se garantir que o sinal entregue condiz com a forma de onda monitorada pela entrada do sensor.

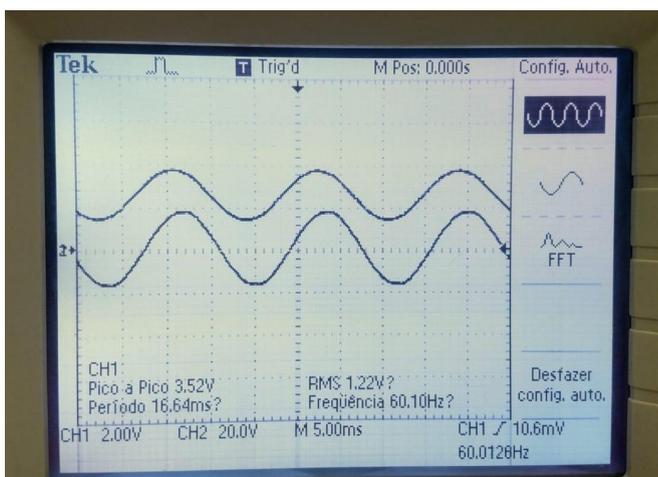
Figura 33 - Erro de saída do sinal do sensor de tensão com níveis saturados



Fonte: do Autor.

A figura 34 traz novamente uma amostra do sinal já corrigido, comparado a forma de onda da rede, obtida por meio de um transformador de teste. Também é possível perceber que o sinal está deslocado para o lado positivo, pois ele é modulado sobre uma componente DC de 2,5V gerada pelo sensor, já que o Arduino não trabalha com sinais negativos.

Figura 34 - Comparação da forma de onda da rede local com a saída do sensor



Fonte: do Autor.

Assim, ocorre a validação do processo de aquisição dos níveis de tensão. Este procedimento deve ser repetido para cada um dos três sensores de tensão, e novamente caso ocorra a substituição de algum dos módulos.

Ainda para simular uma variação da rede elétrica, e testar a linearidade do sensor, foram efetuados testes com a utilização de um variac, conforme mostra a figura 35.

Figura 35 - Testes de linearidade com variac



Fonte: do Autor.

4.5 Montagem da caixa e cabos de conexão

O início da montagem na caixa final é exposto na figura 36.

Figura 36 - Início da montagem da caixa do analisador



Fonte: do Autor.

A figura 37 mostra os transformadores de corrente montados com os cabos e o conector *mike* para interligação com a caixa. Cabe ressaltar que nesse cabo, já está embutido e isolado o resistor de carga do transformador de corrente. Assim, é garantido que não ocorram danos aos componentes em caso de desconexão do cabo de TC sob carga da caixa.

Figura 37 - Cabo montado com transformadores de corrente e resistor de carga



Fonte: do Autor.

Na imagem 38, estão expostos os cabos do tipo banana com a respectiva garra jacaré. Para facilitar a instalação e uso, os cabos foram numerados e identificados.

Figura 38 - Garras tipo jacaré com os respectivos cabos de conexão



Fonte: do Autor.

Um ponto a destacar consiste na troca do conector *mike* da caixa do circuito, para conexões do tipo banana para a conexão dos cabos de tensão. Além da maior segurança de operação, considerando a tensão no conector de até 400 volts entre as fases e a operação em ambientes com poeira e/ou umidade, o uso de conexões

banana garante maior isolação entre as três fases e possibilita uma versatilidade de utilização, pois caso seja necessário um levantamento em conexões monofásicas, os demais cabos podem ficar guardados. Para a conexão do cabo com os TCs, foi mantido o conector *mike* em virtude do baixo nível de tensão envolvido.

O painel final, com os bornes e conectores já identificados, é mostrado na figura 39.

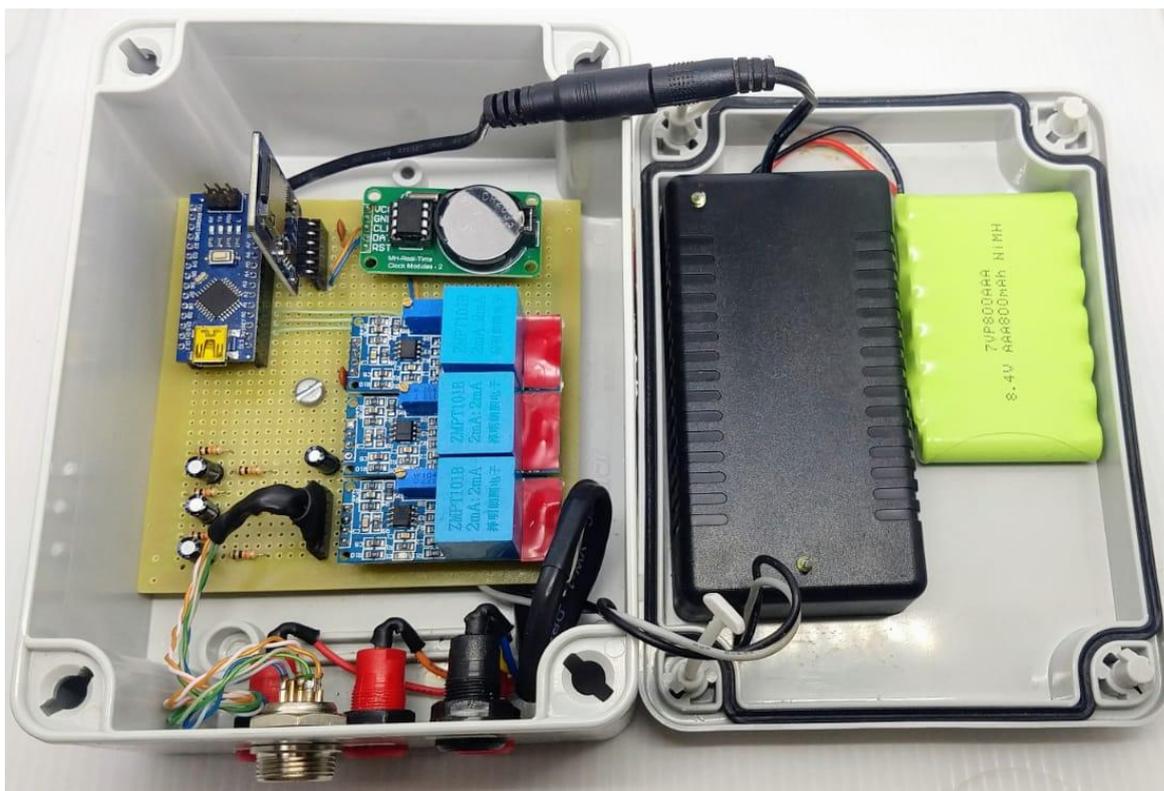
Figura 39 - Vista dos bornes para conexão dos cabos



Fonte: do Autor.

A organização interna do analisador está mostrada na figura 40. Os componentes bem como a placa base foram organizados de forma a ocupar o menor espaço, porém mantendo a isolação entre os circuitos.

Figura 40 - Organização interna dos componentes do analisador

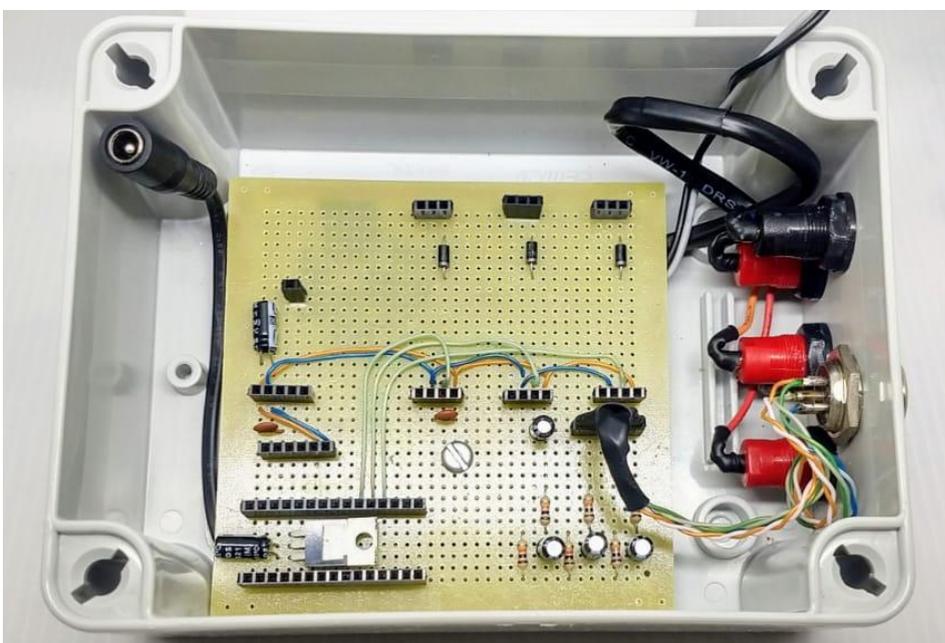


Fonte: do Autor.

4.5.1 Detalhes construtivos

A placa base foi pensada de forma modular, conforme demonstra a figura 41. Caso ocorra algum defeito, basta substituir o módulo desejado e retornar ao uso normalmente, salvo ajustes de calibragem ou programação.

Figura 41 - Placa base do circuito



Fonte: do Autor.

Os três diodos que podem ser vistos na placa base, tem por finalidade retificar cada uma das três fases e alimentar a fonte de alimentação do circuito, que ainda mantém a carga da bateria.

Também para garantir a estabilidade de tensão do circuito, um regulador de 5 volts foi instalado na placa, além de um conjunto de capacitores eletrolíticos e

cerâmicos para filtrar possíveis interferências que possam acarretar em oscilações nas leituras.

Uma pequena área de sobra na placa base, abre espaço para futuras ampliações, como por exemplo a adição de comunicação via wifi ou sinal de celular. O desenvolvimento deste analisador delimitou-se na gravação dos dados em um cartão SD devido ao propósito de uso em instalações dentro de empresas, que normalmente possuem restrições e controle de acesso a internet, sendo necessário uma autenticação no servidor de rede de internet, ou ainda o uso em áreas rurais que sequer possuem algum tipo de sinal.

Desse modo, este método supre a necessidade e garante a obtenção segura das leituras de forma independente, cujo código de programação efetua a abertura e fechamento do arquivo de registros do dia a cada escrita, ou seja a cada segundo, prevenindo perda ou corrompimento de registros caso acabe a bateria, ou ocorra algum erro no processo, já que os dados até então escritos, ficam salvos no cartão.

A bateria acoplada com a fonte de alimentação, mantém o fornecimento de tensão para o circuito em caso de queda ou desligamento repentino da rede monitorada. Dessa maneira os registros seguem sendo efetuados normalmente, até o restabelecimento da energia elétrica ou término da bateria. Os testes de autonomia da bateria indicaram um período de aproximadamente 3h e meia de durabilidade.

4.6 Teste prático em campo

De modo a coletar dados de forma prática utilizando o analisador desenvolvido, foi escolhido um processo produtivo de uma indústria gráfica da cidade de Roca Sales. A etapa da produção, chamada de hot-stamp, consiste em uma máquina rotativa com eixo excêntrico e um conjunto de resistências, que

aplicam uma camada metálica sobre uma determinada área de papel. Detalhes do sistema e as suas características estão descritos no ANEXO I deste trabalho.

Como a empresa possui um quadro com banco de capacitores com o objetivo de manter o fator de potência dentro dos padrões, não há preocupação neste levantamento com erros referentes ao fator de potência. A figura 42 mostra o quadro com os capacitores, que atuam de modo automático, comandados por um controlador da marca WEG, bem como os valores informados na fatura de energia (Figura 43) referente à reativos estão quase zerados, já que um valor de 8 kW para fornecimento de reativo fora de ponta é apontado na fatura, ao custo de R\$ 3,10.

Figura 42 - Vista do banco de capacitores da indústria



Fonte: do Autor.

Figura 43 - Detalhe da fatura de energia da empresa

R VER JOAO DE SOUZA, 322
 95735-000 ROCA SALES / RS

CNPJ 87.304.986/0001-71
 Inscrição Estadual: 102.000.187.6
 Conta Contrato Nº: 120000267041

0800 721 1701 713409979 3095502623 SET/2021 14/10/2021 27.766,68

www.cpflempresas.com.br

Cod	Descrição da Operação	Mês Ref.	Quant Registrada	Quant Faturada	Umid. Med.	Tarifa com Tributos	Valor Total Operação	Base Cálculo ICMS	Aliq. ICMS%	ICMS	Base Cálculo PIS/COFINS	PIS 1.16%	COFINS 5.28%
0605	Energia Atv Fornec Ponta TUSD	SET/21	2.442,575	2.442,575	kWh	1,39227250	3.400,73	3.400,73	17,50	595,13	2.805,80	32,54	148,42
0605	Energia Atv Fornec Fponta TUSD	SET/21	22.542,275	22.542,275	kWh	0,11233649	2.532,32	2.532,32	17,50	443,16	2.089,16	24,23	110,52
0601	Energia Atv Fornec Ponta - TE	SET/21	2.442,575	2.442,575	kWh	0,56732752	1.385,74	1.385,74	17,50	242,50	1.143,24	13,26	60,48
0601	Energia Atv Fornec Fponta - TE	SET/21	22.542,275	22.542,275	kWh	0,35069220	7.905,40	7.905,40	17,50	1.383,45	6.521,95	75,65	345,01
0601	Adicional Band Vermelha Ponta	SET/21					449,40	449,40	17,50	78,65	370,75	4,30	19,61
0601	Adicional Band Vermelha FPonta	SET/21					4.147,51	4.147,51	17,50	725,81	3.421,70	39,69	181,01
0601	Consumo Reativo Exc Fora Ponta	SET/21	8,431	8,431	kWh	0,36765803	3,10	3,10	17,50	0,54	2,56	0,03	0,14
0602	Demanda [kW] - TUSD	SET/21	177,316	177,316	KW	35,21696760	6.244,56	6.244,56	17,50	1.092,80	5.151,76	59,76	272,53
0602	Demanda Ultrap [kW] - TUSD	SET/21		15,316	KW	70,23311819	1.078,81	1.078,81	17,50	188,79	890,02	10,32	47,08
	Subtotal						27.147,57						
	Total Distribuidora						27.147,57						
0607	Contrib. Custeio IP-CIP Municipal	SET/21					619,11						
	Total Devoluções/Ajustes						619,11						
	Total a Pagar						27.766,68						

Fonte: do Autor.

A figura 44 expõe o quadro de disjuntores das máquinas da empresa. Neste quadro foi conectado o analisador nos respectivos cabos de alimentação da máquina de *hot-stamp*.

Figura 44 - Quadro de disjuntores durante o processo de coleta de dados



Fonte: do Autor.

4.7 Processo de coleta das medições de tensão e corrente

Para uma organização dos registros, a figura 45 mostra como foi idealizada a criação dos nomes dos arquivos. Os quatro primeiros dígitos indicam o ano, seguido do mês e do dia.

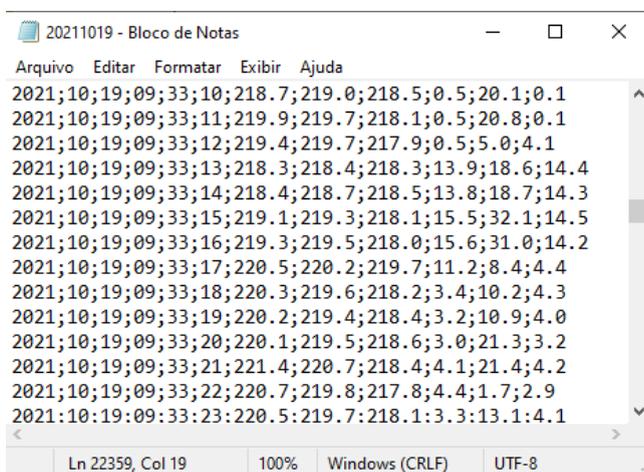
Figura 45 - Nome dos arquivos gerados diariamente

Nome	Tamanho	Tipo
20211010	1.377 KB	Documento de Texto
20211011	1.920 KB	Documento de Texto
20211013	292 KB	Documento de Texto
20211016	280 KB	Documento de Texto
20211017	290 KB	Documento de Texto
20211018	2.700 KB	Documento de Texto
20211019	3.176 KB	Documento de Texto
20211020	2.102 KB	Documento de Texto

Fonte: do Autor.

Já a linha de dados de cada arquivo (Figura 46) é composta pelo ano, mês, dia hora, minuto, segundo, registro das três tensões e registro das três correntes, sempre com separação de ponto e vírgula entre os campos para que o sistema de planilhas entenda a delimitação dos valores no momento da importação .

Figura 46 - Formato de dados lidos durante os testes



Fonte: do Autor.

4.8 Planilha de análise e cálculos

O processo de análise e classificação das informações tinha como referência inicial a utilização de macros para a realização dos filtros e gráficos desejados. Contudo, com o andar do desenvolvimento, adotou-se o sistema de planilhas dinâmicas.

Esse método de construção da planilha se mostrou melhor já que se adapta facilmente a quantidade de dados importados, e principalmente a simplicidade na operação dos filtros de dados.

Como o próprio nome diz, a tabela se comporta de forma dinâmica, pois à medida que novos dados vão sendo inseridos basta escolher a opção “Atualizar dados” do editor de planilhas que os filtros e gráficos se ajustam automaticamente com os resultados. Nos testes realizados, foram mantidos dados de diversos dias, de forma a validar e testar os filtros e gráficos.

A figura 47 apresenta a aba de dados importados do arquivo gerado pelo analisador, cujo método de planilha dinâmica já foi aplicado.

Figura 47 - Aba com dados coletados para realização das análises

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
1	ANO	MÉS	DIA	HORA	MIN	SEG	TENSAO 1	TENSAO 2	TENSAO 3	I1	I2	I3	POT1	POT2	POT3	LIT
23681	2021	10	10	22	50	12	224.40	-4.20	-4.40	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23682	2021	10	10	22	50	13	225.20	-4.50	-4.50	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23683	2021	10	10	22	50	14	224.90	-4.40	-4.50	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23684	2021	10	10	22	50	15	224.60	-4.30	-4.70	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23685	2021	10	10	22	50	17	226.80	-4.30	-4.50	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23686	2021	10	10	22	50	18	225.30	-4.20	-4.80	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23687	2021	10	10	22	50	19	224.70	-4.20	-4.40	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23688	2021	10	10	22	50	20	224.40	-4.20	-4.30	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23689	2021	10	10	22	50	21	224.50	-4.10	-4.40	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23690	2021	10	10	22	50	22	228.10	-4.30	-4.40	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23691	2021	10	10	22	50	24	226.80	-4.30	-4.50	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23692	2021	10	10	22	50	25	224.70	-4.30	-4.50	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23693	2021	10	10	22	50	26	225.10	-4.20	-4.60	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23694	2021	10	10	22	50	27	224.90	-4.40	-4.30	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23695	2021	10	10	22	50	28	224.70	-4.40	-4.50	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23696	2021	10	10	22	50	29	225.80	-4.10	-4.30	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23697	2021	10	10	22	50	30	225.40	-4.40	-4.50	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23698	2021	10	10	22	50	31	225.00	-4.40	-4.60	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23699	2021	10	10	22	50	33	225.10	-4.20	-4.20	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23700	2021	10	10	22	50	34	226.00	-4.20	-4.80	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23701	2021	10	10	22	50	35	226.50	-4.30	-4.40	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23702	2021	10	10	22	50	36	224.70	-4.00	-4.40	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23703	2021	10	10	22	50	37	224.60	-4.10	-4.40	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23704	2021	10	10	22	50	38	226.20	-4.30	-4.60	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23705	2021	10	10	22	50	39	224.20	-4.30	-4.10	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23706	2021	10	10	22	50	40	225.40	-4.50	-4.40	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23707	2021	10	10	22	50	41	224.80	-4.20	-4.50	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	
23708	2021	10	10	22	50	43	225.20	-4.30	-4.60	-0.10	-0.10	-0.10	0.0	0.0	0.0	

Fonte: do Autor.

A captura de tela da figura 48 apresenta a aba de análises de tensão. Aqui já estão filtrados os dados com médias por hora e por minuto.

Figura 48 - Aba de análises de tensão com organização das estruturas dos filtros

Horas						Minutos						Mini		
ANO	(Tudo)					ANO	(Tudo)					ANO	(Tudo)	
MÊS	10					MÊS	10					MÊS	10	
MIN	(Tudo)					HORA	(Vários it...)					HORA	(Vários iten...)	
DIA	18					DIA	18					DIA	18	
Rótulos de Lin	Média de Te	Média de Ter	Média de Te	Limite In	Limite Superior	Rótulos	Média de Ter	Média de Tensão	Média de Tens	Limite Inferior	Limite Superior	Rótulos de l	Min de TENSÃO	Min de TENS
5	218,33	218,89	216,20	201,00	231,00	0	218,73	218,08	216,03	201,00	231,00	0	214,500	213,900
6	216,93	217,33	214,91	201,00	231,00	1	218,03	217,36	215,31	201,00	231,00	1	213,200	213,700
7	215,77	215,96	214,30	201,00	231,00	2	218,03	217,35	215,30	201,00	231,00	2	213,100	212,400
8	217,91	217,12	215,51	201,00	231,00	3	218,05	217,45	215,29	201,00	231,00	3	212,600	212,800
9	216,11	215,54	213,38	201,00	231,00	4	218,01	217,47	215,35	201,00	231,00	4	210,700	213,300
10	217,42	216,48	214,85	201,00	231,00	5	218,06	217,49	215,45	201,00	231,00	5	212,400	212,100
11	217,54	216,93	215,21	201,00	231,00	6	218,23	217,58	215,56	201,00	231,00	6	212,700	210,900
12	220,42	219,72	218,11	201,00	231,00	7	218,52	217,83	215,75	201,00	231,00	7	213,300	212,800
13	216,76	215,43	213,71	201,00	231,00	8	218,65	217,97	215,77	201,00	231,00	8	214,700	214,200
14	218,13	216,72	214,07	201,00	231,00	9	218,32	217,75	215,50	201,00	231,00	9	212,700	213,100
15	219,24	218,05	214,36	201,00	231,00	10	218,03	217,50	215,13	201,00	231,00	10	213,000	211,600
16	220,53	219,70	216,03	201,00	231,00	11	218,09	217,49	215,25	201,00	231,00	11	208,500	212,800
17	221,10	220,06	217,99	201,00	231,00	12	218,18	217,52	215,27	201,00	231,00	12	212,800	211,700
18	217,88	217,23	215,18	201,00	231,00	13	218,16	217,46	215,20	201,00	231,00	13	212,800	211,100
19	220,17	219,60	217,43	201,00	231,00	14	218,10	217,37	215,00	201,00	231,00	14	213,900	213,100
20	221,11	220,37	218,02	201,00	231,00	15	218,05	217,44	215,13	201,00	231,00	15	212,800	212,100
Total Geral	218,46	217,75	215,53	201,00	231,00	16	218,09	217,52	215,31	201,00	231,00	16	213,000	213,100
						17	218,07	217,40	215,14	201,00	231,00	17	213,500	213,500
						18	218,04	217,26	214,89	201,00	231,00	18	214,000	213,000
						19	218,07	217,34	214,96	201,00	231,00	19	213,500	210,500
						20	218,23	217,51	215,10	201,00	231,00	20	214,100	208,800
						21	218,10	217,27	215,00	201,00	231,00	21	213,600	211,400
						22	218,12	217,34	214,99	201,00	231,00	22	213,700	213,700
						23	218,47	217,71	215,51	201,00	231,00	23	214,400	213,500
						24	218,44	217,60	215,45	201,00	231,00	24	212,900	213,500
						25	218,53	217,78	215,53	201,00	231,00	25	212,600	213,400
						26	218,45	217,82	215,51	201,00	231,00	26	213,800	213,700
						27	218,40	217,72	215,43	201,00	231,00	27	212,600	212,700

Fonte: do Autor.

Da mesma forma, a aba de análises de potência (Figura 49) faz o cálculo da potência média e total consumida, além dos filtros de horário de ponta. A potência é obtida pela multiplicação da tensão do instante pela corrente lida, sendo o resultado transformado em kW.

Figura 49 - Aba de análises com organização das estruturas dos filtros

Horas				Minutos			
ANO	(Tudo)	-		ANO	2021	-	
MES	(Tudo)	-		MES	10	-	
MIN	(Tudo)	-		DIA	18	-	
DIA	18	-		HORA	(Tudo)	-	

Rótulos	Potência			Rótulo	Pontência		
	Potência 1	Potência 2	Potência 3		Pontência 1	Pontência 2	Pontência 3
0	0,00	0,00	0,00	0	0,23	1,58	0,17
5	0,00	0,00	0,00	1	0,30	1,59	0,23
6	0,00	0,01	0,00	2	0,35	1,60	0,28
7	0,04	0,02	0,01	3	0,32	1,56	0,25
8	0,19	3,58	0,10	4	0,41	1,61	0,33
9	0,84	3,31	0,71	5	0,40	1,59	0,32
10	1,04	3,56	0,90	6	0,28	1,52	0,22
11	0,57	2,91	0,47	7	0,25	1,51	0,19
12	0,92	3,38	0,79	8	0,36	1,59	0,29
13	0,49	2,83	0,39	9	0,34	1,55	0,26
14	0,79	3,34	0,64	10	0,36	1,57	0,29
15	0,73	3,18	0,59	11	0,35	1,89	0,27
16	0,76	2,91	0,64	12	0,45	2,09	0,36
17	0,37	2,82	0,27	13	0,42	2,09	0,33
18	0,73	3,12	0,55	14	0,39	2,09	0,31
19	0,75	2,76	0,60	15	0,41	2,11	0,32
20	0,04	0,01	0,00	16	0,42	2,10	0,34
21	0,00	0,00	0,00	17	0,37	2,06	0,29
22	0,00	0,00	0,00	18	0,39	2,07	0,31
23	0,00	0,00	0,00	19	0,36	2,05	0,28
Total Gera	0,44	1,99	0,35	20	0,31	2,01	0,24
				21	0,38	2,03	0,30
				22	0,53	2,13	0,44
				23	0,43	2,05	0,34
				24	0,40	2,02	0,32
				25	0,42	2,07	0,34

Consumo Horário de Ponta					Consumo Horário Total				
Horário	P1	P2	P3	Som	Horário	P1	P2	P3	Som
18	0,73	3,12	0,55	4,4	1	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
19	0,75	2,76	0,60	4,1	2	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
20	0,04	0,01	0,00	0,1	3	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Soma	1,52	5,90	1,15	6,6	4	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
					5	0,00	0,00	0,00	0,0031
					6	0,00	0,01	0,00	0,0178
					7	0,04	0,02	0,01	0,0776
					8	0,19	3,58	0,10	3,8725
					9	0,84	3,31	0,71	4,8568
					10	1,04	3,56	0,90	5,4989
					11	0,57	2,91	0,47	3,9488
					12	0,92	3,38	0,79	5,0931
					13	0,49	2,83	0,39	3,717
					14	0,79	3,34	0,64	4,7726
					15	0,73	3,18	0,59	4,4951
					16	0,76	2,91	0,64	4,3008
					17	0,37	2,82	0,27	3,4602
					18	0,73	3,12	0,55	4,4021
					19	0,75	2,76	0,60	4,107
					20	0,04	0,01	0,00	0,0558
					21	0,00	0,00	0,00	0
					22	0,00	0,00	0,00	0
					23	0,00	0,00	0,00	2E-05
					24	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
					Soma	8,3	37,7	6,7	52,7

Fonte: do Autor.

A figura 50 apresenta a captura da tela principal da planilha. Nela são apresentados os gráficos, e informações de consumo de energia.

Figura 50 - Aba de *dashboard* com filtros interativos e gráficos dinâmicos



Fonte: do Autor.

A figura 51 apresenta o sistema de filtros de informações. Este filtro traz os campos de forma dinâmica, de acordo com as opções disponíveis na aba de dados.

Figura 51 - Filtros de acordo com os dados coletados

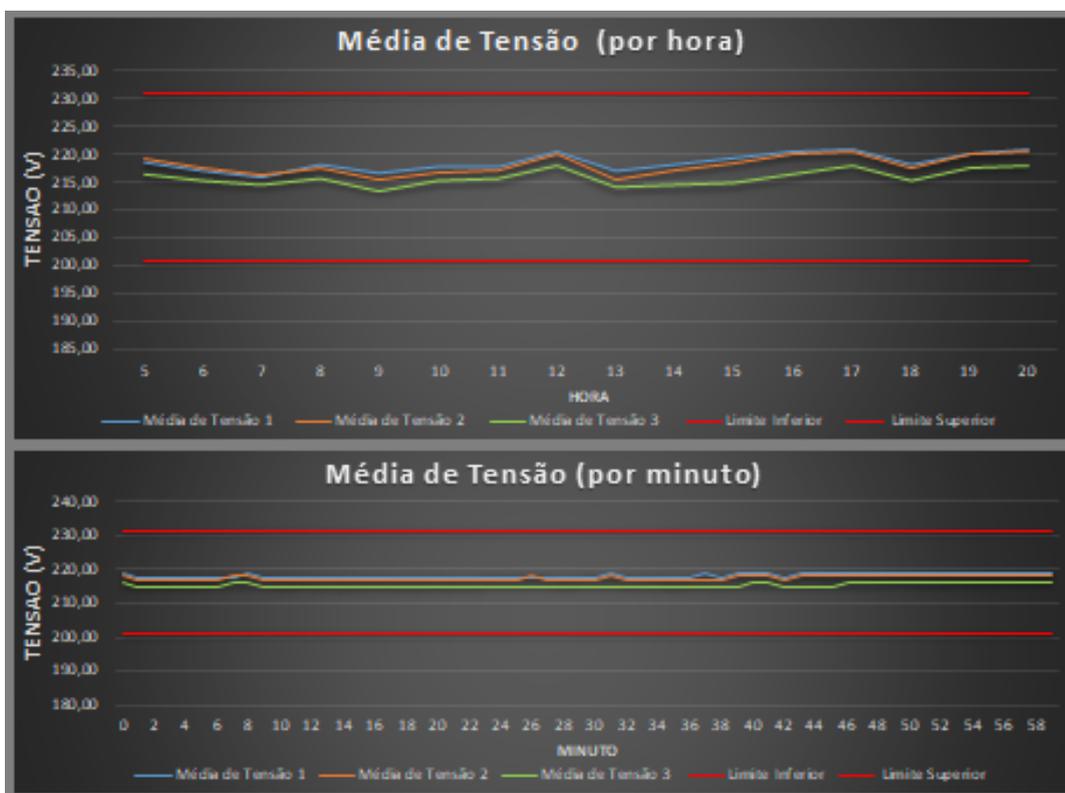
The image shows a vertical stack of five filter sections, each with a title and a list of options. The sections are: ANO (Year) with '2021' selected; MÊS (Month) with '10' selected; DIA (Day) with '17', '18', and '19' visible; HORA (Hour) with '0', '5', '6', '7', '8', '9', '10', '11', '12', and '13' visible; and MIN (Minute) with '27', '28', '29', '30', '31', '32', and '33' visible. Each section has a small 'x' icon in the top right corner, likely for clearing the filter.

Fonte: do Autor.

A imagem 52 revela o gráfico de tensão de cada fase. O gráfico de média de tensão por minuto retrata as variações durante o período de uma hora. Caso seja selecionado mais de uma hora, é feita a média entre as horas selecionadas. Cabe ressaltar que caso ocorram longos períodos de falta, a média geral deste gráfico pode levar a indicação de tensão fora do padrão, porém basta avaliar de forma conjunta o gráfico de média de tensão por hora para a tomada de decisão.

Por sua vez, o gráfico de média de tensão por hora, traz a variação dentro daqueles horários selecionados. Contudo, caso seja selecionado mais de um dia de análise, é apresentada a média dos dias selecionados.

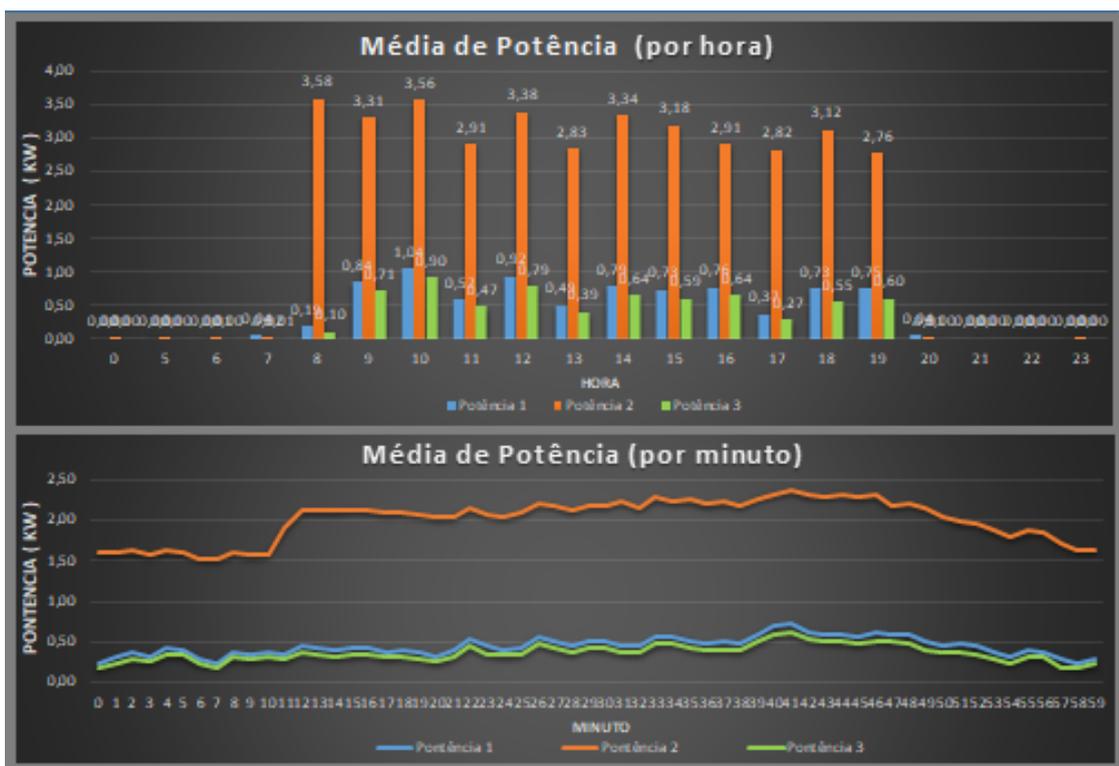
Figura 52 - Gráficos da tensão



Fonte: do Autor.

A mesma lógica é empregada no gráfico de potências (Figura 53), contendo a média em minutos, e a média por hora, de acordo com a seleção de dias e horários do filtro dinâmico.

Figura 53 - Gráficos de potência

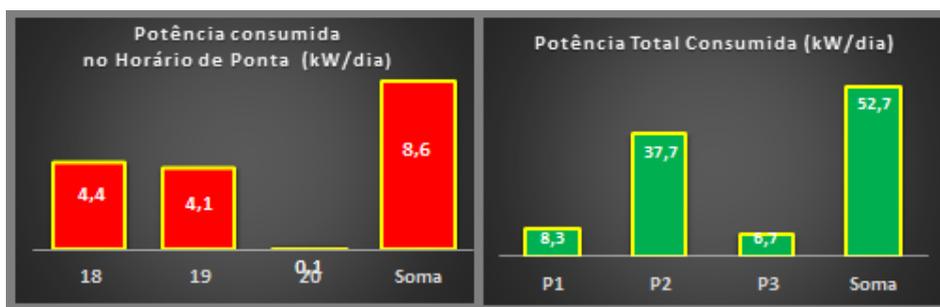


Fonte: do Autor.

Para o horário de ponta e consumo total diário, tem-se o gráfico da figura 54. Nele é possível verificar o consumo de energia em kW em cada um dos horários do período de ponta, além do somatório de gasto total na ponta e da potência total consumida no dia.

Este cálculo faz uma média do dia selecionado. Caso se tenha mais dias para análise, deverá ser feita a avaliação dia por dia. Na condição de seleção de mais dias, será feita e apresentada a média geral.

Figura 54 - Gráficos de consumo de energia no horário de ponta e total



Fonte: do Autor.

Convém ressaltar que a potência total consumida no dia engloba todos os horários, tanto de ponta como fora de ponta.

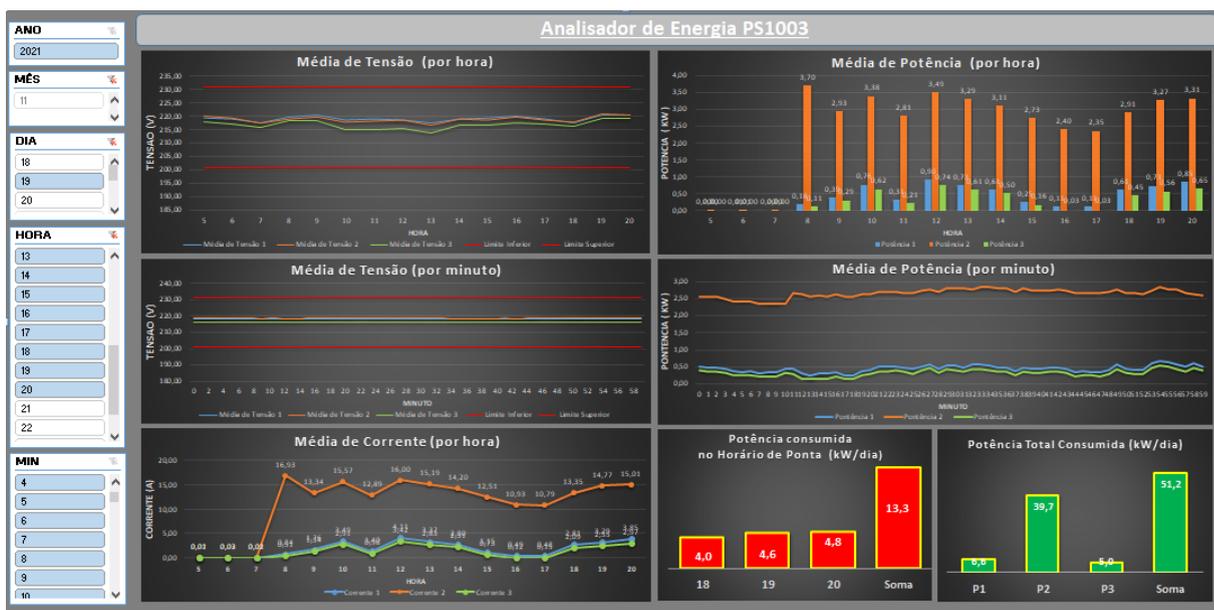
5 ANÁLISES

Com a montagem e finalização do circuito e da caixa final, os resultados da coleta realizada em uma máquina de uma indústria gráfica e de simulações de falhas são apresentados neste capítulo.

5.1 Tabela de análise dinâmica do teste de campo

A tela principal da planilha de resultados é apresentada na figura 55. Nela, é possível visualizar as datas disponíveis para avaliação, pois o filtro dinâmico já as indica automaticamente a partir das informações da aba de dados.

Figura 55 - Tela principal planilha com resultados da coleta na máquina



Fonte: do Autor

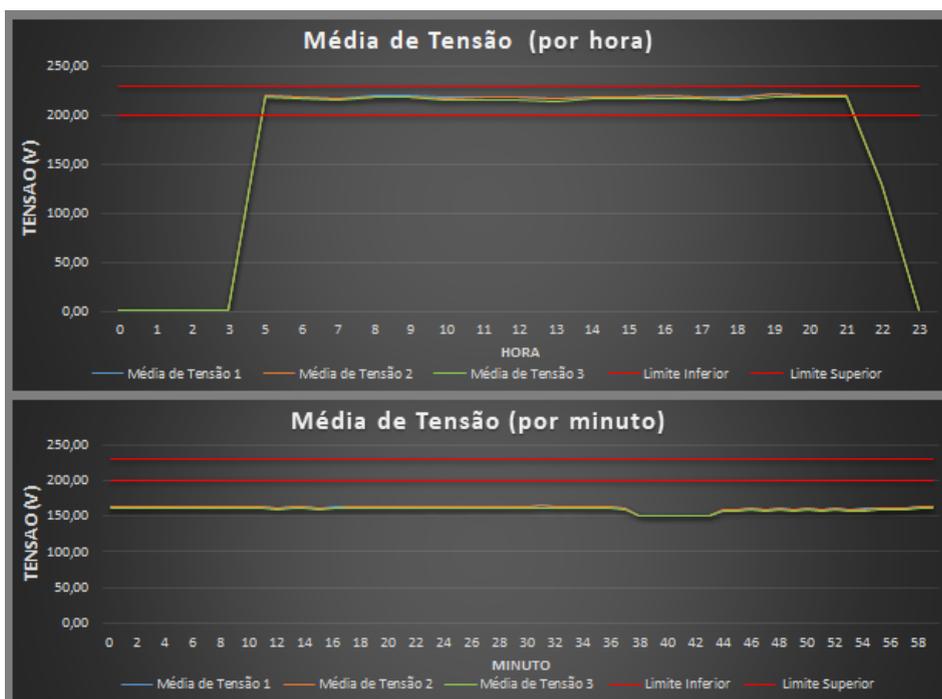
Os gráficos dos níveis de tensão são indicados na figura 56. Deve-se manter atenção para a interpretação dos valores. A média por minuto é realizada entre todos os períodos selecionados, tanto com níveis normais de tensão, ou com valores zerados, cuja exibição é uma simples média. Com o andamento da avaliação, e seleção dos horários, o gráfico vai se ajustando automaticamente.

A seleção de um único horário vai indicar um ponto de média no gráfico por hora, e no gráfico por minuto é apresentado todo histórico do intervalo daquela hora.

As linhas vermelhas indicam os limites de tensão considerados adequados segundo o PRODIST.

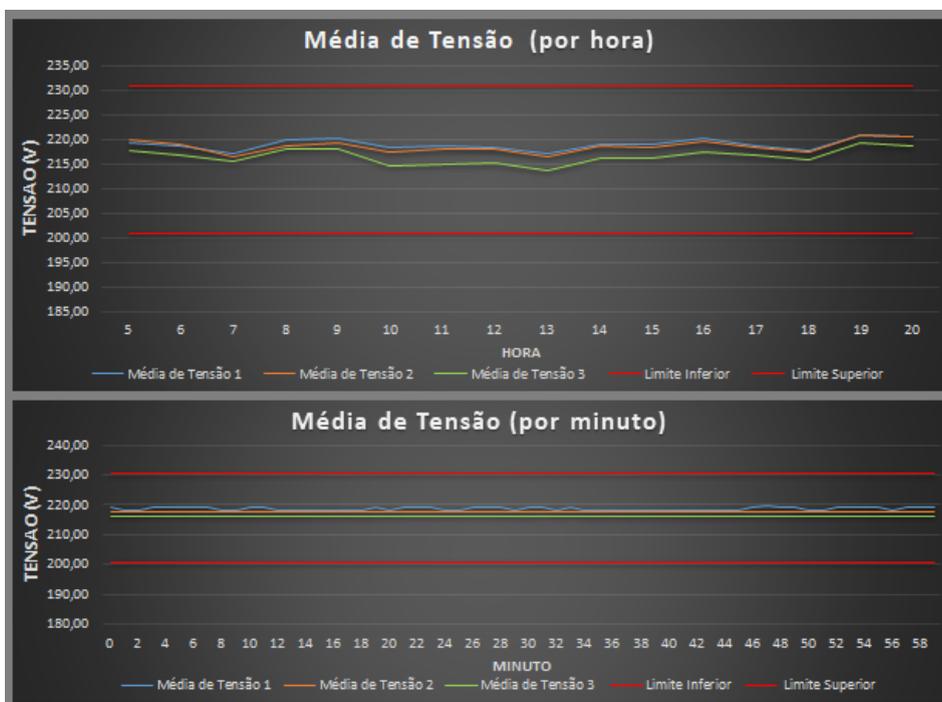
A figura 57 traz os gráficos com uma seleção do horário de funcionamento da máquina, com os respectivos valores de tensão.

Figura 56 - Gráficos dos níveis de tensão da máquina



Fonte: do Autor.

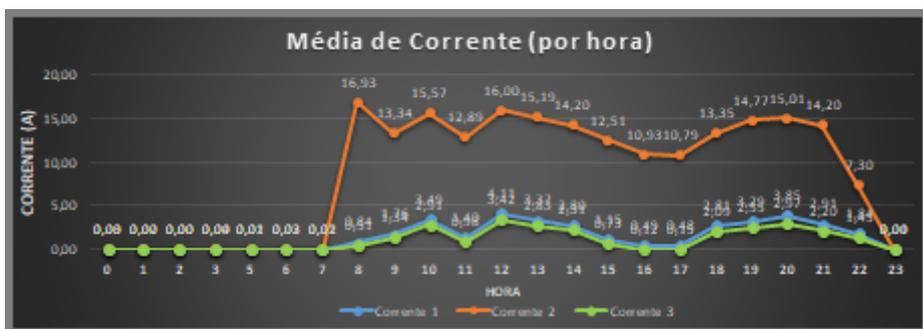
Figura 57 - Gráficos dos níveis de tensão da máquina com ajuste do filtro



Fonte: do Autor.

O gráfico da figura 58 aponta a distribuição de corrente entre as três fases. Neste exemplo, a corrente da fase 2 está bem superior à média das outras duas fases devido à característica construtiva da máquina, que conta com um conjunto de resistências monofásicas para aquecimento da chapa de gravação, segundo exposto no ANEXO I.

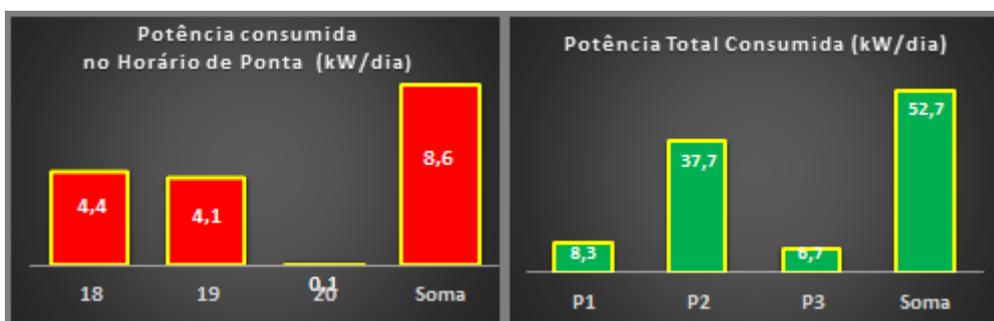
Figura 58 - Gráfico da distribuição de corrente entre as fases da máquina



Fonte: do Autor.

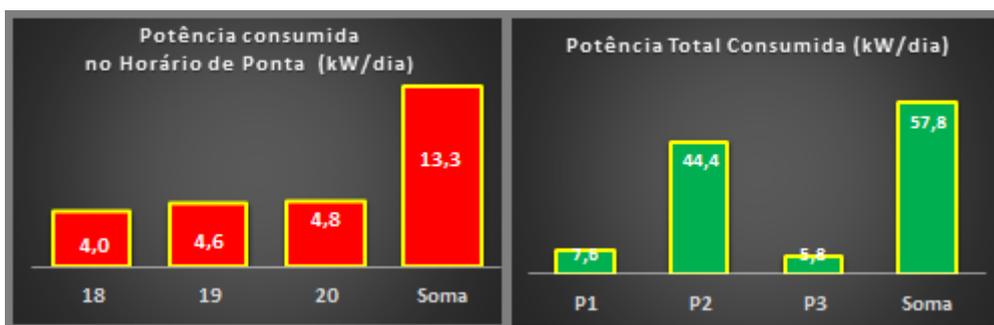
Já o consumo de energia do horário de ponta é apresentado na figura 59 e figura 60. Tal fato decorre em função do horário de trabalho estendido, e do volume de produção de acordo com a época do ano, cuja máquina segue em operação no período noturno para atender a demanda dos pedidos.

Figura 59 - Gráficos de consumo de energia da máquina no dia 18/10/21



Fonte: do Autor.

Figura 60 - Gráficos de consumo de energia da máquina no dia 19/10/21



Fonte: do Autor.

Em consulta ao setor de orçamentos da empresa, foi verificado que este processo produtivo leva em conta um custo de R\$ 90,00 por hora trabalhada. Esse valor engloba diversas variáveis, sendo uma delas a energia elétrica. O gasto médio de energia de acordo com os levantamentos realizados em quatro dias de análise estão indicados na tabela 02, utilizando como referência valores unitários com tributos.

Tabela 02 - Consumo de energia da máquina

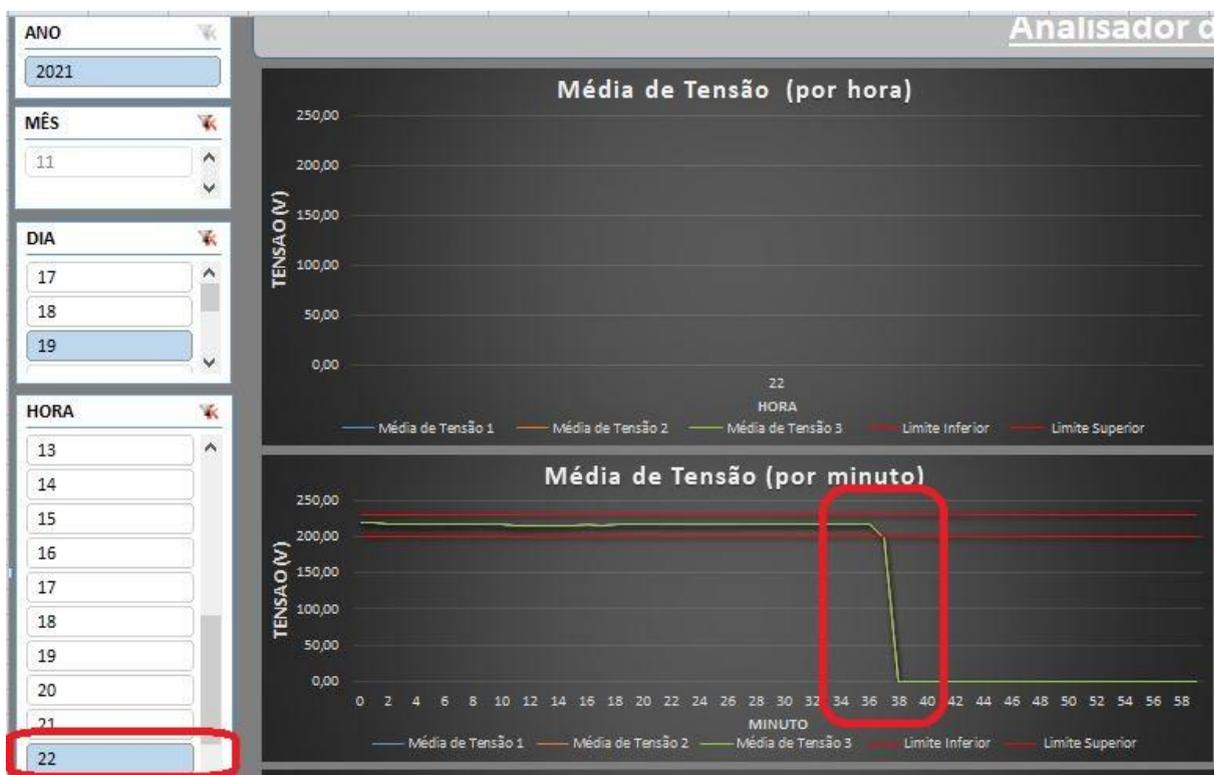
	Ponta	Fora de Ponta	Total do dia
18/10	8,6	44,1	52,7
19/10	13,3	44,5	57,8
Total (kWh)	21,9	88,6	110,5
Total (R\$)	42,92	40,93	83,86

Fonte: do Autor.

5.2 Simulação de falhas

A imagem 62 expõe um período de ocorrência de uma falta de energia. Por intermédio do filtro, é possível selecionar apenas o horário desta falha, e assim, acompanhar no gráfico de minutos o momento exato da ocorrência. No teste em campo, este foi o momento em que foram desligados os disjuntores gerais da máquina, devido ao fim dos trabalhos do dia.

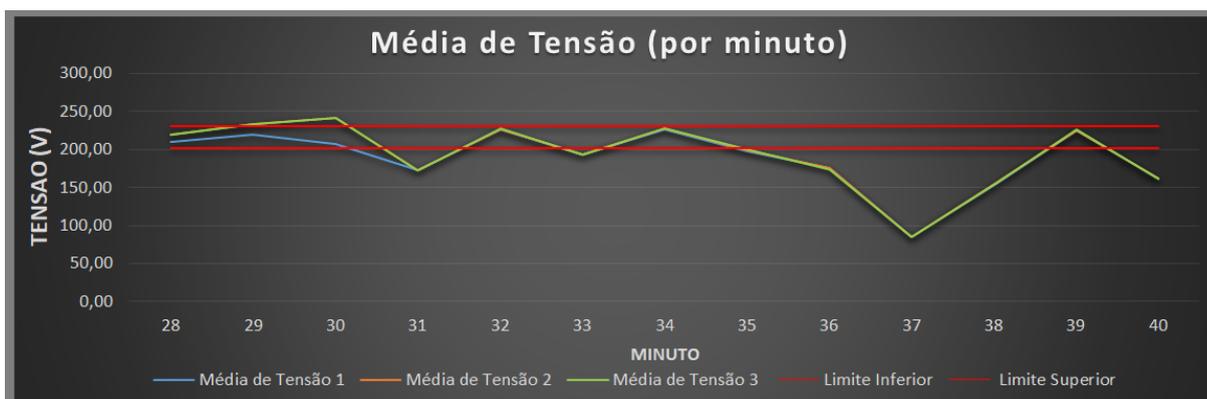
Figura 61 - Gráfico de falta de energia



Fonte: do Autor.

De modo análogo, um afundamento de tensão em determinado período é mostrado na figura 62, com valores de tensão abaixo de 100 volts. As linhas vermelhas indicam os limites considerados adequados segundo o PRODIST.

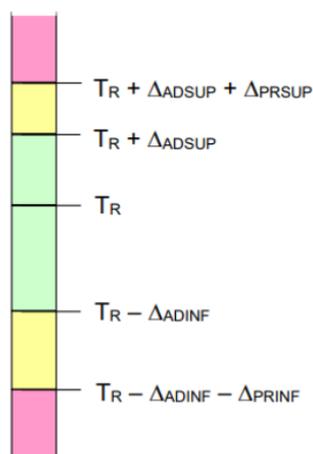
Figura 62 - Gráficos de afundamento de tensão



Fonte: do Autor.

Segundo define o Módulo 8 do PRODIST, as tensões de atendimento podem ser classificadas de acordo com a figura 63. As tensões giram em torno do valor de referência, que no caso deste trabalho é 220 volts. Logo, os valores considerados adequados estão entre 201 e 231 volts, representados pela faixa verde da figura 63. A faixa amarela é considerada precária, e a faixa vermelha indica níveis críticos.

Figura 63 - Faixas em torno da tensão de referência



sendo:

Tensão de Referência (T_R);

Faixa Adequada de Tensão ($T_R - \Delta_{ADINF}$, $T_R + \Delta_{ADSUP}$);

Faixas Precárias de Tensão ($T_R + \Delta_{ADSUP}$, $T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ OU $T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$, $T_R - \Delta_{ADINF}$);

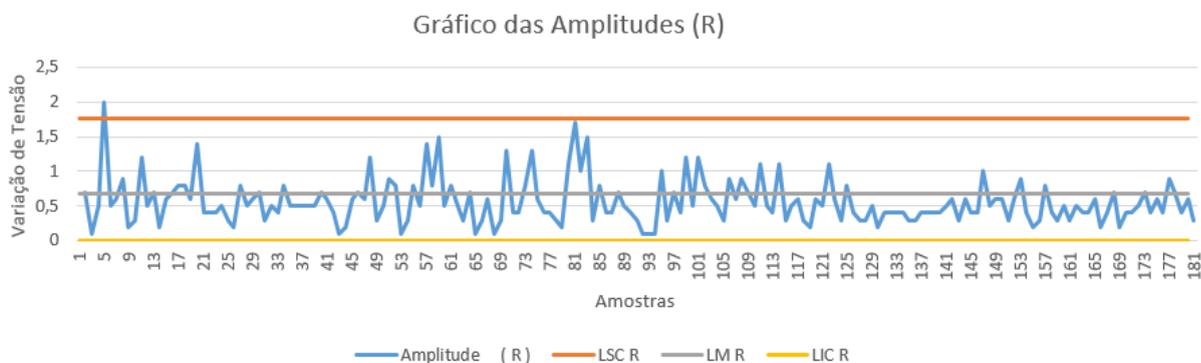
Faixas Críticas de Tensão ($>T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ OU $<T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$).

Fonte: PRODIST Módulo 8 (2021).

5.3 Resultados da calibração e precisão

Para validar a precisão de leitura entre os sensores, foi realizado um teste, interligando as três entradas de tensão e contando-as em uma única fase. Este teste foi realizado durante três minutos e gerou 180 valores. O objetivo consiste em identificar variações de leitura entre os três sensores após o processo de calibração do analisador. A figura 63 traz o resultados das leituras e dos desvios entre os valores, bem como a taxa de variação.

Figura 64 - Comparação prática de leituras dos sensores em uma mesma fase



Fonte: do Autor.

Na especificação do sensor é verificada uma variação de $\pm 0,5\%$, enquanto que um multímetro True-RMS de padrão médio, possui em suas especificações uma variação de até $\pm 2\%$ nos valores.

A amplitude, representada pela linha azul, indica a diferença entre as três leituras da mesma fase no mesmo instante. Utilizando metodologia de estatística, foi determinado o desvio padrão das 180 amostras coletadas nos três sensores conectados de forma paralela na entrada AC.

O desvio padrão das amostras representado pela linha cinza ficou em 0,685 volts, o que em percentual significa 0,31% do valor médio de 220 volts lido em cada teste. Percebe-se que, em um único instante, o desvio chegou a 2 volts, fato que não pode ser considerado como perda de estabilidade.

5.4 Grandezas registradas, calculadas e avaliadas

O analisador faz a captura e gravação de tensão e corrente. Já a potência é calculada individualmente para cada fase, por meio da multiplicação da tensão versus corrente, e a divisão por milhar para que o resultado seja em kW. Isso permite a utilização em sistemas monofásicos e bifásicos sem alteração no funcionamento.

Já o consumo total consiste na soma das potências médias de cada horário. O consumo de ponta é indicado por um filtro dinâmico que avalia as potências médias do período entre 18 até as 21 horas.

Nesse mesmo molde, as falhas ou faltas de fornecimento podem ser visualizadas pelos gráficos e pelas indicações na aba principal.

5.5 Tabela de custos

A tabela 03 relaciona os componentes e peças utilizados na construção do analisador.

Tabela 03 - Lista de materiais utilizados no projeto e respectivos custos

Quant.	Item	Unitário	Sub-Total
1	placa arduino nano	37,00	37,00
3	sensor de tensão zmp101b	23,50	70,50
1	módulo RTC (tempo real) DS1302	12,90	12,90
1	módulo SD card	13,90	13,90
1	cartão SD de 16GB	25,00	25,00
3	transformador de corrente tipo janela	17,00	51,00
1	bateria de ni-mh 8.4v	30,00	30,00
1	placa de fonte de alimentação com flutuação	45,00	45,00
6	resistor de 10k	0,05	0,30
3	resistor de 22R	0,05	0,15
2	capacitor de 10nF	0,40	0,80
6	capacitor de 10uF	0,40	2,40
1	regulador 7805	1,80	1,80
1	placa de circuito impresso padrão 10x10	14,00	14,00
1	conjunto de jack e plug P4	4,00	4,00
2	barra de pinos fêmea	2,30	4,60
1	barra de pinos macho	1,60	1,60
1	caixa plástica Cemar	35,00	35,00
1	conector mike GX16 6 vias macho e fêmea	18,00	18,00
3	borne banana de segurança vermelho	4,50	13,50
3	cabo banana de segurança vermelho	27,50	82,50
3	garra jacaré isolada vermelha	24,10	72,30
1	borne banana de segurança preto	4,50	4,50
1	cabo banana de segurança preto	27,50	27,50
1	garra jacaré isolada preta	24,10	24,10
Total de materiais			R\$ 592,35

Fonte: do Autor.

Em comparação com valores verificados no referencial teórico, a montagem deste projeto ficou bem abaixo da média do mercado, salvo diferenças de funcionamento e grandezas registradas. Contudo, apesar da simplicidade, o analisador desenvolvido atende as necessidades básicas propostas no trabalho.

5.6 Método de coleta dos dados

O arquivo de texto gerado pelo analisador, fica armazenado no cartão de memória. Para que se tenha acesso aos dados é necessário efetuar a retirada do cartão do analisador, e conectá-lo ao computador para a cópia dos arquivos.

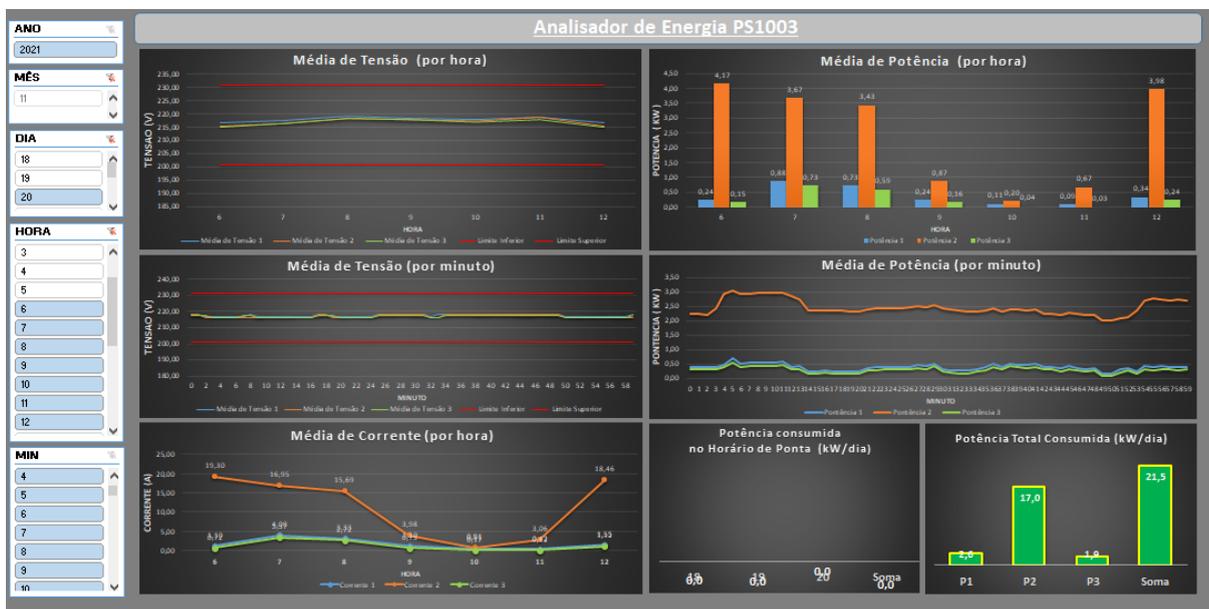
Já com a planilha aberta, na aba dados, é executada a importação do arquivo. Tal processo deve ser repetido para cada dia desejado na análise.

Deve-se atentar para a escolha do separador do texto, que deve ser por ponto e vírgula, para que os campos sejam preenchidos corretamente.

5.7 Layout da *Dashboard*

A elaboração da aba de gráficos e resultados busca oferecer uma forma simples e amigável de visualizar e compreender os registros do analisador. Devido ao volume de dados, já que é obtido um registro a cada segundo, o sistema de filtros e planilhas dinâmicas se mostrou muito prático para a aplicação neste trabalho, conforme resultado da figura 65.

Mesmo contendo registros de diversos dias, com mais de 170 mil linhas na planilha de dados, e somando as planilhas de análises e *dashboard*, a pasta de trabalho fica com tamanho de 22 *Megabytes*.

Figura 65 - Tela principal com gráficos (*dashboard*)

Fonte: do Autor.

A escolha dos gráficos de tensão, corrente e potência decorre do fato de tais grandezas representarem o principal modo de análise de defeitos e garantirem um poder de decisão rápido e simplificado em relação ao consumo de energia, pois a facilidade de identificar e comparar horários é fundamental para que se busque economia de energia e avaliação das instalações do local em estudo.

6 CONCLUSÕES

De modo geral, o trabalho foi bastante interdisciplinar, pois engloba diversos conhecimentos de diferentes segmentos adquiridos durante o curso, proporcionando uma prática nas áreas da eletrônica, lógicas de programação, circuitos elétricos, sistemas de potência, análise de sinais e circuitos, tratamento de dados, além de diversas normas do ramo.

Este dispositivo também acaba sendo uma boa opção para investigações de medidas em ensaios ou avaliações de consumo de energia, conforme exemplo demonstrado.

Com o decorrer do trabalho já surgiram novas demandas para o projeto, pois com a realização da avaliação na indústria gráfica, já foi solicitado um teste para aferir o consumo de energia dos compressores da empresa. A gráfica possui um compressor do tipo pistão e outro compressor recém adquirido do tipo parafuso, que segundo fabricante seria mais econômico em relação ao consumo de energia.

O trabalho também contribuiu para um melhor entendimento do cenário atual do mercado de energia elétrica, onde devido a atual escassez hídrica, ocorrem cobranças de tarifas extras, além da busca incessante por economia de energia e melhoria constante do serviço prestado no fornecimento de energia.

O desenvolvimento deste dispositivo permite resolver um problema prático na indústria, utilizando a engenharia como forma de melhoria contínua, já que o custo

de energia deve ser considerado e se possível compensado com ações de otimização e eficiência energética.

6.1 Características da metodologia proposta

Como características finais do projeto pode-se destacar:

- O sistema possui fonte de alimentação própria, com suprimento garantido em caso de queda de energia, com a utilização de uma bateria.
- Registro de tensão e corrente com intervalos de um segundo, com valores armazenados em cartão de memória.
- Avaliação dos resultados em formato de planilha dinâmica, com filtros de acordo com os dados importados.
- Indicação do total de consumo de energia, e do total gasto no horário de ponta.
- Projeto de baixo custo.

6.2 Melhorias para trabalhos futuros

Apesar que os objetivos do trabalho tenham sido alcançados, ficam algumas oportunidades de melhorias e podem ser feitas ampliações, como por exemplo:

- Leds indicativos no painel do analisador, com status de acordo com a operação e/ou falha;
- Sistema com conexão para banco de dados em nuvem utilizando rede de dados móveis;

- Criação de um ambiente *Web*, com possibilidade de programar faixas de alarme, e assim visualizar os dados em tempo real;
- Integração e comunicação com aplicativo para *smartphone*;
- Adição de uma tela com interface gráfica para melhorar a interação do usuário.

REFERÊNCIAS

ABUBAKAR, S. N KHALID, M. W. MUSTAFA ,HUSSAIN SHAREEF AND M. MUSTAPHA, **Calibration of zmp101b voltage sensor module using polynomial regression for accurate load monitoring**. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, VOL. 12, NO. 4, 2017.

ALMEIDA FILHO, José Aderbal Augusto. **Introdução à análise de previsão de demanda de energia elétrica utilizada pela empresa de pesquisa energética**. 88f. 2010. Trabalho de conclusão de curso (Curso de Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2010.

ANEEL – **Postos Tarifários**. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/postos-tarifarios>>. Acesso em: 19 out. 2021.

Arduino. **Site Oficial Arduino Store**. Disponível em: <<https://store-usa.arduino.cc/?selectedStore=us>> Acesso em: 15 Ago. 2021.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 2014.

BAPTISTA, J; MARTINS, J S.; AFONSO, J. L.. **Sistema de Monitoração da Qualidade da Energia Eléctrica Baseado em PC e Desenvolvido em LABVIEW**. Bragança/Portugal, 2014.

BARBI, I. **Eletrônica de Potência**. UFSC. Florianópolis, 2006

BARBOSA, José Manuel da Silva. **Analisador de energia**. 2012. 78f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Telecomunicações) – Universidade de Aveiro. Aveiro, 2012.

BARRETO, G. P. **Sistema de monitoramento e controle de consumo de energia para uma residência**. Brasília: [s.n.], 2015.

BARROS, B. F. D. **Gerenciamento de energia: ações administrativas e técnicas de uso adequado da energia elétrica**. São Paulo: Érica, 2016.

CARVALHO, M.R. **Estudo comparativo entre fluxo de potência para sistemas de distribuição radial**. Dissertação Final de Curso. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2006

Casa da Robótica. **Sensores**. Disponível em :< <https://www.casadarobotica.com/sensores-modulos/sensores/tensao/sensor-de-tensao-ac-0-a-250v-voltmetro-zmpt101b>> Acesso em: 11 Ago. 2021.

DIAS, G. **Harmônicas em sistemas industriais**. 2 ed. Rio Grande do Sul: EDIPUCRS, 2002.

DOURADO, R.A. **Formulação de um modelo de projeção de demanda de energia elétrica aplicado a sistemas isolados em desenvolvimento natural: O caso da CERON**. Florianópolis, 2004 – Dissertação UFSC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 80p.

DUGAN, R.C.; MCGRANAGHAN, M.F.; BEATY, H.W. **Electrical Power Systems Quality**. McGraw-Hill, 2nd Edition, 1996.

EMBRASUL. **Analisador de energia RE8000**. Disponível em: < http://www.embrasul.com.br/painel/pdf/Cat%C3%A1logo_RE8000_v01r00_PT_LR-1.pdf> Acesso em: 12 Mai. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. 2018. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018: Ano base 2017**. Ministério de Minas e Energia. Brasília:Ministério de Minas e Energia, 2018

ENGELÉTRICA. **Manual de correção do fator de potência**. Disponível em: <<http://www.engeletrica.com.br/manual-conceitos-basicos.html>> Acesso em: 11 Jun. 2020.

EPE, E. de P. E. **Anuário estatístico de energia elétrica 2015**. 2015.

FLANDOLI, Fábio. **Medição de harmônicas**. Disponível em: <<http://www.eletricistaconsciente.com.br/pontue/fasciculos/6-qualidade-da-energia-eletrica/medicao-de-harmonicass/>> Acesso em: 11 Jun. 2020.

FLUKE. **Analisadores e solucionadores de problemas de qualidade de energia**. Disponível em: <<https://www.fluke.com/pt-br/produto/teste-eletrico/analísadores-da-qualidade-de-energia/434-435>> Acesso em: 11 Jun.2020.

FONTES, Marcos José de Carvalho. **Automação de Sensores de Corrente Elétrica**. 2013. Disponível em :< http://repositorio.uniceub.br/bitstream/235/4912/1/2007_5673.pdf> Acesso em: 11 Jun. 2020.

GARCIA, D. A. A. DUZZI; F.F. **Tópicos de sistemas de transmissão e de distribuição de energia elétrica**. 2012. Revista O Setor Elétrico. São Paulo.

HAFNER, A; LOPES, H. S.; LIMA, C. R. H.. **Implementação de um Medidor de Qualidade de Energia Usando Computação Reconfigurável por Hardware**. São Luiz, 2015.

HBM. **Catálogo de produtos**. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/>> Acesso em: 11 Jun. 2020.

IMPAC. **Impac Instrumentos de Medição - Portal Web**. Disponível em: <<https://www.impac.com.br/>> Acesso em: 11 Jul. 2021.

LAMIN, H. **Medição eletrônica em baixa tensão: Aspectos regulatórios e recomendações para implementação**. 3. Ed. São Paulo: Atlas, 2009.

MAMEDE, J.F. **Manual de equipamentos elétricos**. 2011. 3 ed. São Paulo: LTC, 2011

Micro Transformer. **Catálogo de produtos - Split Core Current Transformer**. Disponível em: <<https://www.micro-transformer.com>> Acesso em: 10 Set. 2021.

MINIPA. **Proposta técnica**. Disponível em: <https://www.minipaelectric.com.br/images/proposta_tecnica/ET-5062-1313-BR.pdf> Acesso em: 14 Set. 2021.

MME, M. de Minas e E.. **Relatório smart grid do grupo de trabalho de redes elétricas inteligentes**. 2012.

MME, M. de Minas e E.. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília: MME/EPE, 2020

OLIVEIRA, Claudio Luis Vieira; ZANETTI, Humberto Augusto Piovesana. **Arduino descomplicado: como elaborar projetos de eletrônica**. 1ª ed. Editora Atlas: Rio de Janeiro, 2015.

PARIS, Demetrius T; HURD, F Kenneth. **Basic Electromagnetic Theory**. New York: McGraw-Hill, 2006.

PRAZERES, R.A. **Redes de distribuição de energia elétrica e subestações**. São Paulo: Ática, 2012

PRODIST – **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional–Módulo 3**. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/modulo-3>>. Acesso em: 18 out. 2021.

PRODIST – **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional–Módulo 8**. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. Acesso em: 22 out. 2021.

ROSÁRIO, J. M. **Princípios de Mecatrônica**. São Paulo: Prentice Hall, 2009.

SCHNEIDER ELECTRIC – **Multimedidor PM3000**. Disponível em: <<https://www.se.com/br/pt/product-range/61274-pm3000/>>. Acesso em: 12 out. 2021.

SILVA, João Henrique Vieira. **Proposta de um protótipo de um analisador de qualidade de energia elétrica**. 2017. 65f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

SILVA, L. C. **Efeitos das distorções harmônicas (tensões e correntes) e desequilíbrios em medidores eletrônicos de energia ativa**. UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, 2008

SILVA JÚNIOR, C. **Retificadores SEPIC monofásicos e trifásicos com elevação do ganho estático e redução dos esforços de tensão sobre os semicondutores**. Trabalho de conclusão de curso (Curso de Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2019).

SOUZA, F.A. **Detecção de falhas em sistemas de distribuição de energia elétrica usando dispositivos programáveis**. 2008. Monografia de Final de Curso. São Paulo: Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita de Melo”.

TAVARES, Bruno. OTIMIZANDO PROCEDIMENTOS COM USO DA IOT NO GERENCIAMENTO INTELIGENTE DAS SALAS DE AULA DA ESMAT. Dissertação - Universidade Federal do Tocantins – Palmas, Curso de Pós-Graduação (Mestrado) em Modelagem Computacional de Sistemas, TO, 2020.

TECNOGERA. **Unidade de medida da corrente elétrica, como descobrir**. Disponível em:<<https://www.tecnogera.com.br/blog/o-que-e-corrente-eletrica-e-qual-sua-unidade-de-medida>> Acesso em: 11 Jun. 2020

TOLEDO, F. **Desenvolvendo as redes elétricas inteligentes**. Brasport livros e multimídia Ltda. Rio de Janeiro, 2012

ZHENG, L. L. J. **Smart meters in smart grid: An overview.** IEEE Green Technologies Conference, 2013.

ANEXO I

Detalhamento do estudo prático realizado na empresa Solupack Embalagens, de Roca Sales, com o objetivo de monitorar o consumo de energia elétrica da máquina do processo de *hot-stamp*. Esse sistema consiste em aplicar uma camada metálica, disposta em um rolo de fita, sobre uma determinada área de papel pré-definida, conforme visão geral da figura 66.

Figura 66 -Vista geral da máquina do processo de *hot-stamp*

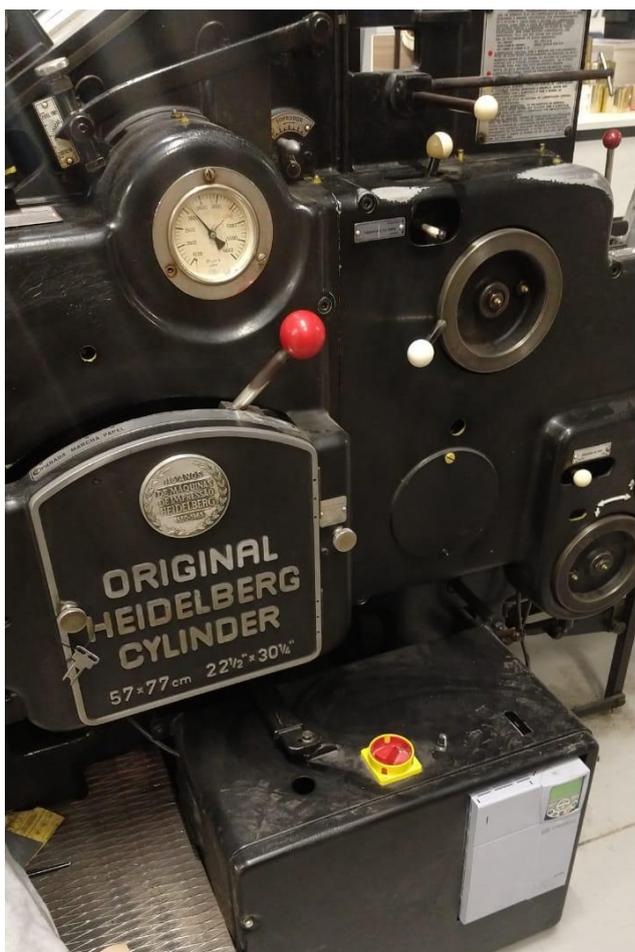


Fonte: do Autor.

O projeto original desta máquina data da década de 50, contudo, sua robustez e as adaptações realizadas ao longo do tempo, permitem seu uso de forma simples e prática.

A rotação do motor originalmente era controlada por meio de uma chave mecânica rotativa, que seccionava conjuntos de resistências em série com a alimentação do motor. Esse quadro de comando mecânico já foi atualizado com a instalação de um inversor (figura 67), que permite um controle de velocidade mais preciso.

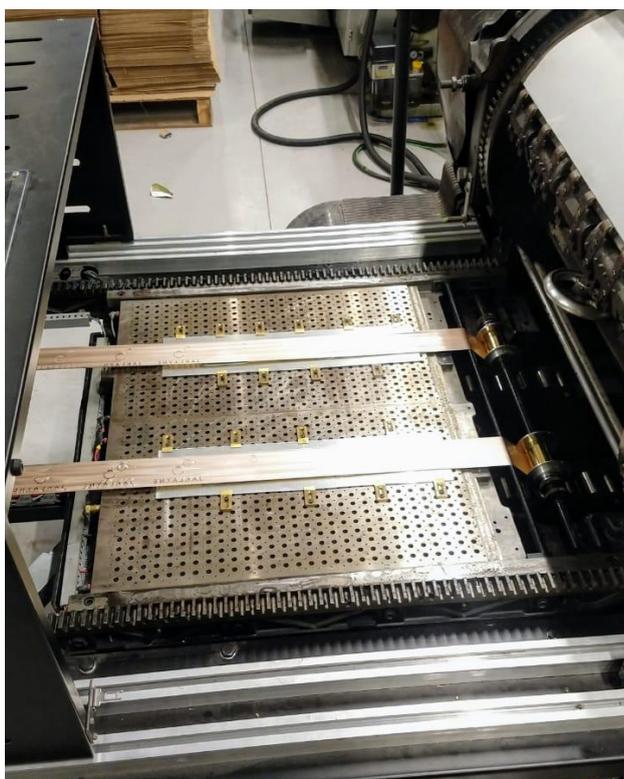
Figura 67 - Vista do comando da máquina



Fonte: do Autor.

Para que a transferência da camada metálica da fita seja feita com sucesso, a temperatura da chapa de aquecimento deve estar entre 130 a 180 graus celsius. A figura 68 mostra detalhes da passagem da fita metálica sobre a chapa de aquecimento.

Figura 68 - Vista da chapa de aquecimento



Fonte: do Autor.

ANEXO II

Código fonte utilizado na elaboração do analisador.

```
#include "stdio.h"
#include "DS1302.h"
#include "EmonLib.h" //INCLUSÃO DE BIBLIOTECA TENSÃO E CORRENTE
#include <SPI.h>
#include <SD.h>

const int ClkPino = 4; // Pino Clk //RTC
const int DatPino = 3; // Pino Dat
const int RstPino = 2; // Pino Rst
DS1302 rtc(RstPino, DatPino, ClkPino); // Cria um objeto para o RTC

#define VOLT_CAL1 263 // VALOR DE CALIBRAÇÃO (AJUSTADO EM PARALELO COM UM MULTÍMETRO)
#define VOLT_CAL2 263
#define VOLT_CAL3 263

EnergyMonitor emon1; //CRIAR UMA INSTÂNCIA
EnergyMonitor emon2;
EnergyMonitor emon3;
EnergyMonitor emon4;
EnergyMonitor emon5;
EnergyMonitor emon6;
float V1;
float V2;
float V3;
int pino_sct4 = A3; //Pino do sensor de corrente
int pino_sct5 = A4;
int pino_sct6 = A5;

char buf[20]; //Variavel tempo para RTC data e hora
char nome[9]; //nome do arquivo

File myFile; //Variaveis para microSD
int pinoSS = 10;

void setup() {
  Serial.begin(57600);

  rtc.writeProtect(false); // Configura o Chip RTC
  rtc.halt(false);

  //Define a hora nesta linha e descomente para setar a hora no chip ((ano,mes,dia,hh,mm,ss)
  //Time t(2021, 10, 04, 20, 23, 10, Time::kMonday);
```

```

//rtc.time(t);

//PASSA PARA A FUNÇÃO OS PARÂMETROS (PINO ANALÓGICO / VALOR DE CALIBRAÇÃO / MUDANÇA DE
FASE) (TENSÃO)
emon1.voltage(0, VOLT_CAL1, 1.7);
emon2.voltage(1, VOLT_CAL2, 1.7);
emon3.voltage(2, VOLT_CAL3, 1.7);
//Pino, calibracao - Cur Const= Ratio/BurdenR. 1000/22 = 45.45 (CORRENTE)
emon4.current(pino_sct4, 45.45);
emon5.current(pino_sct5, 45.45);
emon6.current(pino_sct6, 45.45);

pinMode(pinoSS, OUTPUT); // Declara pinoSS como saída
SD.begin();
}

void loop() {
//Calcula a tensão
emon1.calcVI(17, 330); //FUNÇÃO DE CÁLCULO (17 SEMICICLOS, TEMPO LIMITE PARA FAZER A MEDIÇÃO)
V1 = emon1.Vrms; //VARIÁVEL RECEBE O VALOR DE TENSÃO RMS OBTIDO
emon2.calcVI(17, 330);
V2 = emon2.Vrms;
emon3.calcVI(17, 330);
V3 = emon3.Vrms;

//Calcula a corrente
float Irms4 = emon4.calclrms(1480);
Irms4 = Irms4 - 0.03;
float Irms5 = emon5.calclrms(1480);
Irms5 = Irms5 - 0.03;
float Irms6 = emon6.calclrms(1480);
Irms6 = Irms6 - 0.04;

//Monta data e hora
Time t = rtc.time();
snprintf(buf, sizeof(buf), "%04d;%02d;%02d;%02d;%02d;%02d", t.yr, t.mon, t.date, t.hr, t.min, t.sec);
snprintf(nome, sizeof(nome), "%04d%02d%02d", t.yr, t.mon, t.date);

myFile = SD.open(String(nome)+".txt", FILE_WRITE); // Cria / Abre arquivo .txt
myFile.print(buf);
myFile.print(";");
myFile.print(V1,1);
myFile.print(";");
myFile.print(V2,1);
myFile.print(";");
myFile.print(V3,1);
myFile.print(";");
myFile.print(Irms4,1);
myFile.print(";");
myFile.print(Irms5,1);
myFile.print(";");
myFile.println(Irms6,1);
myFile.close(); //Fecha myFile após escrever

//Serial.print(buf); //imprime data e hora
//Serial.print(" ");
//Serial.print(V1, 1); //IMPRIME NA SERIAL O VALOR DE TENSÃO MEDIDO E REMOVE A PARTE DECIMAL
//Serial.print(" ");
//Serial.print( V2, 1);
//Serial.print(" ");
//Serial.print( V3, 1);
//Serial.print(" ");
//Serial.print(Irms4,1);
//Serial.print(" ");
//Serial.print(Irms5,1);
//Serial.print(" ");
//Serial.println(Irms6,1);
}

```