



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
FACULDADE DE ENGENHARIAS ELÉTRICA E BIOMÉDICA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**MEDIDOR MULTIFUNÇÃO TRIFÁSICO COM MEMÓRIA DE MASSA: PROJETO,  
DESENVOLVIMENTO, IMPLEMENTAÇÃO E TESTES**

**JAIR SILVA DE SOUZA**

**BELÉM-PA  
2º SEMESTRE/2017**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
FACULDADE DE ENGENHARIAS ELÉTRICA E BIOMÉDICA**

**JAIR SILVA DE SOUZA**

**MEDIDOR MULTIFUNÇÃO TRIFÁSICO COM MEMÓRIA DE MASSA: PROJETO,  
DESENVOLVIMENTO, IMPLEMENTAÇÃO E TESTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Colegiado da Faculdade de Engenharias  
Elétrica e Biomédica da Universidade Federal  
do Pará como requisito parcial para a  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos André Barros  
Galhardo.

Belém, PA

2017

# MEDIDOR MULTIFUNÇÃO TRIFÁSICO COM MEMÓRIA DE MASSA: PROJETO, DESENVOLVIMENTO, IMPLEMENTAÇÃO E TESTES

Este trabalho foi apresentado em 21 / 12 / 2017 e julgado adequado para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, e aprovado na sua forma final pela banca examinadora, que atribuiu o conceito EXCELENTE.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcos André Barros Galhardo  
Orientador – FEEB/ITEC/UFPA

Prof. M.Sc. Cláudomiro Fábio de Oliveira Barbosa  
Membro da Banca Examinadora – FEEB/ITEC/UFPA

Prof. Dr. Wilson Negrão Macêdo  
Membro da Banca Examinadora – ITEC/UFPA

Eng. M.Sc. Paulo Augusto Sherring da Rocha Junior  
Membro da Banca Examinadora – CEAMAZON/UFPA

VISTO:

Prof. Dr. Daniel Cardoso de Souza  
Diretor da FEEB/ITEC/UFPA

*À minha família que esteve sempre ao meu lado e me deu total e incondicional apoio a todas as minhas atividades educacionais.*

## **AGRADECIMENTOS**

Expresso minha gratidão a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

Aos meus amigos, que sempre me deram força e acreditaram no potencial deste projeto, com destaque ao Lucas Arruda, Valéria Monteiro, Luiz Henrique e Bruno Alessandro.

Ao meu orientador, Professor Dr. Marcos Galhardo, pela paciência e atenção dedicada na realização deste projeto.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Elétrica pelos conhecimentos e valores transmitidos no decorrer do curso.

Aos meus colegas de trabalho da UPPa pelas vezes que precisei me ausentar para desenvolver este trabalho.

A todos o meu muito obrigado!

*“O que é real? Como você define o ‘real’?  
Se você está falando sobre o que você  
pode sentir, [...] cheirar, [...] saborear e  
ver, o real são simplesmente sinais  
elétricos interpretados pelo seu cérebro.”*

Matrix. Direção: Lana  
Wachowski e Lilly Wachowski.  
Warner Bros Pictures, 1999

## RESUMO

Este trabalho aborda o processo de projeto, desenvolvimento, implementação e testes de um medidor eletrônico trifásico de energia ativa, reativa e aparente, bem como de tensão rms e corrente rms. As bases de *hardware* utilizadas foram o circuito integrado ADE7758 da Analog Device e a plataforma Arduino UNO. O medidor desenvolvido conta com memória de massa e relógio de tempo real (RTC), possibilitando desta forma, a capacidade da obtenção de curva de consumo de eletricidade e relatórios de monitoramento de parâmetros elétricos. Com o medidor trifásico construído, realizaram-se ensaios comparativos com medidores padrões e obtiveram-se resultados aceitáveis de erro entre as medições.

**Palavras-chave:** ADE7758, Arduino UNO, medidor eletrônico de energia, memória de massa.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Medidor de lâmpada-hora de corrente alternada.....	5
Figura 2.2 – Medidor químico de Thomaz Edson.....	5
Figura 2.3 – Conversão analógico-digital.....	12
Figura 2.4 – Divisor Resistivo.....	15
Figura 2.5 – Transformador de corrente.....	17
Figura 2.6 – Transformador de corrente de núcleo articulado.....	18
Figura 3.1 – Diagrama de blocos do medidor.....	23
Figura 3.2 – Placa Arduino UNO.....	24
Figura 3.3 – Comunicação pelo protocolo SPI com vários escravos.....	29
Figura 3.4 – Transformador de corrente utilizado no projeto.....	39
Figura 3.5 – Diagrama do filtro RC passa-baixa para entrada de corrente.....	40
Figura 3.6– Diagrama filtro RC passa baixa para entrada de tensão.....	40
Figura 3.7 – Resistor de precisão de 1 MΩ, 1% de tolerância e 50 ppm/°C.....	41
Figura 3.8 – IHM de cinco botões.....	41
Figura 3.9 – Vista do módulo RTC DS3231.....	42
Figura 3.10 – Display 16x2 utilizado no projeto.....	43
Figura 4.1 – Terminais utilizados na placa Arduino UNO.....	45
Figura 4.2 – Esquemático do circuito de entrada do sinal de tensão.....	47
Figura 4.3 – Esquemático do circuito de entrada do sinal de corrente.....	48
Figura 4.4 – Esquemático das ligações do CI ADE7758.....	49
Figura 4.5 – Esquemático com as ligações do soquete do módulo SD.....	49
Figura 4.6 – Esquemático do divisor de tensão utilizado pelo módulo SD.....	50
Figura 4.7 – Conexões de entrada/saída do módulo ADE7758 com o Arduino UNO.....	50
Figura 4.8 – Placa circuito impresso do módulo CI ADE7758.....	52
Figura 4.9 – Visão exterior do medidor montado.....	53
Figura 4.10 – Visão interna do medidor.....	54
Figura 4.11 – Representação gráfica da medição e erro de medição.....	57
Figura 4.12 – Circuito de Calibração por Comparação.....	58
Figura 5.1 – Curva de consumo da residência das 6h00 até 19h00.....	64

Figura 5.2 – Curva de consumo gerada via os dados dos dois medidores do dia 22.11.16 e a curvas de erro entre eles.....	65
Figura 5.3 – Curva de consumo gerada via os dados dos dois medidores do dia 23.11.16 e a curvas de erro entre eles.....	66
Figura 5.4 – Curva de consumo gerada via os dados dos dois medidores do dia 24.11.16 e a curvas de erro entre eles.....	67
Figura 5.5 – Curva de consumo gerada via os dados dos dois medidores do dia 25.11.16 e a curvas de erro entre eles.....	67
Figura 5.6 – Curva de consumo gerada via os dados dos dois medidores do dia 26.11.16 e a curvas de erro entre eles.....	68
Figura 5.7 – Corrente fase B medida por ambos os medidores.....	68
Figura 5.8 – Medição da tensão de ambos os medidores do dia 22.11.16.....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Algumas especificações técnicas do CI ADE7758.....	27
Tabela – 3.2 Descrição dos pinos do protocolo SPI.....	28
Tabela 3.3 – Modos de comunicação do protocolo SPI.....	35
Tabela 3.4 – Especificações técnicas do transdutor SCT-013-000.....	39
Tabela 3.5 – Tabela para análise dos dados oriundo da memória de massa.....	44
Tabela 4.1– Conexões do display LCD.....	46
Tabela 4.2 – Resultado das leituras para calibração.....	56
Tabela 4.3 – Comparação após calibração da corrente.....	57
Tabela 5.1 – Momento de erro máximo.....	66
Tabela 5.2 – Energia ativa, em Wh, medida pelos medidores.....	69
Tabela 5.3 – Energia Reativa, em VArh, medida pelos medidores.....	69
Tabela 5.4 – Energia Aparente, em VAh, medida pelos medidores.....	70
Tabela 5.5 – Erros diários para medidas de tensão.....	71
Tabela 5.6 – Parâmetros da carga da amostra 1.....	73
Tabela 5.7 – Valores medidos da amostra 1.....	73
Tabela 5.8 – Parâmetros da carga da amostra 2.....	74
Tabela 5.9 – Valores medidos da amostra 2.....	74
Tabela 5.10 – Parâmetros da carga da amostra 3.....	75
Tabela 5.11 – Valores medidos da amostra 3.....	75
Tabela 5.12 – Parâmetros da carga da amostra 4.....	76
Tabela 5.13 – Valores medidos da amostra 4.....	76
Tabela 5.14 – Parâmetros da carga da amostra 5.....	77
Tabela 5.15 – Valores medidos da amostra 5.....	77
Tabela 5.16 – Resumo com média e Desvio Padrão das amostras.....	78
Tabela 5.17 – Resultado do ensaio de perdas internas.....	79

## CÓDIGOS FONTE

Código-fonte 3.1 – Gravação de dados no cartão SD.....	34
Código-fonte 3.2 – Confecção da palavra a ser gravada.....	34
Código-fonte 3.3 – Configuração da Comunicação via Protocolo SPI.....	36
Código-fonte 3.4 – Função escrita.....	37
Código-fonte 3.5 – Função Leitura.....	38
Código-fonte 4.1 – Leitura e produto entre valor lido e constante.....	55
Código-fonte 4.2 – Trecho da programação de calibração de energias.....	60
Código-fonte 4.3 – Acumulação dos valores de energia ativa.....	61
Código-fonte 4.4 – Tradução dos valores acumulados em valores de energia.....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Analog-Digital converter (conversor analógico-digital)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PGA	Programmable-gain amplifier (amplificador de ganho programável)
CELPA	Centrais Elétricas do Pará S.A.
UFPa	Universidade Federal do Pará
GEDAE	Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas
KTX	Constante de Energia Aparente para a fase X
RB	Resistor do secundário do transformador de corrente
J1	Medidor desenvolvido ao longo do trabalho
TC	Transformador de Corrente
R	Read (leitura)
R/W	Read/Write (leitura/escrita)
PCB	Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impresso)
c.c.	Corrente Contínua
c.a.	Corrente Alternada
IDE	Integrated Development Environment
SPI	Serial Peripheral Interface
RMS	Root Mean Square (valor quadrático médio)
RTC	Real Time Clock (Relógio de Tempo Real)
CI	Círculo Integrado

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivo.....</b>	<b>3</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do Trabalho.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Breve Histórico.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>Valor RMS e TRUE RMS.....</b>	<b>6</b>
<b>2.3</b>	<b>Potências Elétricas.....</b>	<b>7</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Potência Aparente.....</b>	<b>8</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Potência Ativa.....</b>	<b>8</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Potência Reativa e Potência Não-ativa.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Fator de Potência.....</b>	<b>10</b>
<b>2.4</b>	<b>Processamento Digital de Sinais no Tempo Contínuo.....</b>	<b>11</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Tempo de Amostragem.....</b>	<b>12</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Teorema da Amostragem.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Conversor Analógico-Digital.....</b>	<b>13</b>
<b>2.5</b>	<b>Medidores Eletrônicos.....</b>	<b>14</b>
<b>2.6</b>	<b>Transdutores.....</b>	<b>14</b>
<b>2.7</b>	<b>Transformador de Corrente.....</b>	<b>16</b>
<b>2.8</b>	<b>Integração.....</b>	<b>18</b>
<b>2.8.1</b>	<b>Período de Integração.....</b>	<b>19</b>
<b>2.9</b>	<b>Terminologias do INMETRO.....</b>	<b>19</b>
<b>2.9.1</b>	<b>Medidor.....</b>	<b>20</b>

2.9.2	Direção do Fluxo.....	20
2.9.3	Funcionalidade.....	20
2.9.4	Tipos de ligação.....	20
2.9.5	Calibração.....	20
2.9.6	Elementos Funcionais.....	21
2.9.7	Constantes.....	21
2.9.8	Memórias .....	21
2.9.9	Valores Nominais e Corrente Máxima.....	21
2.9.10	Erros.....	22
2.9.11	Faixa Limite de Funcionamento.....	22
2.9.12	Base de Tempo.....	22

<b>3</b>	<b>DESCRÍÇÃO DO PROJETO E INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA UTILIZADA PARA O DESENVOLVIMENTO DO MEDIDOR.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1</b>	<b>Descrição dos Componentes Eletrônicos Empregados.....</b>	<b>24</b>
3.1.1	Plataforma Arduino.....	24
3.1.2	Círculo Integrado ADE7758 para Medição de Energia Elétrica.....	26
<b>3.2</b>	<b>Barramento SPI.....</b>	<b>28</b>
<b>3.3</b>	<b>Operação.....</b>	<b>29</b>
<b>3.4</b>	<b>Descrição dos Sistemas de Armazenamento e Comunicação dos Dados.....</b>	<b>32</b>
3.4.1	Sistema de Armazenamento de Dados.....	33
3.4.2	Sistema de Comunicação.....	35
<b>3.5</b>	<b>Periféricos.....</b>	<b>38</b>
3.5.1	Transdutores.....	38
3.5.2	Filtros.....	39

3.5.3	IHM – Interface Homem Máquina.....	41
3.5.4	<i>Time Clock</i> .....	42
3.5.5	Mostrador.....	42
<b>3.6</b>	<b>Tratamento dos Dados no Computador.....</b>	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>PROJETO, MONTAGEM E ENSAIOS NO MEDIDOR.....</b>	<b>45</b>
4.1	<b>Conexão dos Módulos.....</b>	45
4.2	<b>Módulo ADE7758.....</b>	46
4.3	<b>Processo de Calibração.....</b>	54
4.3.1	Calibração dos Canais de Tensão e Corrente.....	54
4.3.2	Calibração de Energias.....	59
<b>5</b>	<b>AVALIAÇÃO OPERACIONAL DO MEDIDOR, LIMITAÇÕES E OPORTUNIDADES FUTURAS.....</b>	<b>63</b>
5.1	<b>Resultados Operacionais.....</b>	63
5.1.1	<b>Ensaio Energia Ativa.....</b>	63
5.1.2	Ensaio de Curva de Carga.....	64
5.1.2.1	Energia Ativa.....	65
5.1.2.2	Energia Reativa e Aparente.....	69
5.1.2.3	Tensão e Corrente.....	71
5.1.3	Ensaio com cargas mistas (lineares e não lineares.....	72
5.1.4	Verificação das perdas Internas.....	78
5.2	<b>Limitações.....</b>	79
5.2.1	Tensão, corrente e Potências.....	79
5.2.2	Medida de Valores Negativos.....	80
5.2.3	Memória.....	80
5.2.4	Incerteza.....	81

<b>5.3</b>	<b>Melhorias e Projetos Futuros.....</b>	<b>81</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>83</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>84</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização

Desde quando a energia elétrica se tornou um produto comercializável, a sua medição também começou a fazer parte do produto, e assim como qualquer bem comercial, a sua qualidade foi e ainda é fundamental para o sucesso dos empreendimentos. Isto torna necessária a medição confiável não apenas da quantidade de energia entregue ou consumida, mas de parâmetros que tangem a sua qualidade, como por exemplo, o nível de tensão (o valor eficaz ou o valor de pico) e a distorção harmônica total.

A medição de energia elétrica é, segundo a Resolução Normativa N°. 414 da ANEEL de 2010 [1], um processo realizado por equipamento que possibilite a quantificação e o registro de grandezas elétricas associadas à geração ou consumo de energia, assim como a potência ativa ou reativa, quando cabível.

Segundo a terminologia adotada na Portaria 587/2012 do Inmetro [2], um medidor eletrônico de energia elétrica é definido como um medidor de energia elétrica estático no qual a corrente e a tensão agem sobre elementos de estado sólido (componentes eletrônicos) para produzir uma informação de saída proporcional à quantidade de energia elétrica medida.

Todas as empresas distribuidoras, geradoras e transmissoras de energia elétrica sempre dependeram de seus equipamentos e sistemas de medição para mensurar, controlar, proteger e faturar sua principal receita. Toda energia fornecida pelas concessionárias a seus clientes é quantificada a partir de um equipamento, o medidor. *“Um medidor de energia elétrica é um dispositivo ou um equipamento eletromecânico ou eletrônico capaz de medir (mensurar) o consumo de energia elétrica de um estabelecimento”*[3].

A medição eletrônica, ou seja, via medidor puramente eletrônico apresenta vantagens frente ao uso de medidores eletromecânicos, como exemplo: não possui peças móveis, o que facilita e diminui o custo da sua manufatura e acaba com a exigência de uma posição angular fixa para medição, além de serem menos suscetíveis às fraudes de medição.

A medição eletrônica traz outra vantagem, que é a compatibilidade com os meios de comunicação eletrônica, possibilitando o acompanhamento e o

gerenciamento mais fácil, tanto para o cliente (unidade consumidora) quanto para a concessionária. Com isto, torna-se mais simples o conhecimento do perfil de consumo, possibilitando uma melhor relação de custo para energia, por exemplo, adequando-se o consumo em diferentes postos horários, algo que já é realidade devido à existência de um novo sistema de tarifação, a Tarifa Branca.

A Tarifa Branca é uma nova opção de tarifa que já se encontra disponível para os consumidores que são atendidas em baixa tensão (127, 220, 380 ou 440 volts), denominadas de grupo B. A tarifa consiste na variação do valor da energia conforme o dia e o horário do consumo [4].

A ideia é que o consumidor adote hábitos que priorizem o uso da energia fora do período de ponta (aquele com maior demanda de potência na área de concessão), diminuindo o consumo neste horário, e a opção pela Tarifa Branca oferece a oportunidade de reduzir o valor pago pela energia consumida [5].

Também poderá ser útil para unidades consumidoras do grupo B, que já não possuem grandes demandas no período de ponta. Porém, para se saber se é vantagem optar pela tarifa branca, é necessário que se conheça a curva de consumo do consumidor. Neste contexto, destacam-se os medidores de energia com memória de massa, que são equipamentos apropriados para fornecerem os dados necessários para a elaboração da curva de consumo, sendo abordado em detalhes no presente trabalho o desenvolvimento de um medidor eletrônico com memória de massa.

## **1.2 Justificativa**

O desenvolvimento de medidores de energia elétrica possui um grande potencial nos dias de hoje, pois as aplicações são inúmeras e o custo não é alto, com menos de uma dezena de dólares é possível adquirir circuitos integrados dedicados à medição de uma grande quantidade de parâmetros elétricos, além de que o custo maior se encontra, normalmente, em componentes comuns presente nos medidores mais simples e também nos mais complexos (fornecem mais variáveis), como por exemplo, o transdutor de corrente. Por estes fatores, foi identificada uma grande necessidade para a pesquisa e elaboração de procedimentos e técnicas de desenvolvimento de medidores, e até mesmo, de

analisadores de qualidade de energia, que ainda hoje é um equipamento de valor elevado.

### **1.3 Objetivo**

Este trabalho visa apresentar as etapas de confecção de um medidor eletrônico multifunção com memória de massa, do projeto aos testes, priorizando-se a descrição do projeto e instrumentação eletrônica utilizada para o desenvolvimento do medidor, bem como as funcionalidades agregadas ao equipamento desenvolvido.

Especificamente a proposta do projeto é a construção de medidor multifunção trifásico portátil utilizando como plataforma base o Arduino UNO e o CI ADE7758, além de periféricos de baixo custo, como transformadores de corrente simples, placa de circuito impresso (PCB) feita em processos não industriais, *display* 16x2, IHM de cinco teclas, fonte de alimentação c.c. de 9 V, entre outros.

### **1.4 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No presente capítulo é onde se expõe a Introdução, contextualização, justificativa e objetivos do trabalho.

No capítulo 2 são apresentados os medidores eletrônicos de energia elétrica e os processos relacionados à medição de tensão, corrente, potência e energia, destacando suas principais características.

No capítulo 3 é realizado um aprofundamento nas particularidades do medidor desenvolvido, descrevendo os componentes eletrônicos utilizados e os sistemas de aquisição, armazenamento, tratamento, comunicação e visualização dos dados.

No capítulo 4 descreve-se o projeto do medidor eletrônico, detalhando a montagem e processo de calibração.

No capítulo 5 apresenta-se a avaliação operacional do medidor, com os resultados de ensaios, análise dos dados monitorados e limitações do medidor.

Ao final do trabalho apresentam-se as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

## 2 MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A medição de energia elétrica é um ponto crucial para a comercialização, projeto e controle de um dos produtos dado como vital atualmente para a sociedade. As formas, aplicações e contexto da medição de grandezas elétricas são as mais variadas possíveis, incidindo assim nas mãos de técnicos e engenheiros o trabalho para seu desenvolvimento e operação.

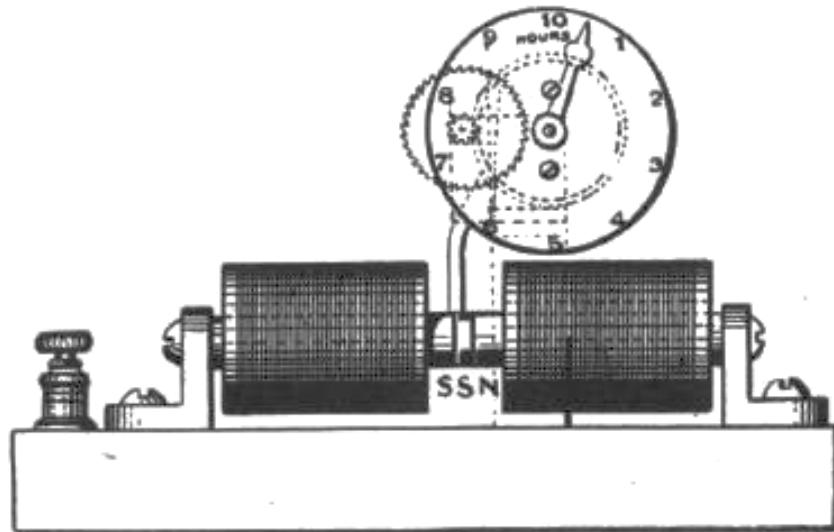
### 2.1 Breve Histórico

No final do século XIX, os sistemas elétricos de potência e seus componentes interconectados (Geração, Transmissão e Distribuição) começavam a ganhar espaço para a utilização da eletricidade nas indústrias e residências, e passaram a ser baseados em sistemas trifásicos e com frequência constante, facilitando assim, o projeto de transformadores e de linhas de transmissão de longas distâncias, mas principalmente para os motores elétricos, que até hoje correspondem a maior parcela da carga dos sistemas elétricos no mundo [6].

Nessa época, as primeiras companhias concessionárias de energia elétrica estavam surgindo e a necessidade de encontrar uma forma para computar o consumo da energia elétrica se tornou cada vez mais crucial, daí surgiram os primeiros medidores de energia.

Basicamente, os primeiros medidores de energia elétrica se constituíam de um relógio (medidor) acoplado a um eletroímã [3]. Operavam inicialmente em corrente contínua (c.c.) e posteriormente surgiram os modelos de corrente alternada (c.a.). Esses medidores expressavam o resultado da medição numa unidade de medida denominada *lâmpada-hora*, ou seja, a medição tinha como base o tempo em que uma lâmpada pré-definida permanecia acesa. Na Figura 2.1 é mostrado um medidor deste tipo.

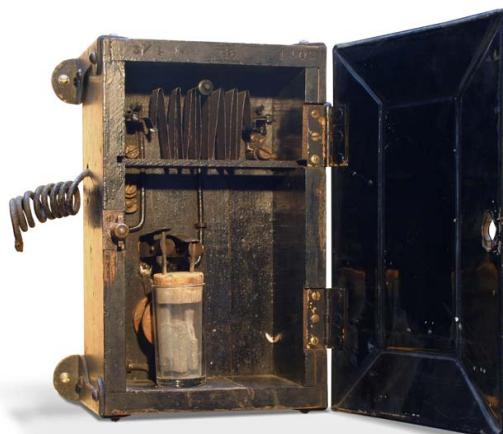
Figura 2.1 – Medidor de lâmpada-hora de corrente alternada.



Fonte: [7].

Com o passar do tempo foram sendo desenvolvidos medidores que de fato mediam a quantidade de energia elétrica consumida. O primeiro foi criado por Thomas Edison, em 1882 [3], mostrado na Figura 2.2. Esse medidor funcionava por meio de uma reação química que ocorria devido à passagem da corrente elétrica pelo medidor. A medição do consumo era então realizada a partir de medições mensais da quantidade de matéria que reagiu na solução.

Figura 2.2 – Medidor químico de Thomas Edison.



Fonte: [8].

Na década de 1970 começou a surgir os primeiros medidores híbridos que faziam uso do sistema mecânico tradicional, porém dotados de visores eletrônicos para facilitar a leitura do consumo de energia. No mercado brasileiro, os medidores eletrônicos passaram a surgir no final dos anos 1980 [3].

## 2.2 Valor RMS

O valor eficaz ou valor médio quadrático (RMS - *Root Mean Square*) de um sinal em corrente alternada é numericamente igual ao valor de uma corrente ou tensão em corrente contínua que iria produzir a mesma dissipação de potência em uma carga resistiva que o sinal em corrente alternada. Sua importância também está no fato de ser um parâmetro utilizado nos cálculos de potências e sua formulação geral está na Equação 2.1, para o caso de sinais de tempo contínuo, e na Equação 2.2 para o caso discreto.

Este conceito de valor RMS, por abranger todos os casos (sinais senoidais ou não), também é denominado de valor RMS verdadeiro ou “TRUE RMS”, podendo ser também expresso em termos das componentes harmônicas presentes em um sinal, como mostrado na Equação 2.3.

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} x^2(t) dt} \quad (2.1)$$

Onde,  $x(t)$  é o sinal ou função temporal contínua;  $k$  é um número inteiro positivo;  $T$  é o período do sinal; e  $\tau$  é o instante quando a medição inicia.

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X^2[n]} \quad (2.2)$$

Onde  $X$  é o sinal discreto e  $N$  é número de amostras do sinal.

$$X_{RMS} = \sqrt{X_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} \frac{x_h^2}{2}} \quad (2.3)$$

Onde,  $X_0$  é a componente de frequência zero (ou componente de corrente contínua) do sinal  $x(t)$ ,  $h$  é o número ou ordem da componente harmônica e  $X_h$  é o valor de pico da componente harmônica de ordem  $h$ .

Um caso particular, utilizado na obtenção do valor RMS de tensão ou corrente em alguns medidores e multímetros considera que o sinal seja puramente senoidal (ou esteja presente somente a componente de frequência fundamental do sinal). Assim, a Equação 2.4 expressa a relação entre o valor de pico do sinal senoidal e o valor RMS.

$$X_{RMS} = \frac{X_p}{\sqrt{2}} \quad (2.4)$$

Onde,  $X_p$  é o valor de pico do sinal senoidal.

Os medidores ou multímetros projetados para fornecer o valor RMS de acordo com a Equação 2.4 apenas medem o valor de pico e depois realizam a operação de divisão por raiz de dois. Logo, eles não são adequados para a medição de sinal alternado não senoidal.

### 2.3 Potências Elétricas

A potência elétrica é a variação da energia elétrica por unidade de tempo, que pode ser fornecida ou absorvida por qualquer sistema elétrico [9], sua unidade usual para eletricidade é o watt (W). A relação entre a energia elétrica fornecida ou absorvida por unidade de tempo pode ser descrita segundo a Equação 2.5.

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (2.5)$$

Onde  $p$  é denominado de potência instantânea, pois é uma grandeza que varia em função do tempo,  $w$  é a energia elétrica envolvida e  $t$  é o tempo.

### 2.3.1 Potência Aparente

Esta potência não existe no sentido físico, a prova disso é a inexistência de medidores analógicos para medição direta dela. A sua importância se dá pelo fato de poder ser interpretada como sendo o máximo de potência ativa que pode ser transmitida por uma determinada rede elétrica ou dispositivo mantendo-se os valores eficazes (RMS) da tensão e corrente constantes [10]. A sua medição na realidade se dá através de um processo de cálculo, que é definido como o produto entre os valores eficazes de tensão e corrente, descrita pela Equação 2.6.

$$S = V_e \cdot I_e \quad (2.6)$$

Onde,  $S$  é a potência aparente, dada em volt-ampère (VA) ou seus múltiplos;  $V_e$  e  $I_e$  são os valores eficazes de tensão e corrente. A definição da Equação 2.6 é dada para o caso monofásico, bastando apenas a adição direta das outras fases para o caso trifásico senoidal e balanceado. Também pode ser aplicada aos casos de sistemas polifásicos desbalanceados e com tensões e correntes não senoidais [10], contudo, a obtenção de  $V_e$  e  $I_e$  (denominados neste caso de valores efetivos de tensão e corrente, respectivamente) foge do escopo deste trabalho.

A integração temporal da potência aparente resulta na energia aparente, que também só é conhecida por via de cálculo.

### 2.3.2 Potência Ativa

Esta potência também pode ser chamada de potência real, pois ela é a que de fato é utilizada pelo dispositivo para produzir trabalho, ou seja, é a potência elétrica que se transforma em outras formas de potência . Ela pode ser entendida como o valor médio da potência instantânea em um determinado intervalo de medição [10], mostrada na Equação 2.7.

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p dt \quad (2.7)$$

Onde,  $k$  é um número inteiro positivo;  $T$  é o período do sinal ou da forma de onda; e  $\tau$  é o instante quando a medição inicia.

Para o caso monofásico operando com tensão e corrente senoidais, define-se a potência ativa pela Equação 2.8.

$$P = V_e \cdot I_e \cdot \cos \varphi \quad (2.8)$$

Onde  $P$  é a potência ativa, dada em watts (W),  $V_e$  e  $I_e$  são os mesmos definidos para a Equação 2.6 e  $\varphi$  é o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente. Para casos em que há presença de componentes harmônicas, a definição da Equação 2.8 ainda pode ser aplicada, porém há de se considerar cada componente harmônica e também a componente contínua, conforme mostrado na Equação 2.9.

$$P = V_0 I_0 + V_1 I_1 \cos \varphi_1 + \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h \quad (2.9)$$

Onde,  $V_0$  e  $I_0$  são os níveis de tensão e corrente, respectivamente, de frequência zero, ou seja, componentes contínuas;  $V_1$ ,  $I_1$  e  $\cos \varphi_1$  são os mesmos definidos em 2.8, com o detalhe que agora se refere especificamente à frequência fundamental;  $V_h$ ,  $I_h$  e  $\cos \varphi_h$  são semelhantes aos definidos em 2.8, porém aplicada a cada componente harmônica de ordem  $h$ .

### 2.3.3 Potência Reativa e Potência Não-ativa

A Potência Reativa é definida como a potência oscilante trocada entre a fonte e a carga, possuindo valor médio nulo, ou seja, não há a transferência efetiva de energia da fonte para a carga. A potência reativa pode surgir de duas formas, uma a partir de cargas que possuam elementos reativos, ou seja, armazenam energia em campos elétricos ou magnéticos e trocam esta potência com a fonte, e no caso da tensão da fonte senoidal, ocorre uma defasagem angular entre a tensão aplicada e a corrente resultante. Outra forma também se dá a partir de elementos não lineares no circuito submetidos a um sinal em corrente alternada.

A potência reativa ( $Q$ ) é dada em Volt-Ampère Reativo (VAr) e pode ser calculada pelo valor médio do produto tensão instantânea e corrente instantânea deslocada de  $90^\circ$ , deste modo obtém-se a Equação 2.10:

$$Q = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} q dt \quad (2.10)$$

Onde,  $q$  representa o produto da tensão instantânea e corrente instantânea deslocada de  $90^\circ$ ;  $k$  é um número inteiro positivo;  $T$  é o período do sinal; e  $\tau$  é o instante quando a medição inicia.

Na equação 2.11 é mostrado como ela é calculada quando se tem a operação com tensões e correntes senoidais.

$$Q = V e \cdot I e \cdot \sin \varphi \quad (2.11)$$

Onde as variáveis  $V e$ ,  $I e$  e  $\varphi$  são as mesmas definidas em 2.8.

Para operação com tensões e correntes não senoidais ainda hoje não há um consenso entre a comunidade científica sobre o que vem realmente a ser potência reativa, porém uma definição utilizada pela norma 1459-2010 do IEEE é a de potência não-ativa (N) [10]. A potência não-ativa une as componentes fundamental (reativa clássica, definida na equação 2.11) e não-fundamental (componentes harmônicas). No passado, esta potência era chamada de “potência fictícia” [10]. Sua unidade se mantém o volt-ampère reativo (VAr).

Assim, a partir dos valores obtidos da potência ativa e da potência aparente, pode-se calcular a potência não-ativa pela Equação 2.12, representando a parcela de potência que não contribui para a potência ativa.

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.12)$$

### 2.3.4 FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência pode ser interpretado como a relação entre a potência efetivamente transmitida à carga e a máxima potência que poderia ser transmitida à

carga para os mesmos valores de tensão e corrente [10], tal relação é dada na Equação 2.13.

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.13)$$

Onde,  $P$  é potência ativa e  $S$  é a potência aparente.

## 2.4 Processamento Digital de Sinais no Tempo Contínuo

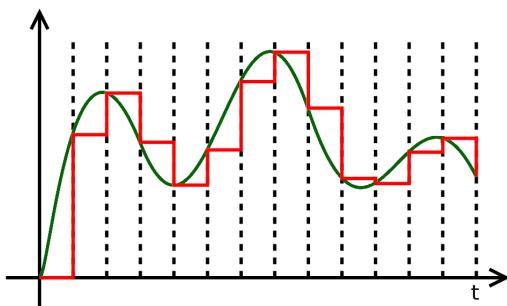
A maioria dos tipos de sinais que se verificam na natureza são considerados como sinais contínuos, ou seja, variam continuamente em função do tempo, espaço, etc. Um exemplo clássico de sinal contínuo é o som, que são ondas mecânicas (contínuas) se propagando (em função de espaço e tempo) em um meio material. Para o processamento destes sinais em dispositivos eletrônicos, normalmente há uma etapa de conversão ou adequação do sinal para sinais elétricos, posteriormente, introduz-se em um dispositivo de natureza analógica ou conversor analógico-digital, também conhecido pela sigla em inglês ADC (*analog digital converter*).

Os conversores analógicos-digitais são sempre necessários para a utilização de sistemas digitais em processos ou manipulação de sinais contínuos, também conhecidos como sinais analógicos. Muitas vezes é preferível realizar o processamento do sinal em formato digital, pois dispositivos digitais apresentam maior facilidade para alterar, corrigir ou atualizar aplicações, aliado a um menor custo, além de menor suscetibilidade a ruído, tempo de desenvolvimento e consumo de energia [11].

O formato digital, também conhecido como sinal de tempo discreto, é representado na forma de palavras binárias (sequência de bits de tamanho fixo), ou seja, um determinado valor instantâneo do sinal contínuo é representado por uma palavra finita composta por valores binários ou bits, normalmente representados pelos valores “0” e “1”. Os bits por sua vez são facilmente representados fisicamente dentro do dispositivo digital, originando daí boa parte de suas vantagens operacionais.

O processamento que um ADC realiza consiste “ler” um valor analógico e “escrever” uma palavra binária que corresponda a aproximadamente a esse valor. Tal processo é representado na Figura 2.3, onde a linha verde corresponde ao sinal contínuo e a linha vermelha ao sinal digitalizado. A quantização deste valor não é exata, mas sim aproximada para o valor digital mais próximo, essa aproximação insere erros na medição e este erro diminui com o uso de mais bits para representação do sinal analógico em formato digital.

Figura 2.3 – Conversão analógico-digital.



Fonte: [12], alterado pelo autor.

#### 2.4.1 Tempo de Amostragem

O tempo de amostragem, ou período de amostragem, é o tempo em que o sinal é “lido”, ou seja, amostrado. Ele é importante também para desenvolver as relações entre os sinais de tempo contínuo e os sinais de tempo discreto equivalentes no domínio do tempo e no domínio da frequência [13].

Uma das limitações do sistema digital é a velocidade de processamento, que está diretamente ligada ao período de amostragem, pois, períodos menores significam velocidade de processamento maiores. Um detalhe neste caso é a limitação por parte da conversão, pois a amostragem deve possuir uma frequência no mínimo duas vezes maior do que a maior frequência do sinal contínuo a ser amostrado.

Portanto, o sinal que pode ser processado por um ADC possui uma largura de banda, também conhecida por *bandwidth*, que é limitada a duas vezes a frequência

de amostragem. Caso não seja respeitado este limite, ocorre um efeito prejudicial à interpretação e recomposição do valor inicial, chamado de *aliasing*. É comum o uso de filtros *anti-aliasing* antes de ADC, normalmente compostos por filtros passa-baixas com frequência de corte menor que duas vezes a frequência máxima do sinal que se deseja analisar. Emprega-se um valor menor para se ter uma margem de segurança contra ruídos.

#### 2.4.2 Teorema da Amostragem

Este teorema já foi detalhado na seção anterior, mas aqui faz-se apenas uma definição mais matemática, que diz: se um sinal  $x_a(t)$  no tempo contínuo tem largura de banda limitada, isto é, sua transformada de Fourier é tal que  $X_a(j\Omega) = 0$  para  $|\Omega| > \Omega_c$ , então  $x_a(t)$  pode ser completamente recuperado a partir do sinal no tempo discreto  $x(n) = x_a(nT_s)$  se e somente se a frequência de amostragem  $\Omega_s$  satisfaz  $\Omega_s > 2\Omega_c$  [13].

Onde,  $x_a(t)$  é o sinal de tempo contínuo,  $X_a(j\Omega)$  é a transformada de Fourier do sinal  $x_a(t)$  para uma frequência  $\Omega$ ,  $\Omega_c$  é a máxima frequência do sinal  $x_a(t)$ ,  $n$  é o número da amostra,  $T_s$  é o período de amostragem e  $\Omega_s$  é a frequência de amostragem.

#### 2.4.3 Conversor Analógico-Digital

Mais detalhadamente, pode-se dizer que um conversor analógico-digital recebe uma tensão analógica de entrada e, após um certo tempo, produz um código digital de saída que representa a entrada analógica. Representando estes sinais em bits, por exemplo, uma palavra de quatro bits possui 16 possíveis valores para um sinal digital.

Logo, o número de bits da palavra digital afeta diretamente o valor a ser interpretado pelo dispositivo nas etapas posteriores, pois se entende que o sinal analógico de entrada possui um número infinito de valores de representação, então, com uma palavra finita, sempre haverá erro na conversão. Logo, pode-se dizer que

uma das principais características de um ADC é a sua resolução, que é determinada pelo número de níveis discretos que podem ser assumidos pela sua saída [13].

## 2.5 Medidores Eletrônicos

Um medidor eletrônico é um medidor de energia elétrica estático no qual a corrente e a tensão agem sobre elementos de estado sólido (componentes eletrônicos) para produzir uma informação de saída proporcional à quantidade de energia elétrica medida [14].

Os medidores eletrônicos de energia realizam o processamento dos sinais oriundos das variáveis elétricas, tensão e corrente, da carga ou de um sistema em medição, e sua representação deve ser o mais fiel possível para que os erros sejam minimizados. Uma boa representação também significa que a forma de onda e a fase dos sinais devem ser preservados pelos sensores e transdutores.

A medição de energia elétrica até pode ser realizada diretamente, sem o uso de transdutores, porém, a construção de aparelhos dessa natureza não é compatível com a medição eletrônica, que geralmente emprega circuitos trabalhando com valores de tensão e corrente muito pequenos. Alguns medidores eletromecânicos funcionam sem transdutores, ou seja, os valores nominais a serem medidos são inseridos diretamente nos elementos medidores.

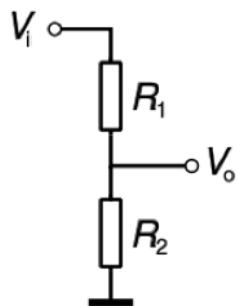
## 2.6 Transdutores

Os transdutores utilizados para medição devem ser precisos, ter largura de banda adequada às frequências a serem medidas e produzir baixo deslocamento de fase do sinal. Um dos transdutores mais utilizados é o transformador de medição, sendo denominado de transformador de potencial (TP) para medição de tensão e transformador de corrente (TC) para medição de corrente. Os transformadores de potencial são normalmente utilizados para medição de valores elevados de tensão. Os transformadores de corrente também são utilizados, por outras razões, para

isolação galvânica entre um condutor em alta tensão e o medidor, e também porque são sensíveis a uma gama grande de corrente, indo desde de valores próximos de zero até centenas de ampères.

Os transdutores também podem ser do tipo divisor resistivo, tanto para tensão quanto para corrente. Para a tensão existe o divisor resistivo série, que consiste esquematicamente em dois resistores série, em que o primeiro resistor  $R_1$  possui normalmente uma resistência muito maior que o segundo  $R_2$ . O sinal de saída  $V_o$  se encontra sobre o resistor  $R_2$  e  $V_i$  é o sinal de entrada. Na Figura 2.4 está esquematizado o divisor resistivo.

Figura 2.4 – Divisor Resistivo.



Fonte: Autoria própria.

Para a corrente, a ideia é semelhante, com a diferença que a transdução não se dá por divisão resistiva e que o resistor fica em série com o circuito a ser medido. O nome dado ao resistor é *shunt* (paralelo) e o sinal a ser utilizado é retirado dos terminais deste resistor *shunt*. Este método possui a limitação de ter que se abrir o circuito para inserir o resistor *shunt* e de não oferecer isolamento galvânico. Este método é conveniente com o uso de transformadores de corrente, como visto na Figura 2.5, pois alia as vantagens do uso de TC com o simplicidade da conversão do sinal.

Os sinais oriundos dos transdutores são os sinais de entrada do medidor. Ao serem inseridos, eles passam ainda por uma série de etapas de processamento, podendo-se destacar aqui os ganhos analógicos, os ADC, filtros *anti-aliasing*, filtros

passa-altas, etc. Ao final destas etapas, ainda há processamentos de cálculos no formato digital, para daí sim, surgirem valores das variáveis propriamente ditas.

## 2.7 Transformador de Corrente

O transformador de corrente consiste em um toróide, contínuo ou não, com muitas espiras (secundário) e, normalmente, com apenas um condutor central (primário) por onde ocorre a passagem da corrente elétrica da carga. É um dispositivo que reproduz, no seu circuito secundário, a corrente que circula em seu enrolamento primário, com sua posição vetorial substancialmente mantida, em uma proporção definida, conhecida e relacionada com o número de espiras do primário e secundário.

O seu funcionamento se dá pela corrente que flui através do condutor que induz tensão no enrolamento do transformador, e caso este enrolamento esteja constituindo um circuito fechado, ocorrerá a passagem de uma corrente elétrica, esta corrente é utilizada como sinal de entrada para os sistemas de medição e controle.

A relação entre corrente no primário e secundário é dada pela Equação 2.14.

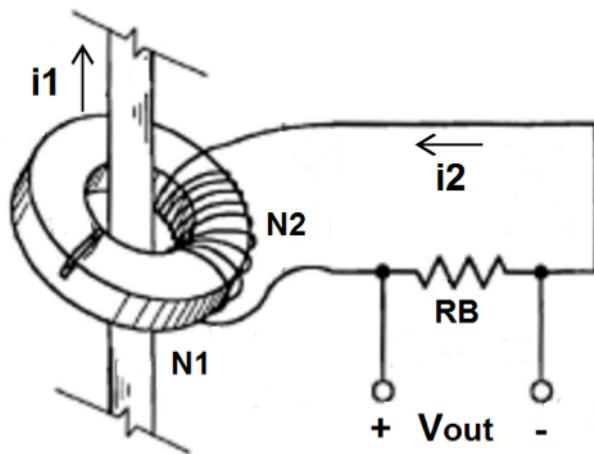
$$\frac{Ns}{Np} = \frac{Ip}{Is} \quad (2.14)$$

Onde,  $N_p$  é o número de espiras no primário,  $N_s$  é o número de espiras do secundário,  $I_p$  é a corrente no primário e  $I_s$  é a corrente no secundário. Como em muitos casos para transformadores de corrente, o número de espiras no primário é igual a um ( $N_p = 1$ ), e tendo como base a Equação 2.14, pode-se escrever que a corrente no secundário  $I_s$  é:

$$Is = \frac{Ip}{Ns} \quad (2.15)$$

Na figura 2.5 mostra-se um transformador de corrente com núcleo contínuo e com apenas uma espira no primário. Nota-se também como ocorre a conversão do sinal de corrente em um sinal de tensão via um resistor, seguindo a Equação 2.16.

Figura 2.5 – Transformador de corrente.



Fonte [15], alterado pelo autor.

$$V_{out} = I_2 \cdot R_B \quad (2.16)$$

Aplicando as equações 2.14 e 2.15 para se realizar a conversão de corrente no primário até o sinal de tensão que será usado como entrada nos medidores, tem-se:

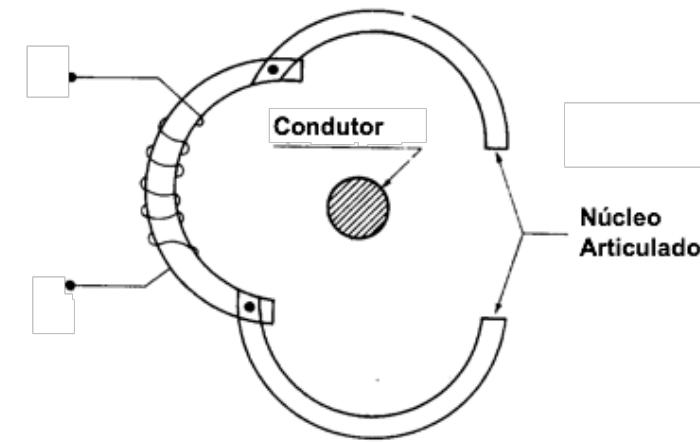
$$V_{out} = R_B \cdot \frac{I_1}{N_2} \quad (2.17)$$

Como os transformadores de corrente proveem isolamento galvânico entre o sistema a ser medido (circuito de potência) e o circuito medidor (circuito eletrônico), pode-se descartar a necessidade de uso de isoladores eletrônicos. É válido destacar também que o valor de  $R_B$  deve ser o menor possível, pois seu valor contribui para a inserção de erros na medição.

Um dos tipos de transformadores de corrente muito utilizado para instrumentos de medição que não se destinam a ficar instalados em um ponto fixo é o transformador de corrente de núcleo dividido ou articulado, ou seja, há facilidade

de seu uso para medições esporádicas. Na Figura 2.6 há uma representação esquemática de como é este transformador. Nota-se que do ponto de vista elétrico não há mudanças, apenas no aspecto mecânico.

Figura 2.6 – Transformador de corrente de núcleo articulado.



Fonte [16], alterado pelo autor.

Este TC possui características semelhantes às dos tipos janela, em que o núcleo pode ser separado para permitir envolver o condutor que funciona como enrolamento primário, conforme mostrado na Figura 2.6.

## 2.8 Integração

A energia elétrica não é uma variável que pode ser medida de forma instantânea como a corrente ou a potência, então sua medição deve ser realizada ao longo do tempo, chamado de período de medição ou acumulação. Os medidores de energia elétrica acumulam os valores medidos de energia de várias formas, por exemplo, nos medidores eletromecânicos, os valores são acumulados via registradores ciclométricos [17], onde cada giro do disco significa uma fração de energia que foi medida, após um determinado número de giros se incrementa o valor no contador.

Para os medidores digitais, o valor é acumulado na memória de massa e mostrado via *display*. O que seria um giro do disco para os eletromecânicos, é dado

por uma saída pulsada no eletrônicos, representado pelo piscar de um Led. Para ambos os modelos há constantes que relacionam o número de giros ou pulsos com a quantidade de energia medida.

As constantes são parâmetros utilizados para calcular, a partir de um certo número de pulsos, o valor correspondente à grandeza elétrica. Essas constantes são calculadas levando em conta a constante interna do medidor e as relações de TP e TC e são expressas em kWh/pulso e kvarh/pulso [18].

Por exemplo, a constante de multiplicação interna de um medidor da marca ELO, modelo ELO.2113 é 2/10000 kWh/pulso para o canal de energia ativa, 2/10000 kvarh/pulso para o canal de energia reativa e 2/10000 kvarh/pulso para o canal de energia aparente [18]. Caso este medidor seja acoplado a um TC de relação 200/5, por exemplo, sua constante final deve ser multiplicada por 40 ( $200 \div 5$ ), e da mesma forma para um TP.

A saída via o piscar de um LED é também utilizada para verificação de funcionamento, calibração e ocorrência de fraudes no medidor.

Muitos modelos guardam em suas memórias de massa apenas os números de pulsos ocorrido em determinado intervalo de tempo, que consiste seus períodos de medição.

### **2.8.1 Período de Integração**

Para os medidores digitais, há um período de integração dos valores de energia medidos, podendo ser em número de pulsos ou em valores de energia propriamente dito. Os modelos que guardam valores de energia em seus registradores devem ser lidos em um período de tempo pré-determinado, normalmente na ordem de milissegundos. Ao fim de uma leitura, o registrador é zerado e inicia-se o ciclo novamente, com o valor lido sendo somado a uma registrador acumulador de bem maior capacidade, fechando em um ciclo de tempo maior, na ordem de minutos.

Normalmente, os medidores integram os valores de cinco em cinco minutos, porém os relatórios de medições geralmente são feitos com integrações de 15, 30 ou 60 minutos [19].

## 2.9 Terminologias do INMETRO

A seguir são apresentadas algumas terminologias utilizadas no presente trabalho, as quais constam na Portaria Inmetro nº 587, de 05 de novembro de 2012 [2], que estabelece alguns limites, terminologias e ensaios para medidores de energia elétrica.

### 2.9.1 Medidor

Um medidor de energia elétrica é um instrumento destinado a medir a energia elétrica através da integração da potência em relação ao tempo. Denomina-se medidor eletrônico, um instrumento estático (não rotativo) no qual a corrente e a tensão agem sobre elementos de estado sólido para produzir uma informação de saída proporcional à quantidade de energia elétrica medida.

### 2.9.2 Direção do Fluxo

Os medidores podem ser uni ou bidirecionais, um medidor unidirecional é um medidor capaz de medir energia elétrica (ativa e/ou reativa) somente no sentido do fluxo direto e um medidor bidirecional é capaz de medir energia (ativa e/ou reativa) em ambos os sentidos de fluxo.

### 2.9.3 Funcionalidade

Um medidor é classificado como multifunção quando ele possui funcionalidades adicionais além de medição, registro e exibição de grandezas elétricas e eventos, tais como: memória de massa, dispositivo de comunicação e outras. Cabe destacar que a saída de pulso não caracteriza medidor multifunção.

### 2.9.4 Tipos de ligação

As ligações podem ser direta ou indireta, um medidor para ligação direta é ligado diretamente ao circuito a ser medido. Enquanto que um medidor para ligação

indireta deve ser ligado ao circuito a ser medido através de Transformador de Corrente, sendo a medição de tensão com ou sem Transformador de Potencial.

### **2.9.5 Calibração**

Para a calibração é necessário o uso de um comparativo padrão, também chamado de medidor padrão, que é um medidor de energia elétrica projetado especialmente para serviço de calibração e/ou verificação.

### **2.9.6 Elementos funcionais**

Existem os circuitos auxiliares que são circuitos destinados à conexão de dispositivos externos. Dentre estes se destacam os circuitos de corrente e tensão.

Circuitos de corrente são circuitos do medidor por onde circula a corrente a ser medida e circuitos de tensão são circuitos do medidor onde é aplicada a tensão a ser medida, podendo incluir o circuito da fonte de alimentação do medidor.

### **2.9.7 Constantes**

Existem normalmente dois tipos de constantes, a de calibração ( $K_h$ ) e a elétrica ( $K_e$ ). A constante de calibração corresponde à relação entre a energia elétrica medida e a quantidade de pulsos emitidos pelo medidor, através do seu dispositivo para verificação/calibração. A constante elétrica é a quantidade de energia que define a unidade básica armazenada. Ambas são expressas em Wh/pulso e em varh/pulso.

### **2.9.8 Memórias**

As memórias podem ser de três tipos, voláteis, não voláteis e de massa. As memórias voláteis retém as informações armazenadas somente enquanto energizada e as não voláteis retém mesmo quando desenergizada. A memória de massa é onde as grandezas medidas ou calculadas são armazenadas, ao longo do tempo e em intervalos definidos, para posterior acesso.

### **2.9.9 Valores Norminais e Corrente Máxima**

A tensão, frequência e corrente nominal de um medidor é definida como o valor para o qual o medidor é projetado e que serve de referência para a realização dos ensaios constantes do regulamento do INMETRO .

A corrente máxima ( $I_{máx}$ ) de um medidor é a maior intensidade de corrente que pode ser conduzida em regime permanente sem que o erro percentual e a elevação de temperatura admissíveis sejam ultrapassados.

### **2.9.10 Erros**

Os erros podem ser absolutos, relativos e percentuais. O Erro absoluto é simplesmente a diferença entre as quantidades de energia elétrica medida pelo medidor e a medida pelo medidor-padrão ou determinada pelo método Potência x Tempo. Se a diferença for negativa, se diz que o medidor está atrasado, e se a diferença for positiva, se diz que o medidor está adiantado. O Erro relativo é a relação entre o erro absoluto e a quantidade de energia elétrica medida pelo medidor padrão. O erro percentual corresponde ao erro relativo multiplicado por 100.

### **2.9.11 Faixa Limite de Funcionamento**

Condições extremas que um medidor em funcionamento pode suportar sem danos e sem degradação de suas características metrológicas quando subsequentemente usado em suas condições de serviço.

### **2.9.12 Base de Tempo**

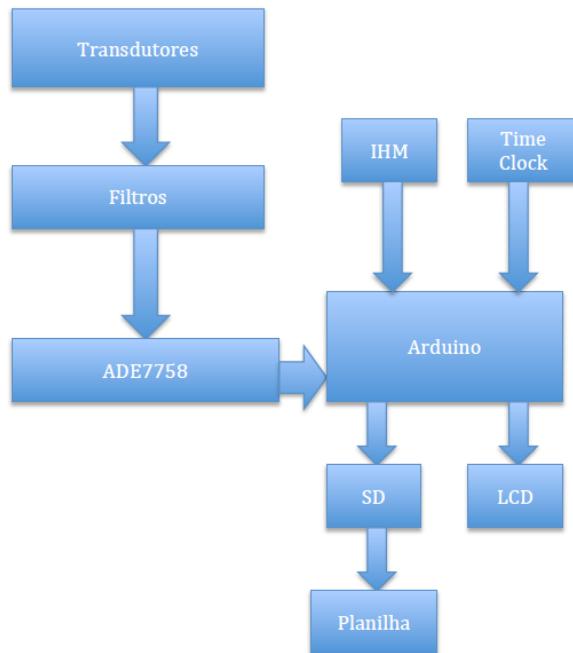
A Base de tempo é a fonte de referência para data e horário, ela pode ser primária, que é utilizada pelo medidor quando este se encontra energizado. Ou secundária, que é utilizada pelo medidor quando este não se encontra energizado.

### 3 DESCRIÇÃO DO PROJETO E INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA UTILIZADA PARA O DESENVOLVIMENTO DO MEDIDOR

O projeto consiste em construir um medidor de energia trifásico, devendo para isso registrar as quantidades de energias ativas, reativa e aparente em determinados intervalos de tempo. Cabe ressaltar que com o circuito integrado de medição empregado no projeto, é possível realizar o registro também de outras variáveis, como tensão e corrente, afundamento de tensão (*voltage sag*), frequência e temperatura. Contudo, no protótipo do medidor desenvolvido são registrados os valores apenas das energias ativa, reativa e aparente, tensão rms e corrente rms das três fases, integralizando as medições de cinco em cinco minutos. Outras formas de medição, como por exemplo, as medições para calibração, são utilizadas para testes no protótipo, conforme apresentado adiante neste trabalho.

No presente capítulo descreve-se os principais componentes ou módulos utilizados para o desenvolvimento do medidor multifunção. O diagrama dos macrocomponentes do medidor é mostrado na Figura 3.1 e cada bloco presente nesta figura é descrito a seguir.

Figura 3.1 – Diagrama de blocos do medidor.



Fonte: Autoria própria.

### 3.1 Descrição dos componentes eletrônicos empregados

Um projeto em eletrônica consiste na junção ordenada e proposital de diferentes componentes eletrônicos, esta seção visa demostrar quais foram utilizados.

#### 3.1.1 Plataforma Arduino

O Arduino é uma plataforma eletrônica de desenvolvimento de código aberto, tanto para o *software* quanto para o *hardware*. As placas Arduino possuem portas de entrada e saída, tanto digitais quanto analógicas, além da possibilidade de usar algumas dessas saídas com modulação PWM, como também as entradas para comandos de interrupção e realização de comunicação serial SPI (*Serial Peripheral Interface*) e I<sup>2</sup>C (*Inter-Integrated Circuit*).

A Figura 3.2 apresenta uma fotografia da placa de um Arduino UNO, um dos modelos de Arduino mais utilizados devido à sua versatilidade e boa capacidade de processamento.

Figura 3.2 – Placa Arduino UNO.



Fonte: [20].

A placa possui suporte e segurança para o desenvolvimento de protótipos, pois permite a conexão via USB a computadores com os sistemas operacionais mais

populares (Mac OS, Windows e Linux). Um mecanismo de segurança importante oferecido pela placa é capacidade de proteção contra curto-círcito da porta USB do computador que estiver conectado, muito útil para o dia a dia do desenvolvimento de um protótipo. A placa pode inclusive servir de fonte de tensão de 5 V e 3,3 V, facilitando mais ainda a prototipagem, desde que respeitado seu limite de corrente.

Com todos estes recursos, muitos módulos e bibliotecas foram e ainda são desenvolvidos para funcionar juntos com o Arduino, possibilitando a existência de uma grande variedade de projetos com Arduino. O desenvolvimento dos módulos tem por objetivo confeccionar um *hardware* que possua o mínimo possível de pinos de entrada/saída. Normalmente, consistindo na integração de um determinado CI ou sensor compatível aos níveis de tensão, corrente, frequência e dimensão física utilizados pelo Arduino. Dentro dessa ótica, o próprio Arduino poderia ser considerado um módulo, uma espécie de “módulo central”. Pois ele integra em uma estrutura física alguns CI's e periféricos (*hardware*) e possui uma IDE (*Integrated Development Environment*) própria (*software*).

O principal CI utilizado no caso do Arduino UNO é o microcontrolador Atmega328p da fabricante ATMEL. É um microcontrolador de alto desempenho baseado em arquitetura RISC que combina 32 kB de memória *flash* com a capacidade de leitura e escrita simultâneas. Possui 1 kB de EEPROM, 2 kB de memória RAM e 23 pinos que podem ser utilizados como I/O. Em um único ciclo de *clock* o dispositivo pode executar várias instruções, atingindo uma taxa de transferência próxima de 1 (um) MIPS/MHz (Milhões de Instruções por Segundo por Megahertz), equilibrando o consumo de energia e a velocidade de processamento [20].

A tradução destes valores em capacidade de execução das tarefas necessárias ao funcionamento do protótipo ainda possui alguns pontos subjetivos, não há como saber exatamente o quanto de memória será necessária para executar todas as funções do protótipo, ou seja, não há uma fórmula que se possa usar para chegar a um valor numérico exato. Até mesmo grandes empresas ainda utilizam o método de tentativa e erro na elaboração de seus sistemas embarcados, mas obviamente há formas de estimar e escolher um controlador que se aproxime do necessário, escolha essa que é influenciada pelo custo do microcontrolador, pois

normalmente é um ponto determinante no sucesso do produto final, assim como a seleção adequada do número de entradas e saídas, velocidade e tipo de comunicação.

### **3.1.2 Circuito Integrado ADE7758 para Medição de Energia Elétrica**

O ADE7758 é um circuito integrado de medição de energia elétrica de alta precisão, com a capacidade de medição em circuitos trifásicos a três ou quatro fios. O CI possui embarcado integrador digital, sensor de temperatura e circuito de referência de tensão, dispensando vários componentes externos para estes fins. O CI tem a capacidade de medição de frequência, temperatura, tensão e corrente de pico, energias ativa, reativa e aparente, além de cálculo de valores RMS de tensão e corrente. A Tabela 3.1 apresenta as principais especificações técnicas do circuito integrado.

Tabela 3.1 – Algumas especificações técnicas do CI ADE7758.

Parâmetro	Especificação	Unidade	Condições de Teste/ Comentários
Exatidão			
Erro medição para energia ativa (por fase)	0,1	%	Sob um <i>range</i> de 1000 para 1.
Erro de medição de corrente RMS	0,5	%	Sob um <i>range</i> de 500 para 1.
Erro de medição de tensão RMS	0,5	%	Sob um <i>range</i> de 20 para 1.
Entradas Analógicas			
Nível máximo de entrada	$\pm 500$	mV	Verificar seção de entrada diferencial
Frequência de entrada do <i>clock</i>			
Frequência máxima	15	MHz	Frequência de referência 10 MHz
Frequência mínima	5	MHz	Frequência de referência 10 MHz
Entrada de comunicação SPI			
Nível lógico alto	2,4	V min	DVDD = 5V $\pm 5\%$
Nível lógico baixo	0,8	V max	DVDD = 5V $\pm 5\%$
Saídas lógicas			
Nível lógico alto	4	V min	I <sub>fonte</sub> = 5 mA
Nível lógico baixo	0,4	V max	I <sub>sink</sub> = 1 mA
Alimentação			
AVDD	4,75	V min	5 V – 5%
AVDD	5,25	V max	5 V + 5%
DVDD	4,75	V min	5 V – 5%
DVDD	5,25	V max	5 V + 5%
AI <sub>DD</sub>	8	mA max	Tipicamente 5 mA
DI <sub>DD</sub>	13	mA max	Tipicamente 5 mA

Fonte: [21].

O CI possui duas saídas para pulsos, uma para energia ativa, outra para reativa ou aparente, utilizados para a finalidade detalhada na seção 2.8.

Apesar do ADE7758 possuir muitos recursos embarcados, ainda há a necessidade de filtros e transdutores para inserir os sinais da medição no CI. Estes componentes são detalhados no circuito de teste apresentado na folha de dados do CI [21], onde pode-se verificar dois esquemas, um para o uso de transformadores de corrente e outro para o uso de transdutores de corrente do tipo  $di/dt$  (por exemplo,

bobina de Rogowski). Para a obtenção do sinal de tensão, pode-se utilizar um simples divisor resistivo, conforme esquema mostrado na Figura 2.4.

### 3.2 Barramento SPI

A comunicação para fins de configuração e operação do CI é realizada por meio do protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*), esta forma de comunicação utiliza três condutores e mais um para cada escravo, com uma taxa de transferência máxima na ordem de 2 Mbps, sendo compatível com a plataforma Arduino, utilizando-se a biblioteca chamada de SPI.h para tal. Os pinos deste tipo de comunicação são chamados de MOSI (*Master Out Slave In*), MISO (*Master In Slave Out*), SCK (*clock*) e SS (*Slave Select*). A Tabela 3.2 apresenta a relação entre os pinos do protocolo SPI para a plataforma Arduino UNO e o CI ADE7758.

Tabela – 3.2 Descrição dos pinos do protocolo SPI.

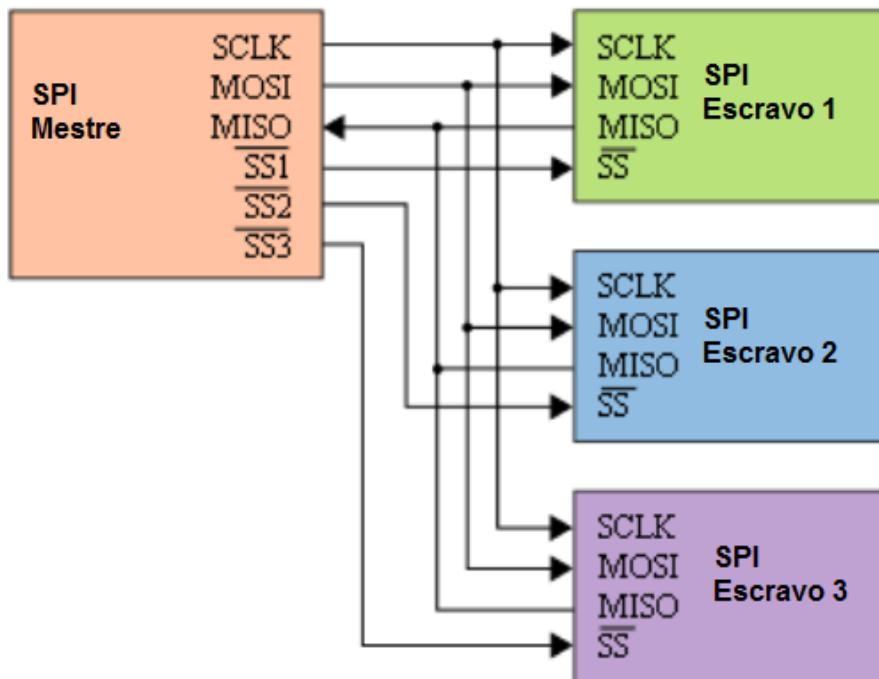
Pino	Significado	Nome Arduino (Pino)	Nome ADE7758 (Pino)
Master Out Slave In	Do mestre para o escravo	MOSI(11)	DIN(22)
Master In Slave Out	Do escravo para o mestre	MISO(12)	DOUT(24)
Clock	Clock	SCK(13)	SCLK(23)
Slave Select	Seleção de escravo	SS(*)	CS(21)

\* Por escolha do projetista.

Fonte: Autoria própria.

O CI ADE7758 se coloca na posição de escravo, nota-se isto pelo nome do pino 22 DIN (*data input*), por exemplo, pois ele se conecta ao pino 11 do Arduino UNO, denominado aqui de MOSI(11). O pino de seleção de escravo no Arduino pode ser escolhido pelo projetista, visto que o Arduino se comporta normalmente como mestre, então pode ser escolhido mais de um SS. A Figura 3.3 ilustra como se dá a ligação de um mestre com mais de um escravo.

Figura 3.3 – Comunicação pelo protocolo SPI com vários escravos.



Fonte: [22], alterado pelo autor.

No item 3.4.2 trata-se com detalhes mais específicos sobre como foi utilizada esta forma de comunicação para integrar os escravos ao mestre, ou seja, a comunicação entre o sistema que produz os dados e o sistema que armazena os dados.

### 3.3 Operação

A operação e configuração do CI ADE7758 se fundamenta na leitura e escrita de seus registradores. Ao todo ele possui 74 registradores, dentre estes 24 são somente leitura (R) e os outros são de escrita e leitura (R/W). No presente trabalho, o nome do registrador é escrito junto com seu endereço em hexadecimal, baseando-se na Tabela 17 da folha de dados do CI [21], para melhor localização durante o projeto e desenvolvimento do programa. Os registradores de somente leitura são preenchidos com os valores medidos, com exceção do registrador VERSION (0x7F),

que possui apenas o valor da versão do CI; dos registradores Status e RSTATUS (0x19 e 0x1A, respectivamente), que são sinais de interrupção; e do registrador CHEKSUM (0x7E) que é a somatória de todos os valores lidos, utilizado para checagem dos valores recebidos.

Os registradores de leitura e escrita são utilizados para fins de configuração e calibração, que são detalhados da Tabela 18 até a Tabela 22 da folha de dados [21].

Os valores de tensão e corrente RMS que são escritos nos registradores XVRMS (0x0D a 0x0F) e XIRMS (0x0A a 0x0C), respectivamente, são provenientes de uma série de processos de conversões e cálculos. Ressalta-se que a letra inicial “X” maiúscula refere-se ao longo deste trabalho como a fase A, B ou C. Estes processos são detalhados a seguir:

- a. Os sinais analógicos oriundos dos transdutores de corrente e dos divisores de tensão são aplicados aos PGA's (*Programmable-gain amplifier*). Estes PGA's podem ter seus ganhos programados via a escrita no registrador *Gain* (0x23), para ter o sinal ampliado em 1, 2 ou 4 vezes. O uso deste PGA influí na sensibilidade do medidor para pequenos valores, muito importante para quando se deseja medir valores no começo da escala de medição. Esta alteração na sensibilidade só pode ser realizada nesta etapa de amplificação, nas outras etapas digitais não ocorre o mesmo efeito para pequenos valores, pois o efeito de amplificação digital não possui a mesma linearidade nesta faixa de valores.
- b. Em seguida, o sinal ainda analógico é aplicado a um conversor ADC. Neste ADC o sinal será convertido em palavras digitais que são uma representação digital do sinal analógico multiplicado pelo ganho do PGA. Um dos parâmetros necessários para a conversão é um valor analógico de referência, este sinal já é disponibilizado pelo próprio CI ADE7758 ou pode ser inserido externamente por questão de conveniência. O ADC utilizado pelo CI ADE7758 possui 24 bits de resolução [21].
- c. Esta etapa é particular do sinal de corrente e só é necessária caso se utilize um transdutor de corrente do tipo di/dt (como exemplo, uma bobina de Rogowski), pois o sinal oriundo dela não é uma representação da corrente e sim da derivada dessa corrente, ou seja, di/dt. Para obter uma representação da corrente de fato, os sinais,

já digitais, passam por um integrador, ou seja, executa uma operação de integral, tendo como produto a representação do sinal de corrente.

d. A partir desta etapa, os sinais de tensão e corrente seguem para o cálculo dos valores RMS. Para o cálculo, além dos sinais de entrada também são necessários valores de ganho e de *offset* que são modelados por uma equação do primeiro grau, onde o ganho seria o coeficiente angular e o *offset* o linear. Todos estes valores são utilizados para fins de calibração, tendo fórmulas e algoritmos descritos na folha de dados do fabricante [21] para encontrar quais valores deverão ser escritos nestes registradores, que são os de ganho de corrente XIGAIN (0x27 a 0x29), *offset* de corrente XIRMSOS (0x36 a 0x38), ganho de tensão XVRMSGAIN (0x24 a 0x26) e *offset* de tensão XVRMSOS (0x33 a 0x35).

Neste trabalho apresenta-se na seção 4.3 uma forma alternativa de se realizar a calibração. O tempo para o cálculo do valor RMS é de 960 ms ou de 1,68 s, caso se utilize o integrador para a corrente.

e. Por fim, o valor é escrito no registrador, que possui 24 bits e o primeiro corresponde ao sinal, 0 para valores positivos e 1 para negativos. O erro de medição é de 0,5% sob um ranger de 500:1 para a corrente e de 20:1 para a tensão [21].

O processo de cálculo das energias ativa, reativa e aparente ocorrem em paralelo com o de tensão e corrente, porém utilizam os sinais em diferentes etapas do processamento digital, ou seja, já após os ADC's, como descrito a seguir:

Para o cálculo da energia ativa e reativa, o sinal de tensão passa por uma etapa de compensação de fase, necessário para compensação de erros que podem ser inseridos ao longo do condicionamento do sinal, principalmente em transdutores de corrente, que podem facilmente apresentar um deslocamento de fase entre 0,1° e 0,3° [21]. Este ajuste é configurado pela registrador XPHCAL (0x3F a 0x41). Enquanto isso, o sinal de corrente é bifurcado, onde um segue direto para a próxima etapa do cálculo de energia ativa e o outro passa por uma etapa de descolamento angular de 90° para o cálculo da potência reativa.

Após estas etapas, ambos seguem para a multiplicação do sinal de tensão e corrente, resultando deste processo os valores de energia não calibrados. Após isto os sinais passam por um filtro passa-baixa (PLF2) e por etapas de calibração com

seus registradores de offset e ganho, sendo os de offset XWATTOS (0x39 a 0x3B) e ganho XWG (0x2A a 0x2C) para a energia ativa, e de offset XVAROS (0x3C a 0x3E) e de ganho XVARG (0x2D a 0x2F) para a energia reativa.

A energia aparente é calculada por um processo mais simples, baseada na Equação 2.6, ou seja, consiste no produto entre os valores RMS de tensão e corrente. Existe uma etapa adicional de calibração, que consiste em um ajuste de ganho via a configuração dos registradores XVAG (0x30 a 0x32).

Finalizada todas as etapas de cálculo, seguem para os registradores de acumulação, que são: XWATHR (0x01 a 0x03) para a energia ativa, XVARHR (0x04 a 0x06) para energia reativa e XVAHR (0x07 a 0x09) para a energia aparente, de onde podem ser lidos seguindo o processo descrito na seção 3.4.2.

Os valores de energia acumulada também podem ser utilizados por meio das saídas de pulsos, sendo APCF (pino 1) para energia ativa e VARCF (pino 17) para energia reativa ou aparente. É válido ressaltar que a saída pulsada neste caso não dará valores de cada fase, mas sim das três fases somadas e também a necessidade de se haver um circuito externo dedicado à leitura destes pulsos. A frequência dos pulsos em relação à quantidade de energia, ou seja, a relação energia/pulso, também possuem sua etapa de calibração, dadas pela configuração dos registradores WDIV (0x42) para energia ativa, VARDIV (0x43) para energia reativa e VADIV (0x44) para energia aparente.

### **3.4 Descrição dos sistemas de armazenamento e comunicação dos dados**

Ao final do processamento dos dados pelo CI, eles são armazenados nos registradores do próprio CI, devendo estes serem lidos pelo Arduino, a fim de não perderem esta informação, perda essa que pode tanto se originar pela perda do instante certo da leitura quanto por *overflow*, para o caso dos registradores acumuladores. Sendo assim, o armazenamento destes dados é parte fundamental para o perfeito funcionamento do medidor como um todo.

Neste contexto, a comunicação entre o CI, o mestre (Arduino) e o registro em memória de massa se destacam como crucial para possibilitar este armazenamento.

### 3.4.1 Sistema de Armazenamento de Dados

Para o armazenamento dos dados utilizou-se um módulo Arduino para acoplar um cartão SD. O módulo realiza a comunicação via protocolo SPI e utiliza os mesmos pinos para a comunicação que o CI ADE7758 usa, exceto o SS (seleção de escravo). A biblioteca utilizada é chamada de SD.h e devem ser tomados alguns cuidados para utilizar esta biblioteca junto com o outro dispositivo que também se comunique via SPI, que é o caso deste projeto.

Para a comunicação com o Arduino é necessário diminuir o nível de tensão utilizado na comunicação SPI, visto que o Arduino opera com 5 V e o cartão SD 3,3 V. Para isso, os pinos de comunicação MOSI, SCK e SS devem ter seus potenciais diminuídos. A forma que foi utilizada para realizar esta diminuição foi via divisores de tensão resistivo, composto por dois resistores de 1 kΩ e 2 kΩ, mostrado na Figura 4.6. O pino MISO se conecta diretamente e possibilita a comunicação reversa, ou seja, que dados sejam lidos do cartão SD pelo Arduino, .

A programação da comunicação com o cartão SD se dá pelo uso da biblioteca SD.h e de algumas funções. Como exemplo, no código-fonte 3.1 lista-se um trecho do código implementado para gravação dos dados no cartão SD, denominando-se de função “gravar”. O cartão SD empregado possui capacidade de 4 GB.

### Código-fonte 3.1 – Gravação de dados no cartão SD.

```

void gravar (String dataString) // dataString é o dado que será gravado
{ SD.begin(sd); // sd é o pino usado para o SS, ex: sd=10.
  File dataFile = SD.open("MEDICOES.TXT", FILE_WRITE); // Abre o arquivo
  MEDICOES.TXT para gravação.
  if (dataFile) { // Se tiver sucesso na abertura, executar:
    dataFile.println(dataString); // Escreve o valor de dataString no cartão SD e
    incrementa uma linha.
    dataFile.close(); } // Fecha o arquivo
  else { Serial.print("Erro de gravação"); // Se não obtiver sucesso na abertura,
  envia mensagem de erro de gravação.
}

```

A confecção de *dataString* é composta por sucessões de concatenações com o dado a ser gravado e sinais gráficos de ponto e vírgula (;). O objetivo destes sinais é para o tratamento dos dados via planilha, por exemplo do MS Excel. Como a gravação é realizada em uma linha por vez, há a necessidade de um elemento separador para distinguir onde começa e onde termina a palavra. A concatenação é realizada pelo operador “+=”. A seguir, no código-fonte 3.2 há um trecho de como isto é feito.

### Código-fonte 3.2 – Confecção da palavra a ser gravada.

```

...
dataString += String(awatthr); dataString += ",";
dataString += String(bwatthr); dataString += ",";
...

```

Onde, *String(variável)* é uma função que transforma uma variável de qualquer tipo em uma variável tipo *String*, e *awatthr* e *bwatthr* são variáveis onde os valores foram obtidos dos registradores AWATTHR e BWATTHR.

Após a utilização da função *gravar* é necessária realizar uma reconfiguração dos parâmetros iniciais da comunicação SPI com o ADE7758, que são detalhados na seção seguinte.

### 3.4.2 Sistema de Comunicação

A comunicação entre o Arduino e o CI ADE7758 é realizada através de SPI como mencionado anteriormente. Para a programação desta comunicação são necessárias algumas configurações iniciais e o desenvolvimento de funções para a leitura e escrita.

Os dois primeiros passos são definir qual pino será o SS do CI ADE7758 e levá-lo ao nível lógico 1, pois desta forma se impede que a comunicação se habilite, como é descrito na folha de dados [21]. Outros passos estão relacionados com a forma de como a comunicação será realizada, pois a comunicação SPI permite a configuração em função das bordas de comunicação do *clock* através de sua polaridade e fase. Na prática, isto se refere ao momento em que o dado será transmitido e qual o seu nível de referência, se é em nível alto ou baixo. Desta forma, há quatro modos possíveis para a comunicação, descritos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Modos de comunicação do protocolo SPI.

Modo	Borda de troca	Nível de referência
0	Subida	Baixo
1	Descida	Baixo
2	Descida	Alto
3	Subida	Alto

Fonte: [22], com modificações.

A frequência do sinal de *clock* de comunicação também deve ser configurada. Ela é dada por um fator de divisão da frequência do sinal de *clock* do mestre, este fator é uma potência de 2, ou seja, pode assumir valores de 2, 4, 8, podendo chegar até 128. O último passo é definir a ordem em que os dados são enviados, ou seja, qual é o bit que é inicialmente transmitido, o mais significativo (MSB) ou o menos significativo (LSB). No código-fonte 3.3 estão estas configurações e passos citados.

### Código-fonte 3.3 – Configuração da Comunicação via Protocolo SPI.

```

pinMode(CS,OUTPUT); // Configura o pino CS como saída, este será o SS do
ADE7758.

digitalWrite(CS,HIGH); //Leva CS ao nível lógico 1 para não realizar comunicação.

SPI.begin();           // Inicia SPI

SPI.setDataMode(SPI_MODE1); // utilizado modo1

SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV16); // frequência de clock

SPI.setBitOrder(MSBFIRST); // ordem de envio

```

A escolha da ordem de envio ser pelo bit mais significativo está descrita na folha de dados [21], porém as outras configurações foram obtidas por tentativa e erro. Também verificou-se que o valor da frequência de *clock* até pode ser diferente, porém o modo deve ser o mode1.

Para realização da leitura e escrita dos registradores é necessária a elaboração de funções de leitura e escrita. A função leitura é a mais simples, pois só necessita de qual registrador se quer ler como dado de entrada, já a função escrita necessita do registrador e do dado que se quer escrever.

Um detalhe importante para a elaboração das funções de leitura e escrita é o sinal para comunicar ao CI ADE7758, se a operação é de escrita ou leitura, visto que ao ser iniciada a comunicação, não há diferenças notáveis entre escrita e leitura. Segundo a folha de dados [21], para realizar uma leitura, é necessário que a palavra em que consta o endereço do registrador tenha o seu bit mais significativo igual a “0” (zero) lógico, e para a escrita o “1” (um) lógico. Isto é simples de ser realizado, basta executar uma operação OR entre o código do registrador e o valor 0x80h (hexadecimal) para a escrita, desta forma, o endereço do registrador começará com o “1” (um) lógico. Nota-se que esta operação não alterará em nada o valor do endereço do registrador, visto que o valor do último registrador é 0x7Fh, que equivale ao número binário 0111 1111, ou seja, o bit mais significativo sempre será “0” (zero) lógico.

Outro ponto importante a ser destacado é a quantidade de bits dos registradores, pois para realizar a comunicação é utilizada a função chamada “SPI.transfer(dado)” da biblioteca “SPI.h”, que transfere apenas oito bits por vez, sendo assim, para registradores maiores que oito bits, há a necessidade de se repetir a operação. Na primeira ocorrência da função “SPI.transfer()” dever ser

escrito o endereço do registrador e para o caso de escrita, com o bit mais significativo igual ao “1” (um) lógico.

Para iniciar a comunicação, independente de ser escrita ou leitura, primeiramente o pino de seleção de escravo SS, CS neste caso, deve ser levado ao nível lógico “0” (zero). Posteriormente, para o caso da escrita, realiza-se a operação OR entre o endereço do registrador e o valor 0x80h.

A função denominada de “*escrita*” é uma função *void*, ou seja, não retorna valor e possui como valores de entrada o endereço do registrador e o valor a ser escrito. Para os registradores que possuem tamanho acima de 8 bits, há a necessidade de repetição da função “*SPI.transfer()*” e também de deslocamento dos bits que serão enviados para a composição da palavra final. Lista-se no código-fonte 3.4 um trecho do código da função “*escrita*”.

#### Código-fonte 3.4 – Função “*escrita*”.

```
void escrita (byte reg, uint32_t dado) { // reg=endereço do registrador
    uint8_t dadoa, dadob, dadoc;
    dadoa=((dado&0x00FF0000)>>16); //fragmentação e deslocamento do dado para
    enviar por partes
    dadob=((dado&0x0000FF00)>>8);
    dadoc=((dado&0x000000FF));
    ...
    //registradores de tamanho 16 bits
    else if (reg == 0x1B or reg == 0x1C or reg == 0x45 or reg == 0x47 )
    { digitalWrite(CS,LOW); //habilita a comunicação com o CI ADE7758
        SPI.transfer(reg || 0x80); // Insere o valor lógico “1” no bit mais significativo
        SPI.transfer(dadob); // Transfere a primeira parte do dado
        SPI.transfer(dadoc); // Transfere a segunda e última parte do dado
        digitalWrite(CS,HIGH); // desabilita a comunicação com o CI ADE7758
    }
```

O mesmo processo de fragmentação do dado ocorre para a função “*leitura*”, porém em sentido contrário, pois ocorre a composição do dado via a fragmentações dele. Lista-se no código-fonte 3.5 como é a programação da função “*leitura*” para um registrador com tamanho de 24 bits.

Código-fonte 3.5 – Função “leitura”.

```
uint32_t leitura (byte reg) {
    int32_t r1,r2,r3,r;
    r1=r2=r3=r=0x00; // zerar os valores
    ...
    else if (reg == 0x18 or reg == 0x19 or reg == 0x1A )
    { digitalWrite(CS,LOW);
        SPI.transfer(reg);
        r1=SPI.transfer(0x00); // o valor 0x00 não executa função, porém é necessário.
        r2=SPI.transfer(0x00);
        r3=SPI.transfer(0x00);
        digitalWrite(CS,HIGH);
        r=((r1<<16)+(r2<<8)+r3); } // composição do dado recebido
    return r
```

### 3.5 Periféricos

Periféricos são todos os componentes eletrônicos, eletromecânicos, ópticos, etc, que interagem enviando ou recebendo sinais dos elementos centrais do circuito. Nesta seção apresentam-se os periféricos empregados no desenvolvimento do protótipo de medidor eletrônico de energia elétrica.

#### 3.5.1 Transdutores

Os transdutores utilizados neste projeto se compõem basicamente por transformadores de corrente (TC) e divisores resistivos. O modelo de TC utilizado foi o SCT-013-000, do fabricante YHDC, que possui uma relação de transformação de 2000:1. O TC é dimensionado para 100 A de corrente no primário com 50 mA de corrente no secundário.

Na Figura 3.4 é mostrado o transdutor de corrente empregado e suas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 3.4.

Figura 3.4 – Transformador de corrente utilizado no projeto.



Fonte: [23].

Tabela 3.4 – Especificações técnicas do transdutor SCT-013-000.

Corrente de entrada	0-100A
Material do Núcleo	Ferrite
Dimensão da abertura	13 mm x 13 mm
Não linearidade	± 3 %

Fonte: [24], alterado pelo autor.

### 3.5.2 Filtros

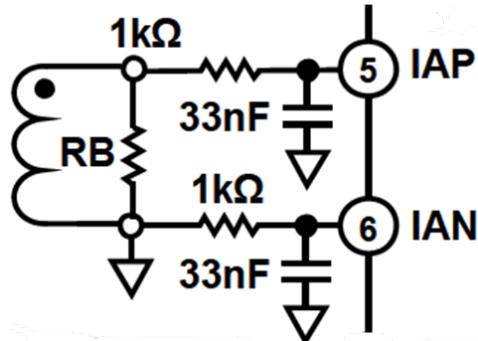
Os filtros utilizados são os que se recomendam para o circuito de teste descrito na folha de dados [21], eles são filtros RC passa-baixas de primeira ordem. A frequência de corte para esse caso é calculada pela Equação 3.1.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.1)$$

Onde  $R$  é o valor da resistência do resistor do filtro, dada em  $\Omega$  (ohm), e  $C$  a capacidade do filtro, dada em  $F$  (faraday).

O filtro utilizado no canal de corrente que está esquematizado na Figura 3.5 e possui frequência de corte de 4,82 kHz.

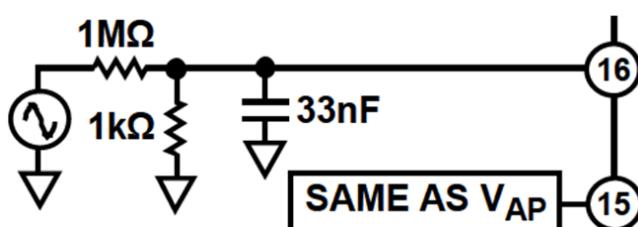
Figura 3.5 – Diagrama do filtro RC passa-baixa para entrada de corrente.



Fonte: [21], alterado pelo autor.

O circuito empregado para obtenção do sinal de tensão da rede elétrica pelo CI é apresentado na Figura 3.6. Para o cálculo da frequência de corte do filtro utilizado no canal de tensão, aplicou-se o teorema de Thévenin no circuito formado pela fonte de tensão e os resistores de  $1 M\Omega$  e  $1 k\Omega$ , obtendo-se um circuito equivalente de uma fonte de tensão, reduzida para cerca de  $9,99 \times 10^{-4}$  em relação ao valor nominal, em série com uma resistência de Thévenin de  $999 \Omega$ , que resultará em praticamente a mesma frequência de corte do canal de corrente.

Figura 3.6 – Diagrama filtro RC passa baixa para entrada de tensão.



Fonte: [21], alterado pelo autor.

Como estes filtros são o cerne do condicionamento dos sinais, ou seja, o sinal proveniente deles será o sinal medido, é de vital importância que os valores de suas resistências não variem muito, por isso é mandatório utilizar componentes de precisão. Para o projeto, utilizou-se resistores de precisão que possuem 5 ou 6

faixas de cores, onde as três primeiras se referem ao valor da resistência, a quarta é um fator multiplicador de base 10, a quinta é a tolerância, ou seja, a faixa que o valor poderá estar, e a sexta é a variação em função da temperatura, dada em ppm/°C, esta última não se aplica ao resistor de cinco faixas. Na figura 3.7 está a imagem de um resistor de 1 MΩ, o mesmo utilizado no divisor resistivo do medidor. Por exemplo, a penúltima listra marrom significa 1% de tolerância e a última listra vermelha significa 50 ppm/°C de variação do seu valor em relação a temperatura.

Figura 3.7 – Resistor de precisão de 1 MΩ, 1% de tolerância e 50ppm/°C.



Fonte: [25].

### 3.5.3 IHM – Interface Homem Máquina

A IHM é necessária para que haja a possibilidade de operação do medidor de energia. No caso deste projeto foi utilizado um conjunto com cinco botões, mostrado na Figura 3.8. O circuito possui apenas três pinos, sendo Vcc, GND e OUT, e funciona como um divisor de tensão, onde cada botão apresenta uma fração do valor de Vcc na saída OUT. A maior vantagem deste teclado é que ele utiliza apenas um pino analógico do Arduino.

Figura 3.8 – IHM de cinco botões.



Fonte: [26].

### 3.5.4 Time Clock

Para a função de gerar o horário da medição, foi utilizado como dispositivo o modulo DS3231. Tal dispositivo é baseado em um Relógio de Tempo Real (RTC) que se comunica via protocolo I2C. Ademais, possui excelente precisão ( $\pm 2$  ppm), oscilador de cristal integrado com compensação de temperatura, uma bateria de *backup*, sensor de temperatura, dois alarmes de tempo de dia programáveis, podendo operar tanto no formato 24 horas como 12 horas com indicação de AM/PM. Possui um pino de saída com sinal de frequência de 32,768 kHz para garantir maior precisão e tolera variações da tensão de alimentação de 2,3 V a 5,5 V [27], o módulo é mostrado de ambos os lados na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Vista do módulo RTC DS3231.



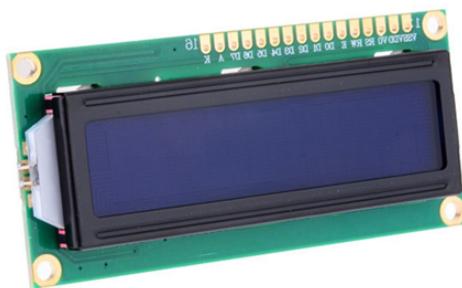
Fonte: [28].

A biblioteca utilizada para operar o RTC se chama Wire.h e a ligação do módulo é simples, utiliza apenas dois fios além da alimentação, que são: o terminal SCL ligado ao A5 da placa Arduino UNO e o terminal SDA ligado ao A4 da placa Arduino UNO.

### 3.5.5 Mostrador

Para a visualização dos dados, utilizou-se um mostrador LCD de 16 colunas e 2 linhas, que possui *backlight* (luz de fundo) azul e letras na cor branca. O mostrador possui conexão com 16 pinos, dos quais usa-se 12 para uma conexão básica, já incluindo as conexões de alimentação (pinos 1 e 2), *backlight* (pinos 15 e 16) e contraste (pino 3) [29]. A Figura 3.10 apresenta o mostrador empregado no projeto.

Figura 3.10 – Mostrador 16x2 utilizado no projeto.



Fonte: [29].

A forma de ligação para este tipo de LCD é facilmente encontrada em diversos sites da Internet sobre a plataforma Arduino, assim como exemplos de códigos para operá-lo, como em [29]. A biblioteca utilizada para operar o mostrador 16x2 é a LiquidCrystal.h.

### 3.6 Tratamento dos Dados no Computador

Nos dados gravados no cartão SD, seguindo o que foi descrito em 3.4.1, cada variável é gravada em uma única palavra, produto da concatenação de todos os valores lidos separados por um sinal de ponto e vírgula (;). Em programas como o MS Excel, esta palavra pode ser facilmente desmembrada com o uso de funções como a “texto para coluna”, com limite definido pelo caractere ponto e vírgula (;).

Conforme mencionado no início deste capítulo, no protótipo do medidor desenvolvido são medidas as energias ativa, reativa e aparente, tensão e corrente das três fases sob um intervalo de tempo de cinco minutos, ou seja, o tempo de

acumulação das energias é de cinco minutos. Para o registro de tempo, configurou-se a escrita de mês, dia, dia da semana, hora, minuto e segundo. A seguir lista-se um exemplo de três *strings* geradas e gravadas na memória de massa (cartão SD).

22;9;5;14:31:3;0.00;0.00;0.00;0.00;1.92;0.15;0.16;0.16;0.00;0.00;0.00;124.66;1  
23.85;123.69

22;9;5;14:32:2;0.00;0.00;0.00;0.38;0.77;0.14;0.16;0.14;0.00;0.00;0.00;124.86;1  
24.05;123.87

22;9;5;14:33:6;104.89;0.00;0.00;1.17;0.38;0.77;0.65;0.17;0.16;0.00;0.00;0.00;124.71  
;124.07;123.57

Sabendo o que o significa cada dado de cada posição, se torna fácil a interpretação e a posterior análise em tabelas. Os valores são respectivamente: dia, mês, dia da semana, horário (hora, minuto, segundo separados pelo sinal de dois pontos (:)), energia ativa fase A, energia ativa fase B, energia ativa fase C, energia reativa fase A, energia reativa fase B, energia reativa fase C, energia aparente fase A, energia aparente fase B, energia aparente fase C, Corrente rms fase A, Corrente rms fase B, Corrente rms fase C, Tensão rms fase A, Tensão rms fase B e Tensão rms fase C. Sabendo disto, montam-se tabelas para análise, como a Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Tabela para análise dos dados oriundos da memória de massa.

Dia	Mês	dia da semana	hora	WhA	WhB	WhC	VArhA
22	9	5	14:31:03	0.00	0.00	0.00	0.00
22	9	5	14:32:02	0.00	0.00	0.00	0.00
22	9	5	14:33:06	104.89	0.00	0.00	1.17

VArhB	VArhC	VAhA	VAhB	VAhC	Ia	Ib	Ic	Va	Vb	Vc
0.00	1.92	0.15	0.16	0.16	0.00	0.00	0.00	124.66	123.85	123.69
0.38	0.77	0.14	0.16	0.14	0.00	0.00	0.00	124.86	124.05	123.87
0.38	0.77	0.65	0.17	0.16	0.00	0.00	0.00	124.71	124.07	123.57

Fonte: Autoria própria. Tabela dividida por questões de formatação.

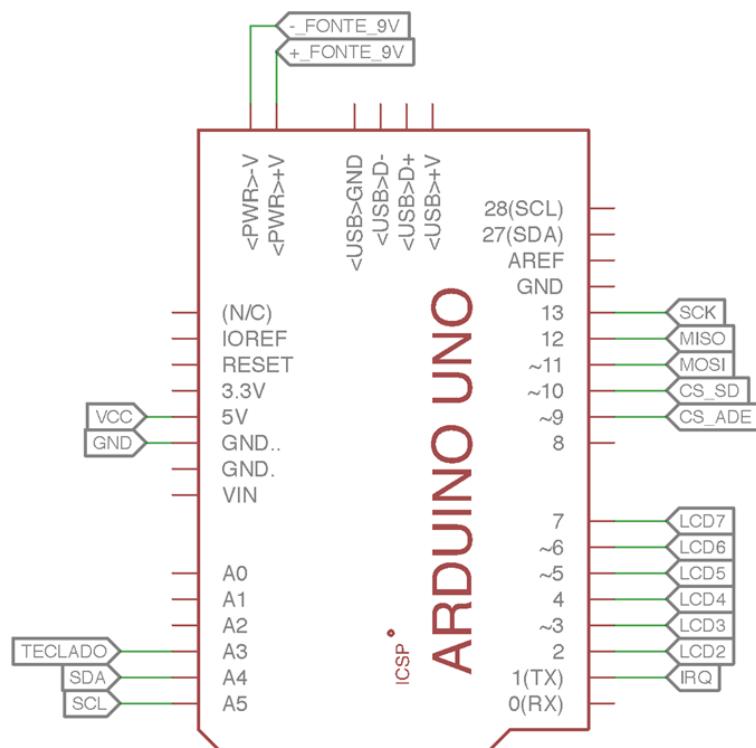
## 4 MONTAGEM E ENSAIOS NO MEDIDOR

Após o projeto e escolha dos componentes, segue a etapa de montagem física do medidor, onde se destaca a confecção da placa de circuito impresso e a soldagem dos componentes, entre outras etapas. Denomina-se, a partir deste ponto, de módulo ADE7758 a placa eletrônica que contém o CI ADE7758 e os circuitos de condicionamento de sinais. Esta seção detalha as conexões entre os demais módulos e as conexões internas do módulo ADE7758.

### 4.1 Conexão dos módulos

O Arduino é o centro de todo o circuito, nele se encontra o microcontrolador com toda a programação, a fonte de alimentação (“Vcc”) e o potencial de referência (“GND”) de todos os outros módulos. A Figura 4.1 apresenta um desenho esquemático do Arduino UNO, com destaque para os terminais utilizados da placa.

Figura 4.1 – Terminais utilizados na placa Arduino UNO.



Fonte: [30], alterado pelo autor.

Os módulos são projetados para terem conexões simples, para facilitar a prototipagem, por exemplo, o módulo teclado possui apenas uma saída, que no esquemático é denominada por TECLADO, como se verifica na Figura 4.1 e detalhado anteriormente na subseção 3.5.3. O módulo TIMER (DS3231) possui dois pinos de conexão, SDA e SCL, eles precisam necessariamente se conectar aos pinos A4 e A5, respectivamente, do Arduino UNO, detalhado anteriormente na subseção 3.5.4. O módulo LCD possui seis pinos de conexão descritas na Tabela 4.1 e detalhadas por sua vez em 3.5.5 e na referência [29].

Tabela 4.1– Conexões do display LCD.

Pino	Nome	Ligaçāo
1	Vss	GND
2	Vdd	Vcc
3	V0	Resistor 2 kΩ para GND
4	RS	Pino 7 do Arduino
5	RW	GND
6	E	Pino 6 do Arduino
7	D0	Não conectado
8	D1	Não conectado
9	D2	Não conectado
10	D3	Não conectado
11	D4	Pino 5 do Arduino
12	D5	Pino 4 do Arduino
13	D6	Pino 3 do Arduino
14	D7	Pino 2 do Arduino
15	A	Vcc
16	K	GND

Fonte: [29], alterado pelo autor.

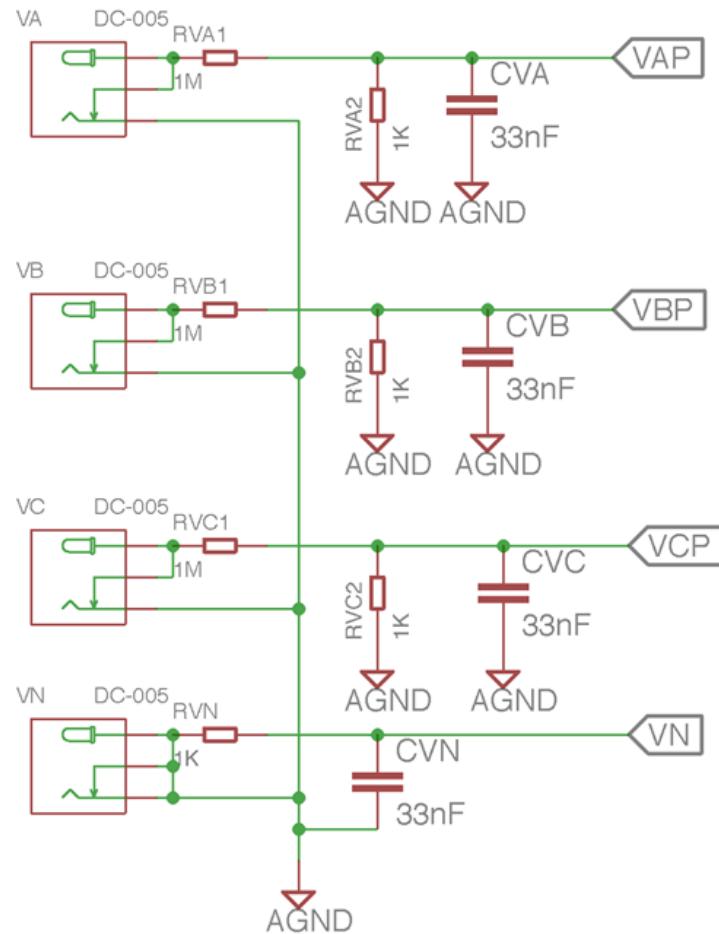
Os pinos A e K são de alimentação dos leds de iluminação, porém não precisam seguir esta ligação, pois pode ser interessante inserir algum circuito para controle de iluminação do mostrador.

## 4.2 Módulo ADE7758

O módulo do ADE7758 foi baseado no circuito de teste presente na folha de dados do fabricante do CI [21], porém não possui unicamente este circuito, também há nele o divisor de tensão para comunicação com o cartão SD, além do soquete

para conexão do módulo SD. As conexões são mostradas da Figura 4.2 até a Figura 4.7.

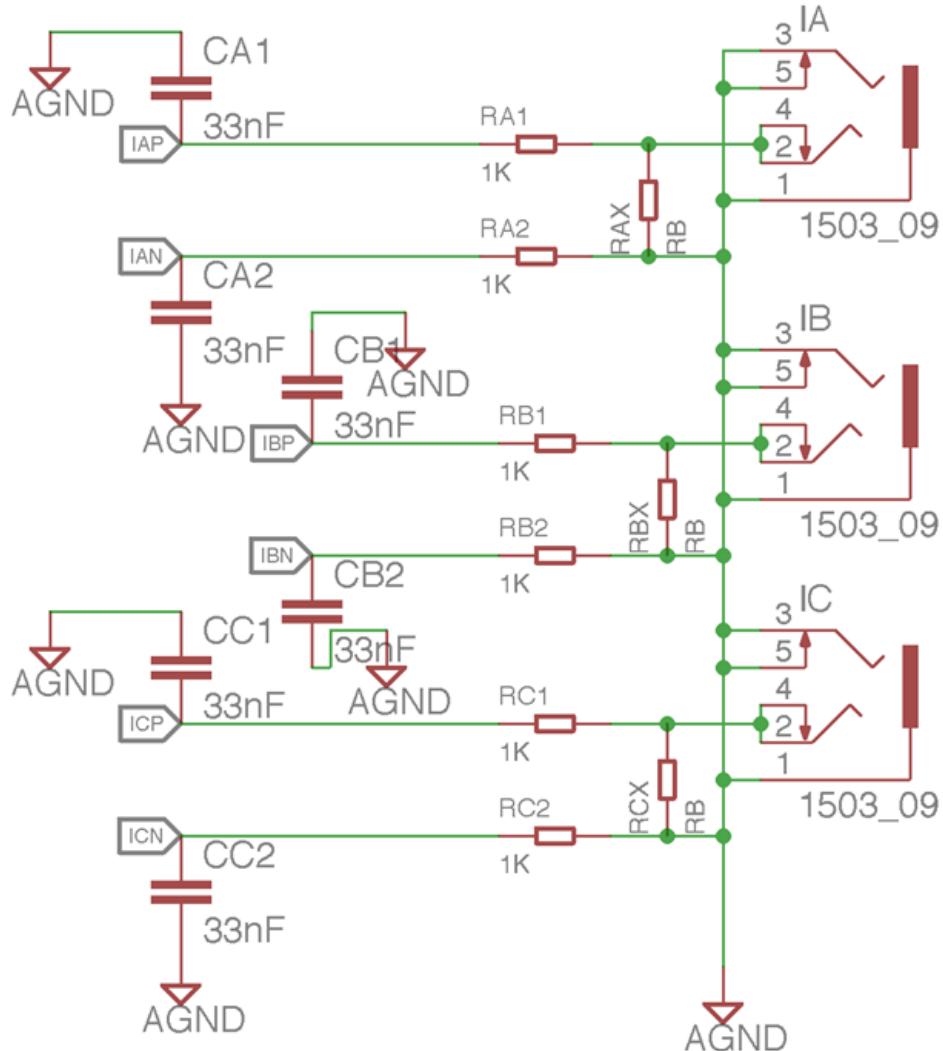
Figura 4.2 – Esquemático do circuito de entrada do sinal de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Onde VAP, VBP, VCP e VN são terminais do CI ADE7758, identificados respectivamente pelas portas 16, 15, 14 e 13.

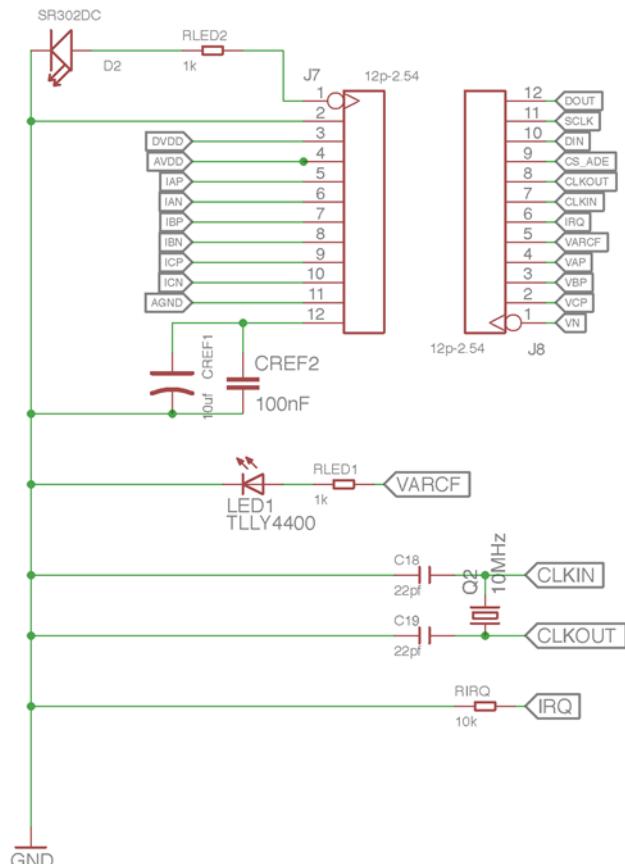
Figura 4.3 – Esquemático do circuito de entrada do sinal de corrente.



Fonte: Autoria própria.

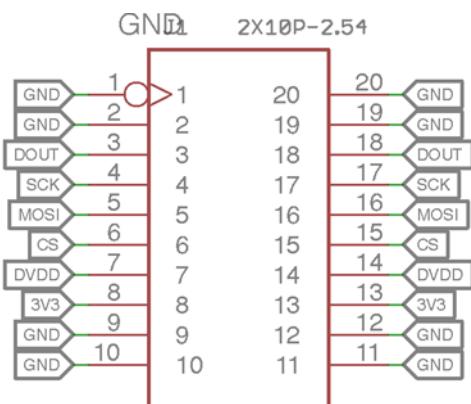
Onde IAP, IAN, IBP, IBN, ICP, ICN e AGND são terminais do CI ADE7758 identificados, respectivamente, pelas portas 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11.

Figura 4.4 – Esquemático das ligações do CI ADE7758.



Fonte: Autoria própria.

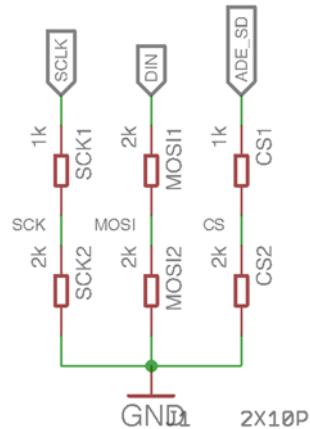
Figura 4.5 – Esquemático com as ligações do soquete do módulo SD.



Fonte: Autoria própria.

O módulo SD utilizado possui pinos redundantes, por isso seu soquete é duplo, mas pode-se reparar que o mesmo terminal de um lado é igual ao do outro lado.

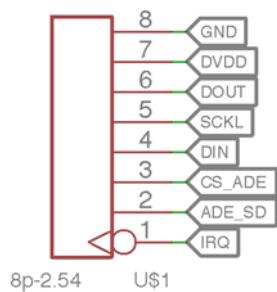
Figura 4.6 – Esquemático do divisor de tensão utilizado pelo módulo SD.



Fonte: Autoria própria.

Onde SCLK, DIN e ADE\_SD são os mesmos terminais mostrados na Figura 4.1 onde se encontra o esquemático do Arduino UNO e os terminais SCK, MOSI e CD são os mesmos mostrados na Figura 4.7, que exibe o soquete que liga o Arduino UNO ao módulo ADE7758.

Figura 4.7 - Conexões de entrada/saída do módulo ADE7758 com o Arduino UNO.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.8 apresenta o leiaute da placa de circuito impresso, para o desenvolvimento do projeto, foi utilizado o *software Eagle*, que é um dos softwares para projeto de placas de circuito impresso mais conhecidos e utilizados atualmente. O EAGLE abrange todas as etapas do ciclo de desenvolvimento de uma placa de

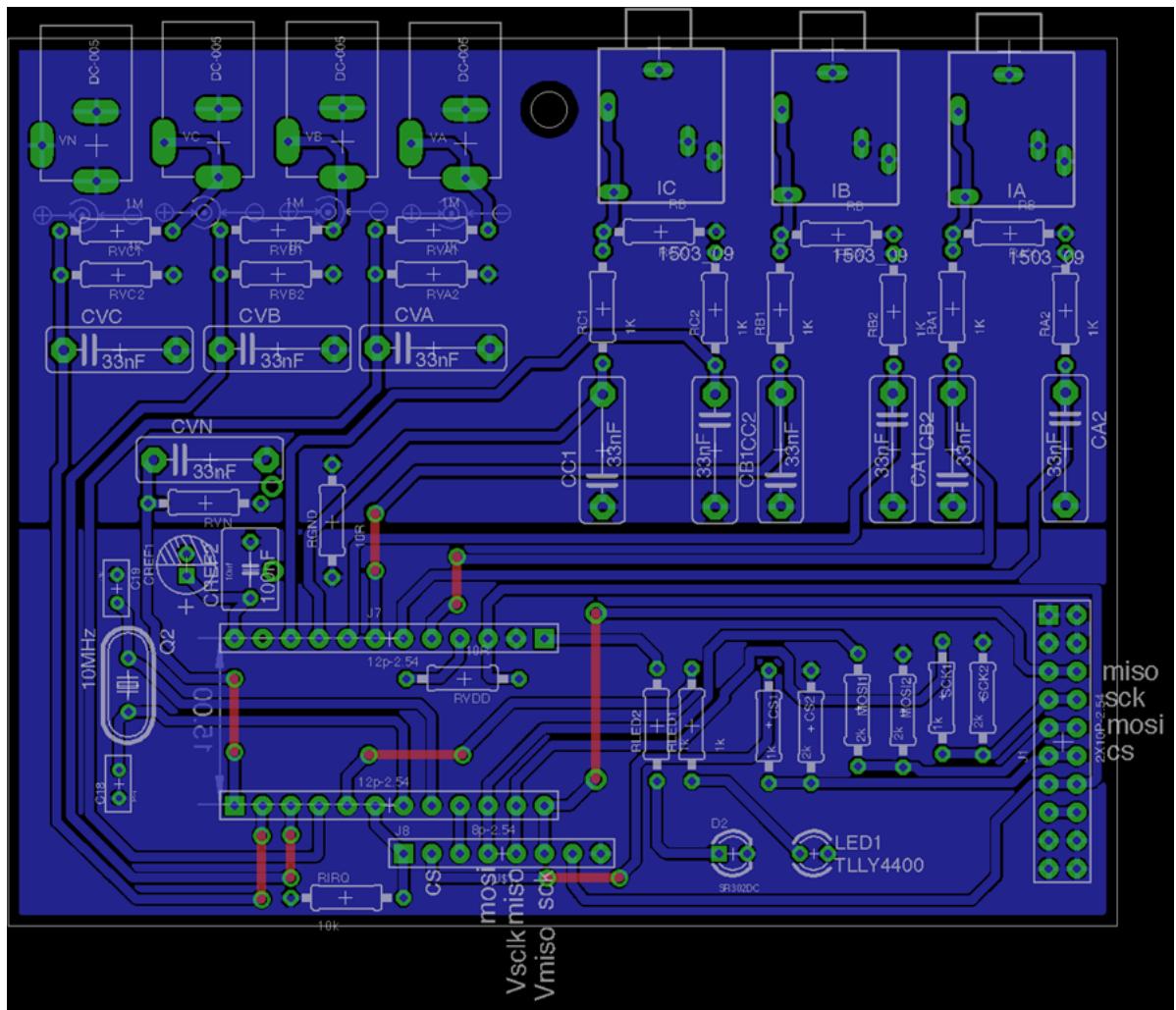
circuito impresso, desde o esquemático até a geração dos arquivos para fabricação da placa, neste projeto foi gerado um arquivo PDF com o desenho da placa. O software possui também uma vasta biblioteca de componentes prontos, além de permitir que o usuário crie novos componentes ou altere os componentes existentes [31].

A confecção física da placa de circuito impresso foi feita utilizando técnica de simples confecção, ou seja, sem o uso de grandes equipamentos profissionais dedicados à confecção de placas. Os materiais adquiridos em loja de eletrônica foram: o líquido de corrosão da placa, percloro de ferro, caneta marca trilhas, furador de placas, além de solda e ferro de solda. A técnica utilizada foi a mesma detalhada na referência [32].

De forma resumida, o layout da placa, mostrado na Figura 4.8, é desenhado sobre uma camada de cobre usando uma substância resistente à corrosão. Isto pode ser feito com uma imagem impressa por impressão de impressora a laser e com uma caneta marca trilha para reparar as imperfeições, desta forma, imprime-se na placa o desenho do que deve ser preservado no processo de corrosão. A placa, já com a máscara (imagem) aplicada, é mergulhada então em um banho de percloro de ferro que irá corroer o cobre não protegido e deixar apenas as áreas cobertas. As áreas protegidas não são afetadas, formando as trilhas necessárias na placa. Depois remove-se a camada de proteção que ficou sobre o cobre, lava-se [32] e fura-se com o furador de placas.

Após todo o processo de confecção, realiza-se a soldagem dos componentes e o teste de conexões. Tal teste consiste em verificar a continuidade das conexões com o uso de um multímetro na função teste de continuidade. Em seguida, conecta-se o módulo ADE7758 ao Arduino UNO, encaixando-se todos os periféricos e o cartão SD. Como teste final da montagem do circuito, liga-se o medidor e verifica-se no mostrador de LCD o processo de inicialização do medidor e os valores dos parâmetros medidos, bem como se os valores estão sendo gravados no cartão SD.

Figura 4.8 – Placa de circuito impresso do módulo CI ADE7758.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.9 mostra-se a caixa confeccionada para montagem do medidor e para a realização das conexões com os TC's e pontas de prova de tensão.

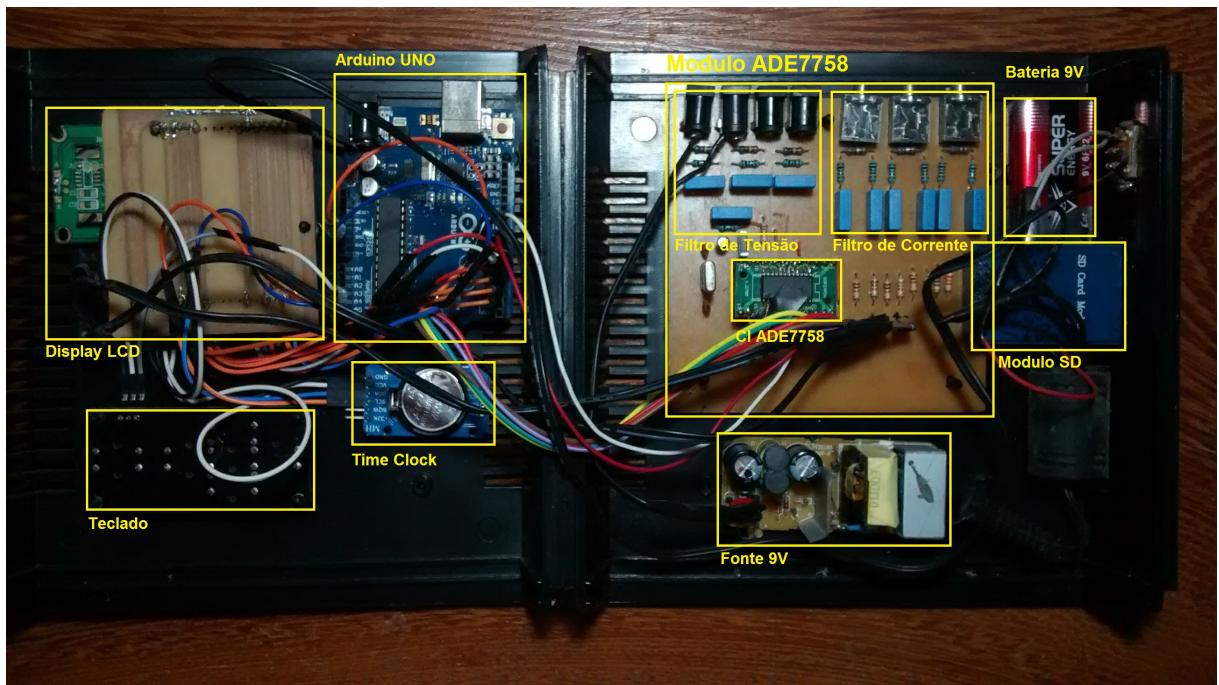
Figura 4.9 – Visão exterior do medidor montado.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.10 apresenta-se uma fotografia da parte interna do medidor contendo os módulos, a placa Arduino UNO, a fonte de alimentação de 9 V, a bateria de 9 V de reserva e as conexões realizadas.

Figura 4.10 – Visão interna do medidor.



Fonte: Autoria própria.

### 4.3 Processo de calibração

A calibração de um instrumento de medição é uma etapa fundamental para a sua operação, pois é por este processo que se realiza a relação numérica entre o sinal medido ao valor real da grandeza medida. No caso de um medidor que utiliza o CI ADE7758, por se tratar de um medidor digital, o sinal medido é uma palavra binária, e a relação entre os valores pode ser dada apenas por um fator multiplicador.

Para a calibração de tensão, corrente e energias, foi utilizado como medidor de referência um analisador de qualidade de energia FLUKE 434, com exatidão na medição de tensão, corrente e energia de 0,5%, 1% e 1,5%, respectivamente [33].

#### 4.3.1 Calibração dos Canais de Tensão e Corrente

Estes canais são os mais simples a serem calibrados, por se tratarem de valores que podem ser medidos instantaneamente e são independentes de outros sinais. No desenvolvimento deste protótipo foram utilizados os registradores de

*offset* do ADE7758 para a retirada de níveis de *offset* presentes na medição, porém não foram usados os registradores de ganho, esta função ficou a cargo do processamento do próprio Arduino UNO. Lembrando que o *offset* é definido como o coeficiente linear de uma equação do primeiro grau.

A calibração do valor de *offset* é simples, pois não necessita de medidores de referência. No caso da tensão, curto circuita-se os contatos e se lê qual é a palavra em hexadecimal que se encontra nos registradores de tensão xVRMS (0x0D a 0x0F), e no caso da corrente, não se insere nenhum condutor dentro da janela dos TC's e se lê a palavra, em seguida, troca-se o primeiro bit desta palavra, tornando assim o seu valor negativo. Por exemplo, se o valor lido for *75Eh*, que é equivalente a *0111 0101 1110* em binário. A palavra a ser escrita no registrador de *offset* correspondente a este registrador de tensão será *F5Eh*, ou em binário *1111 0101 1110*.

A calibração do ganho deve ser feita utilizando algum medidor de referência para realizar a comparação dos valores. O processo consiste em realizar leituras simultâneas entre o medidor de referência e os registradores, medindo vários pontos dentro da faixa de medição. Após isto, calcula-se a razão entre o valor do registrador e o valor medido. Esta razão será a constante que multiplicará o valor lido do CI ADE7758 e se traduzirá no valor da variável propriamente dita. No fragmento de código-fonte 4.1 pode-se observar como isto é feito na programação.

Código-fonte 4.1 – Leitura e produto entre valor lido e constante.

```
...
airms=KCa*leitura(AIRMS);
...
```

Onde, KCa é a constante para a corrente da fase A. Na Tabela 4.2 é mostrado o resultado do processo de calibração para a corrente da fase A. A primeira coluna da tabela é a corrente utilizada nos testes, medida pelo medidor de referência; na segunda coluna é a palavra em decimal lida do registrador AIRMS (0x0A); a terceira coluna é composta pelo valor de qual seria a constante de multiplicação para o ponto; a quarta coluna é composta pelo desvio em relação à média de todas as constantes (última linha da terceira coluna), sendo utilizada para seu cálculo a Equação 4.1.

$$Desvio(%) = \frac{Kca - Média}{Média} \times 100 \quad (4.1)$$

Tabela 4.2 – Resultado das leituras para calibração.

Referência (A)	AIRMS	Kca	Desvio
0,91	18870	0,0000482246952835	3,05%
1,97	41900	0,0000470167064439	0,47%
2,99	63789	0,0000468732853627	0,16%
3,99	85000	0,0000469411764706	0,30%
5	106540	0,0000469307302422	0,28%
6,91	147300	0,0000469110658520	0,24%
10,13	215800	0,0000469416126043	0,31%
12,02	257300	0,0000467158958414	-0,18%
15,27	327000	0,0000466972477064	-0,22%
17	365200	0,0000465498357065	-0,53%
19,85	427300	0,0000464544816288	-0,74%
25	539000	0,0000463821892393	-0,89%
29,97	649100	0,0000461716222462	-1,34%
40	857100	0,0000466690001167	-0,28%
50	1067000	0,0000468603561387	0,13%
60	1292000	0,0000464396284830	-0,77%
Média:		0,0000467987205854	0,00%

Fonte: Autoria própria.

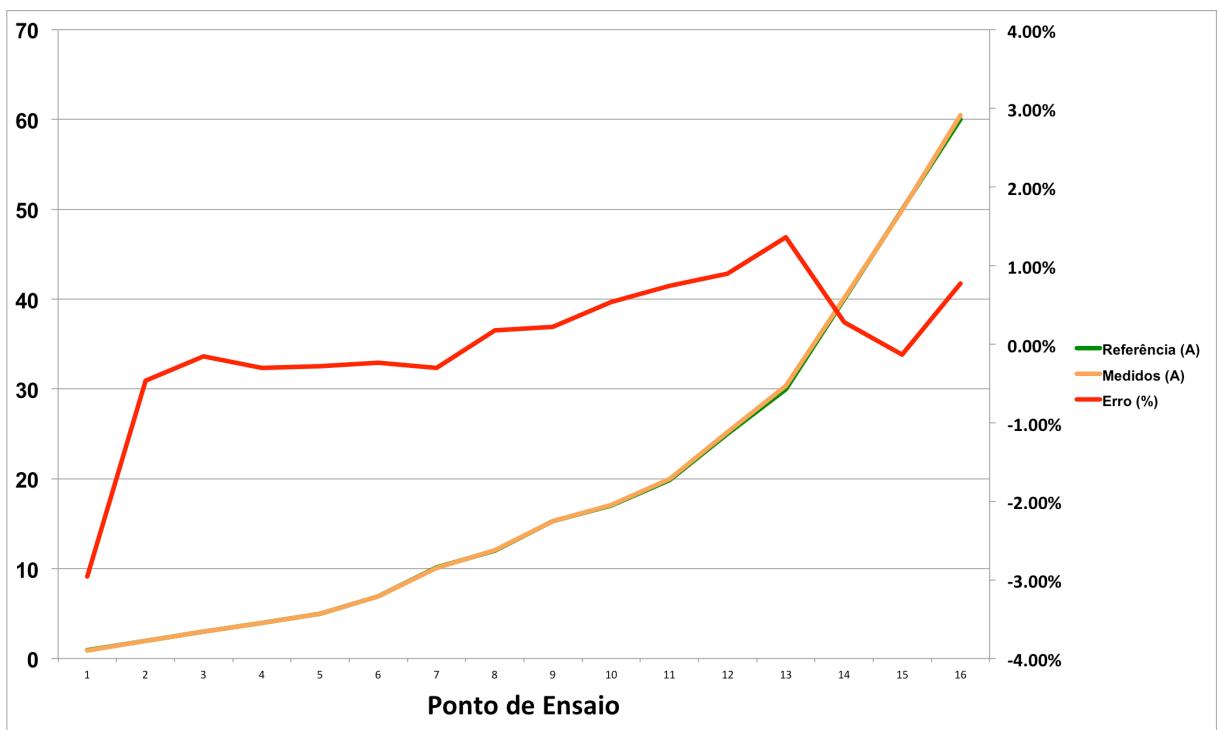
Os valores dos desvios ultrapassam um por cento em apenas dois pontos, tendo que no primeiro ponto se encontra o maior desvio (3,05%). Isto se deve a não linearidade do processamento do sinal de entrada de corrente para pequenos valores, fenômeno citado na subseção 3.3, item (a). A Tabela 4.2 compara quais valores seriam lidos para as mesmas correntes de referência utilizadas anteriormente com o uso da constante calculada na última linha da terceira coluna e o erro associado de medição. Esta tabela está representada graficamente na Figura 4.11.

Tabela 4.3 – Comparaçāo apōs calibraçāo da corrente.

Referência (A)	Medido (A)	Erro (%)
0,91	0,88	-2,96%
1,97	1,96	-0,46%
2,99	2,99	-0,16%
3,99	3,98	-0,30%
5,00	4,99	-0,28%
6,91	6,89	-0,24%
10,13	10,10	-0,30%
12,02	12,04	0,18%
15,27	15,30	0,22%
17,00	17,09	0,53%
19,85	20,00	0,74%
25,00	25,22	0,90%
29,97	30,38	1,36%
40,00	40,11	0,28%
50,00	49,93	-0,13%
60,00	60,46	0,77%

Fonte: Autoria própria.

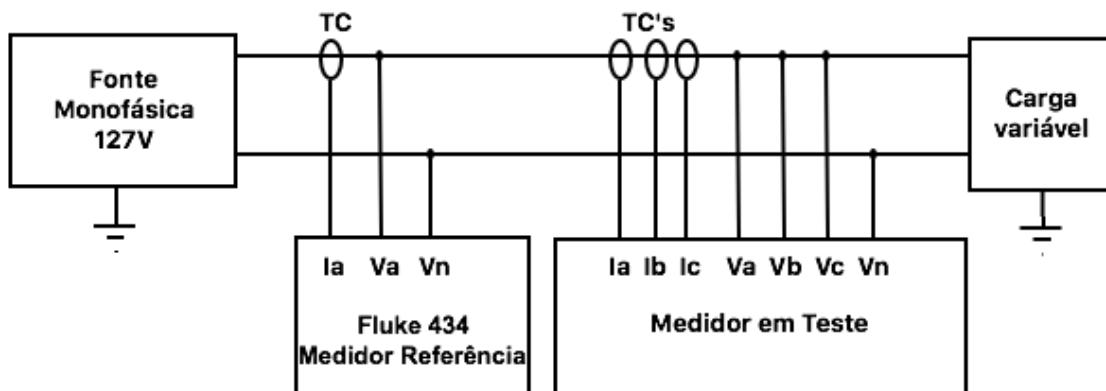
Figura 4.11 – Representaçāo gráfica da medição e erro de medição.



Fonte: Autoria própria.

A carga utilizada para o ensaio foi um equipamento projetado para servir de carga teste, ele possui a capacidade de simular diferentes tipos de cargas, variando em potência, fator de potência, fator de crista, dentre outros parâmetros. O equipamento é do fabricante Chroma Systems Solutions modelo 63803. O circuito de calibração é esquematizado na Figura 4.12.

Figura 4.12 – Circuito de Calibração por Comparaçāo.



Fonte: Autoria própria.

A carga utilizada nos testes possui um limite de corrente por volta de dez amperes, daí para realizar a medição para valores maiores do que isto, fez-se com que a corrente fosse medida mais de uma vez pelos TC's, para isso fizeram-se voltas com o condutor pelos TC's, inserindo assim um fator multiplicador inteiro à medição, tornando-se então possível medir valores de até sessenta amperes.

Os valores de corrente pequenos sofrem distorções e apresentam o maior erro, a forma de diminuir isto se dá pelo aumento da sensibilidade do amplificador de ganho programável de entrada, o PGA. Isto é feito escrevendo valores no registrador de ganho, GAIN (0x23), podendo-se alterar tanto o valor do ganho em 1x, 2x ou 4x (os bits de configuração são o bit 0 e o bit 1 do registrador GAIN, denominando-se por GAIN[1:0]), quanto o valor de fundo de escala do sinal de entrada em 0,5, 0,25 ou 0,125 V (GAIN[4:3]).

### 4.3.2 Calibração de Energias

A calibração das energias é mais complexa, pois depende de valores de tensão, corrente e tempo. Para realizar a calibração é necessário um medidor de energia, tensão e corrente. Caso não se disponha de um medidor de energia, um medidor de potência também pode ser utilizado. O método apresentado a seguir é baseado no método descrito pela folha de dados [21].

O primeiro passo é configurar os registradores de energia para terem seus valores zerados após uma leitura, o chamado *read-with-reset*. Para isso, necessita-se configurar o registrador LCYCMODE (0x17) escrevendo o valor “1” no bit 6, chamado de RSTREAD. Isto é necessário para que se tenha a possibilidade de retirar qualquer valor remanescente que o registrador possua e estabelecer um momento de contagem a partir do zero.

O segundo passo é configurar o tempo de medição, como o CI ADE7758 não possui relógio interno, não é simples usar o tempo diretamente, porém o CI ADE7758 oferece a possibilidade de contar o número de semiciclos da rede, desta forma pode-se inferir o tempo de medição. Por exemplo, se for escolhido um valor de mil e duzentos meio ciclos, sabendo que a frequência da rede é de 60 ciclos por segundo ou 120 semiciclos por segundo, facilmente calcula-se um tempo de 10 segundos de ensaio. Para isto, escreve-se o valor de meio ciclos no registrador LINECYC (0x1C), e para o caso do exemplo, o valor escrito seria 4B0h.

O terceiro passo é a configuração da interrupção que consiste em escrever no registrador Mask (0x18). O valor a ser escrito é 001000h, que habilita o bit 12, LENERGY, e provoca interrupção apenas quando o valor de meios ciclos configurado seja atingido. A contagem dos meio ciclos começa desde a última leitura aos registradores de energia, quando ocorre uma leitura, o valor e a contagem são zerados.

O quarto passo é a programação do ensaio de medição, que deve se iniciar por leituras aos registradores de energia e ao registrador RSTATUS (0x1A), pois a leitura dele zera todas as interrupções. Em seguida, executa-se um laço WHILE em relação à interrupção provocada pelo contador de semiciclo, desta forma o valor lido em cada ciclo é somado à variável de energia. Expõe-se a seguir, o código-fonte

4.2, composto por um trecho da programação envolvida para calibração da energia reativa, o mesmo código se utiliza para as demais energias.

Código-fonte 4.2 – Trecho da programação de calibração da energia.

```
// Passo 1: configuração de LCYCMODE.
escrita(LCYCMODE, 0x40);

//Passo 2: Configuração de LINECYC
escrita(LINECYC, 0x4B0);

// Passo 3: Configuração de MASK
escrita(MASK, 0x001000);

// Passo 4: Laço de verificação de contagem de semiciclos.

leitura(RSTATUS);
leitura(AVARHR);
leitura(BVARHR);
leitura(CVARHR);
while( ! ( leitura(RSTATUS) & 0x00100 ) )
{
    avarhr+=leitura(AVARHR);
    bvarhr+=leitura(BVARHR);
    cvarhr+=leitura(CVARHR);
}
Serial.println(avahr);
Serial.println(bvarhr);
Serial.println(cvarhr);
```

Após a leitura, faz-se a comparação com os valores medidos pelos medidores de referência ou calculados pela fórmula potência vezes tempo, em seguida se repete o mesmo processo detalhado na subseção 4.3.1, para encontrar as constantes.

Apesar do processo mais complexo, o produto da calibração de energias é o mesmo da tensão e corrente, ou seja, a determinação de constantes de relação. A título de exemplo, a constante para a energia ativa da fase A (KAa) foi igual a 0,0001374858489. Este valor é muito pequeno, devendo ter o cuidado ao utilizá-lo no programa para que ele não diminua demais o valor lido, como é o caso que

ocorre quando se mede a energia sob um intervalo muito pequeno e logo se multiplica por esta constante.

Os valores de ganho e *offset* também são valores possíveis de serem ajustados para fins de calibração, porém neste processo não foi necessário o seu cálculo, então os valores utilizados são iguais a zero (0x00) para todos os registradores.

Para a operação com os valores de energia, deve-se tomar alguns cuidados, pois o seu valor não é instantâneo como os de tensão e corrente, mas sim acumulativo. Isto traz o inconveniente da perda de informação por *overflow*, que ocorre quando o valor acumulado no registrador é muito grande e é somado mais um valor que ultrapassa o seu limite. Este fenômeno pode acontecer em um tempo muito pequeno, e para valores máximos de tensão e corrente, o tempo de *overflow* para a energia aparente é de 1,15 segundo e para as energias ativa e reativa de apenas 0,52 segundo [21].

Na medida do possível, ao longo do programa é importante se ler e acumular em uma variável do microcontrolador os valores de energia, como expõem-se no código-fonte 4.3, onde se usa, por exemplo, a varável *awatthr* para acumular o valor do registrador AWATTHR (0x01).

Código-fonte 4.3 – Acumulação dos valores de energia ativa.

```
...
awatthr+=leitura(AWATTHR);
bwatthr+=leitura(BWATTHR);
cwatthr+=leitura(CWATTHR);
...
```

Ao final de um número determinado de ciclos de leitura, o valor obtido não é o calibrado, sendo necessário ainda multiplicar o valor obtido pelas constantes das energias, como expõem-se no código-fonte 4.4.

Código-fonte 4.4 – Tradução dos valores acumulados em valores de energia.

```
...
awatthr=KAa*awatthr;
bwatthr=KAb*bwatthr;
cwatthr=KAc*cwatthr;
...
// Função de registro e/ou operação
...
awatthr=0;
bwatthr=0;
cwatthr=0;
...
Após a leitura das variáveis, igualam-se as mesmas a zero para reiniciar um novo ciclo de acumulação.
```

## 5 AVALIAÇÃO OPERACIONAL DO MEDIDOR, LIMITAÇÕES E OPORTUNIDADES FUTURAS

Neste capítulo analisa-se o desempenho obtido pelo medidor eletrônico após as etapas de projeto, montagem e calibração descritas nos capítulos anteriores. Apresenta-se ainda os limites operacionais do protótipo de medidor eletrônico desenvolvido e propostas de pesquisa e melhorias.

### 5.1 Resultados Operacionais

Durante a avaliação operacional do medidor eletrônico realizaram-se três ensaios comparativos, o primeiro foi para comparar apenas a medição de energia ativa de uma residência, o segundo comparou os valores de tensão, corrente e energias por pequeno período de tempo e o terceiro foi a coleta para produção de gráficos com a curva de consumo.

Ao longo deste capítulo o medidor desenvolvido neste trabalho é mencionado apenas pela sigla J1, para facilitar a nomeação de tabelas e gráficos.

#### 5.1.1 Ensaio de Energia Ativa

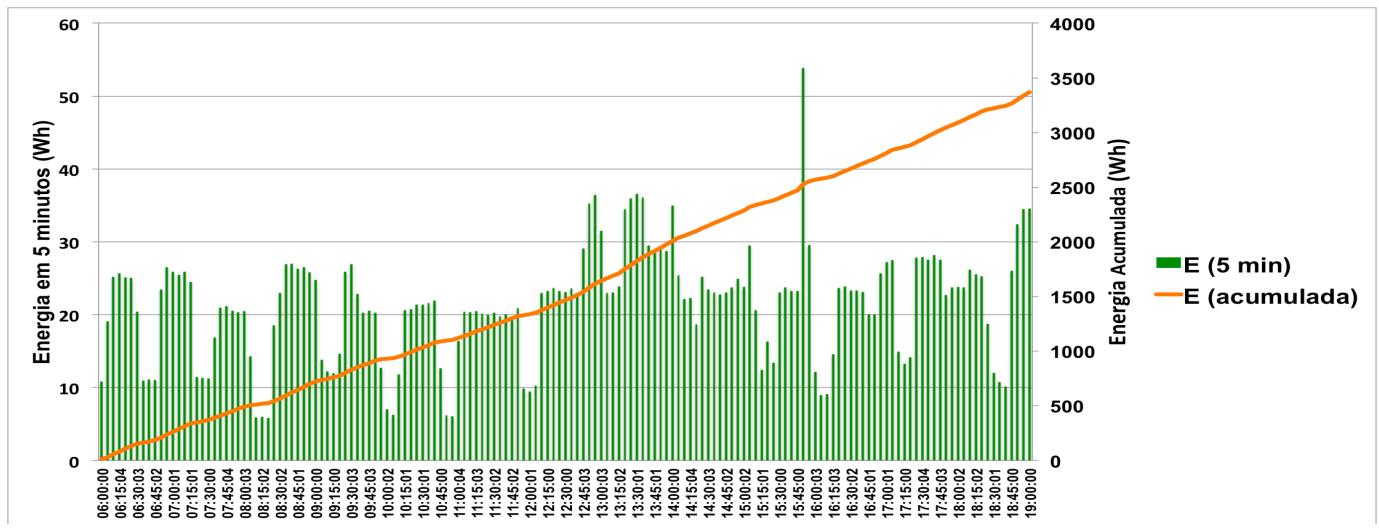
O ensaio consistiu em monitorar o consumo de energia ativa de uma residência por um período de nove dias e comparar com a energia registrada pelo medidor da concessionária local, as Centrais Elétricas do Pará S.A. – CELPA, que serviu como o medidor de referência. O modelo do medidor é E13 da fabricante Landis+Gyr, empregado na referida residência com sistema bifásico, 127 V de tensão de fase e 220 V de tensão de linha. Mais exatamente, a medição se iniciou às 23h00 do primeiro dia e terminou às 12h00 do nono dia, totalizando 181 horas de ensaio.

O medidor E13 mede energia ativa e reativa, sob níveis de tensão de 120 V ou 240 V, possui corrente nominal ( $I_n$ ) de 15 A, corrente máxima de 100 A, corrente de partida de 0,4% de  $I_n$ , frequência de operação de 60Hz e classe de exatidão B (1%) [34], ou seja, possui erro de medição para energia ativa de  $\pm 1\%$  para valores acima da corrente de partida e abaixo da corrente máxima. Valores abaixo da

corrente de partida possuem erro superior, conforme mencionado na subseção 4.3.1.

Ao fim do ensaio de medição foi registrado 60 kWh pelo medidor E13 e 60,8 kWh pelo medidor J1, totalizando um erro de -0,27%. Na Figura 5.1 é mostrado um gráfico que pôde ser gerado a partir dos dados obtidos, sendo plotado um trecho reduzido de tempo por questões de visualização gráfica, onde na abscissa está valores em Wh (watt-hora) para cada cinco minutos de ensaio.

Figura 5.1 – Curva de consumo da residência das 6h00 até 19h00.



Fonte: Autoria própria.

Este ensaio não põe à prova a total capacidade do medidor, apenas o registro somatório da energia ativa, porém serve para um primeiro estágio de testes e mostra que a curva de consumo pode ser utilizada para a caracterização da carga ou perfil de consumo. Por exemplo, há uma grande carga “modulando” a curva de consumo, neste caso essa carga é a refrigerador da casa; há também a ocorrência de um pico de consumo às 15h45, isso é devido ao acionamento de um forno micro-ondas.

### 5.1.2 Ensaio de Curva de Consumo

Este ensaio consistiu em medir o consumo de energia ativa, a solicitação de energias reativa e aparente, bem como os valores rms de tensão e corrente integralizados em intervalos de cinco minutos. Para isto foi utilizado como medidor de referência o analisador de energia trifásico modelo P600 de fabricação da IMS,

sendo referido neste capítulo apenas por IMS. Este medidor possui exatidão de  $\pm 0,2\%$ ,  $\pm 1,2\%$  e  $\pm 1,4\%$  na medição de tensão, corrente e energias, respectivamente.

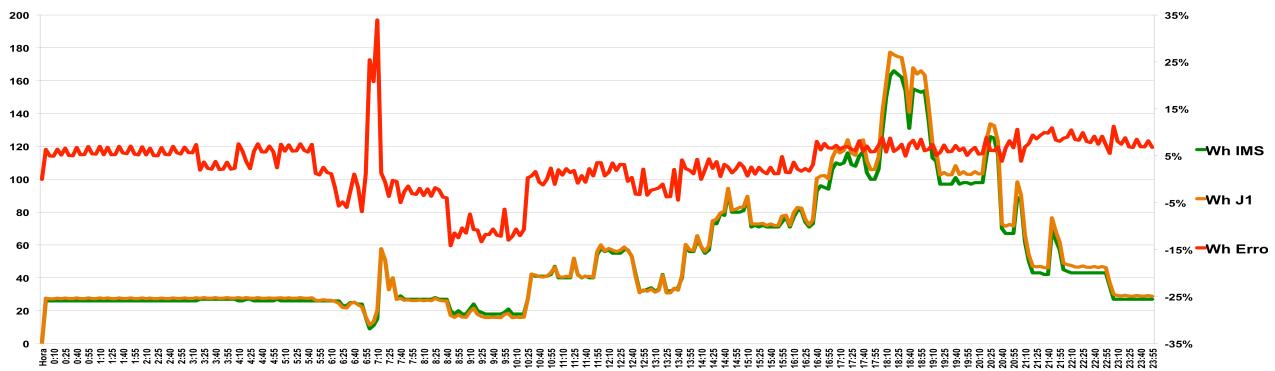
A carga foi medida diretamente no QDL (quadro de distribuição de iluminação) do prédio do GEDAE, localizado na Universidade Federal do Pará - UFPa, campus Belém, consistindo em uma carga majoritariamente composta por lâmpadas fluorescentes tubulares com reator eletrônico, de 127 V de tensão de fase.

### 5.1.2.1 Energia Ativa

O resultado da medição da energia ativa pode ser visualizado na Figura 5.2, onde foi gerada uma curva de consumo de um período de 24 horas do dia 22/11/16, iniciado às 0h00 até às 23h55. A linha em verde expressa a medição do medidor IMS, a laranja do medidor J1 e a linha vermelha expressa o erro em porcentagem entre o medidor IMS e o J1. Os valores da abscissa esquerda seguem a mesma definição da figura 5.1, os valores da abscissa direita são o erro em porcentagem das medições, obtido pela Equação 5.1.

$$\text{Erro (\%)} = \frac{(Medido - Referência) \times 100}{Referência} \quad (5.1)$$

Figura 5.2 - Curvas de consumo geradas via os dados dos dois medidores do dia 22.11.16 e a curvas de erro entre eles.



Fonte: Autoria própria.

A média do erro de medição para este período ficou em 3,15% e o erro entre as medições de energia do período inteiro foi de 4,31%, porém, no período entre

7h00 e 7h10 o erro aumentou consideravelmente. Este fato ocorre devido ao fato do medidor ter entrado na região anterior à corrente de partida, ou seja, os valores medidos eram muito baixos, na Tabela 5.1 está detalhado este momento.

Tabela 5.1 - Momento de erro máximo.

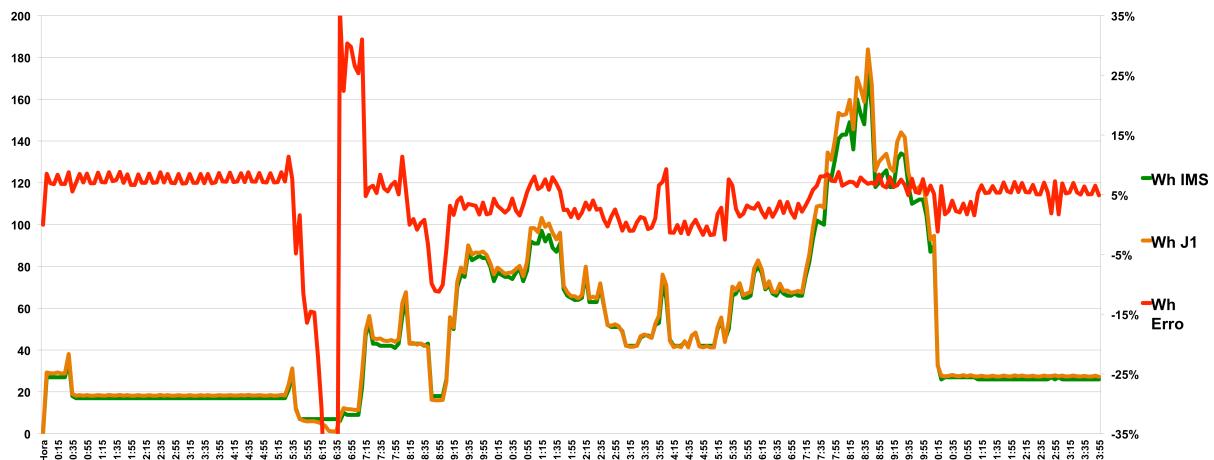
Hora	E. ativa IMS	E. Ativa J1	Erro	Corrente IMS	Corrente J1
6:55	16	16,19	1%	0,58	0
7:00	9	11,29	25%	0	0
7:05	11	13,29	21%	0,28	0
7:10	15	20,09	34%	0,63	1,79
7:15	57	57,77	1%	2,12	1,49

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que a energia envolvida no período de maior erro é pequena assim como a corrente instantânea medida. A mesma conclusão se pode chegar no período de 8h45 e 10h20, onde a média de erro é de -11%.

Das Figuras 5.3 a 5.6 estão os gráficos dos dias 23/11 ao 26/11/16, neles pode-se verificar os outros resultados e outras situações de erro de medição, além da situação encontrada na figura 5.2.

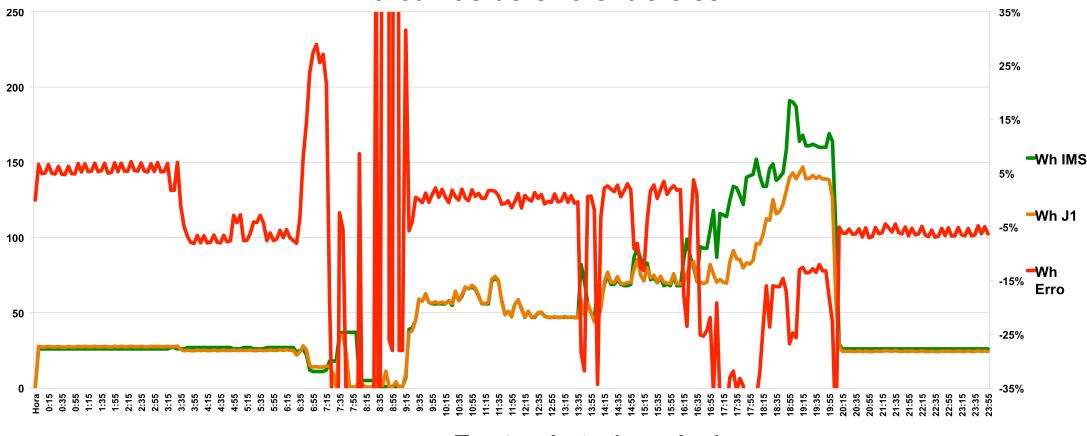
Figura 5.3 - Curvas de consumo geradas via os dados dos dois medidores do dia 23/11/16 e a curvas de erro entre eles.



Fonte: Autoria própria.

A média do erro para o dia 23/11/16 foi de 3,58%, e considerando as energias do período inteiro, o erro foi de 4,59%.

Figura 5.4 - Curvas de consumo geradas via os dados dos dois medidores do dia 24/11/16 e a curvas de erro entre eles.



Fonte: Autoria própria.

A média do erro para o dia 24/11/16 foi de -2,69% e considerando as energias do período inteiro, o erro foi de -11,58%.

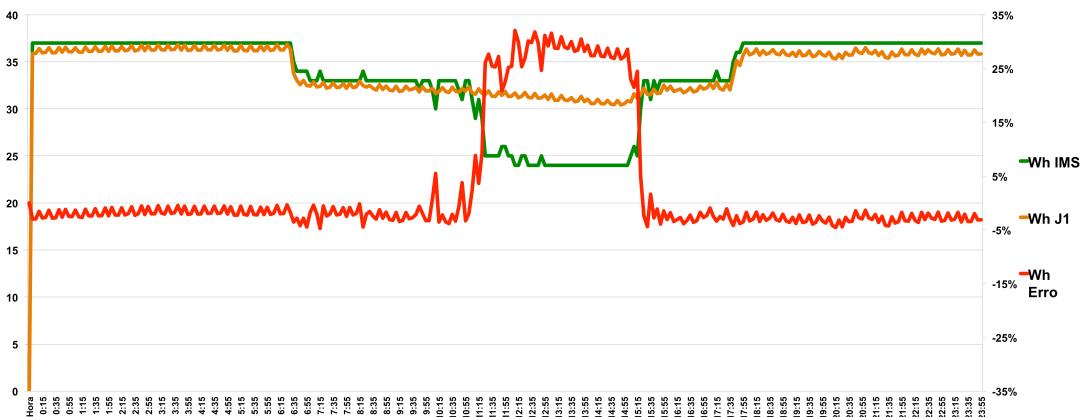
Figura 5.5 - Curvas de consumo geradas via os dados dos dois medidores do dia 25/11/16 e a curvas de erro entre eles.



Fonte: Autoria própria.

A média do erro para o dia 25/11/16 foi de -10,99% e considerando as energias do período inteiro, o erro foi de -8,91%.

Figura 5.6 - Curvas de consumo geradas via os dados dos dois medidores do dia 26/11/16 e a curvas de erro entre eles.

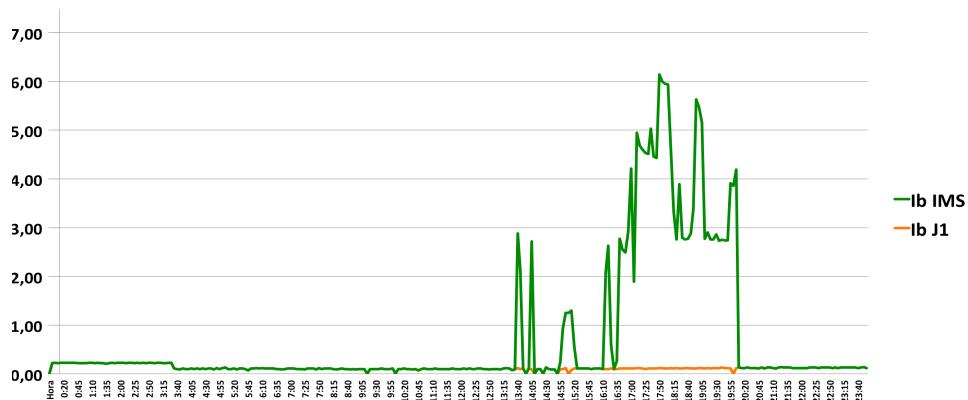


Fonte: Autoria própria.

A média do erro para o dia 26/11/16 (sábado) foi de 2,73% e considerando as energias do período inteiro o erro foi de 1,35%.

Na figura 5.4 há um momento que entre 16h40 e 20h05 onde o erro assume valores negativos altos, com média de -25% e pico de -44,78%, este erro não é explicado pela corrente inferior à corrente de partida, mas foi provavelmente por uma má conexão da garra de corrente da fase B, pois se verifica ao longo ensaio, que a partir de um determinando ponto, a corrente  $I_b$  não é mais medida pelo medidor J1, acontecimento que não é verificado facilmente devido ao fato da fase B não apresentar carga na grande maior parte do ensaio. Na figura 5.7 está plotado o gráfico com a corrente da fase B medida no dia 24/11/16.

Figura 5.7 – Corrente fase B medida por ambos os medidores.



Fonte: Autoria própria.

Nota-se que a corrente medida pelo IMS sobe enquanto a do J1 permanece próxima do zero, indicando que provavelmente a garra não esteja bem conectada.

Mesmo com os erros apresentados anteriormente, ao final da campanha de medição o erro calculado considerando todo o período de medição é considerado pequeno, correspondendo ao valor de -1,72% destacado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Energia ativa, em Wh, medida pelos medidores.

Data	IMS	J1	Erro diário
22/11/16	14803	15441,87	4,32%
23/11/16	14181	14831,98	4,59%
24/11/16	15081	13334,54	-11,58%
25/11/16	8351	7606,6	-8,91%
26/11/16	9698	9828,65	1,35%
Total	62114	61043,64	-1,72%

Fonte: Autoria própria.

### 5.1.2.2 Energia Reativa e Aparente

As medições destas energias não obtiveram resultados dentro do aceitável, os resultados estão expostos nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Tabela 5.3 – Energia Reativa, em VArh, medida pelos medidores.

Data	IMS	J1	Erro diário
22/11/16	5096	38637,68	658,20%
23/11/16	5024	39083,14	677,93%
24/11/16	5069	31516,08	521,74%
25/11/16	3357	29794,2	787,52%
26/11/16	3802	30259,14	695,87%
Total	22348	169290,24	657,52%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.4 – Energia Aparente, em VAh, medida pelos medidores.

Data	IMS	J1	Erro diário
22/11/16	15676,00	14338,24	-8,53%
23/11/16	15081,47	13998,39	-7,18%
24/11/16	15928,49	12060,32	-24,28%
25/11/16	9011,47	5107,86	-43,32%
26/11/16	10418,84	6461,95	-37,98%
Total	66116,29	51966,76	-21,40%

Fonte: Autoria própria.

Como pôde ser verificado pela Tabela 5.3, o erro para a medição de energia reativa foi muito grande, caracterizando algum problema estrutural do dispositivo. Melhores análises foram realizadas e se constatou que o problema é causado pela programação, que não processa adequadamente valores negativos. A carga medida no ensaio consistia majoritariamente em lâmpadas fluorescentes, estas por sua vez, apresentam potências reativas capacitivas, que é dada numericamente como uma energia reativa negativa. A prova disso são os valores bem maiores, causados pelo bit “1” na frente das palavras dos registradores de energia reativa (XVARHR) quando submetidos a valores negativos.

Para a energia aparente, o erro apresentou valores mais baixos do que o da reativa, porém ainda assim altos e, também, negativos. Mesmo assim, ainda não se caracteriza como um erro estrutural, até verificar-se que os valores são menores do que o valor de energia ativa, fato impossível de se ocorrer segundo a equação 2.3. Assim, realizaram-se análises no código e se chegou à conclusão que o erro se encontra nos valores das constantes de relação de energia aparente KTX oriundas do processo de calibração detalhado na subseção 4.3.2, que convertem os valores binários para decimais dos registradores de energia aparente (XVAHR).

Destes ensaios se tira a conclusão de que os valores medidos de energia reativa não são confiáveis e para a resolução deste problema, é necessária a revisão e adequação da programação para converter adequadamente valores negativos binários em valores negativos decimais.

Quanto à energia aparente, há a necessidade de se calibrar novamente e encontrar novos valores para as constantes de energia aparente. No ensaio com as cargas mistas na subseção 5.1.3, os valores das constantes foram reajustados.

### 5.1.2.3 Tensão e Corrente

A medição de tensão para fins de validação não é visualizada neste teste, pois a tensão pouco varia, logo só se pode afirmar que alguns pontos foram validados, que é caso de pontos ao redor de 127 Vrms. Porém, este pode ser considerado como o ponto de operação do medidor, visto que grande parte do território nacional opera sob este padrão de tensão de fase.

Na Figura 5.8 estão esboçadas as curvas de tensão registrada pelos dois medidores em um dia de medição, nota-se que o erro relativo varia pouco, assim como o valor da tensão.

Figura 5.8 – medição da tensão de ambos os medidores do dia 22.11.16.



Fonte: Autoria própria.

O erro médio deste dia foi de 0,55% para a fase A, 1,89% para a fase B e 1,31% para a fase C. Os resultados dos dias de teste estão na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Erros diários para medidas de tensão.

Data	Fase A	Fase B	Fase C
22/11/16	0,55%	1,89%	1,31%
23/11/16	0,57%	1,89%	1,28%
24/11/16	0,53%	1,86%	1,29%
25/11/16	0,52%	1,84%	1,25%
26/11/16	0,50%	1,82%	1,28%
Média	0,53%	1,86%	1,28%

Fonte: Autoria própria.

Com uma média geral de 1,23% de erro (considerando as três fases), a medida da tensão para os pontos próximos de 127 V foram dadas como satisfatórias.

Para a medição da corrente, este teste não garante um dos critérios fundamentais para a análise, que é a medição simultânea, pois a medição é feita e de forma instantânea e sincronizada com ambos os relógios dos medidores. Os relógios não estavam devidamente sincronizados, tendo diferenças de poucos segundos, diferença essa que não causa grandes distorções na medição das energias e da tensão, visto que esta última ser bem menos variável se comparada a corrente.

### **5.1.3 Ensaio com cargas mistas (lineares e não lineares)**

O ensaio consistiu em cinco amostras de medição com diferentes conjuntos de lâmpadas formando uma carga trifásica desequilibrada. Para este ensaio foi utilizado o mesmo medidor de referência usado para a calibração, o Fluke 434, já detalhado na subseção 4.3. As lâmpadas consistiam em lâmpadas fluorescentes compactas de 20 W e incandescentes de 200 W de potência nominal, todas com tensão nominal de 127 Vrms.

As amostras foram caracterizadas pelas seguintes variáveis: tempo (em minutos), distorção harmônica total de tensão ( $\text{THD}_V$ ) e pelas potências ativa, reativa e aparente. As variáveis medidas foram: corrente, tensão e as energias ativa, reativa e aparente.

Como a medição de energia reativa do experimento anterior não se mostrou eficaz, os valores obtidos desta variável foram calculados pela Equação 2.12, ou seja, usou-se os valores de energia aparente e ativa para o cálculo da reativa. Desta forma, a medição não detecta se a carga é reativa capacitiva ou indutiva, apenas o seu valor numérico. Os valores das constantes de potência aparente, KTX, também foram reajustados antes dos ensaios.

### a) Amostra 1

A amostra 1 foi realizada em um tempo de 10 minutos, os seus valores são detalhados na Tabela 5.6 e o resultado da medição na Tabela 5.7.

Tabela 5.6 – Parâmetros da carga da amostra 1.

Fase	P. Ativa (W)	P. Reativa (VAr)	P. Aparente (VA)	THDv (%)
A	150	210	260	4,1
B	350	90	360	2,5
C	1170	20	1170	1,5

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.7 – Valores medidos da amostra 1.

Tensão (V)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	118,1	120,1	-1,67%
B	117,77	119,8	-1,69%
C	116,8	119,1	-1,93%
Corrente (A)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	2,02	2,1	-3,81%
B	3	2,93	2,39%
C	9,63	9,8	-1,73%
Energia Ativa (Wh)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	24,05	25	-3,80%
B	57,98	58	-0,03%
C	194,91	193	0,99%
Energia Reativa (VArh)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	32,37	33	-1,90%
B	14,88	14	6,32%
C	2,79	3	-6,92%
Energia Aparente (VAh)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	40,33	41	-1,63%
B	59,86	60	-0,23%
C	194,93	194	0,48%

Fonte: Autoria própria.

### b) Amostra 2

A amostra 2 foi realizada em um tempo de 20 minutos, os seus valores são detalhados na Tabela 5.8 e o resultado da medição na Tabela 5.9.

Tabela 5.8 – Parâmetros da carga da amostra 2.

Fase	P. Ativa (W)	P. Reativa (VAr)	P. Aparente (VA)	THDv (%)
A	80	130	150	3
B	180	60	180	1,9
C	690	20	700	1,5

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.9 – Valores medidos da amostra 2.

Tensão (V)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	118,05	120	-1,63%
B	117,85	119,8	-1,63%
C	116,98	119,3	-1,94%
Corrente (A)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	1,17	1,2	-2,50%
B	1,49	1,5	-0,67%
C	5,73	5,8	-1,21%
Energia Ativa (Wh)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	24,62	26	-5,31%
B	58,95	58	1,64%
C	236,05	232	1,75%
Energia Reativa (VArh)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	41,12	42	-2,09%
B	17,77	19	-6,48%
C	12,10	13	-6,91%
Energia Aparente (VAh)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	47,93	49	-2,18%
B	61,57	61	0,93%
C	236,36	232	1,88%

Fonte: Autoria própria.

### c) Amostra 3

A amostra 3 foi realizada em um tempo de 20 minutos, os seus valores são detalhados na Tabela 5.10 e o resultado da medição na Tabela 5.11.

Tabela 5.10 – Parâmetros da carga da amostra 3.

Fase	P. Ativa (W)	P. Reativa (VAr)	P. Aparente (VA)	THDv (%)
A	490	120	500	2,9
B	250	50	250	1,8
C	820	20	820	1,1

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.11 – Valores medidos da amostra 3.

Tensão (V)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	118,15	119,9	-1,46%
B	117,97	119,9	-1,61%
C	117,31	119,3	-1,67%
Corrente (A)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	4,06	4,3	-5,58%
B	2,03	2,1	-3,33%
C	6,75	6,9	-2,17%
Energia Ativa (Wh)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	186,06	185	0,57%
B	94,54	94	0,57%
C	321,37	316	1,70%
Energia Reativa (VArh)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	42,76	42	1,81%
B	18,27	19	-3,82%
C	26,97	28	-3,67%
Energia Aparente (VAh)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	190,91	190	0,48%
B	96,29	96	0,30%
C	322,5	316	2,06%

Fonte: Autoria própria.

#### d) Amostra 4

A amostra 4 foi realizada em um tempo de 45 minutos, os seus valores são detalhados na Tabela 5.12 e o resultado da medição na Tabela 5.13.

Tabela 5.12 – Parâmetros da amostra 4.

Fase	P. Ativa (W)	P. Reativa (VAr)	P. Aparente (VA)	THDv (%)
A	140	130	190	3,3
B	140	80	160	2,4
C	180	70	190	1,6

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.13 – Valores medidos da amostra 4.

Tensão (V)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	118,16	120,00	-1,53%
B	117,9	119,90	-1,67%
C	117,27	119,5	-1,87%
Corrente (A)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	1,47	1,7	-13,53%
B	1,23	1,3	-5,38%
C	1,54	1,6	-3,75%
Energia Ativa (Wh)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	83,44	83	0,53%
B	80,51	80	0,64%
C	106,7	104	2,60%
Energia Reativa (VArh)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	74,55	75	-0,61%
B	43,86	45	-2,54%
C	41,21	41	0,50%
Energia Aparente (VAh)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	111,89	112	-0,10%
B	91,68	92	-0,35%
C	114,38	112	2,13%

Fonte: Autoria própria.

### e) Amostra 5

A amostra 5 foi realizada em um tempo de 30 minutos, os seus valores são detalhados na Tabela 5.14 e o resultado da medição na Tabela 5.15.

Tabela 5.14 – Parâmetros da carga da amostra 5.

Fase	P. Ativa (W)	P. Reativa (VAr)	P. Aparente (VA)	THDv (%)
A	540	80	530	2
B	530	80	530	2,1
C	530	80	530	1,3

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.15 – Valores medidos da amostra 5.

Tensão (V)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	120	119,8	0,17%
B	119,87	119,7	0,14%
C	119,55	119,4	0,13%
Corrente (A)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	4,52	4,6	-1,74%
B	4,33	4,5	-3,78%
C	4,39	4,5	-2,44%
Energia Ativa (Wh)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	278,29	276	0,83%
B	269,56	267	0,96%
C	272,91	268	1,83%
Energia Reativa (VArh)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	47,11	45	4,70%
B	48,45	46	5,33%
C	50,98	47	8,46%
Energia Aparente (VAh)			
Fase	J1	Fluke	Erro
A	282,25	280	0,80%
B	273,88	271	1,06%
C	277,63	272	2,07%

Fonte: Autoria própria.

Os resultados destes ensaios resultaram em valores mais aceitáveis de erro, com as médias e o desvio padrão do erro detalhados na Tabela 5.16. Nesta tabela também se mostra a média e desvio padrão do THDV, nota-se no caso, que a diferença não é tão significativa. A diferença entre as cargas está mais ligada à potência das cargas, tendo uma amplitude significativa de até 990 W entre as amostras. A maior média de erro está na medição de corrente na fase A, muito influenciada pelos baixos valores de corrente envolvidos em alguns ensaios.

Tabela 5.16 – Resumo com média e Desvio Padrão das amostras.

	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Fase	THDV		Tensão		Corrente	
A	3,06	0,6771	-1,22%	0,70%	-5,43%	4,25%
B	2,14	0,2728	-1,29%	0,72%	-2,15%	2,73%
C	1,4	0,1789	-1,46%	0,80%	-2,26%	0,85%
Fase	Energia Ativa		Energia Reativa		Energia Aparente	
A	-1,43%	2,59%	0,38%	2,57%	-0,53%	1,18%
B	0,75%	0,55%	-0,24%	5,12%	0,34%	0,58%
C	1,77%	0,51%	-1,71%	5,77%	1,72%	0,63%

Fonte: Autoria própria.

O resultado geral destes ensaios é dado como satisfatório, porém, ressalta-se a necessidade de ensaios mais dedicados para fins de calibração, principalmente para uma amplitude maior de potência de carga, além de valores de corrente.

#### 5.1.4 Verificação das Perdas Internas

Este ensaio tem por objetivo determinar o consumo próprio do medidor, ou seja, as perdas internas, tanto em potência ativa quanto em aparente para todos os níveis de tensão especificados pelo fabricante.

No caso, o medidor J1 é projetado para operar no nível de 127 e 220 V, com isso o ensaio foi realizado para estes dois níveis. Na Tabela 5.17 é mostrado o resultado do ensaio.

Tabela 5.17 – Resultado do ensaio de perdas internas.

Tensão (V)	Corrente (mA)	P. aparente (VA)	P. Ativa (W)
127,11	26,08	3,317	1,255
220,19	19,38	4,27	1,527

Fonte: Autoria própria.

## 5.2 Limitações

Como todo instrumento de medição, o medidor desenvolvido também possui limitações de valores de entrada. Valores de tensão e corrente são fáceis de serem aquisitados, pois dependem majoritariamente dos valores dos resistores do divisor de tensão de sua entrada e de sua capacidade de isolamento, já valores de energia dependem de cálculos mais complexos e de mais de uma variável.

### 5.2.1 Tensão, Corrente e Potências

O valor máximo de medição de nível de tensão, sem levar em conta a capacidade de isolamento, é calculado pela fórmula do divisor de tensão, sabendo que a tensão de saída  $V_{out}$  do divisor é a tensão de entrada dos pinos VAP, VBP e VCP. A tensão de entrada deve ser limitada a 0,5 V<sub>pico</sub> [21], ou 0,353 V<sub>rms</sub> (considerando a forma de onda de tensão senoidal). Para os valores utilizados, chega-se ao valor de 354 V de tensão de fase e 612 V de tensão de linha, ou seja, adequado até o padrão de 440 V.

Para o valor da corrente, tem-se a mesmo valor de tensão de entrada, 0,5 V<sub>pico</sub>, para os seus pinos IAP, IBP e ICP. Porém, seu cálculo leva em consideração a queda de tensão do resistor RB que está em série com o transformador de corrente. Considerando que a relação de transformação do TC utilizado é de 100 A:50 mA, ou seja, 2000:1, e que a resistência do resistor RB é de 7,5 Ω, chega-se ao valor de 94,13 A.

Para valores pequenos de corrente, notou-se pela calibração na subseção 4.3.1 e nas medições operacionais na subseção 5.1 as não linearidade para pequenos valores, estando ele abaixo dos 100 mA. Há técnicas possíveis de serem

empregadas para diminuição deste valor, como é caso do aumento da sensibilidade dos ganhos de tensão, via configuração do registrador Gain (0x23), detalhado na subseção 4.3.1.

Para o cálculo do valor máximo para energias, além das variáveis de entrada (tensão e corrente), tem-se que levar em conta o tempo que o programa leva para completar os ciclos de leituras de todos os registradores de energia. Os registradores de energia são do tipo acumulador, os de energia ativa (XWATTHR) e de reativa (XVARHR) quando submetidos a valores máximos de entrada de tensão, corrente e fase, chegam ao valor máximo de registro em apenas 0,52 segundos e o de energia aparente (XVAHR) chegam ao valor máximo em 1,15 segundo [21], após este tempo, corre-se o risco de ocorrer *overflow* e se perder a informação existente no registrador.

Levando em consideração apenas o valor máximo da tensão e corrente, ou seja, supondo que o ciclo de leitura dos registradores de corrente é menor do que seu tempo máximo de *overflow*, pode-se facilmente chegar a um valor máximo de potência aparente, que é de  $(612 \text{ V} \times 94,13 \text{ A}) 57,607 \text{ kVA}$ . Tendo como base o padrão de tensão de 220 V, se obtém a potência de 20,708 kVA.

### **5.2.2 Medida de valores negativos**

As conclusões das experiências evidenciaram que a programação aplicada ao medidor não processa corretamente valores negativos oriundos dos registradores com essa propriedade (S-signed). Isto impõe limitações de uso nos casos em que a carga fornece energia ativa à fonte ou quando a energia reativa assume valores negativos, limitando assim a medição de energia a apenas um quadrante.

### **5.2.3 Memória**

A memória de massa utilizada nos experimentos foi de 4 GB, através de um cartão SD. Constatou-se que um dia de medição e registro dos parâmetros data, hora, tensão, corrente e energias das três fases a cada cinco minutos gerou 33 kB

de dados, ou seja, para um cartão de memória de 4 GB, tem-se 121 mil dias de registro. Então, conclui-se que a memória para registro dos parâmetros monitorados não significa uma limitação prática, pelo menos para esta aplicação.

#### **5.2.4 Incerteza**

Os principais componentes envolvidos com a incerteza da medição são os resistores do divisor de tensão e o do resistor da saída do TC, além do próprio TC. Os resistores utilizados na saída do TC de  $7,5\ \Omega$  possuem tolerância de 1% e coeficiente de temperatura de 50 ppm/ $^{\circ}\text{C}$  e os resistores de 1 k $\Omega$  também possuem tolerância de 1%. O TC apresenta, segundo o fabricante, uma não linearidade de 3% e não destaca a sua incerteza.

Os resistores utilizados no divisor resistivo, ou seja, de 1 M $\Omega$  e de 1 k $\Omega$ , possuem tolerâncias de 1% e o de 1 M $\Omega$  um coeficiente de temperatura de 50 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ .

O cálculo final para a definição da incerteza leva em consideração vários outros pontos, como a resistência dos pontos de solda, das capacitâncias parasitas, entre outros. Os recursos disponíveis durante a elaboração deste trabalho e o seu próprio objetivo, não visam o cálculo associado às incertezas de medição relatadas.

### **5.3 Melhorias e Projetos Futuros**

Para o desenvolvimento de projetos futuros, pode-se destacar os seguintes pontos:

- a) Uso de técnicas de calibração mais precisas e padronizadas, além do uso de equipamentos mais dedicados à calibração;
- b) Cálculo e determinação por medição do grau de incerteza, com o objetivo de classificar a classe do medidor;
- c) Explorar a capacidade de medição para pequenos valores via o uso do registrador Gain (0x23);
- d) Explorar as funções de detecção e medição de variações de tensão de curta duração;
- e) Redefinir a programação para a conversão adequada de binário negativo para decimal negativo, com isso o medidor passa a medir nos quatro quadrantes;

f) Explorar outros *chips* da mesma família do ADE7758. Existem atualmente CI da família ADE da Analog Device que medem muitas outras variáveis, proporcionando por exemplo no desenvolvimento de um medidor de qualidade de energia elétrica.

## CONCLUSÕES

O projeto consistiu no desenvolvimento, aplicação de técnica de construção e testes de um medidor de energia elétrica trifásico com memória de massa, que utiliza como componente medidor o CI ADE7758 da Analog Device e como plataforma de base o Arduino UNO.

Como um todo, o protótipo pôde ser considerado de baixo custo, pois a grande maioria das técnicas de manufatura utilizadas são de fácil e barata obtenção, como por exemplo, a utilizada para a confecção da placa de circuito impresso. Assim como as ferramentas e componentes utilizados, por exemplo, o software EAGLE, utilizado no projeto da placa, que possui versões gratuitas para estudantes até determinados limites.

O medidor se mostrou válido na apresentação das grandezas monitoradas, e também pode ser utilizado em aplicações que as novas legislações demandam, como é o caso da modalidade denominada Tarifa Branca, onde a análise do perfil de consumo é de vital importância para as tomadas de decisões.

As limitações dos componentes empregados, como o CI e o Arduino UNO, são significativas, por exemplo, o medidor não é capaz de medir tensão de linha. Desta forma, para o avanço no desenvolvimento de medidores, ou até mesmo de registradores e analisadores de energia, necessita de uso de plataformas base e CI dedicados à medição mais avançados e com mais recursos.

O desenvolvimento do medidor de energia foi dado como satisfatório, visto o fato de não ter apresentado erros elevados, e quando ocorriam, houve sempre uma identificação do erro e das diretivas para sua melhoria. Desta forma, o seu aperfeiçoamento ainda é possível, mas principalmente, o *know-how* de resolução de falhas e busca de soluções se mantém.

Assim, pode-se afirmar que a experiência foi relevante ao projeto, construção e testes de um medidor eletrônico de energia, o qual intenta-se servir futuramente como base para o desenvolvimento de outros equipamentos de medição eletrônica de energia elétrica, apresentando mais funcionalidades, robustez e melhor exatidão nas medições.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL. Resolução normativa ANEEL. nº 414/2010 de 09 de setembro de 2010. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>> . Acessado em 26/01/2017.
- [2] INMETRO. Regulamento Técnico Metrológico. Portaria Inmetro nº 587, de 05 de novembro de 2012. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001929.pdf>> Acessado em 20/02/2017.
- [3] NICOLA, Carolina T.; **Medição de Energia Elétrica: impactos da mudança tecnológica no setor jurídico de uma concessionária de energia elétrica.** Dissertação de Mestrado. PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2013.
- [4] ANEEL. Disponível em [http://www.aneel.gov.br/baixa-tensao-itens/.../o-que-e-tarifa-branca\[...\]](http://www.aneel.gov.br/baixa-tensao-itens/.../o-que-e-tarifa-branca[...]), acessado em 14.01.2017.
- [5] ANEEL. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>, acessado em 14.01.2017.
- [6] JUNIOR, Alírio. F.; **Metodologias de Medição de Energia Elétrica Reativa (VArh) e Erros de Medição em Equipamentos Eletrônicos de (VArh).** Ilha Solteira (SP), 2011.
- [7] WATTHOURMETERS.COM. Disponível em <<http://watthourmeters.com/others/fuller.html>>, acessado em 14.12.2016.
- [8] SPARKMUSEUM.COM. Disponível em <[http://www.sparkmuseum.org/collections/electricity-sparks-invention-\(1800-1900\)/edison-chemical-meter/](http://www.sparkmuseum.org/collections/electricity-sparks-invention-(1800-1900)/edison-chemical-meter/)>, acessado em 15.12.2016.
- [9] SADIKO, Matthew N. O.; ALEXANDER Charles K. **Fundamentos de Circuitos Elétricos;** Trad. Gustavo Guimarães Parma. Porto Alegre : Bookman, 2003.
- [10] IEEE. **Standard 1459-2010:** Sponsored by Power System Instrumentation and Measurements Committee. New York, 2010.
- [11] DINIZ, P. S. R. Processamento digital de sinais / Porto Alegre: Bookman, 2004.
- [12] PUHLMANN, Henrique; **Trazendo o mundo real para dentro do processador - Conversor A/D;** Disponível em <<https://www.embarcados.com.br/conversor-a-d/>>, acessado em 12.12.2016.
- [13] LIMA, Marcelo A. A.; **Desenvolvimento de um sistema de medidas em tempo real de tensão, corrente, potencia e energia conectado à porta paralela**

- do computador;** Viçosa (MG), 2007.
- [14] INMETRO. Portaria Inmetro nº 602, de 09 de novembro de 2012. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002054.pdf>> Acessado em 25/01/2017.
- [15] HÁJEK, Zdeněk; **MĚŘIČ SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE;** BRNO, 2011.
- [16] Ferreira, Bruno B.; Oliveira, Paulo V. A. **Transformadores de Medição e Proteção;** Curitiba, 2013.
- [17] Paula, Gilberto J. **Medidor de Energia Elétrica com Acesso Remoto;** Brasília, 2013.
- [18] ELO Sistemas Eletrônicos S.A. **Medidor Eletrônico de Energia Elétrica ELO.2113;** Abril de 2015.
- [19] VDEW-Lastenheft **Elektronische Lastgangzähler.** Versão 2.1.2, 07.11.2003.
- [20] ATmega328/P, Datasheet Complete. **ATMEL,** Atmel-42735B-ATmega328/P\_Datasheet\_Complete; 11/2016.
- [21] ADE7758, Datasheet. **Analog Devices,** Poly Phase Multifunction Energy Metering IC with Per Phase Information, revisão E; 2004-2011.
- [22] SACCO, Francesco. Comunicação SPI – Parte 1, disponível em <<https://www.embarcados.com.br/spi-parte-1/>> Acessado em: 10/2016.
- [23] Disponível em <<https://portuguese.alibaba.com/product-detail/split-core-current-transformer-100a-50ma-1345426826.html>>, acessado em 01/12/2016.
- [24] SCT-013, Datasheet, **HD,** Split-Core Current Transformer; acessado em 01/12/2016.
- [25] RMELETRONICA, disponível em <<http://rmeletronica.com.br/arquivos/resistor/6band.html>>. Acessado em 01/12/2016.
- [26] MSSELETRONICA, disponível em <<http://www.msseletronica.com/detalhes/teclado-de-5-teclas-com-saida-analogica-para-microcontrolado-/965.html>>. Acessado em 30/11/2016.
- [27] DS3231, Datasheet. **Maxim Integrated,** Extremely Accurate I2C-Integrated RTC/TCXO/Crystal, revisão 10; 2015.
- [28] POTENTIALLABS, disponível em <<http://potentiallabs.com/cart/buy-ds3231-rtc-module-hyderabad-online-india>>. Acessado em 30/11/2016.
- [29] THOMSEM, Adilson. **Controlando um LCD 16x2 com Arduino,** disponível em <<http://blog.filipeflop.com/display/controlando-um-lcd-16x2-com-arduino.html>>. Acessado em 10/11/2016.

- [30] Disponível em <<https://www.element14.com/community/community/arduino/blog/2013/11/05/finally-an-arduino-library-for-eagle>>. Acessado em 5/12/2016.
- [31] SILVA, Tarsicio. **Introdução ao Cadsoft Eagle.** Disponível em <<https://www.embarcados.com.br/tutorial-eagle-introducao>>. Acessado em 12/02/2017.
- [32] LEMOS, Manuel; **Como fazer suas próprias PCBs.** Disponível em <<http://blog.fazedores.com/como-fazer-suas-proprias-pcb-placas-de-circuito-impresso>>. Acessado em 01/02/2017.
- [33] FLUKE CORPORATIONS. **Fluke 434/435 Three Phase Power Quality Analyzer - Users Manual.** Manual. 2008. Rev. 3. 140 p.
- [34] LANDIS+GYR. **SGP+M III, Manual do Usuário, versão 00.** 06/01/2012. 132 p.