

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Odair José Iaronka

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
INTELIGENTE DE MONITORAMENTO DE ENERGIA
ELÉTRICA PARA RESIDÊNCIAS**

**Cachoeira do Sul, RS, Brasil
2019**

Odair José Iaronka

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA INTELIGENTE
DE MONITORAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA
RESIDÊNCIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso Apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Vargas Luz

**Cachoeira do Sul, RS, Brasil
2019**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Iaronka, Odair José

Projeto e desenvolvimento de um sistema inteligente de monitoramento de energia elétrica para residências / Odair José Iaronka - 2019

95 p.; 30 cm

Orientador: Paulo César Vargas Luz

TCC (graduado) – Universidade Federal de Santa Maria - Campus Cachoeira do Sul, Curso de Engenharia Elétrica, RS, 2019

1. Engenharia Elétrica 2. Medidor de energia 3. Multimedidor de energia 4. Automação residencial 5. Internet das coisas I. Vargas Luz, Paulo Cesar. II. Projeto e desenvolvimento de um sistema inteligente de monitoramento de energia elétrica para residências.

© 2019

Todos os direitos autorais reservados a Odair José Iaronka. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Rua Major Ouriques, Nº 2015, Bairro Santo Antônio, Cachoeira do Sul, RS, Brasil, CEP: 96506-296

Fone: (55) 99909-2087

Endereço Eletrônico: odair.iaronka@gmail.com

Odair José Iaronka

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA INTELIGENTE
DE MONITORAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA
RESIDÊNCIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso Apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 10 de Julho de 2019:

Paulo César Vargas Luz, Dr. (UFSM)
(Presidente/ Orientador)

Willian Dotto Vizzotto, Eng. (UFSM)

Felipe Loose, Me. (UFSM)

**Cachoeira do Sul, RS, Brasil
2019**

RESUMO

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA INTELIGENTE DE MONITORAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA RESIDÊNCIAS

AUTOR: ODAIR JOSÉ IARONKA

ORIENTADOR: PAULO CÉSAR VARGAS LUZ

Este trabalho apresenta o projeto e desenvolvimento de um multimedidor de energia elétrica inteligente aplicado a residências alimentadas em baixa tensão. Este multimedidor é proposto visando a obtenção de algumas características relacionadas ao consumidor. Essas características podem ser do tipo: consumo de energia em tempo real, padrão de consumo, cálculo do valor a ser pago, entre outras. Essas características podem vir a contribuir com a economia de energia elétrica, a qual faz-se necessária tendo em vista o aumento do preço da energia elétrica e a preservação dos recursos naturais. Com isso, para atender esses requisitos faz-se necessário a utilização de um medidor microcontrolado. Este medidor baseia-se na leitura dos sinais através dos sensores LV20-P e LA55-P que permitirão monitorar os sinais de tensão e corrente respectivamente. Os sinais de tensão e corrente após serem obtidos através dos sensores são condicionados por um circuito específico para fornecer um sinal compatível com a entrada do microcontrolador. Essas leituras condicionadas são processadas através de um microcontrolador da marca Arduino, modelo Mega 2560. O microcontrolador conectado com o celular através da tecnologia *bluetooth*, é capaz de disponibilizar todas as informações geradas por ele para interfaces criadas para o usuário. Além dessas vantagens, esse multimedidor é desenvolvido visando o controle do consumo de energia elétrica internamente a residência, não dispensando a utilização do medidor de energia da concessionária.

Palavras-chave: Automação residencial, Internet das coisas, Medição de energia elétrica, Multimedição inteligente.

ABSTRACT

**DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN
ELECTRIC ENERGY MONITORING SYSTEM
INTELLIGENT FOR RESIDENCIES.**

AUTHOR: ODAIR JOSÉ IARONKA
ADVISOR: PAULO CÉSAR VARGAS LUZ

This work presents the design and development of an intelligent electric power meter applied to homes energized at low voltage. This meter is used to measure characteristics in the consumer installation. These characteristics can be: real time energy consumption, consumption standard, estimation of the value of the energy bill, among others. These characteristics can contribute to electric energy savings and preservation of natural resources. To establish such characteristics, it is necessary to apply a microcontroller. This meter is based on the reading of the voltage and current signals in an analogous way through the sensors LV25-P and LA55-P. After reading these signals are conditioned and inserted into the inputs of the microcontroller. In the microcontroller the signals are converted to the digital form. The microcontroller is connected with the smartphone through Bluetooth technology. With this the multimeter is able to make available all the information generated by it for an application created for the user. Therefore, this meter was developed in order to control electrical energy internally the residence, does not excluding the conventional metering of houses. The conventional meter is used to charge electricity consumed in the residence by a distribution company.

Keywords: Home automation, Internet of things, Electric power measurement, Smart multimeter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	–	Conceito de residência inteligente.	14
Figura 2.2	–	Esquema básico de funcionamento da automação residencial.	15
Figura 2.3	–	Marco de nascimento da Internet das Coisas.	20
Figura 2.4	–	Placa de Arduino Uno.	22
Figura 2.5	–	Diagrama de diferenciação entre tipos de medidores de energia elétrica.	25
Figura 2.6	–	Sensor de corrente LA55-P (a) e sensor de corrente SCT013 (b).	27
Figura 2.7	–	Diagrama de medição de tensão com retificação.	27
Figura 2.8	–	Monitor de energia marca Smappee.	30
Figura 2.9	–	Monitor de energia marca GreenAnt.	30
Figura 2.10	–	Interface com o usuário do sistema desenvolvido pela Fox.	31
Figura 3.1	–	Diagrama do multimedidor proposto.	34
Figura 3.2	–	Display LCD utilizado.	34
Figura 3.3	–	Identificação dos recursos do Arduino Mega 2560.	36
Figura 3.4	–	Sensor LV25-P.	37
Figura 3.5	–	Circuito de acionamento do sensor LV25-P.	38
Figura 3.6	–	Comparação entre o sinal de entrada (Vrede plotado em (a)) e o sinal de saída do sensor (Vsensor plotado em (b)).	40
Figura 3.7	–	Circuito somador inversor.	40
Figura 3.8	–	Tensão de saída do circuito somador.	41
Figura 3.9	–	Estrutura do filtro passa baixa.	42
Figura 3.10	–	Circuito completo de condicionamento de tensão.	43
Figura 3.11	–	Saída do circuito de condicionamento de tensão (VMicro).	43
Figura 3.12	–	Sensor de corrente LA55-P.	44
Figura 3.13	–	Circuito de acionamento do sensor LA55-P.	45
Figura 3.14	–	Circuito completo de condicionamento de corrente.	45
Figura 3.15	–	Circuito utilizado para realização da simulação.	46
Figura 3.16	–	Resultado completo da simulação do circuito de condicionamento do sinal.	47
Figura 4.1	–	Esquemático do multimedidor montado.	48
Figura 4.2	–	Circuito do multimedidor montado em <i>protoboard</i>	49
Figura 4.3	–	Diagrama do circuito medidor de tensão.	49
Figura 4.4	–	Circuito de medição de tensão montado em <i>protoboard</i>	50
Figura 4.5	–	Tensão da rede - Vrede (Ch1 - 100V/div) e Tensão de saída do condicionamento - VMicro (Ch2 - 2V/div) - 10ms/div.	51
Figura 4.6	–	Tensão da rede - Vrede (Ch1 - 100V/div) e Tensão de saída do sensor - VSensor (Ch2 - 2V/div) - 10ms/div.	51
Figura 4.7	–	Tensão após o somador - VPreFiltro (Ch1 - 2V/div) e Tensão de saída do sensor - VSensor (Ch2 - 2V/div) - 10ms/div.	52
Figura 4.8	–	Tensão após o somador - VPreFiltro (Ch1 - 2V/div) e Tensão de saída do condicionamento - VMicro (Ch2 - 2V/div) - 10ms/div.	53
Figura 4.9	–	Diagrama do circuito medidor de corrente.	54
Figura 4.10	–	Circuito de medição de corrente montado em <i>protoboard</i>	54
Figura 4.11	–	Diagrama de medição de corrente no circuito resistivo.	55
Figura 4.12	–	Corrente do circuito - IRede (Ch1 - 1A/div) e Tensão de saída do sensor - VSensor (Ch2 - 1V/div) - 10ms/div.	56
Figura 4.13	–	Tensão após o somador - VPreFiltro (Ch1 - 1V/div) e Tensão de saída do sensor - VSensor (Ch2 - 1V/div) - 10ms/div.	56

Figura 4.14 – Tensão após o somador - VPreFiltro (Ch1 - 1V/div) e Tensão de saída do condicionamento - VMicro (Ch2 - 1V/div) - 10ms/div.	57
Figura 4.15 – Corrente de entrada do sensor - IRede (Ch1 - 1A/div) e Tensão de saída do condicionamento - VMicro (Ch2 - 1V/div) - 10ms/div.	58
Figura 4.16 – Diagrama de medição de corrente no circuito indutivo.	58
Figura 4.17 – Corrente de entrada do motor - IMotor (Ch1 - 200mA/div) e Tensão de entrada do motor - VMotor (Ch2 - 100V/div) - 10ms/div.	59
Figura 4.18 – Corrente de entrada do motor com acoplamento CC - IMotor (Ch1 - 200mA/div) e Tensão de saída do circuito de condicionamento - VMicro (Ch2 - 1V/div) - 10ms/div.	60
Figura 4.19 – Corrente de entrada do motor com acoplamento CA - IMotor (Ch1 - 200mA/div) e Tensão de saída do circuito de condicionamento - VMicro (Ch2 - 100mV/div) - 10ms/div.	60
Figura 4.20 – Diagrama de medição de corrente no circuito com carga não linear.	61
Figura 4.21 – Corrente de entrada das lampadas com acoplamento CC - IRede (Ch1 - 200mA/div) e Tensão de saída do circuito de condicionamento - VMicro (Ch2 - 1V/div) - 10ms/div.	62
Figura 4.22 – Corrente de entrada das lampadas com acoplamento CA - IRede (Ch1 - 200mA/div) e Tensão de saída do circuito de condicionamento - VMicro (Ch2 - 200mV/div) - 10ms/div.	62
Figura 4.23 – Diagrama do circuito do microcontrolador.	63
Figura 4.24 – Fluxograma de funcionamento do código programado no microcontrolador.	64
Figura 4.25 – Medidas de tensão (a) e corrente (b) para uma carga resistiva	68
Figura 4.26 – Medidas realizadas pelo circuito do multimedidor (Tensão (V) em Volts, corrente (I) em Amperes e potência (P) em Watts) para uma carga resistiva.	68
Figura 4.27 – Medidas de tensão (a) e corrente (b) para uma carga indutiva.	69
Figura 4.28 – Medidas realizadas pelo circuito do multimedidor (Tensão (V) em Volts, corrente (I) em Amperes e potência (P) em Watts) para uma carga indutiva.	69
Figura 4.29 – Medidas de tensão (a) e corrente (b) para uma carga não linear.	70
Figura 4.30 – Medidas realizadas pelo circuito do multimedidor (Tensão (V) em Volts, corrente (I) em Amperes e potência (P) em Watts) para uma carga não linear.	70
Figura 4.31 – Circuito completo do multimedidor implementado.	72
Figura 4.32 – Visão interna do protótipo do multimedidor desenvolvido.	73
Figura 4.33 – Visão externa do protótipo do multimedidor desenvolvido.	73
Figura 4.34 – Diagrama do circuito de comunicação.	74
Figura 4.35 – Aplicativo desenvolvido para visualização dos dados.	75
Figura 4.36 – Resposta do protótipo visualizada no <i>display</i> em (a) e no aplicativo em (b) para uma carga resistiva.	75
Figura 4.37 – Resposta do protótipo visualizada no <i>display</i> em (a) e no aplicativo em (b) para uma carga indutiva.	76
Figura 4.38 – Resposta do protótipo visualizada no <i>display</i> em (a) e no aplicativo em (b) para uma carga não linear.	77
Figura B.1 – Programação aplicativo para conexão <i>bluetooth</i>	92
Figura B.2 – Programação aplicativo para demonstração dos dados.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	–	Comparação entre a resposta dos circuitos sensores utilizados e os valores calculados de tensão	77
Tabela 4.2	–	Comparação entre o sensor utilizado e o valor calculado para carga resistiva.....	78
Tabela 4.3	–	Comparação entre o sensor utilizado e o valor calculado para carga indutiva	78
Tabela 4.4	–	Comparação entre o sensor utilizado e o valor calculado para carga não linear	78
Tabela 4.5	–	Resultados de potência média dos circuitos.....	79
Tabela C.1	–	Memorial descritivo dos componentes do circuito completo.....	94

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A – Programação do microcontrolador	86
Apêndice B – Programação do aplicativo	92
Apêndice C – Memorial descritivo dos componentes	94

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS GERAIS	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL	14
2.1.1 Conceito de automação residencial	14
2.1.2 História da automação residencial	15
2.1.3 Importância e aplicações da automação residencial	16
2.1.3.1 Segurança	16
2.1.3.2 Conforto	17
2.1.3.3 Economia	17
2.1.3.4 Acessibilidade	18
2.1.3.5 Entretenimento	18
2.1.3.6 Informatização residencial	18
2.1.4 Conclusão parcial	18
2.2 INTERNET DAS COISAS (IoT)	19
2.2.1 História da internet das coisas	19
2.2.2 Conceitos e definições	20
2.2.3 Tecnologia IoT	21
2.2.3.1 Redes e protocolos de comunicação	21
2.2.3.2 Dispositivos	22
2.2.3.3 Sistemas de controle	22
2.2.4 Conclusão parcial	23
2.3 MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	23
2.3.1 Conceito de energia	23
2.3.2 Importância de um medidor de energia elétrica	23
2.3.3 Princípio de funcionamento de um medidor de energia elétrica	24
2.3.3.1 Circuito de medição de corrente	26
2.3.3.2 Circuito de medição de tensão	27
2.3.3.3 Aquisição e manipulação dos dados	28
2.3.3.4 Interface de comunicação	28
2.3.3.5 Gateway	28
2.3.3.6 Banco de dados	28
2.3.3.7 Interface de visualização	29
2.3.4 Multimedidores existentes	29

2.3.5 Conclusão parcial	31
3 METODOLOGIA	33
3.1 PROJETO	33
3.1.1 Visor mostrador	34
3.1.2 Microcontrolador	35
3.1.2.1 <i>Arduino Mega 2560</i>	35
3.1.3 Medição de tensão	37
3.1.3.1 <i>Sensor LV25-P</i>	37
3.1.4 Medição de corrente	44
3.1.4.1 <i>Sensor LA55-P</i>	44
3.2 SIMULAÇÃO	46
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	48
4.1 CIRCUITO MEDIDOR DE TENSÃO	49
4.2 CIRCUITO MEDIDOR DE CORRENTE	53
4.2.1 Carga resistiva	55
4.2.2 Carga indutiva	58
4.2.3 Carga não linear	61
4.3 CÓDIGO MICROCONTROLADOR	63
4.3.1 Conversão analógico/digital e valor instantâneo	65
4.3.2 Cálculo da potência instantânea e valor médio	65
4.3.3 Cálculo do valor RMS	66
4.3.4 Cálculo da energia elétrica consumida e do valor a ser pago	66
4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE POTÊNCIA	67
4.4.1 Carga resistiva	67
4.4.2 Carga indutiva	68
4.4.3 Carga não linear	69
4.5 MONTAGEM DO PROTÓTIPO	70
4.5.1 Sistema de comunicação	74
4.5.2 Análise da potência com o protótipo	75
4.6 CONCLUSÃO PARCIAL	77
5 CONCLUSÃO	80
5.1 TRABALHOS FUTUROS	81
REFERÊNCIAS	82
APÊNDICES	85

1 INTRODUÇÃO

Em nível mundial, a energia elétrica impulsiona a tecnologia e os serviços que por consequência aumenta a qualidade de vida das pessoas. A disponibilidade de energia promove a expansão da indústria, a modernização da agricultura, a ampliação do comércio e a melhoria dos transportes, contribuindo com o crescimento econômico, gerando novos empregos e no desenvolvimento humano.

A economia de energia elétrica é, e sempre foi, uma necessidade. De junho de 2017 a junho de 2018, o valor da energia elétrica sofreu um aumento de 25,7% (YOSHINAGA, 2019). Dessa forma, surge a obrigação da população a economizar para poder ter um controle no orçamento familiar. A questão ecológica é outro fator que vem obrigando a economia de energia, já que as fontes não renováveis já não são tão abundantes como anos atrás e geram um grande impacto ambiental, muitas vezes prejudicando a flora, a fauna e os ecossistemas como um todo. Dessa forma, se faz necessário a implantação de tecnologias que mitiguem esses efeitos, como por exemplo, a geração solar fotovoltaica, que pode ser instalada próxima aos pontos de consumo e tem menores impactos ambientais. Esses investimentos visam aumentar a produtividade e a competitividade das indústrias, e visam também a diminuição dos custos com o consumo de energia elétrica nas residências.

Neste cenário, esse trabalho de conclusão de curso se trata de um projeto e desenvolvimento de um multimedidor de energia elétrica microcontrolado. Ele será responsável por medir o consumo de uma residência ou de um circuito específico, apresentando seu consumo de energia em Wh em tempo real, cálculo da conta de energia em tempo real, entre outras características.

Já existem sistemas que executam o monitoramento em tempo real que serão utilizados como base nesse estudo. Tendo isso em vista o sistema desenvolvido apresenta o consumo de energia elétrica em tempo real, ainda apresenta a energia consumida acumulada, bem como uma estimativa da conta de energia a ser paga pelo consumidor. Todas essas informações são disponibilizadas em um *display* para visualização rápida e também a um aplicativo para smartphone, o qual se comunica com o multimedidor através da tecnologia *bluetooth*.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Projetar e implementar um sistema de monitoramento de energia elétrica para residências buscando a maior transparência do consumo de energia e por consequência economia de energia elétrica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Tem como objetivos específicos:

- Pesquisar os sistemas de medição de consumo de energia elétrica existentes no mercado;
- Definir características pertinentes a esse trabalho;
- Gerar informações para o usuário sobre seu consumo de energia elétrica;
- Demonstrar uma alternativa que contribua para a conscientização do consumo de energia elétrica;
- Incentivar a inclusão a alternativas tecnológicas.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho se divide em 5 capítulos onde cada um deles é composto por:

Capítulo 1 - Introdução com apresentação do tema proposto, problemas, objetivo geral, objetivos específicos, justificativa e metodologia.

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica com o estudo da importância do monitoramento do consumo de energia residencial. Conhecendo a automação residencial, internet das coisas e tecnologias já existentes no mercado para a medição.

Capítulo 3 - Metodologia de projeto do sistema implementado.

Capítulo 4 - Resultados experimentais detalhados obtidos a partir da pré-implementação do sistema e discussões dos resultados.

Capítulo 5 - Conclusões e desenvolvimentos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL

Nesse capítulo será apresentado um cronograma histórico da automação residencial, os principais conceitos, assim como o funcionamento, os componentes que podem ser utilizados e a importância da implementação da automação em uma residência.

2.1.1 Conceito de automação residencial

Em uma residência, seja ela casa, apartamento, entre outros meios de moradia, existem ações que podem ser tomadas de forma automática (SILVA, 2009). Nesse sentido entra o conceito de automação residencial.

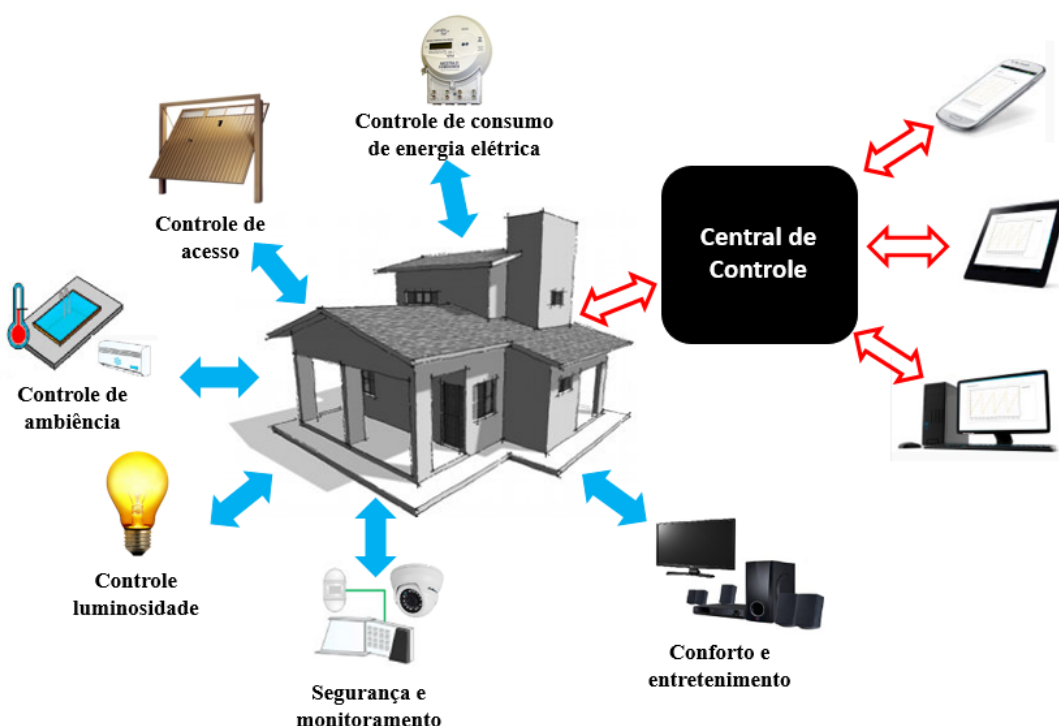
A automação residencial, também conhecida pela palavra domótica, é originada do francês *domotique* que significa "casa automática". Conceitualmente domótica é a automatização e o controle aplicados à residência. Isso se realiza mediante ao uso de equipamentos que possuem capacidade de se comunicar interativamente entre eles e capacidade de seguir instruções de um programa previamente estabelecido pelo seu usuário, podendo ser modificado a qualquer momento. Em consequência, a domótica substitui o trabalho humano. Uma das principais vantagens de utilizar esses sistemas é a possibilidade da expansão quase que ilimitada dos recursos e funcionalidades (CASTRUCCI, 2007; MURATORI, 2015; GOMES, 2016; QUINDERE, 2009; PITON, 2017; BOLZANI, 2004). Quando em uma residência são utilizados dispositivos capazes de se comunicarem entre eles e com outros dispositivos, dizemos que estes dispositivos e consequentemente a residência se tornaram "inteligentes". O diagrama que representa esta mudança em uma residência convencional está representado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Conceito de residência inteligente.



Com a domótica ocorre uma mudança radical no funcionamento da instalação. A informação fornecida por qualquer sensor está a disposição através de uma rede interna a habitação. Dessa forma esta informação está disponível para ser manipulada remotamente a qualquer momento com a utilização de smartphones, computadores, tablets, entre outros (PRUDENTE, 2011). Na Figura 2.2 temos o esquema de conexão entre os principais componentes de uma automação residencial. Nesse caso a central de controle entra como uma caixa preta significando a utilização de diversos tipos de controladores para o sistema.

Figura 2.2 – Esquema básico de funcionamento da automação residencial.



Fonte: Autor.

2.1.2 História da automação residencial

A automação residencial é algo que nessa década vem quebrando os paradigmas sobre o uso dessa tecnologia. O que no século passado era algo direcionado apenas a pessoas da classe economicamente alta, hoje já se torna mais popular. Quando na década de 70 que a tecnologia começou a se desenvolver, foram criados nos Estados Unidos (EUA) os primeiros equipamentos que possuíam "inteligência". Estes que recebiam os comandos pela própria rede de energia elétrica, conceito esse chamado de PLC (*Power Line Carrier*). O funcionamento era simples e resolviam situações pontuais, como o acionamento remoto de lâmpadas e eletrodomésticos, e eram destinados a atender às pessoas com necessidades especiais (MURATORI, 2015).

Na década de 90 algumas residências americanas tinham acesso a essa tecnologia, fazendo com que a automação residencial se tornasse mais popular. Porém, foi apenas nos anos 2000 que o Brasil começou a implantação em residências de alto padrão, mas ainda com bastante dificuldade pela falta de mão de obra qualificada e alto custo de aquisição e manutenção dos equipamentos.

Com o surgimento de computadores, telefones móveis, internet e outros meios, a tecnologia residencial começou a ter maior aceitação e procura, fazendo com que as pessoas comecem a se especializar na área e assim surgem as chamadas "casas inteligentes" (MURATORI, 2015; ROVERI, 2012; GOMES, 2016).

Atualmente percebe-se o uso da automação residencial mais presente na vida das pessoas, segundo a Associação Brasileira de Automação Residencial e Predial (AURESIDE) existe um potencial atual para o fornecimento de equipamento de cerca de 1,8 milhão de residências. Estima-se que no Brasil cerca de 300 mil residências já possuam equipamentos de automação. O interesse dos brasileiros em possuir automação em suas residências é de 78%, no mundo o interesse fica em torno de 68% (AURESIDE, 2018).

2.1.3 Importância e aplicações da automação residencial

Um dos conceitos simplificados de automação residencial é um sistema que substitua ou facilite o esforço muscular e mental humano, realizando as atividades até então atribuídas ao homem, de forma automática. Para realização dessas atividades alguns dispositivos são pré-programados, e proporcionam alguns benefícios à residência, dentre eles: Segurança, Conforto, Economia, Acessibilidade, Entretenimento e Informatização residencial (SILVA, 2009).

2.1.3.1 Segurança

Podemos considerar a segurança como sendo um foco importante dos crescentes estudos na área da automação residencial. A proteção do patrimônio das pessoas engloba diversos recursos, tais como:

1. Monitoramento de ambientes através de imagens, podendo essas imagens serem acessadas de qualquer lugar via internet;
 - Simulação da presença de moradores no interior da residência, através do acionamento de lâmpadas e som;
2. Controle de acessos;
3. Acionamento de alarme ocasionado por invasões;

4. Alarme de vazamentos e incêndio.

No assunto da segurança o que a partir dos anos 2000 vem sendo mais procurado são os sistemas de alarmes e sistemas de vídeo monitoramento. Em ambas as soluções, a visualização das imagens em tempo real se torna um importante aliado.

Opções de segurança contra fatores que não envolvam ações humanas também merecem destaque, com o investimento em sensores de fumaça para a defesa contra incêndios ou acidentes que envolvam vazamentos de gás ou água (SILVA, 2009).

2.1.3.2 *Conforto*

Outro importante papel da automação residencial é ajudar de forma precisa e eficiente nas atividades diárias de casa. Conforme a necessidade, equipamentos podem ser programados através de horários ou de sensores a tomarem decisões e substituir o trabalho do homem, assim gerar conforto às pessoas. Alguns exemplos, de como a automação pode gerar conforto aos ocupantes são:

1. Acionamento automático da iluminação através de sensores ou em horários programados;
2. Controle da intensidade luminosa conforme mudança de iluminação externa;
3. Ajuste prévio da temperatura de um ambiente, de acordo com os desejos dos ocupantes;
4. Abertura e fechamento de cortinas e/ou persianas;
5. Controle de sistemas de irrigação em jardim, utilizando sensores de umidade;
6. Manutenção da qualidade da água em piscinas.

A iluminação é uma das áreas da automação mais procurados e que possui maior simplicidade na implementação. Este controle proporciona comodidade e beleza estética em uma residência, além de economia de energia elétrica (SILVA, 2009).

2.1.3.3 *Economia*

Monitorar o consumo de água, gás, energia elétrica, entre outras fontes, representa uma valiosa funcionalidade quando se fala em automação residencial. A medição e o monitoramento em tempo real de energia elétrica, por exemplo, é de extrema importância em uma residência, possibilitando o uso racional dos recursos e gerando economia. Com a

medição e o monitoramento o usuário pode controlar suas ações a todo momento, fazendo com que suas tomadas de decisões possam evitar acidentes e desperdícios de energia. Além disso podem ser estimados perfis de consumo das residências, e o cálculo do valor final da tarifa de energia elétrica, podendo conferir com o valor gerado pelas concessionárias de distribuição de energia.

2.1.3.4 *Acessibilidade*

Em ambientes onde existam pessoas com necessidades especiais ou idosos, a automação residencial entra como uma ferramenta muito importante para facilitar a vida dessas pessoas. Sistemas que são comandados por voz, chaves de toque (*touch pad*), entre outros equipamentos, são exemplos de dispositivos que auxiliam nas necessidades dessas pessoas.

2.1.3.5 *Entretenimento*

Outro benefício procurado por pessoas na automação residencial é o entretenimento. Nesse caso o sistema de automação age de forma programada para trazer satisfação e conforto aos seus usuários. Alguns exemplos de utilização da automação residencial como entretenimento é nos dispositivos de áudio, vídeo, TV por assinatura, internet, *home theater*, etc.

2.1.3.6 *Informatização residencial*

Com a crescente utilização de equipamentos de informática, computadores, celulares, impressoras e notebooks estão cada vez mais presentes nas residências contemporâneas. Esses equipamentos estão conectados a uma mesma rede de comunicação local. Essa interconectividade torna usual o acionamento e comunicação entre diversos dispositivos. Essa troca de informação concretiza a automação residencial moderna.

2.1.4 Conclusão parcial

Conhecido a história da automação residencial, os principais conceitos, assim como o funcionamento, os componentes que podem ser utilizados, podemos notar a importância que a automação residencial vem tomando nas últimas duas décadas. Podemos perceber que muitas tarefas realizadas em nossa residência podem ser automatizadas e monitoradas,

trazendo, principalmente, mais conforto, segurança e economia às pessoas que ali habitam. Tendo em vista o monitoramento de alguma fonte de energia da residência, podemos perceber que o desperdício é evitado e conseqüentemente existe a economia do recurso, também fornecer informações que possibilitam determinar a forma como essa energia é consumida. Para que esse sistema de monitoramento exista faz-se necessário a utilização de dispositivos conectados à rede de internet.

2.2 INTERNET DAS COISAS (IOT)

Nesse capítulo apresenta-se a história da internet das coisas, assim como sua evolução. Totalmente atrelada à automação residencial, apresenta-se também o conceito e as principais partes que compõem esse sistema.

2.2.1 História da internet das coisas

A história da internet das coisas (IoT do inglês *Internet of Things*) surge muito antes da internet. Se inicia na Segunda Guerra Mundial, com a utilização da identificação por radiofrequência (RFID do inglês *Radio Frequency Identification*). A identificação por radiofrequência é um método de identificação automática através de sinais por frequência de rádio. Nos anos de 1940 essa comunicação era utilizada durante a Segunda Guerra Mundial para identificar se o avião captado pelo radar era amigo ou inimigo, diferenciando assim, os grupos envolvidos na batalha.

Na década de 1970 foram desenvolvidas algumas outras aplicações. O empreendedor californiano Charles Walton desenvolveu um sistema de controle de acesso, baseado em radiofrequência, ao aproximar um cartão em uma porta, a porta abria-se automaticamente. Também nessa época o governo norte-americano desenvolveu pesquisas para identificar equipamentos militares. Também nesse estudo teve por finalidade o rastreamento do gado e o controle da medicação nos mesmos (FACCIONI, 2016).

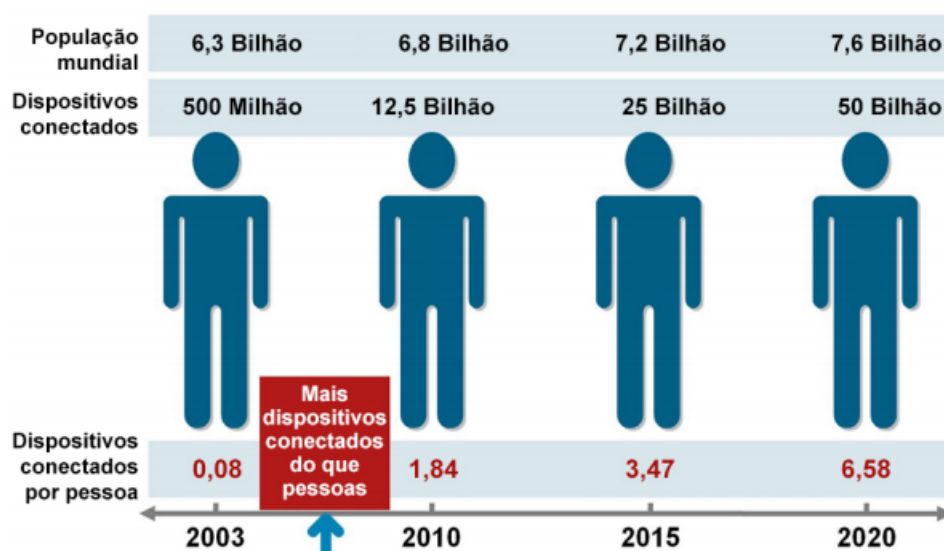
Em 1990 John Romkey criou o primeiro dispositivo conectado à internet (MANCINI, 2017). Esse dispositivo se tratava de uma torradeira que poderia ser ligada e desligada pela internet, considerado sem aplicação prática na época, pois o pão deveria ser colocado manualmente.

Até que em 1999 o termo "Internet das Coisas" é mencionado pelo cofundador e diretor do grupo de pesquisa Auto-ID Center Kevin Ashton em uma entrevista ao jornal RFID journal. Ashton apresentou uma nova ideia de RFID para a aplicação em rastreamento de produtos na cadeia de suprimentos. Para Ashton, os objetos do mundo físico poderiam se conectar à internet, criando um mundo mais inteligente. Kevin Ashton foi

considerado o criador do termo "Internet das Coisas (IoT)" (ASHTON, 2009; MANCINI, 2017).

Em 2005 nos Estados Unidos (EUA) foram exigidos aos fornecedores que utilizassem RFID nos pacotes de seus produtos para o controle de estoque, esse foi considerado o marco inicial do conceito de Internet das Coisas. Entre 2008 e 2009 foi o momento que, conforme a Figura 2.3 haviam mais objetos conectados à internet do que a população mundial, nesse período é considerado como sendo o nascimento da Internet das Coisas. Além disso o mesmo estudo prevê que até 2020 cerca de 50 bilhões de dispositivos estejam conectados à internet (ENERGIA, 2015).

Figura 2.3 – Marco de nascimento da Internet das Coisas.



Fonte: (EVANS, 2011).

2.2.2 Conceitos e definições

O termo Internet das Coisas possui alguns significados diferentes. Inicialmente, a "Internet" se refere a um conceito já conhecido de rede de comunicação de dados, em segundo "Coisas" abrange uma quantidade imensa de objetos genéricos que farão parte de uma rede preestabelecida.

Na última década são muitos os equipamentos que estão (ou estarão) conectados entre si por uma rede. Estes equipamentos podem ser eletrodomésticos, óculos, carros, entre outros. Com a evolução da microeletrônica e dos protocolos de comunicação sem fio, surgiu a necessidade de anexar tudo em uma única tecnologia, com o intuito de facilitar a comunicação. O principal benefício dessa comunicação entre equipamentos é deixar a vida do homem mais fácil, rápida e conectada (SINGH, 2015).

Assim, internet das coisas é, basicamente uma extensão do conceito de internet atual, que tem por objetivo conectar objetos do dia a dia à internet para serem monitorados e controlados. Um exemplo é você estar no trabalho e ter ciência e controle do que está acontecendo em sua casa através de um aplicativo de celular, podendo controlar temperatura, acessar câmeras de monitoramento, acesso em tempo real do consumo de energia elétrica da instalação da residência, entre outros (SILVA, 2017).

2.2.3 Tecnologia IoT

Internet das coisas não se trata de uma tecnologia única, mas sim de um aglomerado de conceitos que, juntos, constituem a IoT. Basicamente existem três grandes pilares que compõe a base da internet das coisas, são eles: redes, dispositivos e sistemas de controle.

2.2.3.1 Redes e protocolos de comunicação

As redes de comunicação são a parte mais importante da internet das coisas. É através das redes que os dispositivos "conversam", ou seja, a troca de informações. A informação normalmente circula por essas redes na forma digital *bits*. Cada rede obedece um protocolo de comunicação que coordena e assegura a troca de informações. Alguns dos principais protocolos são:

- Ethernet: é uma arquitetura de interconexão para redes locais (LAN). Presente em grande parte das redes de computadores atuais, tem como princípio de funcionamento a utilização de uma mesma rede para a conexão de todos os dispositivos. Sendo assim o envio da informação desejada só é efetuado caso a linha estiver desocupada. É baseada em cabos, por isso sua limitação se dá pelo alcance da rede e de que os dispositivos não possuem mobilidade(SILVA, 2017).
- Wi-Fi: está entre as tecnologias de comunicação mais utilizadas na última década, uma em cada quatro residências do mundo possui conexão Wi-Fi. É a rede utilizada por dispositivos que pertencem a classe de rede local sem fio (WLAN). A alta distância de alcance é um ponto positivo nessa tecnologia, a mobilidade dos dispositivos conectados a essa rede é livre, além da taxa de transmissão de dados sendo de 100 a 1300Mbps, dependendo do protocolo(SILVA, 2017).
- ZigBee: se trata de um padrão de conexão sem fio utilizada em aplicações simples que não possuem grande demanda de transferência de dados, os quais ela se limita 250Kbps. Se destaca pelo baixo consumo de energia comparado com Wi-Fi e Bluetooth. O alcance também é pequeno e se limita a aproximadamente a

100metros(SILVA, 2017).

- Bluetooth: é um protocolo de comunicação usado para interligar periféricos próximos sem a utilização de cabos. O Bluetooth é uma rede de curta distância, utilizado em computadores, celulares e fones de ouvido(SILVA, 2017).
- 3G/4G/5G: representam as últimas três gerações de redes para telefonia móvel. O aumento dos dispositivos móveis nas últimas décadas, elevou por consequência as redes de conexão móvel. Possui como benefício altas distancias alcançadas pela rede(SILVA, 2017).

2.2.3.2 Dispositivos

Os dispositivos que podem ser conectados entre si através de uma rede, responsáveis pela automatização de uma residência vão desde pequenos itens como relógios, lâmpadas e câmeras a objetos grandes que estão presentes no nosso cotidiano como carros, geladeiras ou qualquer tipo de eletrodoméstico. Para que isso seja possível, basta estes dispositivos possuírem tecnologia para a comunicação.

2.2.3.3 Sistemas de controle

Sistema tem por definição a combinação de componentes que agem em conjunto para atingir determinado objetivo. O cérebro de um sistema de controle é o microcontrolador, o qual tem a função de processar, salvar e gerar respostas adequadas com as informações obtidas por meio de sensores. Existem no mercado uma grande variedade de microcontroladores com as mais variadas descrições e capacidades. Um exemplo bastante popular no meio acadêmico é o Atmel AVR que vem embutido na plataforma de prototipagem Arduino Uno, o qual podemos visualizar na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Placa de Arduino Uno.



Fonte: (ARDUINO, 2018).

2.2.4 Conclusão parcial

Tendo conhecido a tecnologia de Internet das Coisas, podemos destacar a importância desse termo na evolução da automação residencial, desde pequenas atividades como ligar uma lâmpada, até como monitorar e tomar decisão relacionado ao consumo de energia elétrica. Estes projetos são possíveis tendo em vista a quantidade de dispositivos conectados à rede de internet e facilidade em conecta-los à mesma. Com todos esses conceitos como podemos fazer, para monitorar o consumo de energia elétrica em uma residencia em tempo real ou próximo disso?

2.3 MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Nesse capítulo, são apresentados os conceitos de energia elétrica, também os dispositivos para mensurar tal variável. É apresentado o funcionamento de um medidor de energia elétrica convencional, o funcionamento de um medidor inteligente e, por fim, o funcionamento de um multimedidor de energia elétrica. Alguns sistemas disponíveis para monitoramento de consumo de energia elétrica existentes atualmente são exemplificados.

2.3.1 Conceito de energia

Cada estabelecimento, seja ele comercial ou residencial, possui um método de mensurar o consumo de energia elétrica. Para entender melhor como funciona essa medida, basta observar a Equação 2.1. A definição mais simples para energia é a potência consumida por alguma carga em um período de tempo específico (SILVEIRA, 2016).

$$Energia(E) = Potência(P) \times Tempo(T) \quad (2.1)$$

Por exemplo, se 1000 Watts (1 kilowatt) de potência foram consumidos por alguma carga continuamente durante 1 (uma) hora, então dizemos que "1 unidade de Energia" foi consumida neste intervalo de tempo. Temos então a definição de 1 kilowatt por hora como sendo 1 kilo-watt-hora (kWh). Para realização da quantidade de unidades que uma carga consome são utilizados medidores de energia elétrica.

2.3.2 Importância de um medidor de energia elétrica

O medidor de energia elétrica é o componente mais importante para as empresas fornecedoras de eletricidade, pois ele desempenha papel fundamental na receita dessas cor-

porações. Além da importância para as empresas de energia, os medidores se constituídos de ferramentas adequadas, podem trazer várias vantagens para o consumidor. Além de capturar as unidades de energia, o medidor pode registrar algumas informações importantes para análise da qualidade de energia. As informações registradas pelos medidores de energia podem ser utilizadas para:

- Controle de carga;
- Gerenciamento de carga conforme períodos de demanda;
- Distribuição tarifária;
- Indicadores de perda ou roubo de energia elétrica;
- Auditoria energética.

2.3.3 Princípio de funcionamento de um medidor de energia elétrica

Existem diversos tipos de medidores de energia elétrica com várias formas de funcionamento. Aqui não trataremos de medidores do tipo disco, que apesar de estarem instalados em muitos estabelecimentos, são considerados ultrapassados (SILVEIRA, 2016).

Muito mais que uma medição precisa, a medição eletrônica é a porta de entrada para a criação de um canal de comunicação em tempo real com o consumidor (FUGITA, 2014). Nesse sentido entra o medidor de energia inteligente (do inglês *smart meter*). Se trata de um avançado medidor que tem a função de mensurar consumo de energia elétrica de um consumidor e fornecer informações adicionais em tempo real, além do consumo, ângulo de fase, valores de tensão, corrente, frequência, entre outros. Além disso através do acesso remoto algumas decisões podem ser tomadas, sem a necessidade de deslocar alguém até o local (N WANG L, 2011).

Alguns benefícios do uso da medição inteligente para o consumidor são (ENERGIA, 2015):

- Gestão online do consumo;
- Redução de tempo inativo (em caso de interrupção de fornecimento);
- Automação residencial;
- Energia pré-paga.

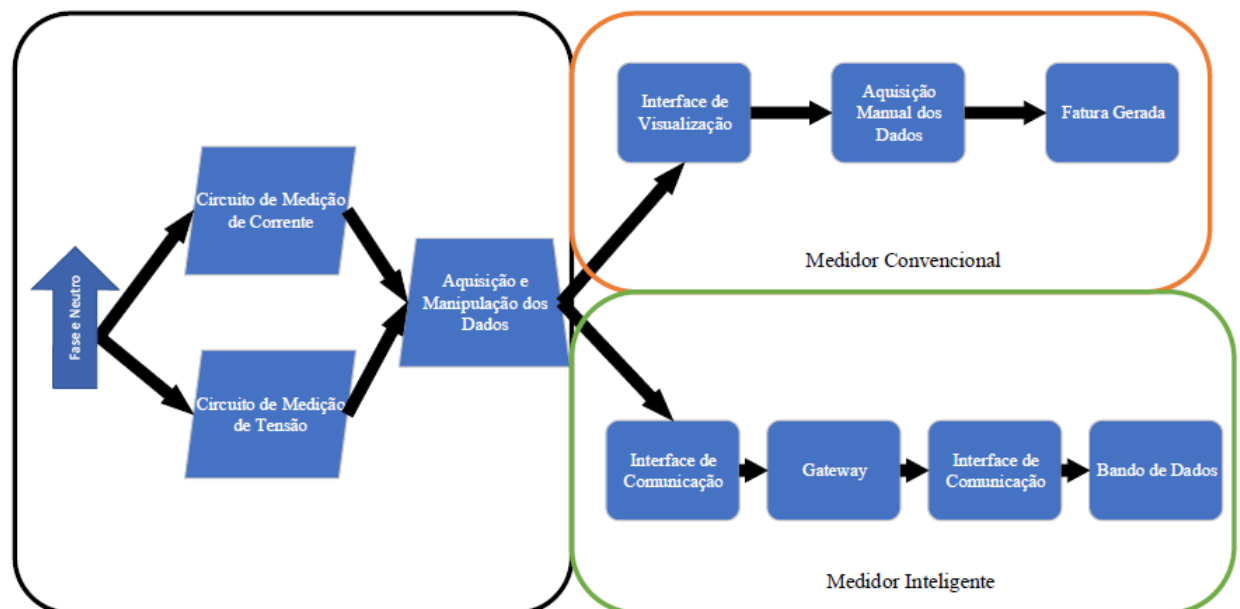
Já os benefícios para a concessionária de energia elétrica são:

- Controle online do consumo de energia nos estabelecimentos;

- Corte/religamento remoto;
- Tarifação horo sazonal;
- Detecção de fraudes;
- Perfil de carga online;
- Melhor interação com o consumidor.

Sendo assim, iniciaremos pelo princípio de funcionamento dos medidores digitais e inteligentes. A Figura 2.5 mostra, de forma simplificada, a estrutura de um medidor de energia elétrica convencional comparado com a estrutura de um medidor inteligente.

Figura 2.5 – Diagrama de diferenciação entre tipos de medidores de energia elétrica.



Fonte: Autor.

Já podemos perceber que os medidores de energia têm um grande papel no monitoramento do desempenho e das características de carga na rede. Nesse mesmo sentido surgem os Multimeditores de energia elétrica que possuem basicamente as mesmas características de um medidor inteligente, salvo a aplicação de normas para tal aplicação.

Multimeditores se baseiam em circuitos eletrônicos compostos de conversores A/D (analógico/digital) que convertem os sinais de tensão e corrente em sinais digitais. Já com os sinais adequados microprocessadores (ou microcontroladores) são aplicados para realizar os cálculos matemáticos das características elétricas. Dependendo da tecnologia empregada na medição e no processamento dos sinais um multimetedor pode ter maior

ou menor precisão. Assim como o medidor inteligente o multimedidor é constituído de circuito de medição de corrente, circuito de medição de tensão, um circuito de aquisição e manipulação dos dados, interface de comunicação e uma interface para demonstração dos dados. Estes medidores são comumente instalados em centros de distribuição no interior das residências, com o intuito de medição paralela a medição da entrada de energia da residência. As partes que constituem esse tipo de medidor serão detalhadas a seguir.

2.3.3.1 Circuito de medição de corrente

Existem diversas maneiras de medir corrente elétrica, e para isso, vários tipos de sensores estão disponíveis no mercado. Para medir corrente o sensor deve ser instalado em série com a carga. Um equipamento bastante utilizado é o transformador de corrente, que baseado no efeito Hall converte um valor de corrente em um valor menor para utilização no medidor (SILVEIRA, 2016). O princípio fundamental de efeito Hall é o chamado força de Lorentz:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.2)$$

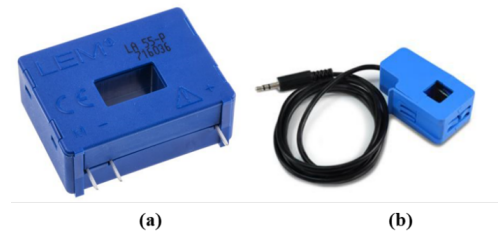
Em que F é a força de Lorentz, q é a magnitude da carga dos transportadores de carga e B é o campo magnético. Em resposta à força F , os elétrons movem-se em uma trajetória curva ao longo do condutor formando uma carga, e conseqüentemente uma tensão, a tensão Hall, que pode ser calculada em função da corrente pela seguinte equação:

$$V_H = \frac{IB}{\rho_n q t} \quad (2.3)$$

Sendo V_H a tensão de Hall, I a corrente, ρ_n o número de cargas por unidade de volume, t a espessura do condutor, q é a magnitude da carga dos transportadores de carga e B é o campo magnético (JUNIOR, 2017).

Dois exemplos de sensores de corrente são os representados na Figura 2.6. O sensor da marca LEM (a) do modelo LA55-P é um sensor de efeito hall com uma melhor precisão se comparado ao sensor da marca YHDC modelo SCT013 (b) também de efeito hall. A única vantagem do sensor SCT013 é de não ser invasivo, ou seja, não necessita alterar as características do sistema para efetuar a medida.

Figura 2.6 – Sensor de corrente LA55-P (a) e sensor de corrente SCT013 (b).

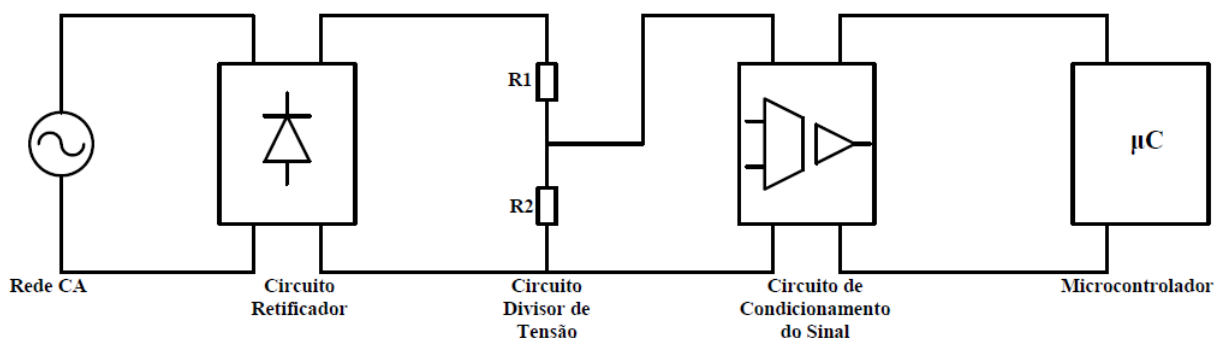


Fonte: Autor.

2.3.3.2 Circuito de medição de tensão

Basicamente existem dois métodos para medir a tensão. O primeiro deles é através de um divisor de tensão, e o outro é através de um transformador de potencial. Esse último utilizado em tensões maiores (SILVEIRA, 2016). Na Figura 2.7 podemos ver um exemplo simples composto das principais etapas de um circuito de medição de tensão. Inicialmente tem-se um circuito retificador, responsável pela conversão do sinal em corrente alternada (CA) para o sinal em corrente contínua (CC), logo após um divisor de tensão composto pelos resistores R1 e R2, projetados para reduzir o valor da tensão até um nível adequado para o controlador. A última etapa antes do sinal estar pronto para o controlador é a etapa dos ganhos e filtros, nessa etapa o sinal filtrado é preparado para a entrada do microcontrolador.

Figura 2.7 – Diagrama de medição de tensão com retificação.



Fonte: Autor.

Podemos ver acima uma forma de medição de tensão, porém essa técnica só pode ser utilizada quando deseja-se medir apenas a potência ativa consumida pelo circuito, pois o sinal de saída será um valor constante e não carrega consigo informações da forma de onda original. Portanto a mais adequada forma de mensurar a tensão para um multime-

didor é aplicando um transformador rebaixador e, através de um circuito de condicionamento adequar o sinal para valores compatíveis com o microcontrolador.

2.3.3.3 *Aquisição e manipulação dos dados*

Podemos chamar essa etapa de cérebro do medidor, geralmente onde está localizado um microcontrolador. Cada fabricante pode usar qualquer tipo de controlador do mercado, como o PIC, Atmel, AVR ou ARM dependo de suas restrições. A função do microcontrolador é receber os dados analógicos provindos dos sensores medidores e dos circuitos de condicionamento, manipular esses sinais para a demonstração, além disso alguns cálculos podem ser realizados a fim de obter valores de fator de potência, consumo de energia, entre outros parâmetros.

2.3.3.4 *Interface de comunicação*

A tecnologia *Bluetooth* é uma especificação de rede sem fio de âmbito pessoal (*Wireless personal area networks* - PANs) consideradas do tipo PAN ou mesmo WPAN. O Bluetooth provê uma maneira de conectar e trocar informações entre dispositivos como telefones celulares, notebooks, computadores, impressoras, câmeras digitais entre outros através de uma frequência de rádio de curto alcance globalmente licenciada e segura. Um tipo de rede de comunicação bastante utilizada em projetos com alguma simplicidade.

2.3.3.5 *Gateway*

Em uma tradução literal do inglês, um *gateway* poderia ser classificado como "portal" ou "portão". Em resumo, uma passagem entre dois ambientes distintos. A tradução do termo é exatamente o que ele significa: um equipamento encarregado de estabelecer a comunicação entre duas redes, respeitando protocolos específicos e tomando determinadas ações necessárias para o correto funcionamento da comunicação entre as duas extremidades. Ele faz o papel de ponte entre as redes, analisando e tratando as informações de acordo com as definições preestabelecidas e o tipo de função a que se destina.

2.3.3.6 *Banco de dados*

Bancos de dados, ou bases de dados, são coleções de informações que se relacionam de forma que crie um sentido. São de vital importância para empresas, e há duas

décadas se tornaram a principal peça dos sistemas de informação. Nesse caso pode ser relacionado como sendo as informações mensuradas pelo medidor e são armazenadas em alguma memória específica.

2.3.3.7 Interface de visualização

Como interface de visualização dos medidores eletrônicos convencionais existe o *display* LCD (do inglês *Liquid Crystal Display*), o qual pré-programado é responsável por demonstrar as medições realizadas que, posteriormente serão retiradas manualmente.

Já para visualização dos dados no aparelho, após serem enviados os dados via *bluetooth*, um aplicativo de fácil visualização é montado para que o usuário utilize de maneira fácil e intuitiva.

2.3.4 Multimeditores existentes

Alguns dispositivos já existem com o princípio de medição inteligente, agora vamos analisar três dessas soluções, assim como suas características e princípios de funcionamento.

O primeiro deles se trata de um monitor de energia da marca Smappee. O monitor de energia Smappee fornece dados em tempo real sobre o uso da eletricidade e o custo em um estabelecimento, medindo a corrente e a tensão. O aplicativo desenvolvido pela marca mostra quanto de energia é consumida e o custo financeiro disso, seja em tempo real ou em uma base diária, mensal e anual.

A função de programação de eventos (*Triggers*) permite ligar ou desligar equipamentos automaticamente utilizando o acionador remoto com base no horário, no nascer ou pôr do sol do local, mudança de status de um aparelho, localização geográfica, potência da energia produzida pelo sistema fotovoltaico (quando também monitorado) ou outros dados de monitoramento disponíveis. Para a comunicação esse aparelho é equipado com um sistema wi-fi e também sistema de radiofrequência (RF) de 433MHz. Podemos visualizar na Figura 2.8 a composição do medidor, aonde possui uma central de controle juntamente com um acionador remoto, este equipamento tem um preço aproximado de R\$ 2.680,31 (ENERGIA, 2010).

O segundo deles é o medidor inteligente da marca GreenAnt, compacto e de simples instalação, conectado à sua rede Wi-Fi para ter acesso a informações precisas sobre sua rotina de uso de energia. Possui algumas características:

- Medição do consumo em tempo real;
- Constituído de uma Plataforma da marca para visualização do consumo de energia

Figura 2.8 – Monitor de energia marca Smappee.



Fonte: (ENERGIA, 2010).

em tempo real;

- Possui gatilhos inteligentes que enviam notificações toda vez que detectamos um consumo atípico;
- Capacidade de integração com a plataforma do sistema de geração (fotovoltaico, diesel, PCH, eólico) para ter acesso a dados e balanços de energia gerada e consumida no mesmo painel;
- Possibilidade de *download* dos dados de medição para utilização em softwares de gestão e planilhas de controle (GREENANT, 2018).

Esse equipamento é constituído de uma central de comando apenas, na Figura 2.9 podemos ver a central de comando juntamente com aplicativo online que a fabricante disponibiliza.

Figura 2.9 – Monitor de energia marca GreenAnt.

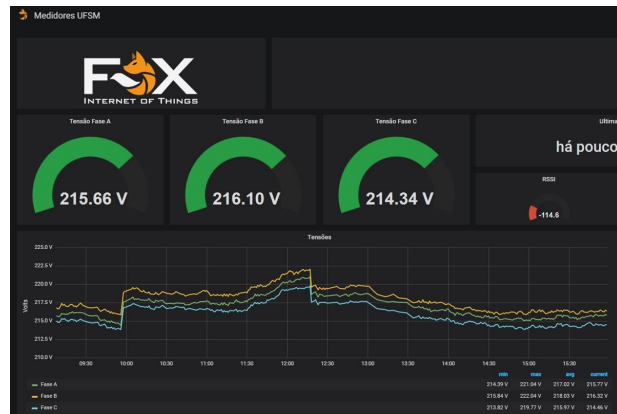


Fonte: (GREENANT, 2018).

O terceiro exemplo é a tecnologia criada pela empresa Fox Solutions, da incubadora Pulsar Agittec, em parceria com professores e alunos da Pós-Graduação em Energia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria. Se trata de um Sistema Inovador de Gestão e Gerenciamento de Energia Elétrica da universidade, que incluiu a instalação de 60 medidores inteligentes nos principais prédios do campus, com sistema de envio em

tempo real das informações por meio de rádio frequência. Com isso, na central de monitoramento, é possível acompanhar em detalhes quanto é gasto de energia em cada prédio e em quais horários há maior consumo, permitindo verificar onde é possível fazer ações para evitar desperdícios, entre outras (ZOLIN, 2019). A interface com o usuário de tal sistema pode ser vista na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Interface com o usuário do sistema desenvolvido pela Fox.



Fonte: (ZOLIN, 2019).

2.3.5 Conclusão parcial

A partir do levantamento das características de cada um dos sistemas de medição apresentados, pode-se destacar algumas características pertinentes a esse trabalho. A primeira característica importante é o cálculo do consumo e da tarifa em tempo real, essa característica é de extrema importância para o consumidor controlar seu consumo, e consequentemente suas finanças. Caso houver produção de energia elétrica em seu estabelecimento, o próprio consumidor pode monitorar e tomar as decisões desejáveis.

Tanto o multimedidor da marca Smappee como o da marca GreenAnt possuem conexão com a rede de internet, tornando-os mais dinâmicos. Um destaque importante do medidor da marca Smappee é ele possuir um gatilho inteligente que envia notificações toda vez que houver consumo excessivo, e tem a possibilidade de comandar um dispositivo para ligar e desligar determinados equipamentos.

Uma vantagem que podemos destacar a partir das informações divulgadas referentes ao sistema da empresa Fox é a interface de visualização dos dados, baseada em gráficos, além do banco de dados que esse sistema é capaz de realizar.

Por outro lado, uma desvantagem presente em nos dois primeiros exemplos de multimedidores é o custo de aquisição. Por possuírem tecnologia e precisão na medida, isso faz com que o preço deles seja bastante elevado. Algum equipamento de mais baixo custo e fácil manuseio faz-se necessário para que consumidores possam ter total acesso

ao seu consumo de energia, e assim tomar decisões antes que a conta de energia no final de cada mês ultrapasse o valor desejado. Também para facilitar futuros estudo de consumidores e assim prever crescimento de carga nos sistemas elétricos de potência.

Tendo visto no capítulo 2 uma série de temas abordados que são de extrema importância para se compreender a construção e aplicação do dispositivo proposto. Então primeiramente foi abordado uma conceituação de automação residencial com os principais dispositivos e vantagens, visto que este dispositivo é de extrema importância para o monitoramento de energia elétrica e por consequência a eficiência energética.

Também foi abordado o conceito de internet das coisas, assim como suas características e composição. Visando a conexão do dispositivo desenvolvido com a rede, e tornando o sistema mais flexível e de fácil utilização. Por último foram apresentados algumas soluções existentes que serão tomadas como base para o decorrer do desenvolvimento.

Com isso pode-se a partir de agora partir para o projeto e desenvolvimento do multimedidor de energia elétrica, a seguir será visto as partes assim como as características do sistema desenvolvido.

3 METODOLOGIA

3.1 PROJETO

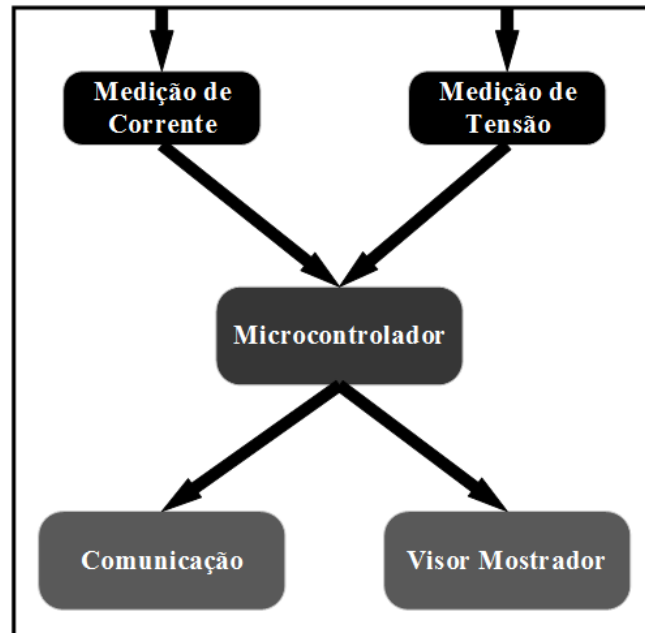
Sendo os princípios de funcionamento, bem como alguns exemplos de um medidor de energia, pode-se traçar as características básicas da proposta desse trabalho. O foco do medidor proposto é realizar a medição de energia elétrica em uma residência, ou qualquer estabelecimento alimentado em tensão secundária (380-220-127V). Este medidor será instalado junto ao centro de distribuição da residência com o intuito de monitorar apenas um circuito elétrico da residência ou um conjunto deles.

Em geral, um medidor inteligente pode apresentar algumas características, as mais importantes, e que serão levadas em consideração são:

- Medição de tensão e corrente de entrada de um consumidor alimentado em tensão secundária;
- Informar consumo de energia em tempo real;
- Calcular e informar a tarifa do consumidor em uma base de tempo especificada;
- Informar consumo de energia em uma base de tempo com o propósito de montar um padrão de consumo;
- Possuir comunicação sem fio;
- Plataforma interativa para visualização e manipulação dos dados.

A partir dos requisitos estipulados acima, pode-se montar um esquemático das principais partes do medidor desejado, conforme mostra a Figura 3.1 .

Figura 3.1 – Diagrama do multimetido proposto.



Fonte: Autor.

3.1.1 Visor mostrador

O *display* utilizado para demonstração das variáveis em tempo real junto ao protótipo do multimetido é o *display* LCD TFT Touch Screen, este Shield possui 2,4", tela sensível ao toque com tecnologia resistiva e sua implementação é muito simples.

Possui controle individual de cada pixel, e com seus 240x320 pixels de resolução, é uma ótima interface para seu projeto. Além disso, você conta com um slot micro SD, que pode ser usado para armazenar as imagens que serão exibidas, etc. Esse dispositivo pode ser visualizado na Figura 3.2 (INTELTRONIC, 2014).

Figura 3.2 – Display LCD utilizado.



Fonte: Autor.

3.1.2 Microcontrolador

O principal dispositivo para a elaboração do multimedidor de energia elétrica é o microcontrolador. Ao longo dos anos o Arduino tem sido o cérebro de milhares de projetos, desde objetos do cotidiano até instrumentos científicos complexos (SOUZA, 2015).

Existem outros diversos microcontroladores e plataformas de microcontroladores disponíveis. Todas essas ferramentas transformam a difícil programação de microcontroladores em pacotes fáceis de usar. Arduino também simplifica o processo de programação de microcontroladores, mas além disso possui algumas vantagens importantes:

- Multi-plataforma: o Software Arduino pode ser executado em Windows, Linux, etc;
- Ambiente de programação simples e claro: O ambiente de programação do Arduino é fácil de usar, mas suficientemente flexível para usuários com conhecimento avançado;
- Open source e software extensível: O software Arduino é publicado como ferramentas de código aberto, disponível para extensão por programadores experientes. O idioma pode ser expandido através de bibliotecas;
- Open source e hardware extensível: O Arduino é baseado nos microcontroladores ATmega8 e ATmega168 da Atmel. Os planos para os módulos são publicados sob uma licença, então os desenvolvedores de circuito experientes podem fazer a sua própria versão do módulo, estendê-los e melhorá-los.

3.1.2.1 *Arduino Mega 2560*

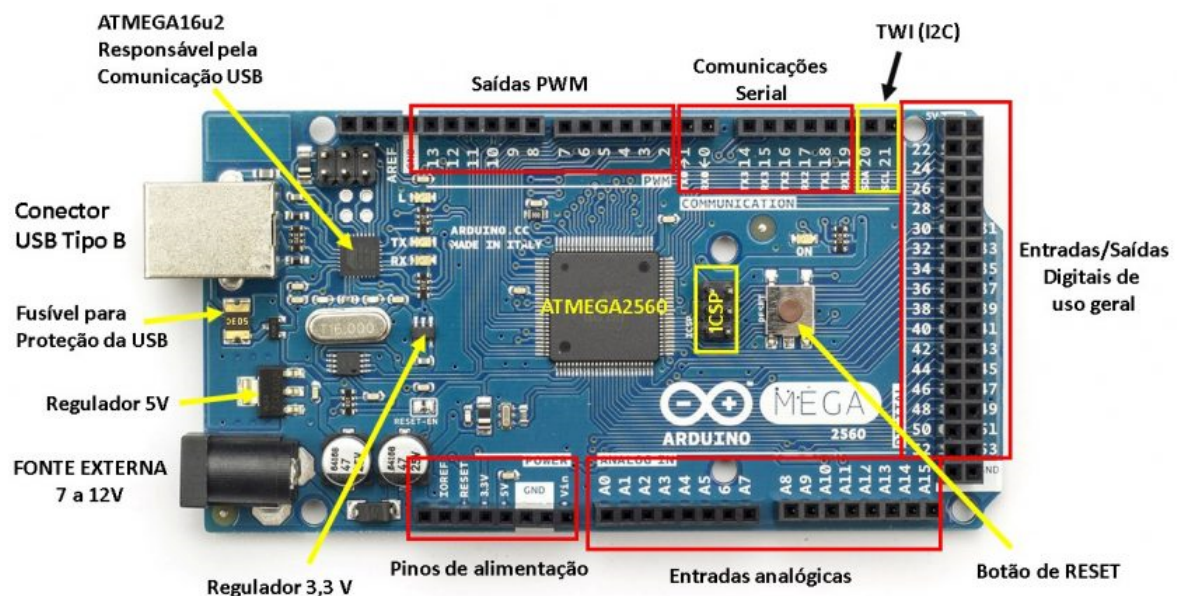
A placa Arduino Mega 2560 é mais uma placa da plataforma Arduino que possui recursos bem interessantes para prototipagem e projetos mais elaborados. Baseada no microcontrolador ATmega2560, possui 54 pinos de entradas e saídas digitais onde 15 destes podem ser utilizados como saídas PWM. Possui 16 entradas analógicas, 4 portas de comunicação serial. Além da quantidade de pinos, ela conta com maior quantidade de memória que Arduino UNO, sendo uma ótima opção para projetos que necessitem de muitos pinos de entradas e saídas além de memória de programa com maior capacidade. Algumas principais características dessa placa de arduino são:

- Microcontrolador: ATmega2560;
- Tensão operacional: 5V;
- Tensão de entrada (recomendado): 7-12V;
- Tensão de entrada (limite): 6-20 V;

- Pinos Digital I / O: 54 (dos quais 15 fornecem saída PWM);
- Pinos de entrada analógica: 16;
- Corrente DC por pino de I / O: 20 mA;
- Memória flash: 256 KB;
- SRAM : 8 KB;
- EEPROM: 4 KB;
- Frequências de Clock: 16 Mhz;
- Comprimento: 101,52 mm;
- Largura: 53,3 mm;
- Peso: 37 g.

Por possuir tais características e ser a placa de microcontrolador disponível no laboratório da Universidade, foi o microcontrolador escolhido para suprir a necessidade do multimetror de energia elétrica, principalmente pelo tamanho do dispositivo e suas características. O microcontrolador MEGA 2560 com os recursos disponíveis podem ser vistos na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Identificação dos recursos do Arduino Mega 2560.



Fonte: Autor.

3.1.3 Medição de tensão

Para se efetuar a medição da tensão alguns métodos podem ser utilizados, como já visto. Tendo em vista o cálculo da potência ativa e reativa do circuito para identificação das características da carga, faz-se necessário a utilização de um sensor analógico e "carregar" o sinal referente a carga até o microcontrolador, para isso utilizaremos o sensor de tensão LV25-P, juntamente com circuitos de condicionamento de sinal.

3.1.3.1 Sensor LV25-P

Este sensor é utilizado para medição eletrônica de corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA). Ele possui isolamento galvânica entre o circuito primário e secundário, característica essa que apresenta algumas vantagens com relação à referência do sinal. Este sensor possui alta precisão, boa linearidade, baixo tempo de resposta, alta imunidade à interferências externas, entre outra (LEM, 2014). Na Figura 3.4 pode-se visualizar o sensor de tensão utilizado. Para medições de tensão, uma corrente proporcional ao sinal de tensão medido deve passar através de um resistor externo (R_e) que é calculado e instalado em série com o circuito primário do transdutor. Para uma leitura correta do valor de tensão, na saída do sensor deve-se colocar um resistor de medição (R_m) em série com o circuito secundário do transdutor.

Figura 3.4 – Sensor LV25-P.



Fonte: (LEM, 2014)

As informações mais importantes que se encontram na folha de dados do LV25-P são (LEM, 2014):

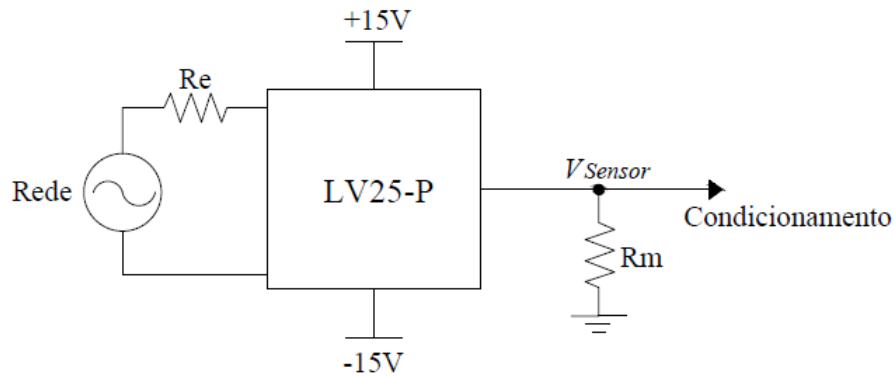
- Tensão nominal do primário (V_{pn}): 10 V a 500 V;
- Corrente eficaz nominal do primário (I_{pn}): 10 mA;

- Corrente primário de pico (I_{pn}): 14 mA
- Resistência de medida (R_m): 100 Ω a 350 Ω (Alimentação ± 15 V);
- Corrente eficaz nominal do secundário (I_{sn}): 25 mA;
- Razão de conversão (K_n): 2,5:1.

Como a resposta de saída desse sensor, se aplicado uma função senoidal na entrada (-311 V a 311 V), é outra função senoidal na saída e, o microcontrolador não é compatível com sinais negativos, precisamos projetar um circuito de condicionamento responsável por amplificar, filtrar e transformar o sinal em níveis compatíveis para a entrada do microcontrolador (0 V à 5 V).

Partindo do circuito da Figura 3.5, responsável pelo acionamento do sensor LV25-P, pode-se efetuar os cálculos dos componentes utilizados para realizar o acionamento desse sensor.

Figura 3.5 – Circuito de acionamento do sensor LV25-P.



Fonte: Autor.

Inicialmente vamos definir algumas equações que serão utilizadas no decorrer do projeto.

$$V_{ap} = V_{aef} \times \sqrt{2} \quad (3.1)$$

$$R_e = \frac{V_{ap}}{I_{pn}} \quad (3.2)$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_s}{I_p} \quad (3.3)$$

$$R_m = V_{Sensor} \times \frac{R_{mmáx} - R_{mmín}}{V_{máx} - V_{mín}} \quad (3.4)$$

Sabendo que a tensão de fase eficaz da rede de energia (V_{aef}) é 220 V, podemos calcular o resistor R_e . É necessário que a corrente eficaz no primário (I_{pn}) seja de 10 mA (LEM, 2014), com isso temos:

$$V_{ap} = 220 \times \sqrt{2} = 311V \quad (3.5)$$

$$R_e = \frac{311}{10 \times 10^{-3}} = 31,1k\Omega \quad (3.6)$$

Como não existe no mercado um valor de resistência como esse vamos utilizar três resistências de 100 k Ω em ligação paralela, obtendo assim $R_e=33,33$ k Ω . Definido isso então a corrente no primário passa a ser 9,33 mA, e a corrente no secundário é:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_s}{I_p} = K_n = 2,5 \quad (3.7)$$

$$I_s = 2,5 \times 9,33 \times 10^{-3} = 23,325mA \quad (3.8)$$

Sendo esse o valor da corrente secundária do componente, corrente essa que flui sobre o resistor R_m . Os valores de resistência limites para o LV25-P são de 100 Ω a 350 Ω , sendo assim, a tensão sobre o resistor R_m varia de 2,33 V a 8,16 V respectivamente.

Para que a variação da tensão na saída do dispositivo varie entre -5 V e +5 V, sendo a tensão de entrada variando entre -311 V e +311 V, calcula-se o valor de R_m por:

$$R_m = 5 \times \frac{350 - 100}{8,16 - 2,33} = 214,25\Omega \quad (3.9)$$

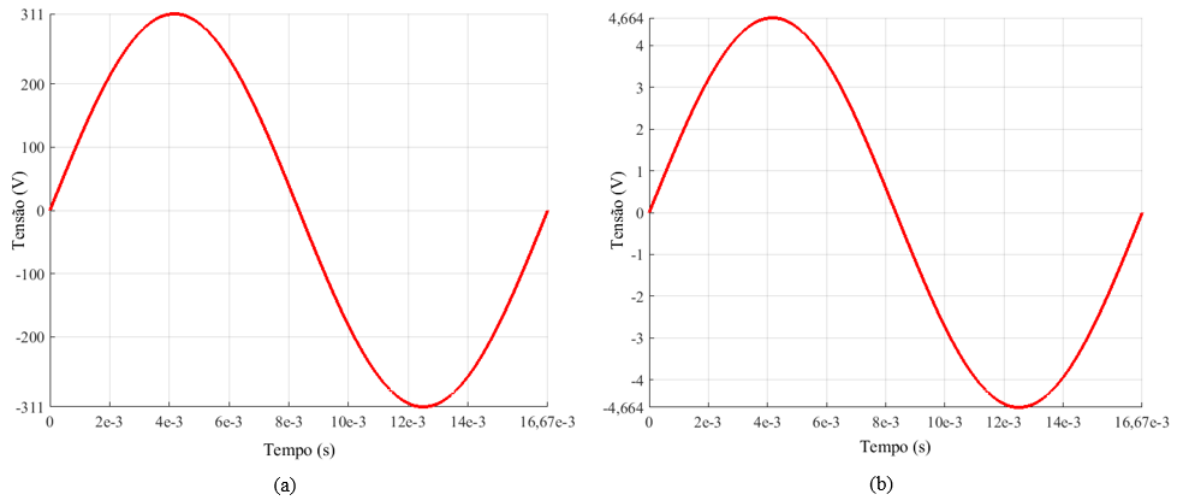
Valor de resistência que não encontramos no mercado, por isso valor utilizar dois resistores de 100 Ω em configuração série resultando em uma resistência com valor de $R_m=200$ Ω . Com isso a tensão de saída do sensor será:

$$V_{Sensor} = I_s \times R_m = 23,325 \times 10^{-3} = \pm 4,66V \quad (3.10)$$

Utilizando o software Matlab plotou-se os sinais esperados de entrada e saída do sensor. Resultados esses podem ser vistos na Figura 3.6. Pode-se observar que a tensão da rede é senoidal e varia de -311 V a 311 V e que a saída do sensor varia de -4,66 V até 4,66 V. Porém os valores negativos da tensão de saída do sensor não são compatíveis com a entrada do microcontrolador, para isso utiliza-se um regulador de tensão (modelo escolhido 7805), com tensão igual a 5 V, para adicionar um *offset* ao sinal de saída do sensor.

Para realizar tal *offset* é projetado um circuito com amplificador operacional na configuração de somador inversor com ganho menor do que 1. O circuito da Figura 3.7 é responsável por atenuar o sinal que vai de 0,336 V a 9,664 V ($V_{Somador}$). Nessa configuração temos o resistor R_f que controla o ganho entre a entrada e a saída. Como a

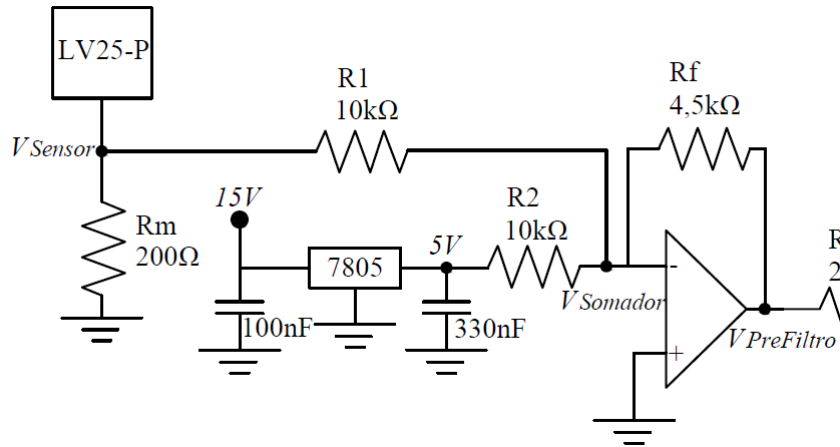
Figura 3.6 – Comparação entre o sinal de entrada (V_{rede} plotado em (a)) e o sinal de saída do sensor (V_{sensor} plotado em (b)).



Fonte: Autor.

configuração é inversora, teremos na saída o sinal totalmente negativo, sinal este que será invertido posteriormente. A equação de um amplificador somador inversor é representada na Equação 3.11.

Figura 3.7 – Circuito somador inversor.



Fonte: Autor.

A equação que rege o comportamento desse circuito é:

$$V_{out} = -R_f \times \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right) \quad (3.11)$$

Com isso, arbitrase $R_1=R_2=10 \text{ k}\Omega$ e o resistor R_f é: A equação que rege o com-

portamento desse circuito é:

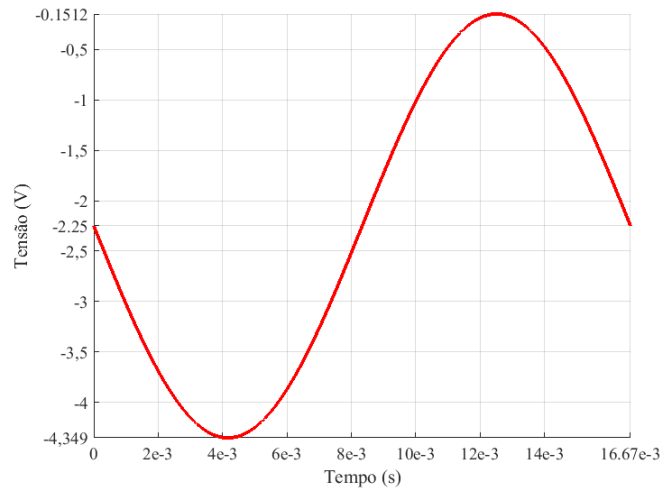
$$R_f = \frac{V_{out} \times R_1}{V_1 + V_2} = \frac{5 \times 10 \times 10^3}{5 + 4,66} = 5,176k\Omega \quad (3.12)$$

Para mantermos uma margem segura de medida vamos utilizar um resistor R_f com resistência igual a 4500Ω , e assim a tensão de saída do circuito somador tem tensão mínima seguindo a equação abaixo:

$$V_{out} = -4500 \times \left(\frac{4,66}{10000} + \frac{5}{10000} \right) = -4,35V \quad (3.13)$$

Com isso a resposta teórica esperada ($V_{préfilto}$) é a função da Figura 3.8, com valores variando de $-0.153 V$ até $-4.35 V$, que posteriormente serão invertidos.

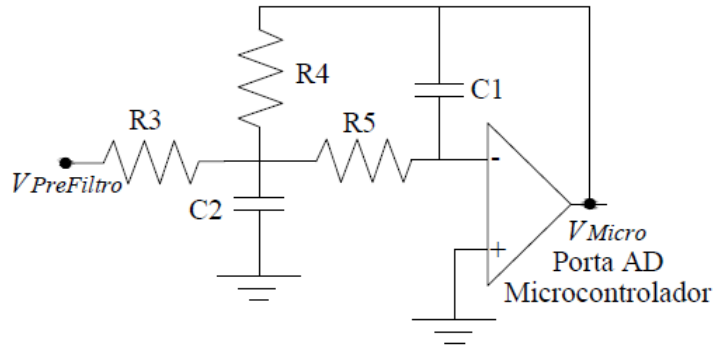
Figura 3.8 – Tensão de saída do circuito somador.



Fonte: Autor.

Agora temos um sinal totalmente negativo com amplitude adequada, então para inverter o sinal e filtrar os ruídos provenientes da medição, utiliza-se um filtro ativo de segunda ordem passa baixa. A estrutura do filtro é a apresentada na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Estrutura do filtro passa baixa.



Fonte: Autor.

As equações que regem esse tipo de filtro são:

$$k = -\frac{R_4}{R_3} \quad (3.14)$$

$$R_4 = -\frac{2(k+1)}{[aC_2 + \sqrt{a^2C_2^2 - 4bC_1C_2(k+1)}]W_c} \quad (3.15)$$

$$R_5 = -\frac{1}{bC_1C_2W_c^2R_4} \quad (3.16)$$

$$C_1 \leq \frac{a^2C_2}{4b(k+1)} \quad (3.17)$$

$$C_2 = \frac{10}{f_c} \quad (3.18)$$

A partir da função de transferência do filtro de segunda ordem e da resposta do tipo Butterworth podemos estipular o valor dos parâmetros a e b como sendo:

$$a=1,414214$$

$$b=1$$

Como deseja-se de um ganho de -1, define-se $R_3=R_4=27 \text{ k}\Omega$ e $f_c=1000 \text{ Hz}$, dessa maneira tem-se:

$$k=-1$$

$$C_2=10 \text{ nF}$$

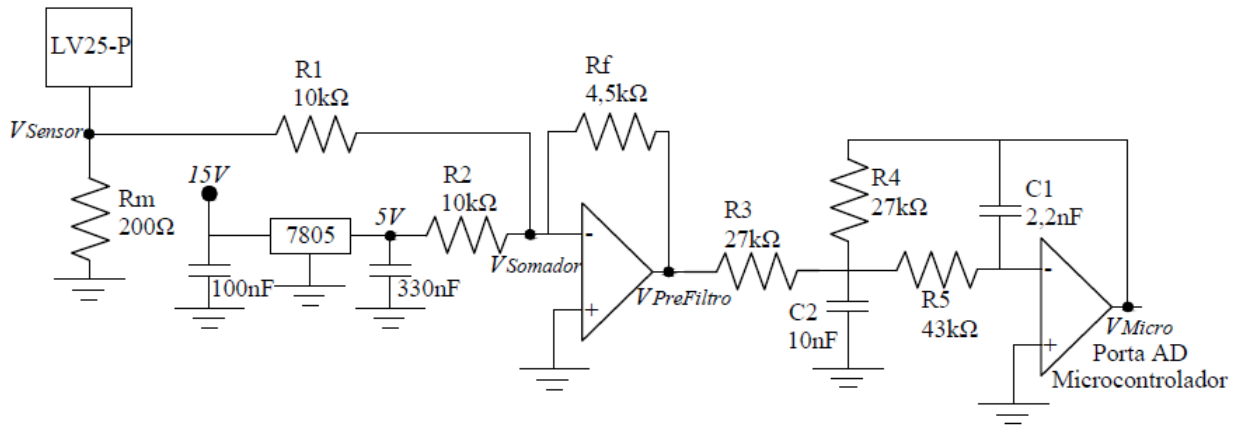
$$C_1=2,2 \text{ nF}$$

$$R_5=43 \text{ k}\Omega$$

Como visto anteriormente, o valor do C_1 calculado através da resolução da Equação 3.15 é $2,2 \text{ nF}$, ficando menor ou igual a $2,5 \text{ nF}$ como calculado pela Equação 3.17. Após

essas etapas de cálculo pode-se montar o circuito de condicionamento do sinal de tensão, conforme a Figura 3.10 apresenta.

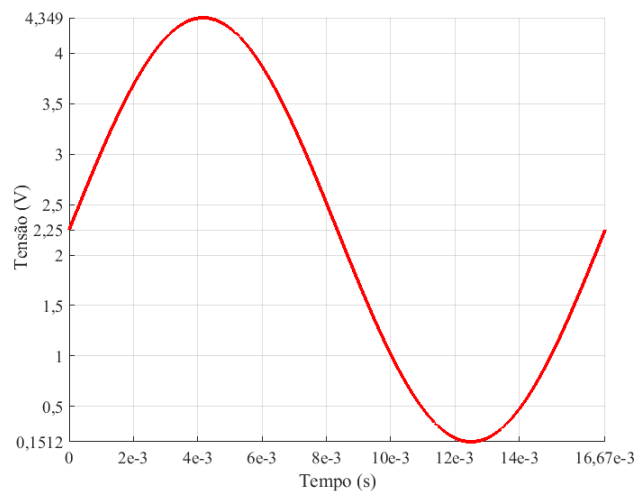
Figura 3.10 – Circuito completo de condicionamento de tensão.



Fonte: Autor.

A resposta ideal esperada para a saída do circuito de condicionamento do sinal de tensão deve ser a inversão do sinal da entrada do filtro conforme a Figura 3.11 . Podemos notar que na configuração inversora o sinal de saída do amplificador é defasado em 180° em relação ao sinal de entrada, mas como são dois estágios de inversão, o sinal retorna a sua fase inicial. Outra característica importante que pode-se notar é que o sinal varia de 0,153 V a 4,35 V, tensões essas que podem ser aplicadas diretamente no microcontrolador.

Figura 3.11 – Saída do circuito de condicionamento de tensão (V_{Micro}).



Fonte: Autor.

3.1.4 Medição de corrente

O monitoramento de corrente baseia-se na leitura dos sinais obtidos através do sensor LA55-P. Esses sinais são manipulados através de um circuito de condicionamento para que fiquem em níveis adequados antes que cheguem até o microcontrolador. Mas antes de projetar o circuito de condicionamento, precisa-se conhecer um pouco do sensor de corrente, bem como as especificações necessárias para o desenvolvimento do condicionamento.

3.1.4.1 Sensor LA55-P

Este sensor serve para a medição de corrente contínua (DC) e corrente alternada (AC). O LA55-P possui isolamento galvânica entre o circuito primário (alta potência) e o circuito secundário (circuito eletrônico). Como características este possui boa linearidade, baixo desvio de temperatura, bom tempo de resposta, alta imunidade a interferências externas, entre outras (COELHO, 2016). As informações mais importantes são encontradas na folha de dados (LEM, 2013) e são:

- Corrente eficaz nominal do primário (I_{pn}): 50 A;
- Resistência de medida (R_m): 135 Ω a 155 Ω (alimentação ± 15 V);
- Corrente eficaz nominal do secundário (I_{sn}): 50 mA;
- Razão de conversão (K_n): 1000:1.

O sensor LA55-P pode ser visto na Figura 3.12.

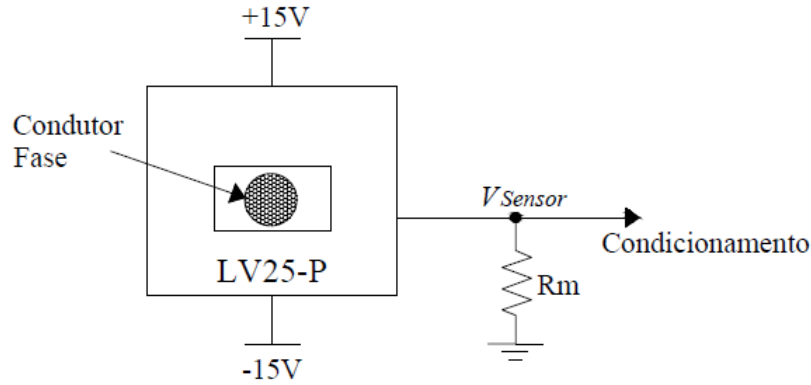
Figura 3.12 – Sensor de corrente LA55-P.



Fonte: (LEM, 2013)

Da mesma maneira que o sensor de tensão, o sensor de corrente também precisa de uma alimentação simétrica de 15 V. O que muda nesse sensor é o valor de R_m , que nesse caso deve estar entre 135 Ω e 155 Ω (LEM, 2013). A ligação desse sensor é feita conforme a Figura 3.18.

Figura 3.13 – Circuito de acionamento do sensor LA55-P.



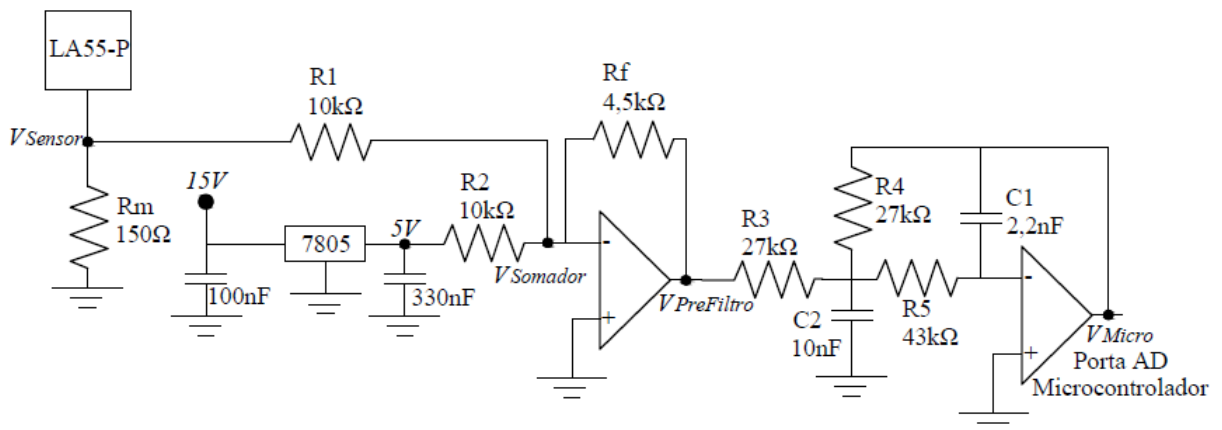
Fonte: Autor.

Para que o circuito de condicionamento do sinal gerado pelo sensor de corrente seja igual ao circuito usado para condicionamento do sinal do sensor de tensão, precisa-se de uma saída do sensor de 4,66 V (V_m), para isso arbitra-se um valor para R_m entre 135 Ω e 155 Ω , nesse caso utilizou-se 150 Ω , sendo assim:

$$I_s = \frac{V_m}{R_m} = \frac{4,66}{150} = 31,09mA \quad (3.19)$$

Com isso o circuito de condicionamento do sinal gerado pelo sensor de corrente fica exatamente igual ao circuito de condicionamento do sensor de tensão, conforme pode-se ver na Figura 3.14, e a corrente máxima permitida no condutor interno ao sensor é de 31,09 A.

Figura 3.14 – Circuito completo de condicionamento de corrente.



Fonte: Autor.

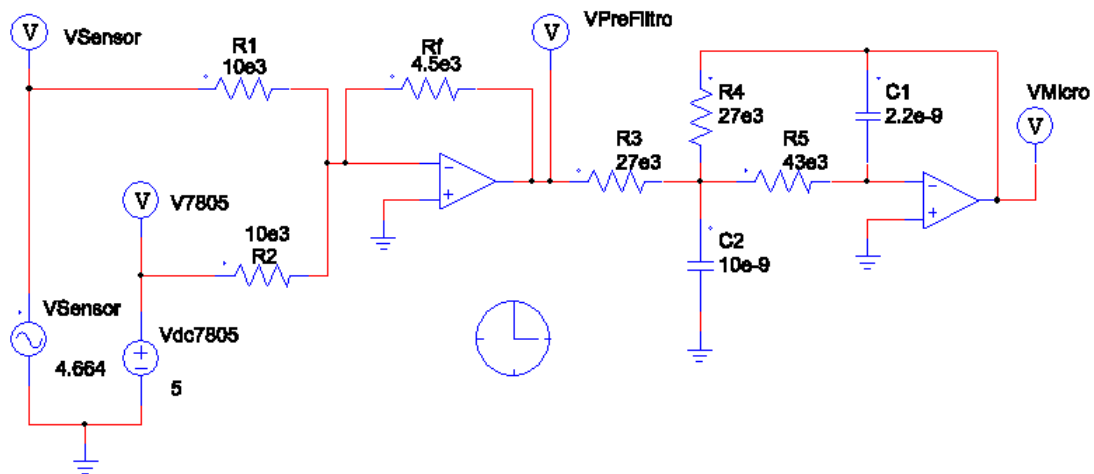
Também no circuito de condicionamento podemos levar em consideração as formas de onda teóricas esperadas. Nesse caso consideraremos a primeira onda como sendo a

tensão de saída do sensor representado em (b) da Figura 3.6 e a partir daí temos a mesma resposta do circuito. Na Figura 3.8 temos a representação da tensão após a primeira etapa do circuito somador de tensão e, por fim, temos a tensão de saída do circuito representado na Figura 3.11.

3.2 SIMULAÇÃO

Após a realização do projeto de condicionamento do sensor de tensão, foi utilizado o software PSIM onde foram feitas as simulações necessárias para verificar se os valores dos componentes foram especificados de forma correta para o perfeito funcionamento do multimedidor. Na Figura 3.15 pode-se visualizar o circuito utilizado na simulação, onde, o sensor é representado por uma fonte de tensão senoidal variando de $-4,664$ V a $+4,664$ V, que representa tanto o sensor de tensão quanto o sensor de corrente já que os dois tiveram o projeto para fornecer tal tensão de saída. O regulador de tensão como uma fonte de tensão contínua de 5 V. O primeiro estágio sendo um amplificador na configuração somador inversor e o segundo estágio um amplificador operacional na configuração de filtro passa baixa de segunda ordem.

Figura 3.15 – Circuito utilizado para realização da simulação.



Fonte: Autor.

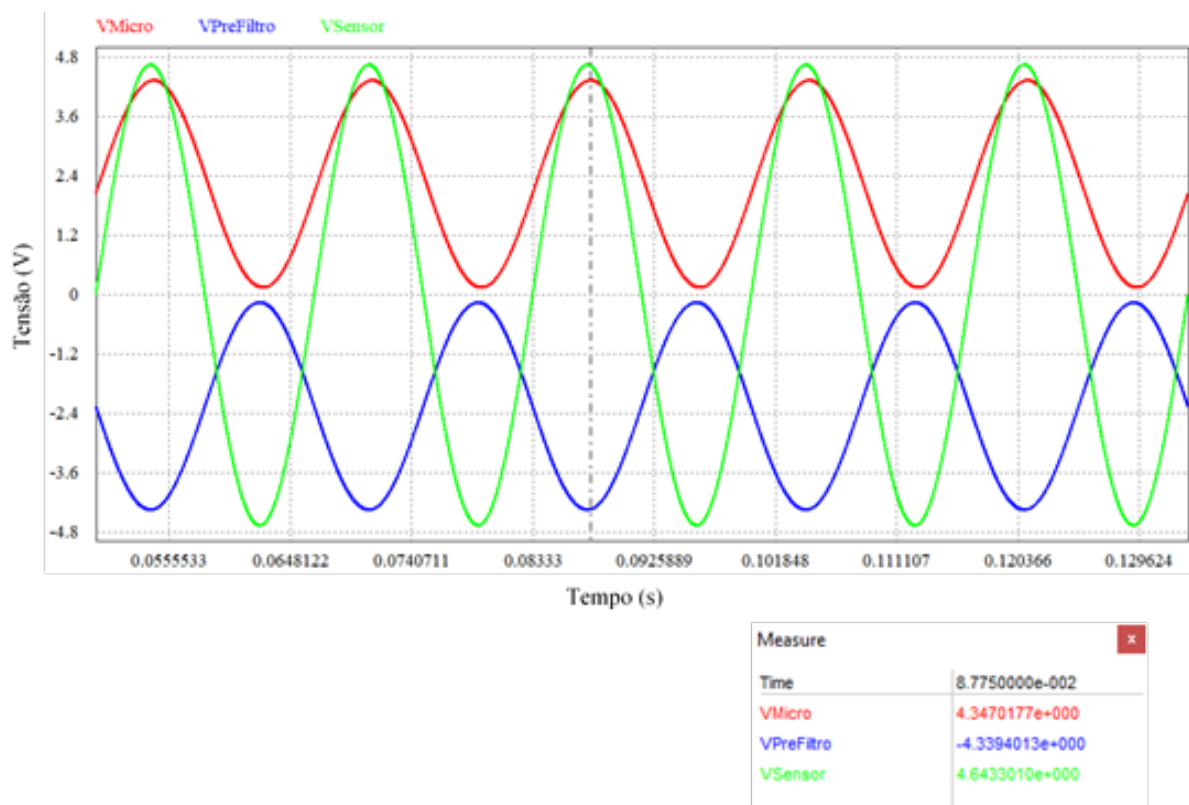
O resultado completo da simulação pode ser observado na Figura 3.16, onde, a tensão do sensor ($-4,66$ V a $+4,66$ V ou VSensor) na cor verde da figura, é a tensão gerada por algum dos sensores (LV25-P ou LA55-P), no circuito representado por uma fonte de tensão alternada.

A tensão entre os dois estágios de amplificação (VPreFiltro) na cor azul da figura, se trata do sinal condicionado entre os valores de $-0,153$ V a $-4,35$ V.

E por fim o valor na saída do circuito de condicionamento, que é a tensão de saída do filtro, representada na imagem como VMicro (0,153 V a 4,35 V) na cor vermelha da figura, podemos perceber que esse valor possui limites próximos aos esperados pelo circuito, que era de 0V a 5V. Mas além disso, o sinal possui uma pequena defasagem angular, imposta pelo filtro de segunda ordem, essa defasagem é desconsiderada para fins de cálculo.

Pode-se observar que os valores da simulação seguiram fielmente os sinais esperados em cada etapa do circuito de condicionamento, sendo assim, o circuito proposto é válido para tal aplicação. A partir disso pode-se considerar efetuadas as medidas necessárias de tensão e corrente.

Figura 3.16 – Resultado completo da simulação do circuito de condicionamento do sinal.

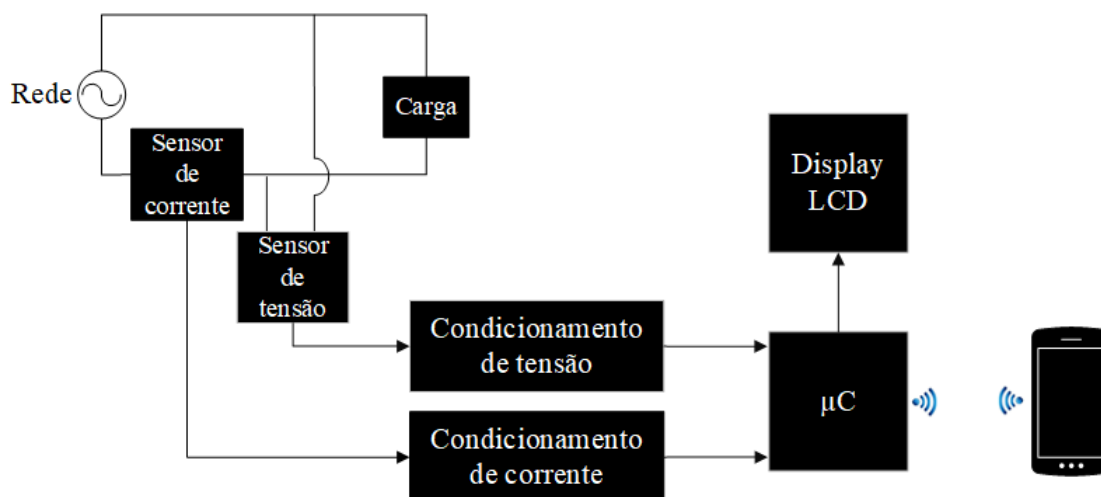


Fonte: Autor.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Após todo o projeto e a etapa de simulação concluída, iniciou-se a etapa de montagem prática do multimetror de energia elétrica conforme estrutura apresentada na Figura , circuito esse baseado na estrutura da Figura 3.1. Primeiramente foi construído o circuito de condicionamento para ambos os sensores, depois de testado os sensores foram inseridos no circuito. Para efetuar os testes foi utilizado uma fonte linear simétrica com tensão de 15V e um osciloscópio para visualizar as formas de onda no decorrer do circuito. Assim serão apresentados os resultados experimentais para o circuito de medição de tensão, após para o circuito de medição de corrente e por fim uma explanação sobre a programação realizada no microcontrolador.

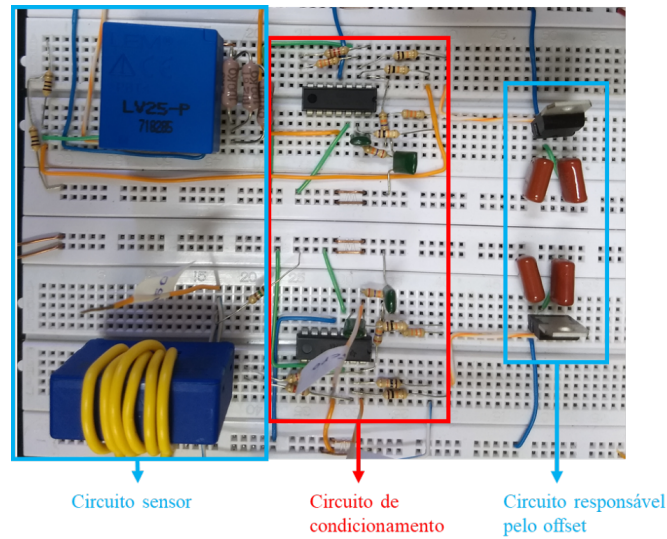
Figura 4.1 – Esquemático do multimetror montado.



Fonte: Autor.

Como resultado dessa montagem, temos o circuito da Figura 4.2, onde pode-se visualizar inicialmente o circuito sensor composto pelos sensores que serão descritos, em seguida temos o circuito de condicionamento juntamente com o circuito responsável pelo *offset* de tensão no condicionamento. Além desse circuito vale ressaltar que temos o microcontrolador Arduino que está conectada com a saída do condicionamento desse circuito, e a fonte simétrica de 15 V responsável pela alimentação desses circuitos. Podemos visualizar na Figura 4.2 o circuito completo da implementação realizada.

Figura 4.2 – Circuito do multimetido montado em *protoboard*.

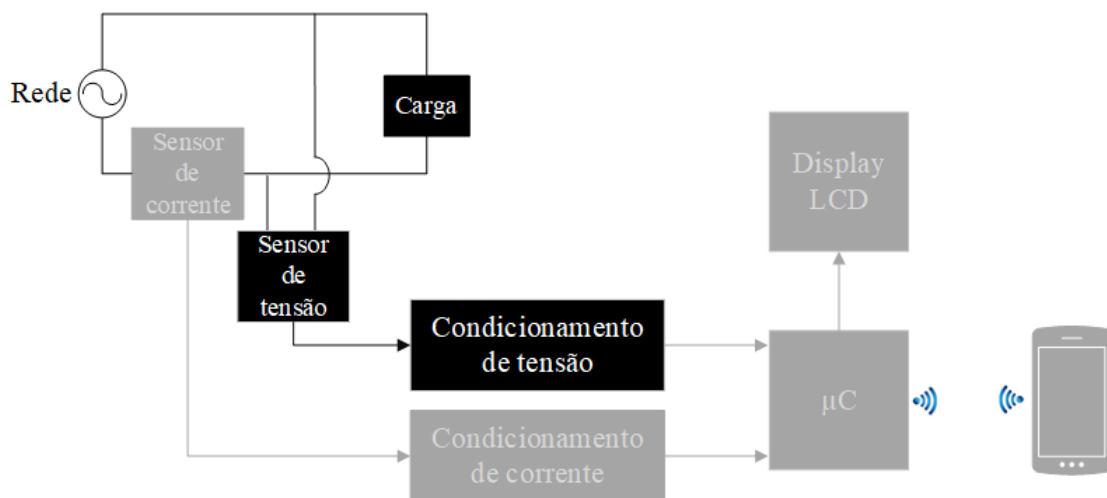


Fonte: Autor.

4.1 CIRCUITO MEDIDOR DE TENSÃO

Circuito de medição de tensão foi o circuito montado inicialmente. Visualizando o circuito total da Figura 4.1, a parte dessa figura que representa o circuito de medição de tensão consiste nos elementos destacados da Figura 4.3 que são, o sensor de tensão conectado em paralelo com a carga, juntamente com o circuito de condicionamento do sinal de tensão. Sendo assim montou-se o circuito da Figura 4.4. Alimenta-se o circuito com tensão simétrica de 15 V e a tensão da rede elétrica.

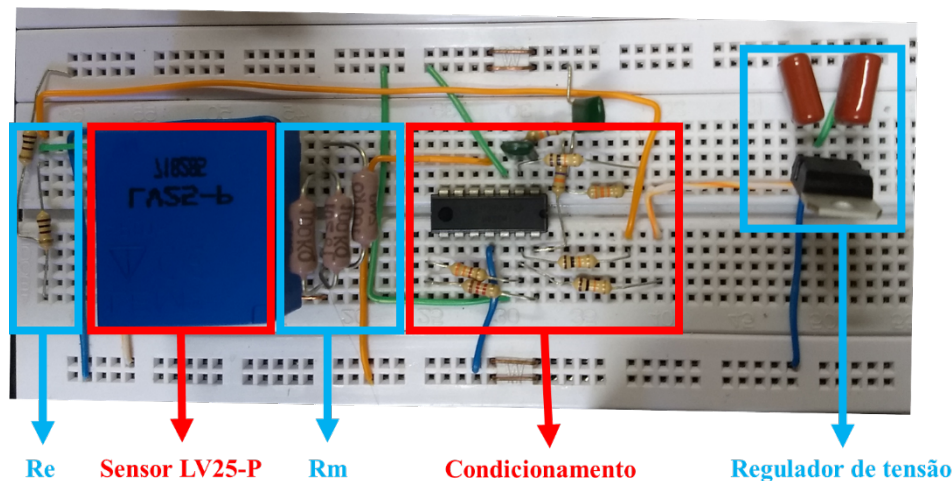
Figura 4.3 – Diagrama do circuito medidor de tensão.



Fonte: Autor.

O circuito da Figura 4.4 é o resultado da montagem desse diagrama e é composto então por um sensor de tensão da marca LEM, modelo LV25-P (LEM, 2014). Para o circuito de condicionamento utilizou-se um circuito integrado do modelo LM324 (FAIRCHILD, 2002) constituído de quatro amplificadores operacionais, também um regulador de tensão de 5 V (SEMICONDUCTOR, 2010).

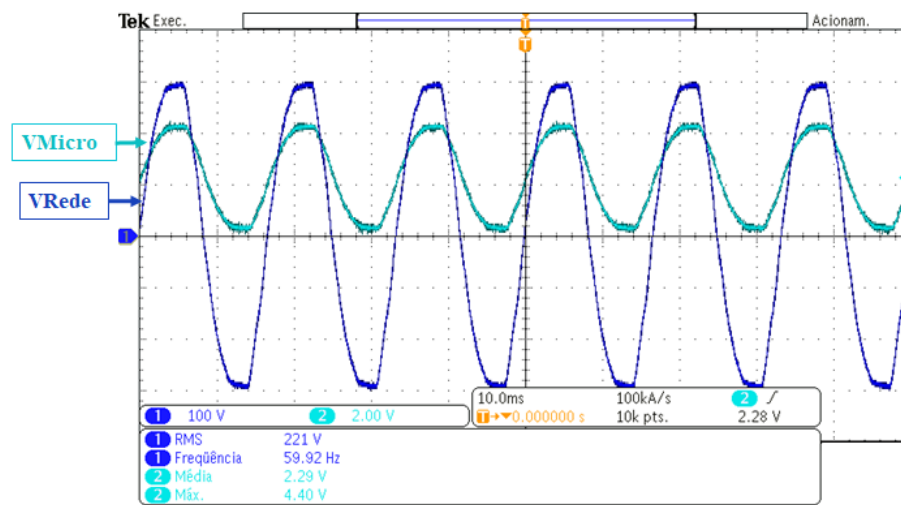
Figura 4.4 – Circuito de medição de tensão montado em *protoboard*.



Fonte: Autor.

Para visualização dos resultados utilizou-se um osciloscópio da marca Tektronix, modelo DPO2002B presente no laboratório de engenharia elétrica da universidade. Como já visto na parte do projeto os sinais no decorrer do circuito são nomeados conforme a etapa. Para verificação do circuito de tensão efetuou-se a medida da tensão da rede comparando com a tensão de saída do circuito de condicionamento, nomeadas como V_{rede} e V_{Micro} respectivamente. Podemos ver na Figura 4.5 que quando se aplica a tensão da rede ($V_{rms}=220\text{ V}$) no sensor, a saída do circuito de condicionamento tem valor máximo de 4,4 V, sendo que o valor esperado era de 4,35 V. Portanto o circuito de medição e condicionamento de tensão são validos e funcionam como projetados.

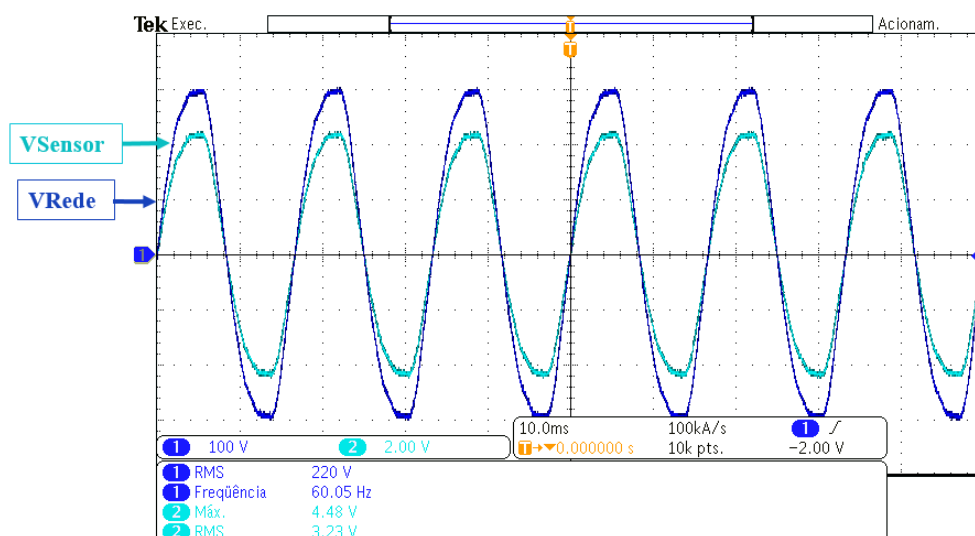
Figura 4.5 – Tensão da rede - Vrede (Ch1 - 100V/div) e Tensão de saída do condicionamento - VMicro (Ch2 - 2V/div) - 10ms/div.



Fonte: Autor.

Para melhor analisar a resposta do circuito de medição de tensão, os gráficos a seguir relacionam duas tensões do circuito, ou seja, a tensão de um estágio comparada com a seguinte. A primeira análise consiste na tensão de entrada do circuito com a tensão de saída do sensor de tensão, VRede e VSensor respectivamente. Conforme a Figura 4.6 podemos perceber que a tensão de saída do sensor possui valor máximo de 4,48 V, visto que o valor teórico esperado era de 4,66 V. com isso podemos verificar o funcionamento do sensor, visto que os valores medidos se aproximam do projeto.

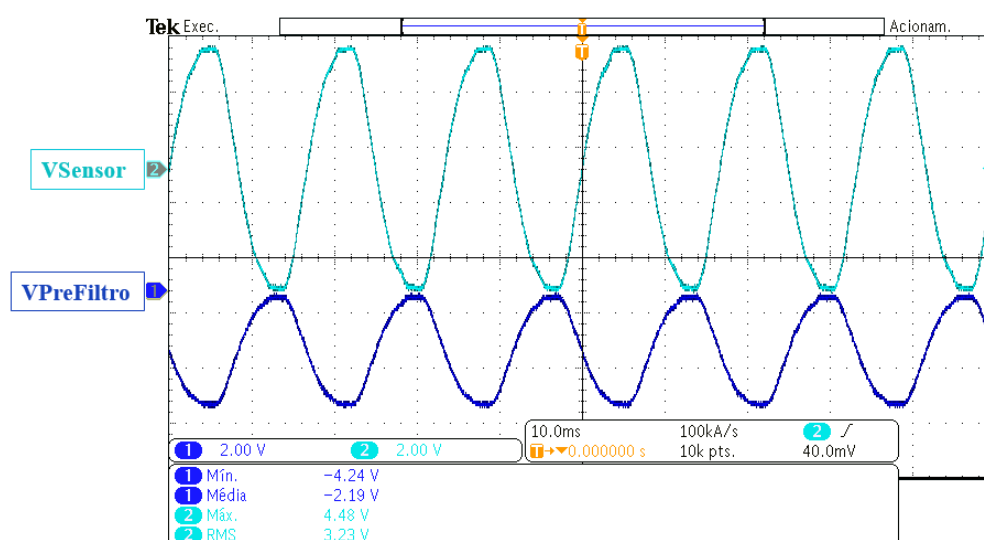
Figura 4.6 – Tensão da rede - Vrede (Ch1 - 100V/div) e Tensão de saída do sensor - VSensor (Ch2 - 2V/div) - 10ms/div.



Fonte: Autor.

O próximo passo é verificar a saída do circuito somador com relação a entrada desse circuito. Pode-se visualizar na Figura 4.7 a resposta do circuito inversor somador. Podemos visualizar que é adicionado um *offset* no sinal provindo do sensor, um ganho menor do que um, e por fim a inversão do sinal. O valor mínimo esperado para a tensão após o somador (VPreFiltro) era de -4,35 V e na figura abaixo podemos ver que o valor mínimo da tensão é de -4,24 V, valor esse próximo ao valor esperado. Podemos visualizar também a inversão do sinal, assim como a defasagem em 180° devido ao amplificador operacional aplicado.

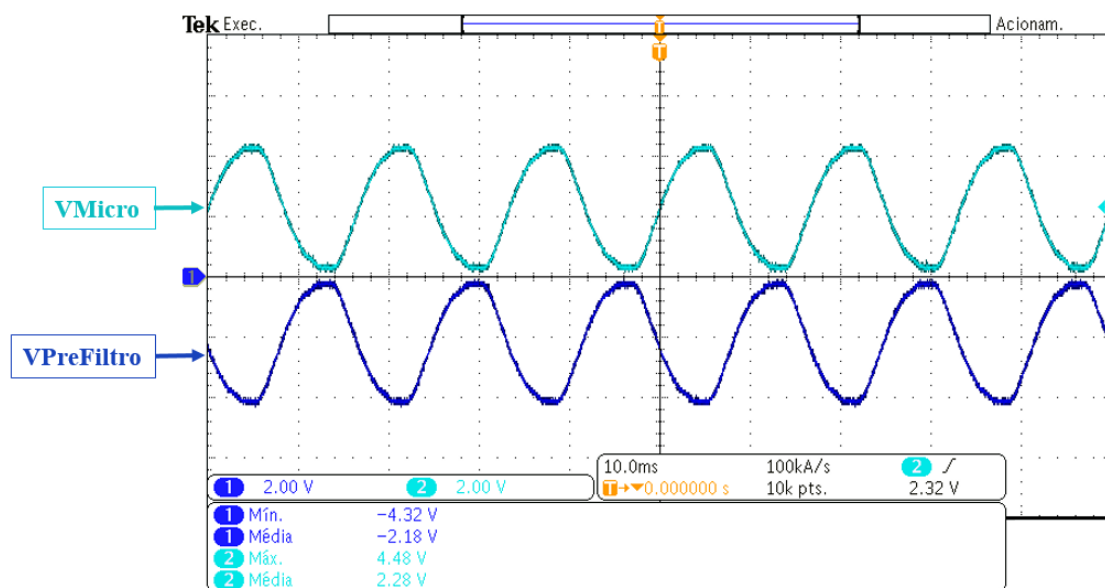
Figura 4.7 – Tensão após o somador - VPreFiltro (Ch1 - 2V/div) e Tensão de saída do sensor - VSensor (Ch2 - 2V/div) - 10ms/div.



Fonte: Autor.

Tendo validado a etapa anterior, a próxima etapa é a validação do circuito do filtro passa baixa inversor. Na Figura 4.8 podemos ver a resposta da etapa de filtro do circuito de condicionamento, ou seja, o valor mínimo da onda que antes do filtro (VPreFiltro) era de -4,32 V, após a etapa do filtro o valor máximo da onda (VMicro) é de 4,48 V, sendo que o valor teórico projetado era de 4,35 V. Podemos ver também que o sinal é defasado em 180°, voltando a fase original do sinal. Com esse sinal condicionado, podemos observar que os valores da tensão de saída do condicionamento (VMicro) são compatíveis com a entrada do microcontrolador (0 V até 5 V).

Figura 4.8 – Tensão após o somador - VPreFiltro (Ch1 - 2V/div) e Tensão de saída do condicionamento - VMicro (Ch2 - 2V/div) - 10ms/div.

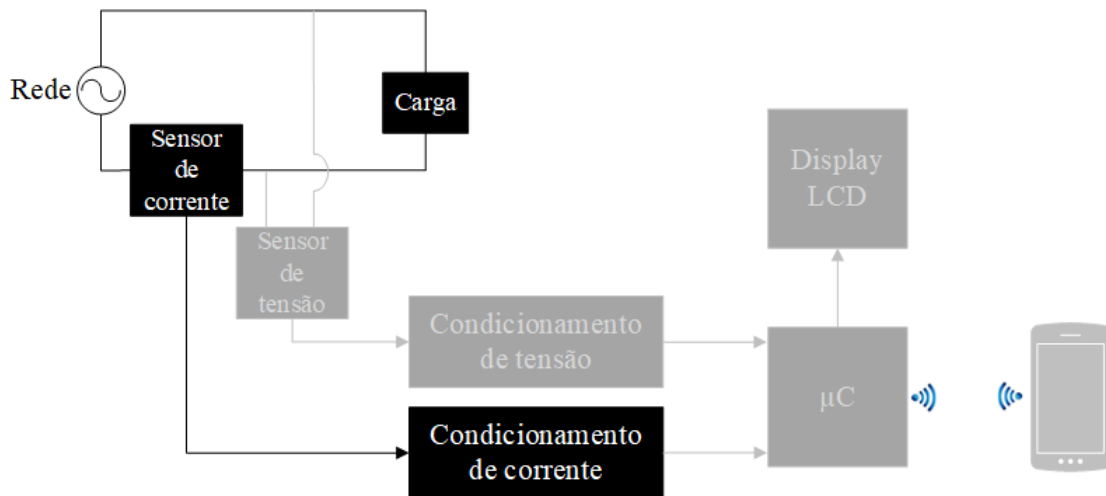


Fonte: Autor.

4.2 CIRCUITO MEDIDOR DE CORRENTE

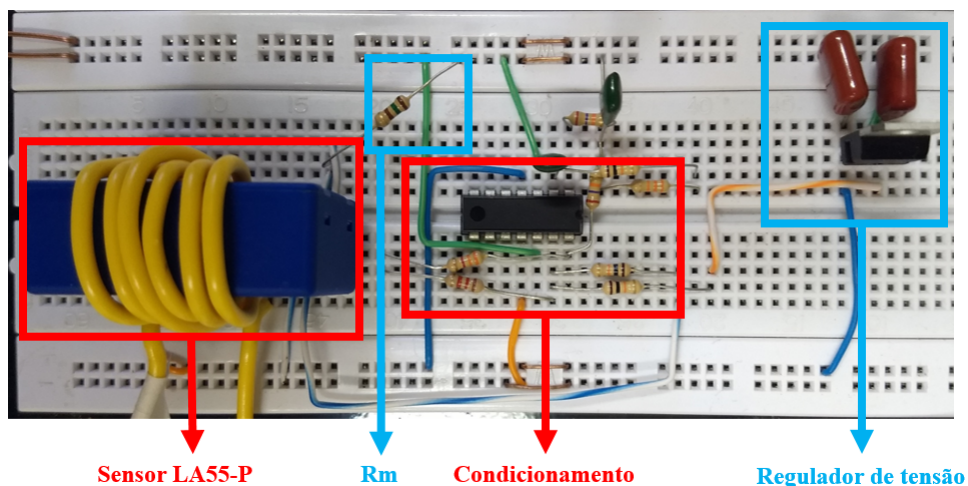
Para montagem do circuito de medição de corrente partiu-se do diagrama do circuito total da Figura 4.1, a parte dessa figura que corresponde ao circuito de medição de corrente consiste nos elementos destacados da Figura 4.9 que são, o sensor de corrente conectado em série com a carga, juntamente com o circuito de condicionamento do sinal de tensão gerado pelo sensor.

Figura 4.9 – Diagrama do circuito medidor de corrente.



Fonte: Autor.

A montagem é realizada conforme pode-se visualizar na Figura 4.10, onde as principais partes do circuito são destacadas. Vale destacar também nessa figura que o condutor do circuito analisada passa 6 (seis) vezes dentro do sensor de corrente, fazendo com que a corrente do sensor seja 6 (seis) vezes maior do que a corrente real do circuito. Esse aumento na corrente real do circuito é realizado para aumentar a precisão da medida e diminuir a escala de medição, isto será compensado no microcontrolador.

Figura 4.10 – Circuito de medição de corrente montado em *protoboard*.

Fonte: Autor.

Os componentes utilizados foram, o sensor de corrente é da marca LEM do modelo LA55-P (LEM, 2013) com características já mencionadas no projeto. Para o circuito de condicionamento utilizou-se um circuito integrado do modelo LM324 (FAIRCHILD, 2002)

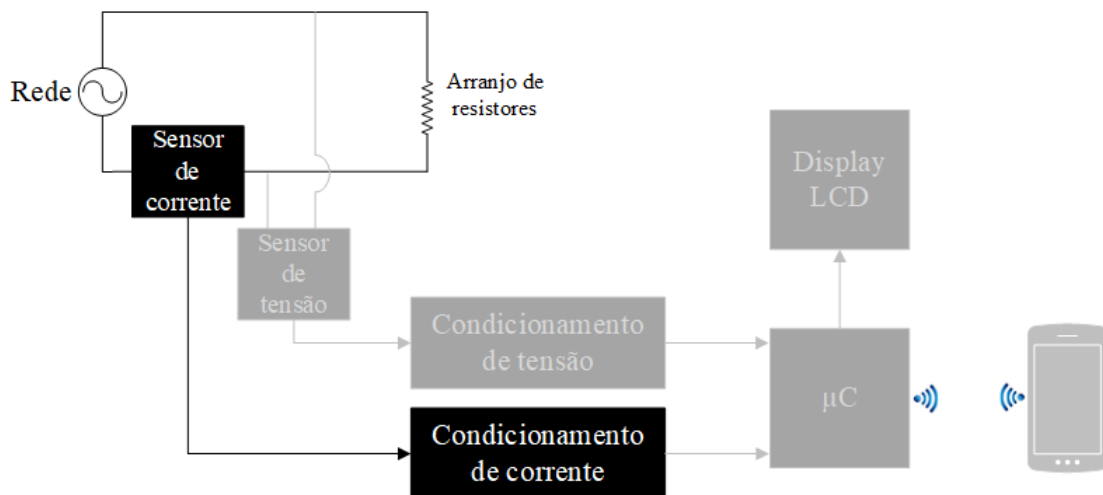
composto de quatro amplificadores operacionais, também um regulador de tensão de 5V (SEMICONDUCTOR, 2010).

A validação do funcionamento do circuito de corrente é feita de três formas diferentes, a primeira delas utilizando uma carga resistiva, em um segundo momento é aplicado uma carga indutiva no caso um motor de indução monofásico, e em terceiro uma carga não linear utilizando um conjunto de lâmpadas compactas.

4.2.1 Carga resistiva

Vamos iniciar a análise com uma carga resistiva, essa carga resistiva é constituída por um arranjo de resistores, o circuito utilizado é o demonstrado na Figura 4.11, os componentes em destaque.

Figura 4.11 – Diagrama de medição de corrente no circuito resistivo.



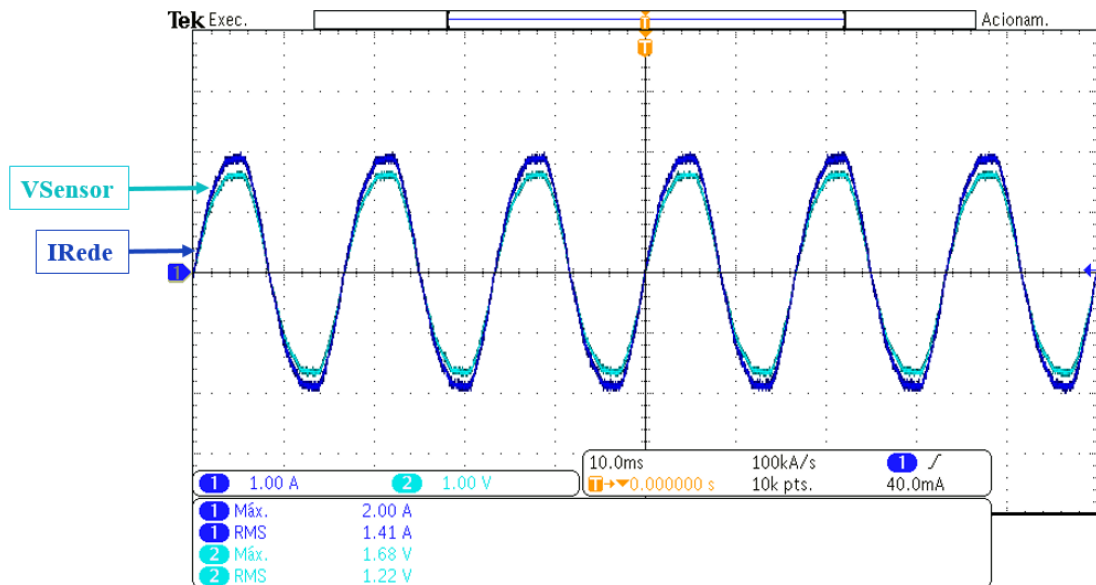
Fonte: Autor.

Nesse circuito foi aplicado uma corrente máxima de 2 A (I_{Rede}) sobre resistores de potência. Lembrando que a corrente que flui pelo circuito é multiplicada por 6 devido ao número de espiras no sensor, como já foi explicado acima, dessa forma o valor máximo da tensão gerada no secundário do sensor deveria ser:

$$\begin{aligned}
 I_p &= 2 \times 6 = 12 \text{ A} \\
 I_s &= \frac{12}{1000} = 12 \text{ mA} \\
 V_{\text{sensormáx}} &= 12 \times 10^{-3} \times 150 = 1,8 \text{ V}
 \end{aligned}$$

A tensão no circuito secundário ao sensor (V_{Sensor}) deveria ter valor máximo igual a 1,8 V, podemos ver na Figura 4.12 que o valor máximo é de 1,68 V, valor esse considerado próximo ao valor desejado.

Figura 4.12 – Corrente do circuito - IRede (Ch1 - 1A/div) e Tensão de saída do sensor - VSensor (Ch2 - 1V/div) - 10ms/div.

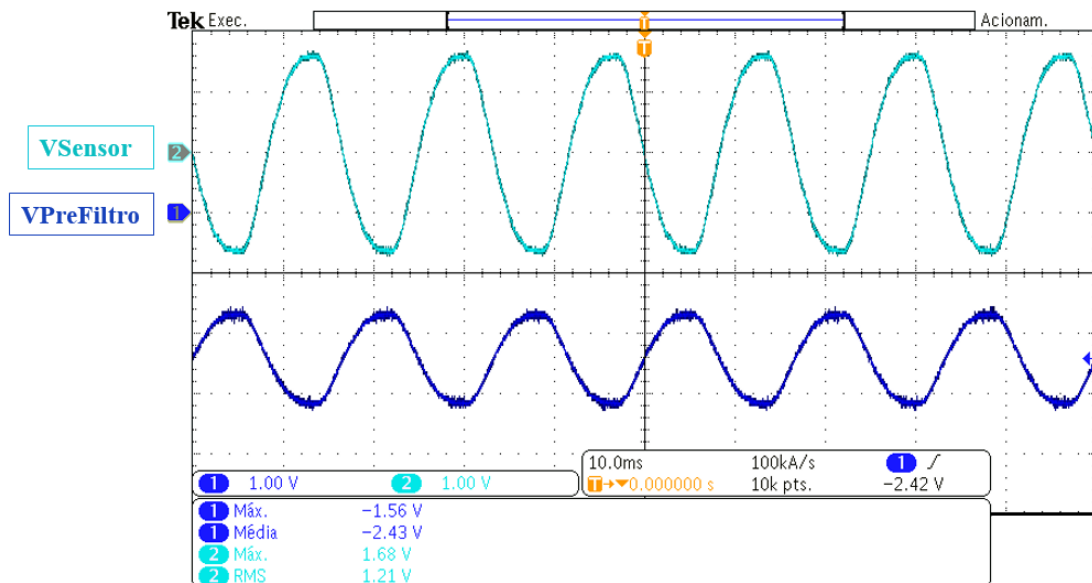


Fonte: Autor.

A próxima etapa é analisar o sinal de entrada do somador (VSensor) comparado com o sinal de saída do somador (VPreFiltro), nesse caso temos o valor máximo de saída do somador (VPreFiltro) projetado como sendo:

$$V_{prefiltromin} = -4500\left(\frac{1,8}{10000} + \frac{5}{10000}\right) = -3,06 \text{ V}$$

Figura 4.13 – Tensão após o somador - VPreFiltro (Ch1 - 1V/div) e Tensão de saída do sensor - VSensor (Ch2 - 1V/div) - 10ms/div.

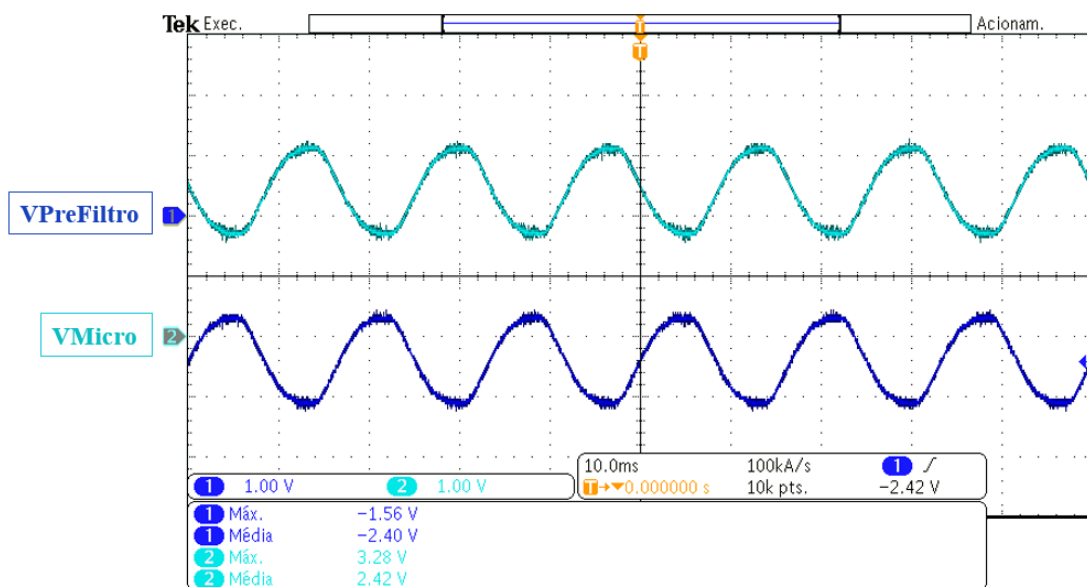


Fonte: Autor.

Pode-se observar que o valor esperado para a saída do somador (VPreFiltro) mínimo é de -3,06 V, conforme a Figura 4.13 esse valor é aproximado de -3,3 V, provindo da soma das tensões $(-2,43 + (-2,43 + 1,56))$, valor esse considerado correto. Nessa etapa ocorre a mesma defasagem de 180° devido a configuração de amplificador operacional aplicado.

Tendo essa etapa avaliada, a próxima se trata de analisar a tensão de entrada do filtro (VPreFiltro) com relação ao sinal de saída do circuito (VMicro). Pode ser visto na Figura 4.14 que o sinal da anterior ao filtro é totalmente negativo e após essa etapa a tensão é apenas invertida e defasada em 180° , com isso temos o sinal de saída do circuito compatível com a entrada do microcontrolador. Como na etapa representada anteriormente o valor mínimo assumia valor de 3,3 V, nessa etapa o valor máximo é visto na Figura 4.14 e tem valor aproximado a 3,28 V.

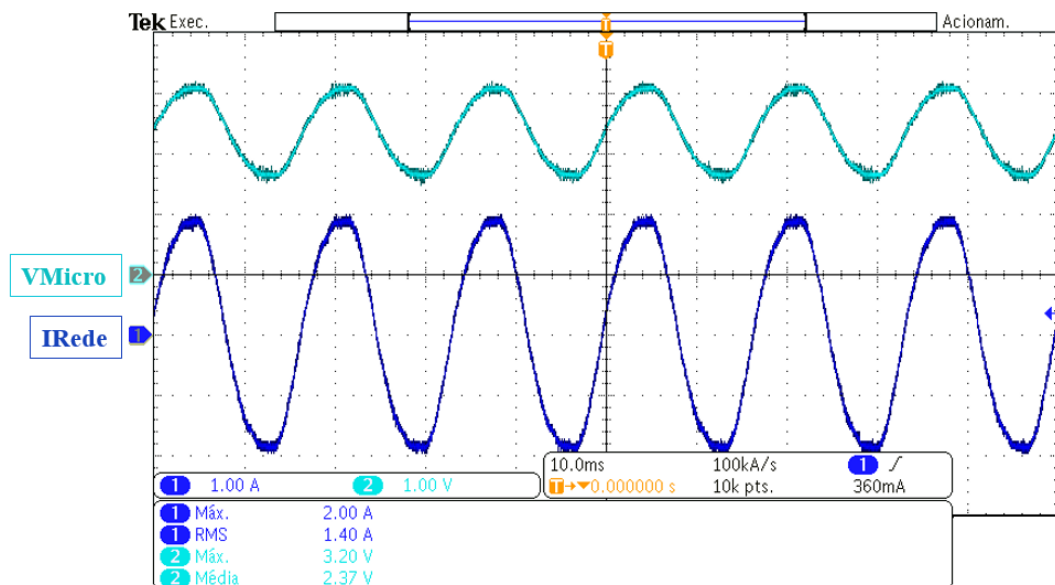
Figura 4.14 – Tensão após o somador - VPreFiltro (Ch1 - 1V/div) e Tensão de saída do condicionamento - VMicro (Ch2 - 1V/div) - 10ms/div.



Fonte: Autor.

Em resumo ao circuito de sensoriamento e condicionamento de corrente temos a Figura 4.15, onde podemos mencionar algumas características importantes, a tensão de saída do circuito tem a mesma forma da corrente de entrada apenas com amplitude reduzida e variando em torno do offset de 2,25 V.

Figura 4.15 – Corrente de entrada do sensor - IRede (Ch1 - 1A/div) e Tensão de saída do condicionamento - VMicro (Ch2 - 1V/div) - 10ms/div.

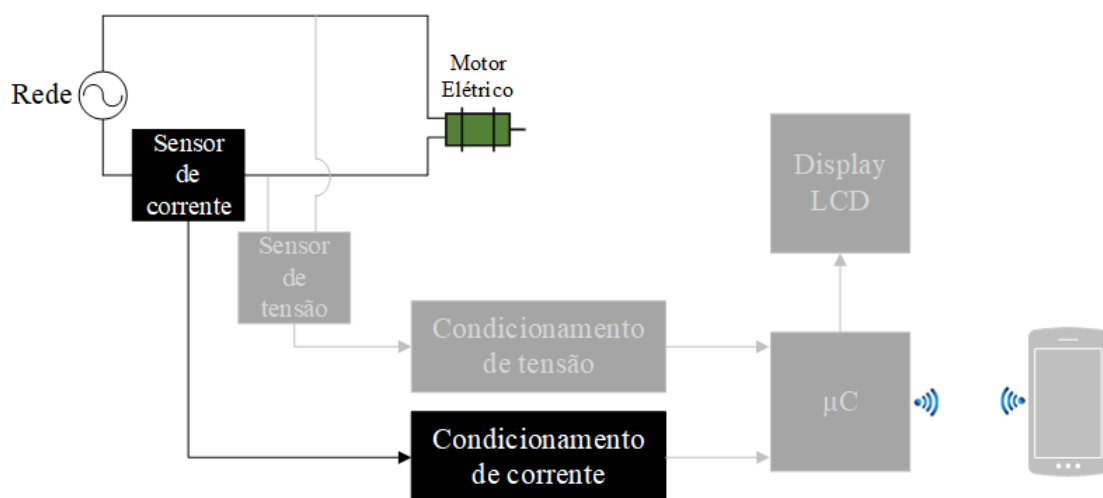


Fonte: Autor.

4.2.2 Carga indutiva

Para a análise do circuito de medição de corrente com carga indutiva foi utilizado um pequeno motor de ventilador, o circuito utilizado nesse caso se trata da parte destacada da Figura 4.16, constituído pelo sensor de corrente e o circuito de condicionamento de corrente.

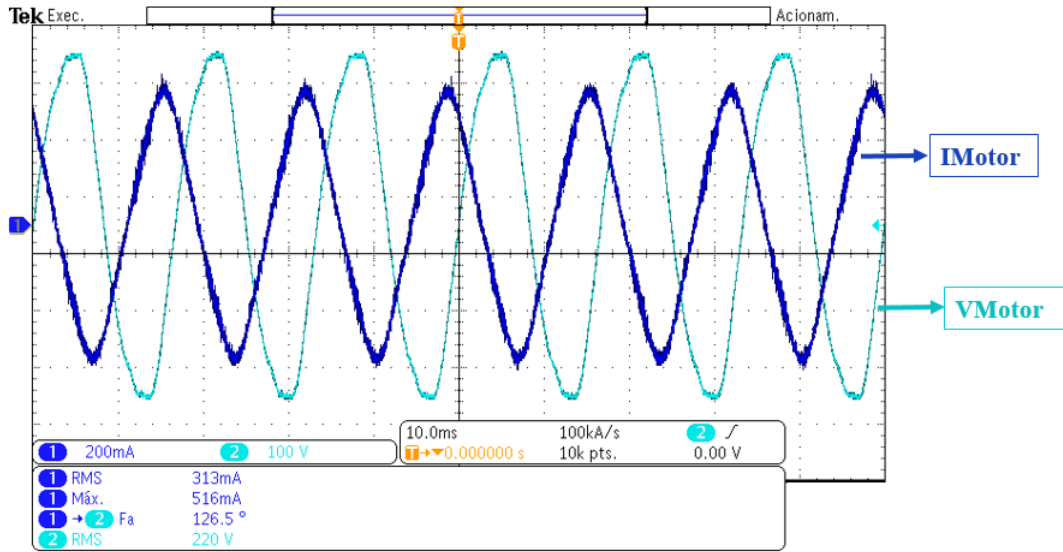
Figura 4.16 – Diagrama de medição de corrente no circuito indutivo.



Fonte: Autor.

O circuito montado possui características indutivas, conforme podemos ver nas formas de onda de entrada do motor da Figura 4.17. Dessa figura podemos destacar a defasagem da corrente em relação a tensão de $-53,5^\circ$, o que demonstra a característica indutiva.

Figura 4.17 – Corrente de entrada do motor - IMotor (Ch1 - 200mA/div) e Tensão de entrada do motor - VMotor (Ch2 - 100V/div) - 10ms/div.



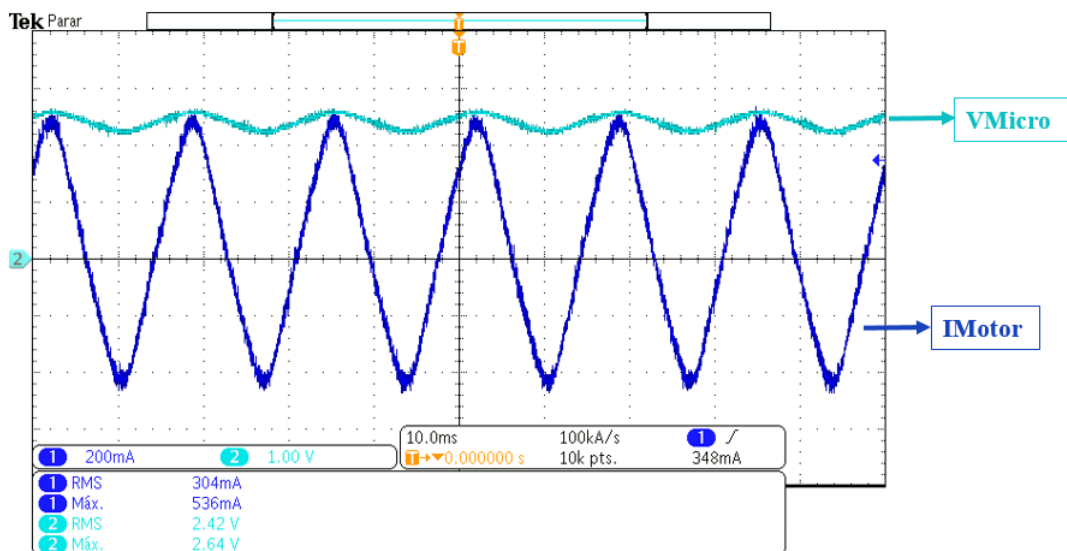
Fonte: Autor.

Para validar os dados de corrente mensurados sobre esse motor, primeiramente vamos analisar o sinal de entrada da corrente e compararmos com o sinal de tensão de saída do circuito de condicionamento do sinal. Na Figura 4.18 podemos ver a corrente do motor, assim como a tensão produzida pelo circuito de medição de corrente. A medida de corrente do motor elétrico segue a relação de cálculos abaixo, lembrando que a corrente que percorre o sensor é multiplicada por seis. Dessa forma temos:

$$\begin{aligned}
 I_{pmáx} &= 0,536 \times 6 = 3,216 \text{ A} \\
 I_{smáx} &= \frac{3,216}{1000} = 3,216 \text{ mA} \\
 V_{sensormáx} &= 3,216 \times 10^{-3} \times 150 = 0,4824 \text{ V} \\
 V_{PreFiltromín} &= -4500 \left(\frac{0,4824}{10000} + \frac{5}{10000} \right) = -2,47 \text{ V} \\
 V_{Micromáx} &= -V_{PreFiltromín} = 2,47 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Podemos perceber, a partir da dedução acima, que a tensão de saída do circuito de condicionamento do sinal de corrente deve assumir um valor de tensão máxima próximo a 2,47 V, a partir da Figura 4.18 vemos que a tensão máxima de saída do circuito ficou em torno de 2,64 V, essa diferença se dá devido as variações dos componentes do circuito, mas para fins de medida esses valores são considerados pertinentes.

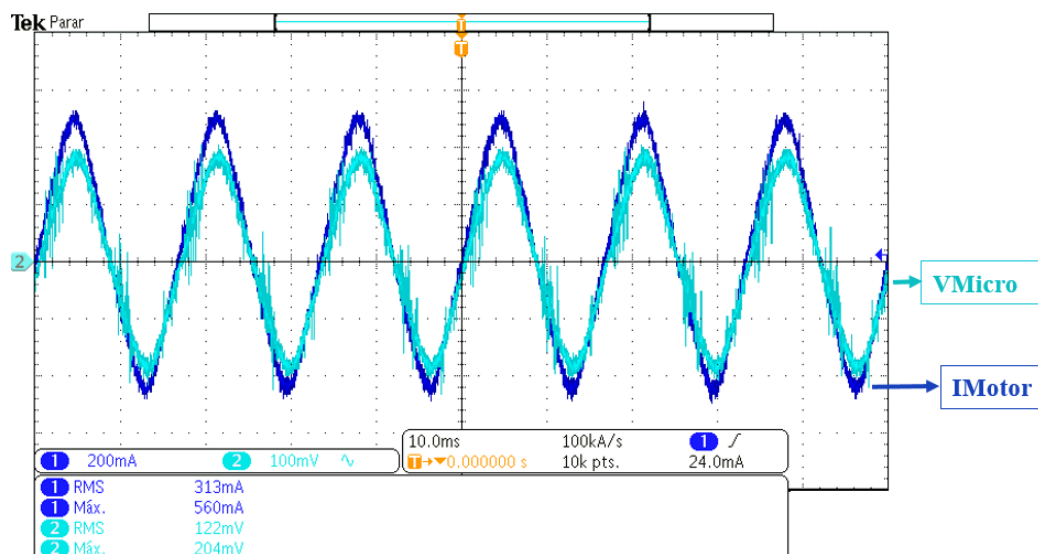
Figura 4.18 – Corrente de entrada do motor com acoplamento CC - IMotor (Ch1 - 200mA/div) e Tensão de saída do circuito de condicionamento - VMicro (Ch2 - 1V/div) - 10ms/div.



Fonte: Autor.

Para melhor avaliar a tensão de saída do circuito de condicionamento, alterou-se o acoplamento de CC para CA no medidor osciloscópio, obtendo a forma de onda da Figura 4.19, pode-se observar que a tensão de saída do circuito de condicionamento é proporcional a corrente de entrada com amplitude aproximada a calculada.

Figura 4.19 – Corrente de entrada do motor com acoplamento CA - IMotor (Ch1 - 200mA/div) e Tensão de saída do circuito de condicionamento - VMicro (Ch2 - 100mV/div) - 10ms/div.

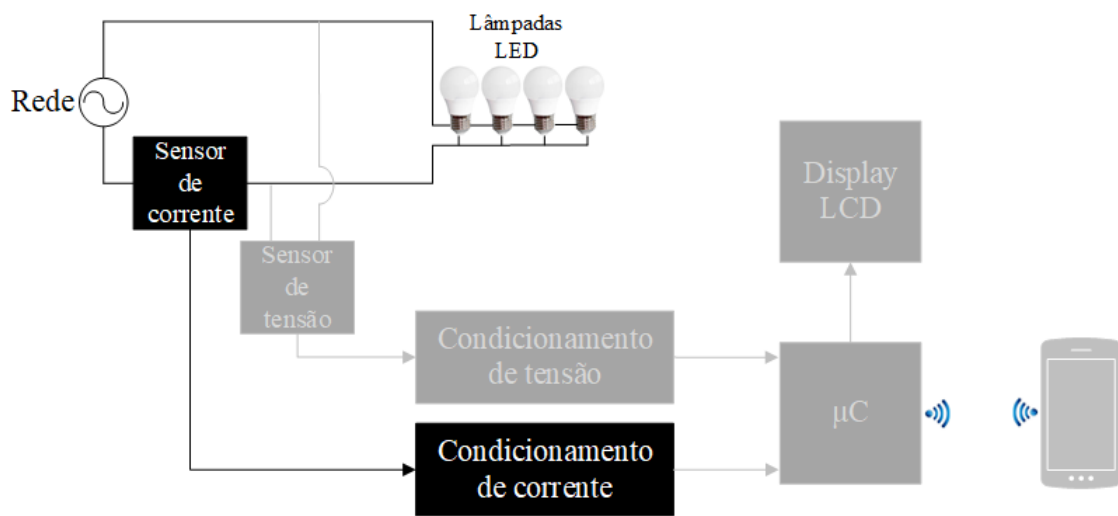


Fonte: Autor.

4.2.3 Carga não linear

Assim como as cargas lineares é feito o ensaio do circuito de medição de corrente com uma carga não linear, nesse caso utilizou-se um conjunto de lâmpadas do tipo LED que possuem um circuito eletrônico com características não lineares de consumo. O circuito montado para essa etapa segue os componentes destacados da Figura 4.20, composto pelo sensor de corrente e circuito de condicionamento de corrente.

Figura 4.20 – Diagrama de medição de corrente no circuito com carga não linear.



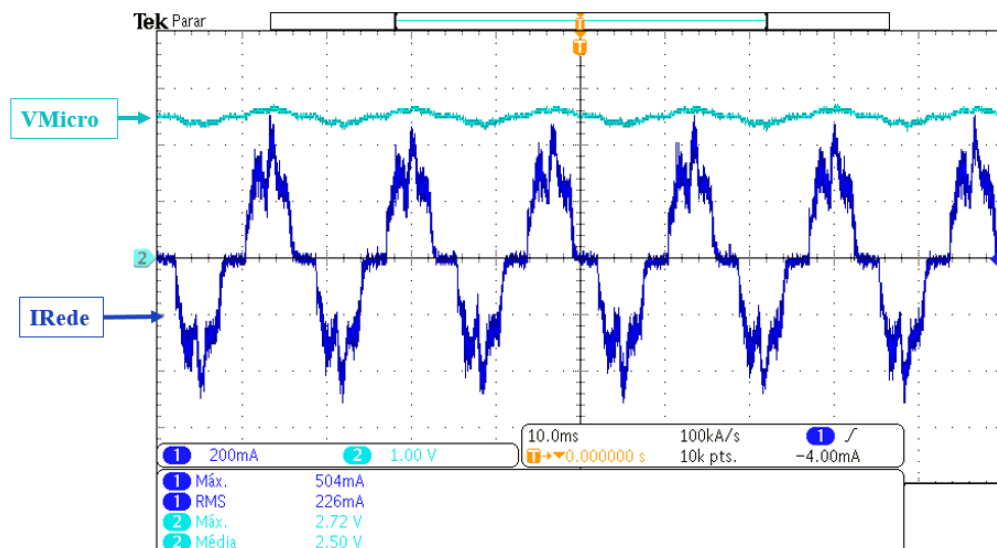
Fonte: Autor.

Para realizar a análise dos resultados vamos partir da corrente das lâmpadas extraída da Figura 4.21, assim a tensão esperada na saída do circuito é:

$$\begin{aligned}
 I_{pm\acute{a}x} &= 0,504 \times 6 = 3,024 \text{ A} \\
 I_{sm\acute{a}x} &= \frac{3,024}{1000} = 3,024 \text{ mA} \\
 V_{Sensorm\acute{a}x} &= 3,024 \times 10^{-3} \times 150 = 0,4536 \text{ V} \\
 V_{PreFiltrom\acute{i}n} &= -4500 \left(\frac{0,4536}{10000} + \frac{5}{10000} \right) = -2,454 \text{ V} \\
 V_{Microm\acute{a}x} &= -V_{PreFiltrom\acute{i}n} = 2,454 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Podemos ver a partir das equações acima que a tensão máxima de saída do circuito esperada tem valor de 2,454 V. Da Figura 4.21 podemos ver esse valor como sendo um valor de 2,72 V, muito próximo do esperado. Primeiramente é efetuada a medição do sinal com o osciloscópio configurado em acoplamento CC, podemos observar na Figura 4.21 que a resposta segue o padrão desejado.

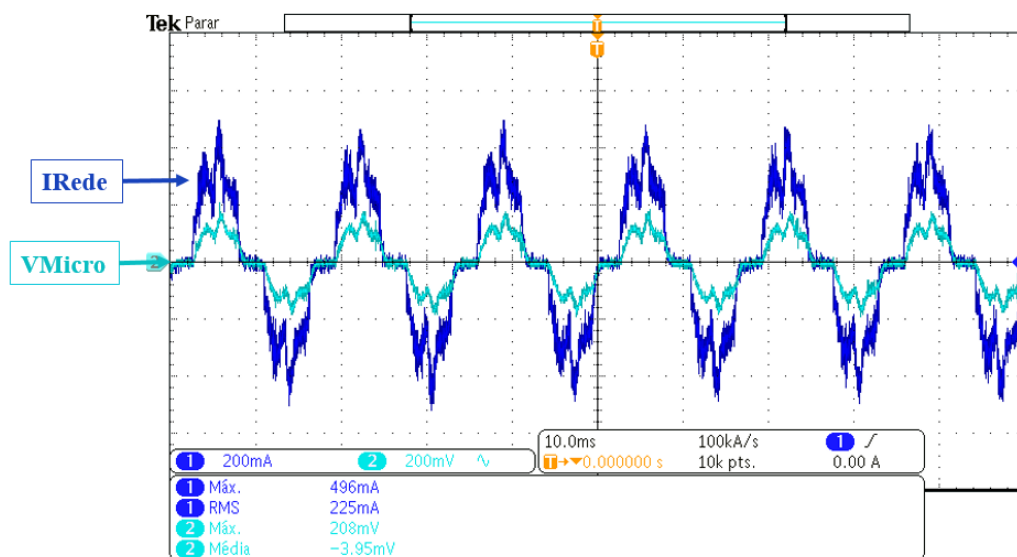
Figura 4.21 – Corrente de entrada das lampadas com acoplamento CC - IRede (Ch1 - 200mA/div) e Tensão de saída do circuito de condicionamento - VMicro (Ch2 - 1V/div) - 10ms/div.



Fonte: Autor.

Nesse caso também alterou-se o acoplamento de CC para CA no medidor osciloscópio, obtendo a forma de onda da Figura 4.22.

Figura 4.22 – Corrente de entrada das lampadas com acoplamento CA - IRede (Ch1 - 200mA/div) e Tensão de saída do circuito de condicionamento - VMicro (Ch2 - 200mV/div) - 10ms/div.

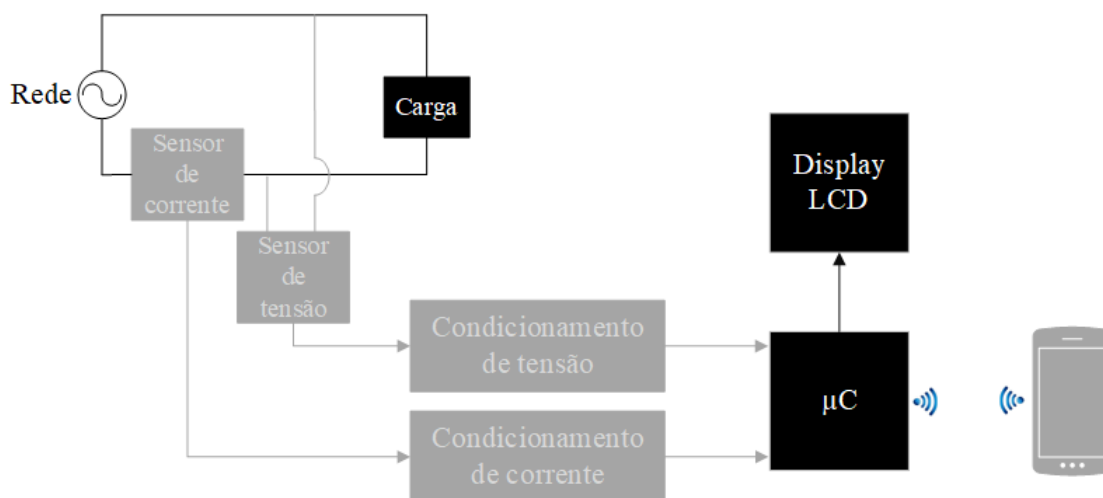


Fonte: Autor.

4.3 CÓDIGO MICROCONTROLADOR

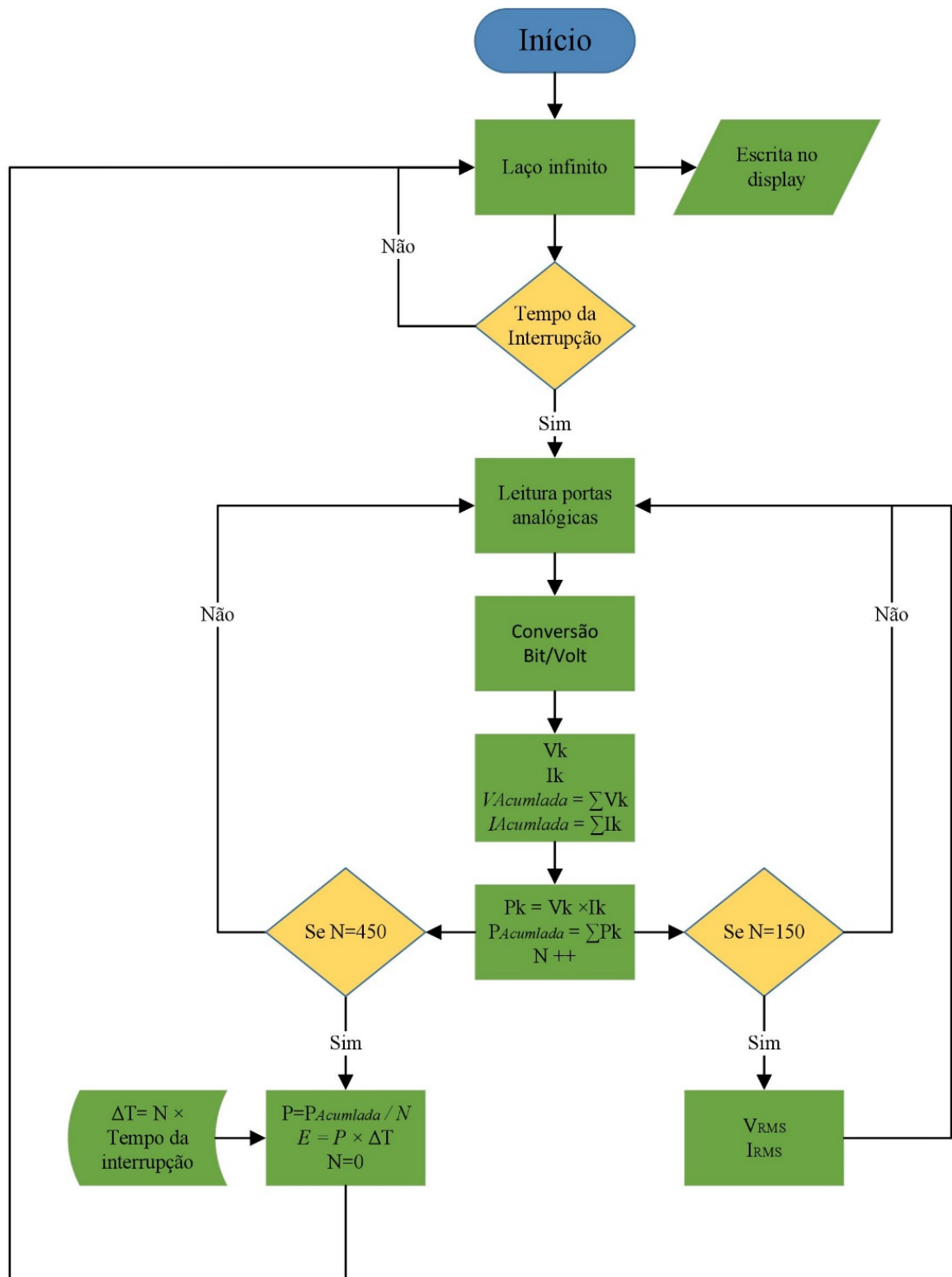
Agora que já tem-se os sinais de saída dos circuitos de condicionamento, os mesmos são inseridos nas entradas analógicas (A8 e A9) do microcontrolador, conforme descrito na Figura 4.1. Com os sinais condicionados e compatíveis com as entradas do microcontrolador, agora faz-se necessário programar o microcontrolador para efetuar os cálculos desejados. As etapas do programa implementado segue basicamente o fluxograma apresentado na Figura 4.24, sendo inicialmente definido um tempo para que a interrupção seja ativa, isso se faz necessário para que a leitura do valor de tensão e corrente seja mensurado ao mesmo tempo e não de forma aleatória. Já dentro da interrupção é feita a leituras das portas analógicas, a conversão analógico/digital e os demais cálculos desejados. Cada etapa de funcionamento do programa será descrita a seguir. Nesse ponto temos no circuito os dispositivos destacados na Figura 4.23, circuito constituído pelo microcontrolador recebendo o sinal do circuito de condicionamento e comandando o *display* mostrador dos dados.

Figura 4.23 – Diagrama do circuito do microcontrolador.



Fonte: Autor.

Figura 4.24 – Fluxograma de funcionamento do código programado no microcontrolador.



Fonte: Autor.

4.3.1 Conversão analógico/digital e valor instantâneo

O sinal provindo dos sensores se trata de um sinal analógico, para trabalhar com o sinal é efetuado uma conversão analógico/digital nas entradas do Arduino, essa conversão é realizada a uma taxa pré-estipulada de $555,556 \mu s$ (1,8 kHz), esse tempo se trata do tempo mínimo para execução do código e foi empregado ao tempo de interrupção. Essa interrupção é responsável por realizar os cálculos do programa. Para que possamos realizar os cálculos necessários, o valor que foi convertido de analógico para digital variando de 0 a 1023 deve ser convertido para um valor instantâneo, e assim dar prosseguimento aos cálculos. Essa transformação de bits para volts é feita seguindo a seguinte equação:

$$U_k = ((U_{bits} \times \frac{Volts}{bits}) - U_{Médio}) \times K \quad (4.1)$$

Onde:

- U_k : Valor instantâneo da medida;
- U_{bits} : Valor variando entre 0 e 1023 correspondente a tensão de entrada;
- Volts/bits: constante de conversão do valor em bits para um valor real de tensão (5/1024);
- $U_{Médio}$: Valor médio da entrada do microcontrolador (Valor de *offset* do sinal);
- K : Ganho total do circuito de condicionamento, para o circuito de medição de tensão $k=142,6$ e para o circuito de medição de corrente $k= 2,87$. Essas constantes foram estabelecidas a partir de ensaios práticos e calculados relacionando os valores de saída com os valores de entrada.

Dessa forma se obtém os valores de tensão e corrente para cada interrupção (V_k e I_k), que nesse caso serão considerados como sendo os valores instantâneos. Nessa etapa também é realizada o acumulo dos valores instantâneos, ou seja, um somatório (integral) que se utilizaremos nas próximas etapas do programa.

4.3.2 Cálculo da potência instantânea e valor médio

O valor médio da tensão e da corrente é calculado a cada amostra, esse valor é utilizado na equação do cálculo dos valores instantâneos da Equação 4.1, e segue a seguinte equação:

$$U_{Médio} = \frac{1}{N} \sum_0^N U_k \quad (4.2)$$

Onde:

- N = Número de interrupções;
- U_k = Valor instantâneo da tensão e da corrente.

A potência média é calculada a partir da soma consecutiva da potência instantânea (P_k) sendo essa última calculada através de:

$$P_k = V_k \times I_k \quad (4.3)$$

- V_k : Valor instantâneo da tensão;
- I_k : Valor instantâneo da corrente.

E então a potência média ou potência ativa instantânea é calculada como sendo:

$$P = \frac{1}{N} \sum_0^N P_k \quad (4.4)$$

Onde:

- P_k : Potencia instantânea.

4.3.3 Cálculo do valor RMS

O cálculo dos valores instantâneos RMS são efetuados a cada interrupção e seguem a seguintes equação:

$$U_k(RMS) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_0^N U_k^2} \quad (4.5)$$

Esses valores são calculados e armazenados para que toda vez que a sequência retorna para o programa principal, esses valores sejam mostrados no *display*.

4.3.4 Cálculo da energia elétrica consumida e do valor a ser pago

Com a potência instantânea calculada, para calcular a energia consumida pelo circuito onde o multimedidor está inserido, temos:

$$E = P \times \Delta_t \quad (4.6)$$

Onde:

- Δ_t = tempo das interrupções realizadas ($N \times 555,556 \mu s$)

Para efetuar o cálculo do valor a ser pago pelo consumidor, basta multiplicar o consumo de energia pelo valor da tarifa, nesse caso levando como base o valor da tarifa com os tributos já inseridos, e na localidade do município de Cachoeira do Sul - RS. a equação responsável por esse cálculo é:

$$Valor_{apagar} = E \times Valor_{tarifa} \quad (4.7)$$

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE POTÊNCIA

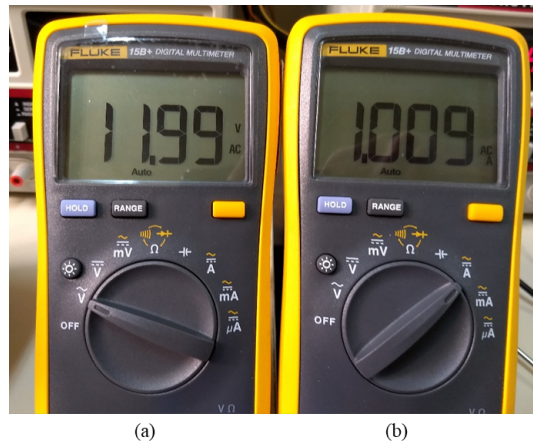
Para validação das leituras de tensão e corrente foi utilizado dois multímetros, o primeiro responsável por mensurar a corrente e o segundo responsável por mensurar a tensão, com isso podemos comparar a potência através da tensão e da corrente medidas com a demonstração do *display* provindo do Arduino. Para essa análise assume-se como medida de potência de referência a resposta dos multímetros. Os mesmos três tipos de cargas (resistiva, indutiva, não linear) foram utilizadas para análise dos resultados de potência.

4.4.1 Carga resistiva

Da mesma forma que na análise de tensão e corrente, aplicou-se um valor de tensão sobre um arranjo de resistores de potência, com a finalidade medir a potência consumida por eles. Podemos ver na Figura 4.25 os valores consumidos pela carga resistiva. Por se tratar de uma carga puramente resistiva, a potência é dada por:

$$P = V \times I = 11,99 \times 1,009 = 12W \quad (4.8)$$

Figura 4.25 – Medidas de tensão (a) e corrente (b) para uma carga resistiva .



Fonte: Autor.

Com o mesmo circuito agora analisa-se o valor que está sendo demonstrado no visor do *display*, como podemos ver na Figura 4.26, o valor de potência é de 11,53 W, valor esse bem próximo do valor mensurado pelos multímetros de 12 W.

Figura 4.26 – Medidas realizadas pelo circuito do multimetido (Tensão (V) em Volts, corrente (I) em Amperes e potência (P) em Watts) para uma carga resistiva.



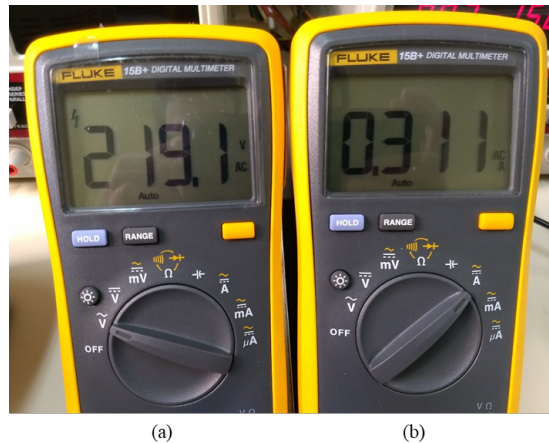
Fonte: Autor.

4.4.2 Carga indutiva

Já para a carga indutiva, efetuou-se a medida da mesma forma da carga anterior, como pode-se visualizar na Figura 4.27 os valores de tensão e corrente eficaz (RMS) foram de 219 V e 0,31 A respectivamente. Levando em consideração o fator de potência da carga indutiva, pode-se visualizar na possui características indutivas, conforme podemos ver nas formas de onda de entrada do motor da Figura 4.17 que a defasagem entre a tensão e a corrente foi de 53° portanto a potência ativa consumida pela carga indutiva é:

$$P = V \times I \times \cos(\theta) = 219,1 \times 0,311 \times \cos(53) = 41W \quad (4.9)$$

Figura 4.27 – Medidas de tensão (a) e corrente (b) para uma carga indutiva.



Fonte: Autor.

Podemos ver acima que o valor de potência assumidos como referência são as medidas dos multímetros, e a potência equivale a 41 W, podemos ver na Figura 4.28 que o valor de potência se aproximou ao valor de referência e assume valor de 41,36 W, valor esse considerado próximo ao valor de referência esperado.

Figura 4.28 – Medidas realizadas pelo circuito do multimetador (Tensão (V) em Volts, corrente (I) em Amperes e potência (P) em Watts) para uma carga indutiva.



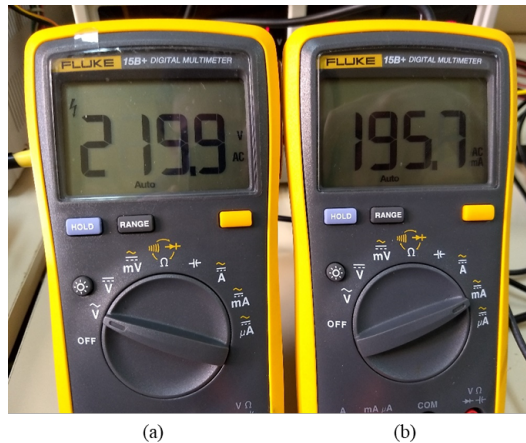
Fonte: Autor.

4.4.3 Carga não linear

A mesma análise é feita na carga não linear, no caso o conjunto de lâmpadas. Quando se conecta o circuito, as medidas realizadas a partir dos medidores multímetros são as vistas na Figura 4.29. Como esses multímetros são equipamentos com capacidade de medir diferentes formas de onda (*True RMS*) a potência consumida por esse conjunto de lâmpadas é dada pela Equação 4.10, sendo o fator de potência ($\cos\theta$) obtido da folha de dados da lâmpada (LED, 2019).

$$P = V \times I \times \cos\theta = 219,9 \times 0,1957 \times 0,92 = 39,59W \quad (4.10)$$

Figura 4.29 – Medidas de tensão (a) e corrente (b) para uma carga não linear.



Fonte: Autor.

A partir disso pode-se comparar esses resultados com os resultados gerados pelo microcontrolador são representados na Figura 4.30. Nessa figura podemos ver que a diferença do valor da potência com relação a potência de referência medida pelos multímetros (39,59 W para 37,506 W), essa diferença se dá devido a quantidade de amostras nas formas de onda. Como podemos ver na Figura 4.21 existe um pico na corrente da carga em um tempo muito pequeno, sendo assim o microcontrolador pode amostrar essa forma de onda de maneira que não consiga identificar a amplitude completa dessa, isso faz com que a potência medida pelo microcontrolador possua um valor menor do valor de potência real do circuito.

Figura 4.30 – Medidas realizadas pelo circuito do multimedidor (Tensão (V) em Volts, corrente (I) em Amperes e potência (P) em Watts) para uma carga não linear.



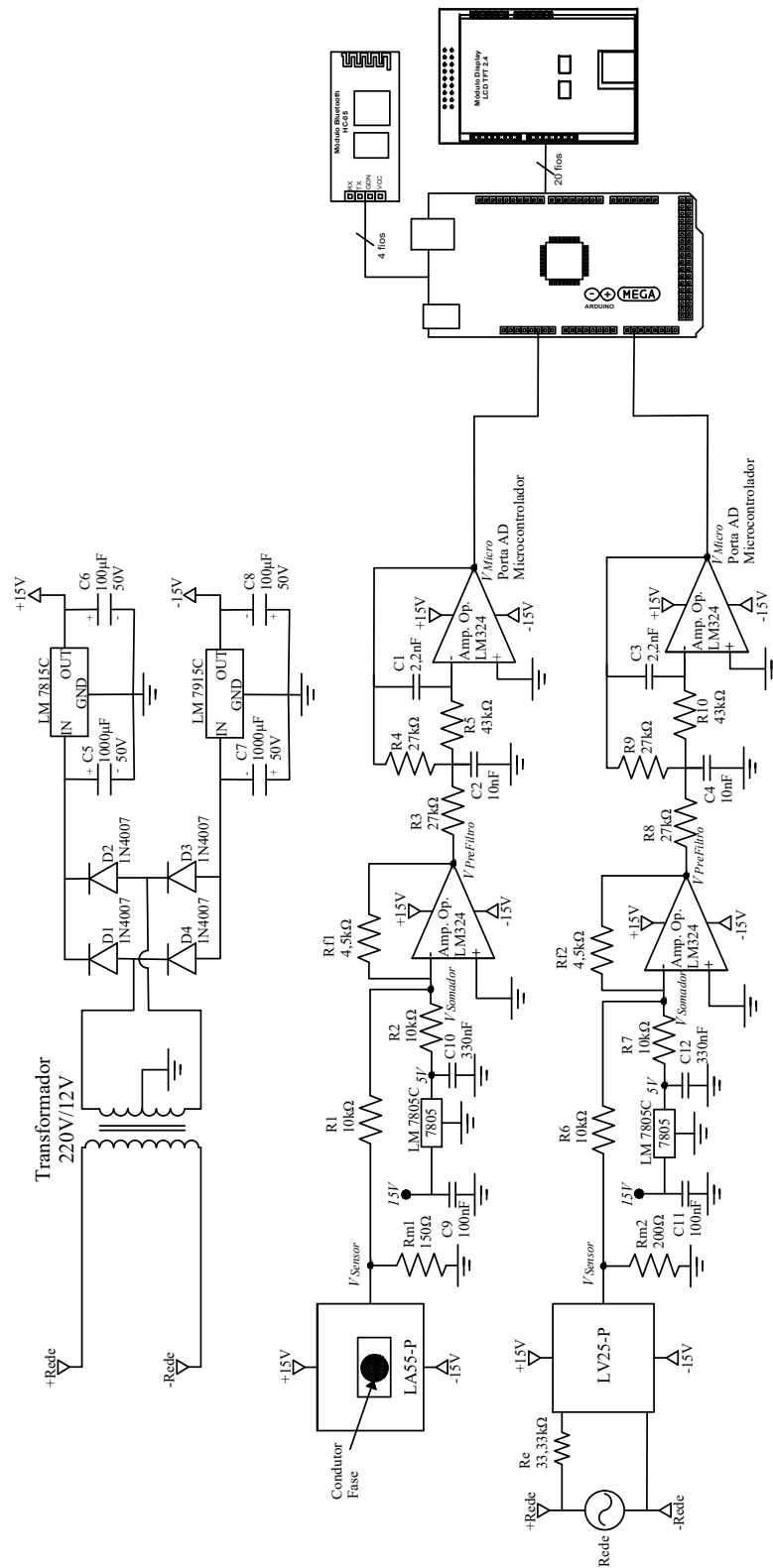
Fonte: Autor.

4.5 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

Sendo a proposta validada experimentalmente, um segundo protótipo foi implementado visando o melhor funcionamento do circuito, já que quando montado em *proto-board* as conexões são feitas de forma que torna o circuito mais suscetível a erros. Essa

montagem foi efetuada utilizando utilizando placa padrão de circuito impresso do tipo *ilhada*, onde foram dispostos todos os componentes. Os circuitos foram dispostos em uma caixa de material PVC para facilitar o transporte e a organização. A montagem foi dividida basicamente em duas placas, a primeira delas composta de circuito com maior potência onde montou-se os sensores de tensão e de corrente juntamente com a fonte simétrica responsável pela alimentação do circuito. Já na segunda placa montou-se o circuito responsável pela manipulação dos sinais, composta pelos circuitos de condicionamento. O restante do protótipo consiste na placa do microcontrolador Arduino conectado ao *display* e do circuito de acionamento do modulo de comunicação *bluetooth*. O circuito completo do protótipo implementado é o representado na Figura 4.31 com todos os componentes e periféricos utilizados, assim como no apêndice C deste trabalho tem-se uma tabela com todos os componentes utilizados.

Figura 4.31 – Circuito completo do multimetro implementado.



Fonte: Autor.

A partir do circuito completo do multimetido, desenvolveu-se o protótipo. Internamente o protótipo ficou conforme a Figura 4.32, onde podemos destacar o circuito de condicionamento separado do circuito dos sensores, e o circuito do microcontrolador na fixado na tampa da caixa.

Figura 4.32 – Visão interna do protótipo do multimetido desenvolvido.



Fonte: Autor.

Já na parte externa da caixa do protótipo podemos visualizar na Figura 4.33 a disposição dos demais dispositivos como a chave de acionamento do multimetido, os cabos para alimentação do circuito e para entrada da corrente a ser medida, e por último, o *display* LCD demonstrando as variáveis do processo.

Figura 4.33 – Visão externa do protótipo do multimetido desenvolvido.



Fonte: Autor.

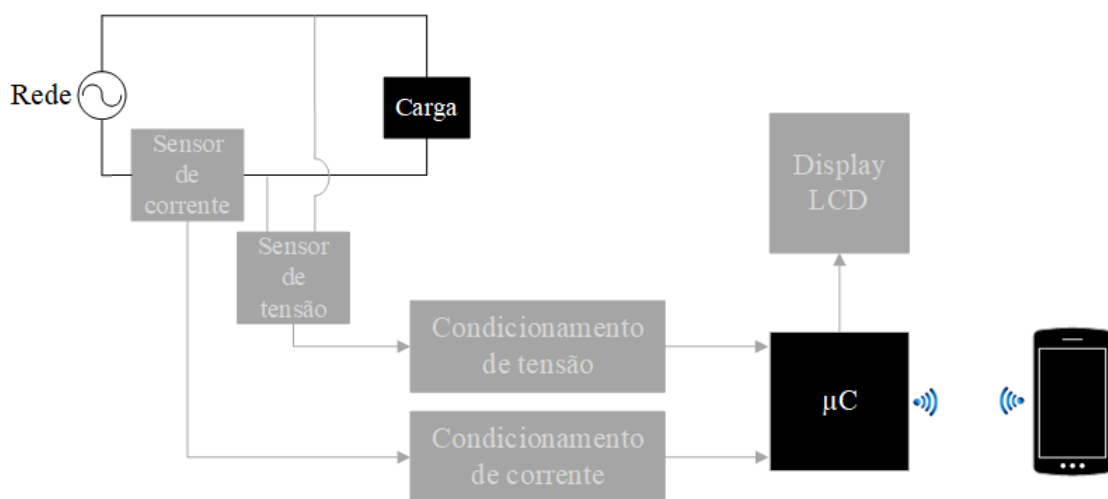
Um ponto que é importante ressaltar nessa etapa é que no ato de desenvolvimento

do circuito, o sensor de tensão foi afetado por um defeito e teve de ser substituído. O novo sensor utilizado é o LV20-P da marca LEM (LEM, 2015). Esse sensor responde de forma semelhante ao utilizado inicialmente, possui o mesmo circuito de acionamento e a resposta de saída é a mesma. A única diferença desse sensor para o sensor utilizado inicialmente (LV25-P) é com relação a precisão de medida que no sensor LV25-P era de $\pm 0,9\%$ agora com o sensor LV20-P passa a ser $\pm 1,1\%$. Com isso percebemos que a diferença não impacta de forma significativa nos resultados, por isso os resultados já extraídos com o sensor anterior não foram alterados.

4.5.1 Sistema de comunicação

Para que o usuário tenha a possibilidade de visualização dos dados de forma remota e em tempo real, utilizou-se da plataforma online MIT App Inventor (INVENTOR, 2018) para criar um aplicativo de visualização dos dados em um *smartphone*. Esse aplicativo teve basicamente o objetivo de buscar os principais dados junto ao multimedidor através da comunicação *bluetooth* e mostrar em uma tela de celular. Nesse caso estamos trabalhando com os elementos destacados da Figura 4.34.

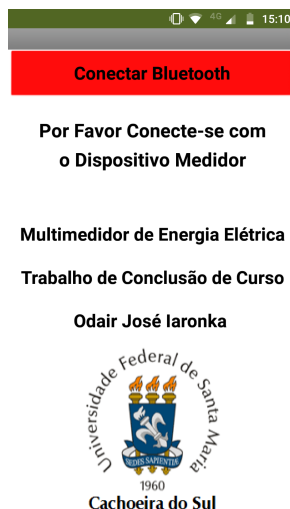
Figura 4.34 – Diagrama do circuito de comunicação.



Fonte: Autor.

Após a montagem do aplicativo junto a plataforma online do MIT App Inventor podemos ver na Figura 4.35 a tela inicial do aplicativo, nessa tela o usuário deve se conectar com o multimedidor através do *bluetooth*, e então os dados serão mostrados automaticamente na tela.

Figura 4.35 – Aplicativo desenvolvido para visualização dos dados.



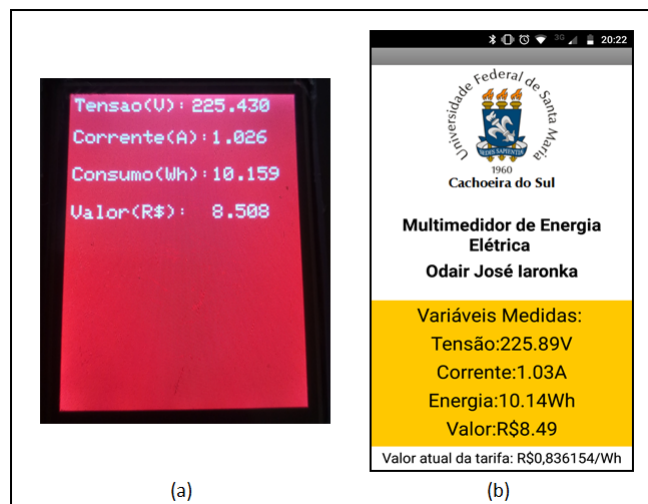
Fonte: Autor.

4.5.2 Análise da potência com o protótipo

Agora com o protótipo montado e o sistema de comunicação implementado podemos refazer as medidas realizadas anteriormente e verificar o funcionamento do protótipo como um todo.

Para iniciar a análise o multimedidor é responsável por mensurar uma carga totalmente resistiva conforme demonstrado na Figura 4.11. com isso temos a resposta do protótipo visualizada na Figura 4.36.

Figura 4.36 – Resposta do protótipo visualizada no *display* em (a) e no aplicativo em (b) para uma carga resistiva.

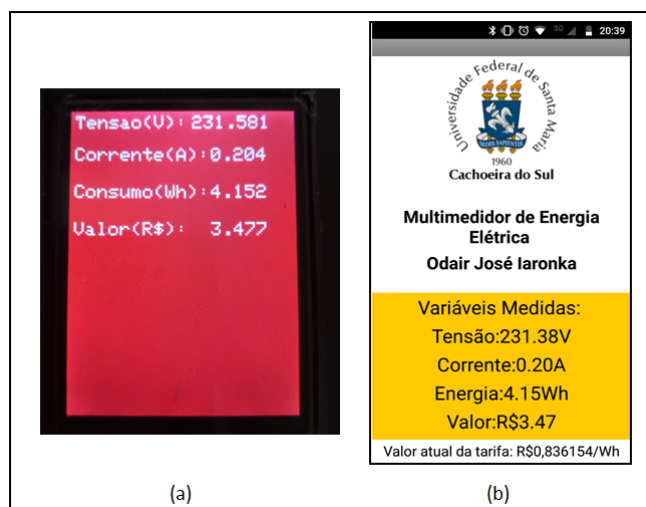


Fonte: Autor.

Podemos ver que os valores do aplicativo condizem com os valores demonstrados no *display*, a diferença nos valores das imagens se dá pela falta de sincronismo nas aquisições das imagens.

Agora analisaremos a carga indutiva, ou seja, as medida realizadas sobre um motor monofásico, conforme a Figura 4.16. Temos como resposta os valores do *display* mostrados em (a) e os valores mostrados no aplicativo descritos em (b).

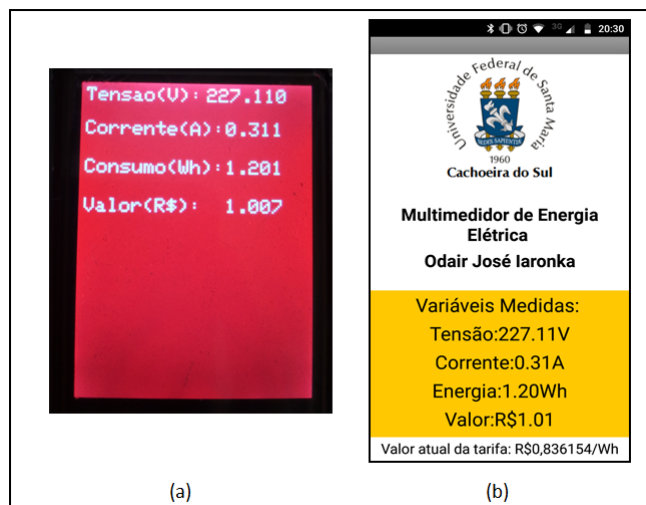
Figura 4.37 – Resposta do protótipo visualizada no *display* em (a) e no aplicativo em (b) para uma carga indutiva.



Fonte: Autor.

E por último é feita a medida em um circuito com carga não linear, no caso acionou-se quatro lâmpadas LED e as medidas seguiram o esquema da Figura 4.20. O que podemos visualizar nessa montagem é que os valores se aproximaram dos valores efetuados anteriormente, e portanto, validando a montagem do protótipo. Na Figura 4.38 podemos visualizar em (a) as medidas sendo demonstradas no *display* do protótipo, e em (b) as medidas sendo demonstradas no aplicativo do celular.

Figura 4.38 – Resposta do protótipo visualizada no *display* em (a) e no aplicativo em (b) para uma carga não linear.



Fonte: Autor.

4.6 CONCLUSÃO PARCIAL

Após a montagem dos circuitos foram efetuados algumas medições, dentre essas a medição de tensão. Essa foi realizada inicialmente utilizando o sensor de tensão LV25-P, após isso a montagem do protótipo foi efetuado utilizando o sensor LV20-P. Utilizando a tensão nominal da rede, ou seja, valor máximo de 311 V, podemos ver os resultados referentes aos sensores e esperados na Tabela ???. Dessa tabela podemos visualizar que os resultados seguiram os valores esperados no projeto.

Tabela 4.1 – Comparação entre na resposta dos circuitos sensores utilizados e os valores calculados de tensão

Medidas	LV25-P (V)	LV20-P (V)	Calculado (V)
VSensor (máx)	4,48	4,46	4,664
VPreFiltro (mín)	-4,24	-4,28	-4,349
VMicro (máx)	4,48	4,52	4,349

Com esses dados podemos calcular o erro referente a cada circuito sensor, seguindo a Equação 4.11.

$$Erro(\%) = \frac{Valor(Medido) - Valor(Real)}{Valor(Real)} \times 100 \quad (4.11)$$

Com isso o erro referente ao sensor LV25-P tem valor próximo a 3%, e utilizando o sensor LV20-P temos um erro próximo a 4%, esses valores se dão incluindo o circuito

de condicionamento do sinal aos sensores.

Já com o circuito sensor de corrente podemos verificar que a resposta do circuito quando aplicada uma corrente de 12 A de um circuito puramente resistivo, temos como resposta os valores da Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Comparação entre o sensor utilizado e o valor calculado para carga resistiva

Medidas	LA55-P (V)	Calculado (V)
VSensor (máx)	1,68	1,80
VPreFiltro (mín)	-3,30	-3,06
VMicro (máx)	3,28	3,06

Com o uso da Equação 4.11 podemos calcular o erro referente ao circuito de sensoriamento de corrente, temos o valor de 7%.

Agora para a resposta de uma carga indutiva a corrente do circuito foi de 3,216 A, temos como resposta os valores da Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Comparação entre o sensor utilizado e o valor calculado para carga indutiva

Medidas	LA55-P (V)	Calculado (V)
VSensor (máx)	0,43	0,483
VPreFiltro (mín)	-2,64	-2,47
VMicro (máx)	2,55	2,47

Também podemos calcular o erro referente a essa medição utilizando a Equação 4.11, e temos como resultado 3%. Agora para a resposta de uma carga não linear a corrente máxima do circuito foi de 3,024 A, temos como resposta os valores da Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Comparação entre o sensor utilizado e o valor calculado para carga não linear

Medidas	LA55-P (V)	Calculado (V)
VSensor (máx)	0,38	0,454
VPreFiltro (mín)	-2,55	-2,45
VMicro (máx)	2,72	2,45

Nesse caso o erro fica sendo de 11%, valor esse elevado devido ao tipo de forma de onda da corrente, como já mencionado anteriormente.

Por fim se falarmos de resposta de potência, ou seja, incluindo a medição dos circuitos sensores de tensão e corrente, circuito do microcontrolador temos como resposta de potência média os dados da Tabela 4.5

Tabela 4.5 – Resultados de potência média dos circuitos

Tipo de circuito	Real (W)	Medida (W)
Resistivo	12	11,53
Indutivo	41	41,36
Não linear	39,59	37,51

Com isso podemos calcular o erro do multimetido referente as medidas de potência média utilizando a Equação 4.11. Para o circuito com carga puramente resistiva temos um erro com valor de aproximadamente 4%, erro esse que vem se propagando do circuito de sensoriamento e que é considerado dentro do valor esperado para uma medida sem fins de seguir normativas. Para a potência medida em um circuito indutivo temos um valor para o erro de 1%. Já para o circuito com carga não linear o erro tende a assumir um valor maior dos valores anteriores por motivos já mencionados anteriormente, e então assume um valor de 5,54%.

5 CONCLUSÃO

Tendo em vista a evolução da automação residencial e a internet das coisas, é notável que as pessoas estão buscando acompanhar a tecnologia e os benefícios que isto proporciona. Nesse contexto o conceito de medição inteligente de energia elétrica é algo que vem ganhando grande notoriedade na última década e, é uma tendência o estudo e a implementação de tipos de multimedidores que possam materializar essa ideia. O monitoramento e a acessibilidade às variáveis de uma planta são desejáveis. Nesse cenário, é desenvolvido um sistema de medição de energia elétrica consumida por uma residência. Essa medição é efetuada de forma a monitorar algumas características da rede de energia. Essas características são do tipo medição de tensão, corrente, cálculo do consumo em tempo real, cálculo do valor da conta a ser paga pelo consumidor, e com isso efetuar um levantamento de um padrão de consumo pelo consumidor.

O objetivo principal do trabalho foi alcançado, que é a construção de um multimissor de energia elétrica. Por se tratar de um circuito com a mistura de medidas de alta amplitude com sinais, algumas dificuldades foram encontradas durante o desenvolvimento, problemas que envolviam sinais indesejados ou até mesmo a ausência de sinais no decorrer do circuito.

Como produto final do trabalho, chegou-se a um sistema eletrônico que a partir de sinais de sensores e um microcontrolador pode exibir e enviar via comunicação sem fio, dados como: tensão, corrente, potência média, consumo de energia e valor da conta de energia a ser paga.

Foram realizados testes no multimissor com diferentes cargas, dentre elas cargas com características resistivas, indutivas e não lineares e os resultados foram próximos aos esperados.

A partir dos testes pode-se observar que algumas características desejadas não foram alcançadas, podemos citar a falta de precisão quando medida uma carga não linear, que pra esse caso a solução poderia ser a substituição do microcontrolador por um microcontrolador de maior velocidade de conversão A/D. Outro ponto que poderia ser melhorado é efetuar o cálculo de maior número de variáveis, ou seja, efetuar simultaneamente o cálculo do fator de potência, da distorção harmônica, entre outros.

Ao fim deste trabalho, foi possível encontrar aspectos positivos como aprendizado acadêmico, a implementação de conhecimentos adquiridos de eletrônica de potência, circuitos elétricos, eletrônica digital, sistemas microcontrolados e o desenvolvimento de um circuito que mescla várias áreas do curso.

Assim, conclui-se que o medidor pode se tornar uma ferramenta útil para residências, comércios e até indústrias onde a necessidade de controle e economia de energia é desejável pelo usuário, pois o mesmo se mostrou eficaz em cumprir sua função.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como comentado anteriormente, alguns problemas foram encontrados no desenvolvimento desse trabalho. Um dos principais que podemos destacar é a falta de precisão quando efetuadas as medidas sobre uma carga com características não lineares. Para isso é sugerido a utilização de um microcontrolador com velocidade de leitura das portas analógicas maior do que o utilizado nesse projeto.

Outra questão é a forma de comunicação do microcontrolador com dispositivos. Nesse trabalho foi utilizado a tecnologia *bluetooth* pelo motivo de possuir implementação de menor dificuldade. Uma sugestão é a utilização de comunicação sem fio através da rede de internet (Wi-Fi) para que haja o aumento da gama de aplicação e o usuário possa ter acesso a seus dados de consumo de energia elétrica com maior alcance.

Um terceiro ponto que pode ser melhorado é a questão do aplicativo de visualização dos dados, por não se tratar do objetivo principal desse trabalho, a interface de visualização dos dados foi elaborada com o intuito de demonstração dos dados apenas. Uma sugestão é que possam ser demonstrados gráficos e menus de configuração para o usuário.

REFERÊNCIAS

- ARDUINO. **Folha de especificações ATmega328-UNO**. 2018.
- ASHTON, K. That "Internet of Things" Thing. **Jornal RFID**, Aug 2009.
- AURESIDE. **Automação Residencial: demanda na Construção Civil**. 2018. <<http://www.aureside.org.br/noticias/automacao-residencial--demanda-na-construcao-civil>>. Acessado em: 09/08/2018.
- BOLZANI, C. A. M. **Residências Inteligentes**. v. 1, Fev 2004.
- CASTRUCCI, P. M. **Engenharia de Automação Industrial**. 2ª. ed. [S.l.]: Editora LTC, 2007.
- ENERGIA, A. **Monitor de energia**. 2010. <<https://loja.almaxenergia.com.br/>>. Acessado em: 09/10/2018.
- ENERGIA, E. **Medição inteligente**. **São Paulo**, Mar 2015.
- EVANS, D. A internet das Coisas: como a próxima evolução da Internet está mudando tudo. **Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG)**, Jun 2011.
- FACCIONI, M. F. **Internet das coisas**. [S.l.]: Livro digital - Palhoça SC, 2016.
- FAIRCHILD. **Folha de especificações LM324**. 2002.
- FUGITA, S. D. Smart meter integrado a analisador de qualidade de energia para propósitos de identificação de cargas residenciais. **Universidade de São Paulo**, Jul 2014.
- GOMES, A. B. **Automação residencial utilizando uma plataforma de baixo custo** — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.
- GREENANT. **Medidor inteligente de energia**. 2018. <<https://www.greenant.com.br/>>. Acessado em: 09/10/2018.
- INTELTRONIC. **Folha de especificações 2.4 TFT LCD**. 2014.
- INVENTOR, M. A. **Conta de energia deve subir 25,7 em um ano, aponta pesquisa**. 2018. <<https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2018/06/conta-de-energia-deve-subir-257-em-um-ano-aponta-pesquisa.shtml>>. Acessado em: 20/11/2018.
- JUNIOR, C. C. **Medidor de energia aplicado à indústria**. Jan 2017.
- LED, F. **Folha de especificações lâmpada LED FLC**. 2019.
- LEM. **Folha de especificações Current Transducer LA 55-P**. 2013.

_____. **Folha de especificações Voltage Transducer LV25-P**. 2014.

_____. **Folha de especificações Voltage Transducer LV20-P**. 2015.

MANCINI, M.

Internet das coisas: História, Conceitos, Aplicações e Desafios — Universidade de São Paulo, 2017.

MURATORI, J. R. **Automação Residencial, Conceitos e Aplicações**. [S.l.]: Editora Educere, 2015.

N WANG L, D. V. D. S. G. **Smart meters for power grid: Challenges, issues, advantages and status**. 2011. IEEE Power Systems Conference and Exposition.

PITON, O. H. G. **Automação residencial utilizando a plataforma em nuvem IBM Bluemix**. Universidade de São Paulo, Ago 2017.

PRUDENTE, F. **Automação Predial e Residencial: uma introdução**. [S.l.]: Editora LTC, 2011.

QUINDERE, P. R. F.

Casa Inteligente: Um Protótipo de Sistema de Automação Residencial de Baixo Custo — Faculdade Farias Brito, 2009.

ROVERI, M. R. **Automação Residencial**. Faculdade POLITEC, Fev 2012.

SEMICONDUCTOR, K. **Folha de especificações KIA 7805**. 2010.

SILVA, A. C. J.

Automação residencial: sistemas residenciais controlados via smarphone — Universidade Federal do Maranhão - São Luiz, 2017.

SILVA, D. S. da.

Desenvolvimento e Implementação de um Sistema de Supervisão e Controle Residencial — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.

SILVEIRA, C. B. **O que é um medidor de Energia Elétrica Inteligente**. Universidade Estadual Paulista, Nov 2016.

SINGH, N. **Internet of things(IoT): Security Challenges, Business Opportunities e Reference Architecture for E-commerce**. International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT), Nov 2015.

SOUZA, L. G. de.

Implementação de um medidor de energia elétrica utilizando arduino — Faculdade de Americana, 2015.

YOSHINAGA, G. **Mit App Inventor**. 2019. <<https://appinventor.mit.edu/explore/>>. Acessado em: 10/06/2019.

ZOLIN, D. Tecnologia local vai monitorar consumo de energia elétrica da UFSM. **Diário de Santa Maria**, Maio 2019.

APÊNDICES

Apêndice A – Programação do microcontrolador

Para o microcontrolador utilizado no multimedidor foi utilizado o código descrito a seguir, com todos os cálculos e funcionalidades incluídas.

```
//Inclusão das bibliotecas
#include <TimerOne.h>
#include <math.h>
#include <LiquidCrystal.h>
#include <TouchScreen.h>
#include <Adafruit_TFTLCD.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include "SoftwareSerial.h"
//Definição das variáveis e cores para o display
#define LCD_CS A3
#define LCD_CD A2
#define LCD_WR A1
#define LCD_RD A0
#define LCD_RESET A4
#define BLACK 0x0000
#define BLUE 0x001F
#define RED 0xF800
#define GREEN 0x07E0
#define CYAN 0x07FF
#define MAGENTA 0xF81F
#define YELLOW 0xFFE0
#define WHITE 0xFFFF
// Inicialização da variável do Display com os parâmetros definidos
Adafruit_TFTLCD tft(LCD_CS, LCD_CD, LCD_WR, LCD_RD, LCD_RESET);
//Inicialização da variável para o bluetooth
SoftwareSerial bluetooth(19,18); //TX, RX (Bluetooth)
//Definição das variáveis para o processo
unsigned long previusMillis = 0;
const long tempo=200;
const long tempo1=400;
const long tempo2=600;
const long tempo3=800;
unsigned long contador;
//Contador para manipular as interrupcoes
```

```
int N=0;
//Numeoro de amostras por ciclo de rede
int k=30;
//Tempo para um ciclo de rede (1/60)
float Trede=0.016666666667;
//Tempo da interrupcao ((1/60)/(k))*106
float Tinterrupcao=555.555555555556;
//Variaveis para tensao
int Valor_Analogico_Tensao;
float Tensao_Inst;
float Tensao_Inst_Med;
int Valor_Analogico_Ten_Maior;
int Valor_Analogico_Ten;
float Tensao_Eficaz;
float Ten_Acum_Med=0;
float Ten_Acum_RMS=0;
float Ten_Med=2.25;
float Ten_RMS=0;
//Variaveis para corrente
int Valor_Analogico_Corrente;
int Valor_Analogico_Cor_Maior;
int Valor_Analogico_Cor;
float Corrente_Eficaz;
float Corrente_Inst;
float Corrente_Inst_Med;
float Corr_Acum_RMS=0;
float Corr_Acum_Med=0;
float Corr_Med=2.25;
float Corr_RMS=0;
//Variaveis para potencia
float Pot_Inst=0;
float Pot_Acum=0;
float Potencia_Ativa=0;
//Variaveis para energia
float Tempo_Energia=0;
float Tempo_Total=0;
float Energia_Eletrica_Consumida=0;
float Energia_Eletrica_Consumida_Acumulada=0;
float Energia_Eletrica=0;
```

```
float Valor_Energia_Eletrica=0;
void setup() {
  bluetooth.begin(9600);
  // Inicializa o display
  tft.begin(0x9325);
  // Define o sentido do display
  tft.setRotation(0);
  //Completa o display na cor vermelha
  tft.fillScreen(RED);
  // Inicializa o Timer da interrupção(microsegundos)
  Timer1.initialize(Tinterrupcao);
  // Atribui a função teste ao Interrupt
  Timer1.attachInterrupt(teste);
}
void teste() {
  //Teste para o tempo da interrupcao
  digitalWrite(51,HIGH);
  //Calculo do tempo para calcular a energia consumida (em horas)
  Tempo_Energia=((N-150)*Tinterrupcao*pow(10,-6))/3600;
  //Leitura da entrada analogica de Tensao
  Valor_Analogico_Tensao = analogRead(A9);
  //Tensao instantanea da rede
  Tensao_Inst= (((Valor_Analogico_Tensao)*0.00488281)-Ten_Med)*148);
  //Tensao_Instantanea usada para calcular a Tensao Media da entrada A/D
  Tensao_Inst_Med=((Valor_Analogico_Tensao)*0.00488281);
  //Calculo da integral para tensao média
  Ten_Acum_Med=Ten_Acum_Med+Tensao_Inst_Med;
  //Calculo da integral para tensao rms
  Ten_Acum_RMS=Ten_Acum_RMS+pow(Tensao_Inst,2);
  //Leitura da entrada analogica de corrente
  Valor_Analogico_Corrente = analogRead(A8);
  //Corrente instantanea da rede /10 pelas voltas do sensor
  Corrente_Inst = (((((Valor_Analogico_Corrente)*0.00488281)-Corr_Med)*2.4));
  //Corrente_Instantanea usada para calcular a Corrente Media da entrada A/D
  Corrente_Inst_Med=((Valor_Analogico_Corrente)*0.00488281); //Calculo da integral
  para Corrente média
  Corr_Acum_Med=Corr_Acum_Med+Corrente_Inst_Med;
  //Calculo da integral para corrente rms
  Corr_Acum_RMS=Corr_Acum_RMS+pow(Corrente_Inst,2);
```

```
//Calculo da Potencia instantanea
Pot_Inst=Tensao_Inst*Corrente_Inst;
//Calculo da integral para potencia média
Pot_Acum=Pot_Acum+Pot_Inst;
if(N==120){
//Calcula a tensao media na porta A/D
Ten_Med=Ten_Acum_Med/N;
//Calcula a corrente media na prota A/D
Corr_Med=Corr_Acum_Med/N;
Ten_Acum_Med=0;
Corr_Acum_Med=0;
}
if(N==300){
//Calculo da tensao RMS
Ten_RMS=sqrt(Ten_Acum_RMS/(N-121));
//Calculo da corrente RMS
Corr_RMS=sqrt(Corr_Acum_RMS/(N-121));
//Calcula a tensao media na porta A/D
Ten_Med=Ten_Acum_Med/(N-121);
//Calcula a corrente media na prota A/D
Corr_Med=Corr_Acum_Med/(N-121);
}
if(N==600){
//Calculo da potencia ativa instantanea
Potencia_Ativa=(Pot_Acum/(N-121));
//Calculo da energia eletrica acumulada
Energia_Eletrica_Consumida_Acumulada=Energia_Eletrica_Consumida_Acumulada+Potencia_
//Tempo em segundos para verificacao dos resultados
Tempo_Total=Tempo_Total+0.25;
Pot_Acum=0;
Ten_Acum_RMS=0;
Corr_Acum_RMS=0;
Ten_Acum_Med=0;
Corr_Acum_Med=0;
N=121;
}
//Calculo do valor da conta a ser pago
Valor_Energia_Eletrica=Energia_Eletrica_Consumida_Acumulada*0.836154;
N=N+1;
```

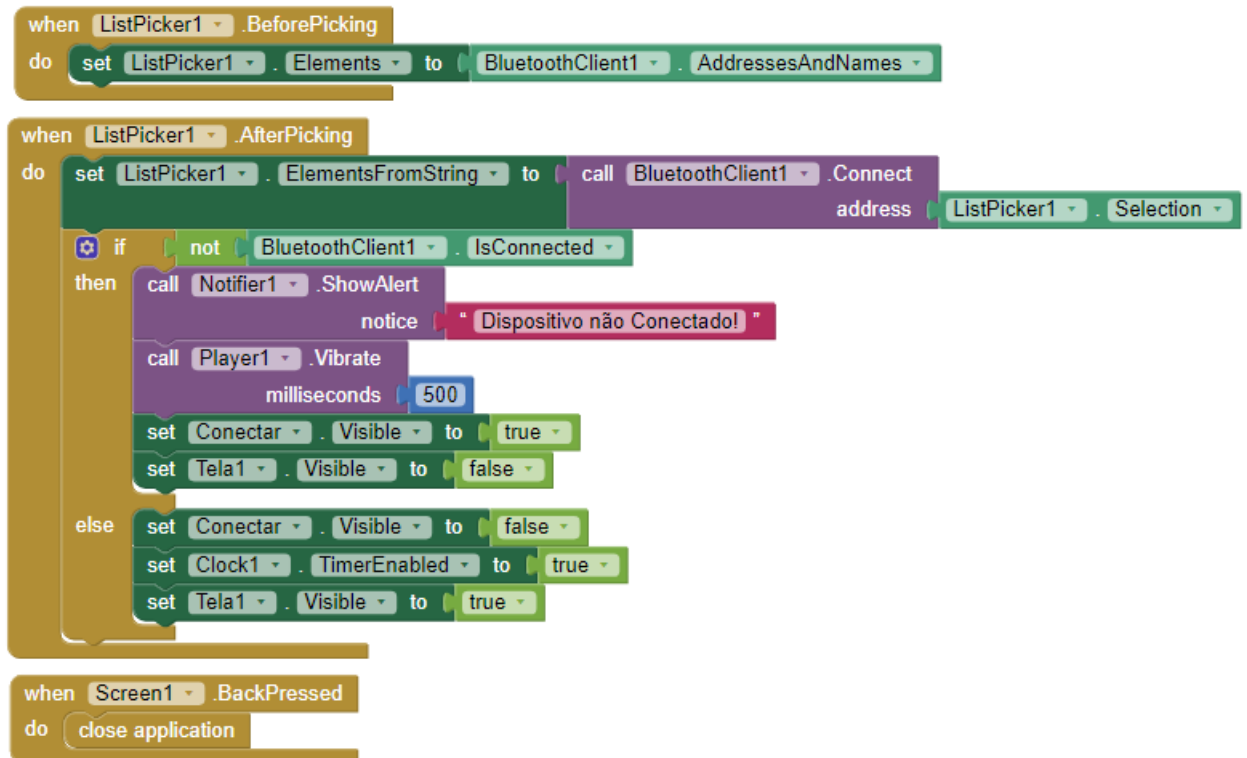
```
//Teste para o tempo da interrupcao
digitalWrite(51,LOW);
}
//Laço para escrita no display
void escreve(){
tft.fillScreen(RED);
if(contador-previusMillis >= tempo){
bluetooth.write("Ten_RMS-");
bluetooth.print(Ten_RMS);
// Coloca o cursor na posição
tft.setCursor(5,5);
// Define a cor do texto que será escrito
tft.setTextColor(WHITE);
// Define o tamanho da fonte
tft.setTextSize(2.8);
// Palavra a ser escrita no display
tft.println("Tensao(V):");
tft.setCursor(130,5);
tft.setTextColor(WHITE);
tft.setTextSize(2.8);
tft.println(Ten_RMS,3);
}
if(contador-previusMillis >= tempo1)
bluetooth.write("Corr_RMS/");
bluetooth.print(Corr_RMS);
tft.setCursor(5,40);
tft.setTextColor(WHITE);
tft.setTextSize(2.8);
tft.println("Corrente(A):");
tft.setCursor(150,40);
tft.setTextColor(WHITE);
tft.setTextSize(2.8);
tft.println(Corr_RMS,3);
}
if(contador-previusMillis >= tempo2){
bluetooth.write("Energia_Eletrica_Consumida_Acumulada|");
bluetooth.print(Energia_Eletrica_Consumida_Acumulada);
tft.setCursor(5,80);
tft.setTextColor(WHITE);
```

```
tft.setTextSize(2.8);
tft.println("Consumo(Wh):");
tft.setCursor(150,80);
tft.setTextColor(WHITE);
tft.setTextSize(2.8);
tft.println(Energia__Eletrica__Consumida__Acumulada,3);
if(contador-previusMillis >= tempo3){
  bluetooth.write("Valor__Energia__Eletrica$");
  bluetooth.print(Valor__Energia__Eletrica);
  previusMillis=contador;
  tft.setCursor(5,120);
  tft.setTextColor(WHITE);
  tft.setTextSize(2.8);
  tft.println("Valor(R$): ");
  tft.setCursor(150,120);
  tft.setTextColor(WHITE);
  tft.setTextSize(2.8);
  tft.println(Valor__Energia__Eletrica,3);
}
bluetooth.write("Valor__Energia__Eletrica$");
bluetooth.print(Valor__Energia__Eletrica);
delay(2000);
}
//Laço principal
void loop() {
  contador=millis();
  escreve();
}
```


Apêndice B – Programação do aplicativo

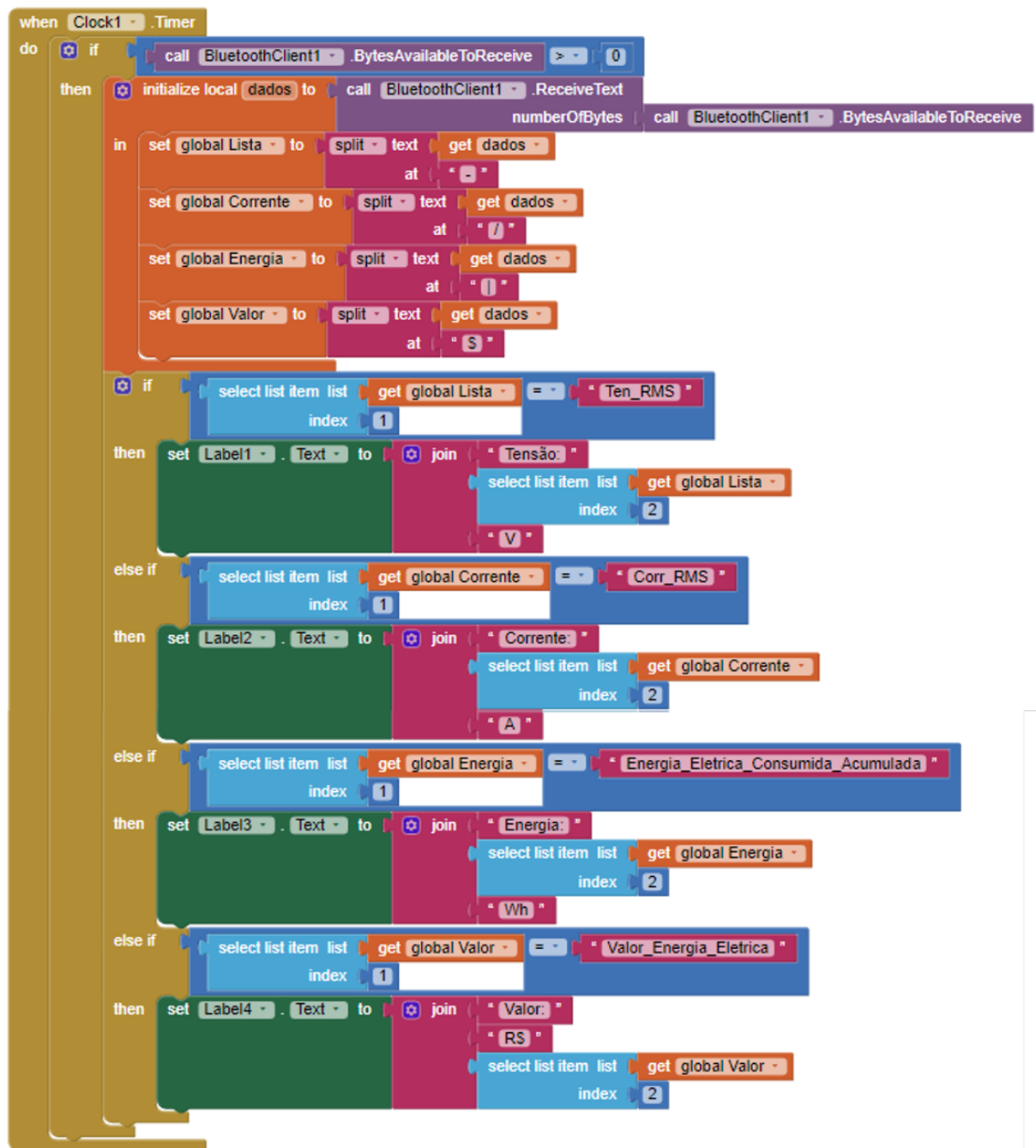
Utilizando a plataforma *online* Mit App Inentor (INVENTOR, 2018) para o desenvolvimento do aplicativo para o celular, o código utilizado para programação do mesmo é o representado nas Figuras B.1 e Figura B.2.

Figura B.1 – Programação aplicativo para conexão *bluetooth*.



Fonte: Autor.

Figura B.2 – Programação aplicativo para demonstração dos dados.



Fonte: Autor.

Apêndice C – Memorial descritivo dos componentes

A seguir podemos visualizar uma tabela com os nomes dos componentes e a descrição de cada um, conforme visualizado na Figura 4.31.

Tabela C.1 – Memorial descritivo dos componentes do circuito completo

Nome	Descritivo	Valor
R1	Resistor entrada CA somador 1	$10\text{k}\Omega/\frac{1}{4}\text{W}$
R2	Resistor entrada CC somador 1	$10\text{k}\Omega/\frac{1}{4}\text{W}$
R3	Resistor filtro 1	$27\text{k}\Omega/\frac{1}{4}\text{W}$
R4	Resistor filtro 1	$27\text{k}\Omega/\frac{1}{4}\text{W}$
R5	Resistor filtro 1	$43\text{k}\Omega/\frac{1}{4}\text{W}$
R6	Resistor entrada CA somador 2	$10\text{k}\Omega/\frac{1}{4}\text{W}$
R7	Resistor entrada CC somador 2	$10\text{k}\Omega/\frac{1}{4}\text{W}$
R8	Resistor filtro 2	$27\text{k}\Omega/\frac{1}{4}\text{W}$
R9	Resistor filtro 2	$27\text{k}\Omega/\frac{1}{4}\text{W}$
R10	Resistor filtro 2	$43\text{k}\Omega/\frac{1}{4}\text{W}$
Re	Resistor entrada tensão	$23,33\text{k}\Omega/5\text{W}$
Rm1	Resistor saída tensão	$150\Omega/\frac{1}{4}\text{W}$
Rm2	Resistor saída corrente	$200\Omega/\frac{1}{4}\text{W}$
Rf1	Resistor amplificador 1	$4,5\text{k}\Omega/\frac{1}{4}\text{W}$
Rf2	Resistor amplificador 2	$4,5\text{k}\Omega/\frac{1}{4}\text{W}$
C1	Capacitor filtro 1	$2,2\mu\text{F}/50\text{V}$
C2	Capacitor filtro 1	$10\mu\text{F}/50\text{V}$
C3	Capacitor filtro 2	$2,2\mu\text{F}/50\text{V}$
C4	Capacitor filtro 2	$10\mu\text{F}/50\text{V}$
C5	Capacitor positivo entrada fonte	$1000\mu\text{F}/50\text{V}$
C6	Capacitor positivo saída fonte	$100\mu\text{F}/50\text{V}$
C7	Capacitor negativo entrada fonte	$1000\mu\text{F}/50\text{V}$
C8	Capacitor negativo saída fonte	$100\mu\text{F}/50\text{V}$
C9	Capacitor entrada regulador 1	$100\mu\text{F}/50\text{V}$
C10	Capacitor saída regulador 1	$330\mu\text{F}/50\text{V}$
C11	Capacitor entrada regulador 2	$100\mu\text{F}/50\text{V}$
C12	Capacitor saída regulador 2	$330\mu\text{F}/50\text{V}$

Nome	Descritivo	Valor
D1	Diodo ponte retificadora	1N4007
D2	Diodo ponte retificadora	1N4007
D3	Diodo ponte retificadora	1N4007
D4	Diodo ponte retificadora	1N4007
Transformador	Transformador da fonte	220V/12V 30A
7815	Regulador fixo de tensão	LM7815C
7915	Regulador fixo de tensão	LM7915C
7805	Regulador fixo de tensão	LM7805C
LM324	Circuito integrado Amp. Op.	LM324
LA55-P	Sensor de corrente	LA55-P
LV25-P	Sensor de tensão	LV25-P
Arduíno	Microcontrolador	Arduino Mega 2560
Display	Display mostrador	TFT Adafruit 2,4'
Bluetooth	Módulo Bluetooth	HC-05