



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS SOBRAL
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ROBSON LOPES DE COUTO

**PROJETO DE DISPOSITIVO PARA MONITORAMENTO DA CORRENTE EM
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO**

SOBRAL

2018

ROBSON LOPES DE COUTO

PROJETO DE DISPOSITIVO PARA MONITORAMENTO DA CORRENTE EM REDES
DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará *Campus* Sobral, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Msc. Rômulo Nunes de Carvalho Almeida.

SOBRAL

2018

ROBSON LOPES DE COUTO

PROJETO DE DISPOSITIVO PARA MONITORAMENTO DA CORRENTE EM REDES
DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO

Monografia apresentada ao Curso de graduação
em Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Elétrica

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Msc. Rômulo Nunes de Carvalho Almeida (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Msc. André dos Santos Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Msc. Erasmo Saraiva De Castro
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Vandilberto Pereira pinto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C912p Couto, Robson Lopes de.
Projeto de Dispositivo para Monitoramento da Corrente em Redes de Distribuição de Baixa Tensão /
Robson Lopes de Couto. – 2018.
76 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral,
Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2018.

Orientação: Prof. Me. Rômulo Nunes de Carvalho Almeida.

1. Redes de Distribuição. 2. Monitoramento de Corrente. I. Título.

CDD 621.3

A minha Mãe, Maria de Lourdes

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. e Coordenador Dr. Rômulo Nunes de Carvalho Almeida, que dedicou parte significativa do seu tempo já muito ocupado a minha orientação.

A professora e Tutora Nilena Brito Maciel Dias, por todo seu apoio e amizade.

Aos professores participantes da banca examinadora André dos Santos Lima, Erasmo Saraiva De Castro e Vandilberto Pereira Pinto pelo seu precioso tempo, colaborações e sugestões.

A Janaína, pelo suporte e carinho inestimáveis.

Aos meus caros colegas de graduação e valiosos amigos, Agna, Alane, Marcos, Larissa e Eli; cujo suporte foi essencial durante todo o curso.

Aos amigos do curso de Engenharia da Computação, David, Rafael, Márcio e Raimundo; que me inspiram a crescer além do campo da Engenharia Elétrica.

À CAPES, pela oportunidade de cursar Engenharia Eletrônica no Trinity College em Dublin, através do programa Ciência sem Fronteiras. Essa experiência foi de grande importância no desenvolvimento deste projeto.

“A invenção é o produto mais importante do cérebro criativo do homem.”

Nikola Tesla

RESUMO

A energia elétrica está atualmente presente em 97,8% todos os domicílios brasileiros, sendo essencial à vida moderna. Ainda assim, a rede elétrica não está livre de falhas, sendo suscetível a interrupções. Enquanto a geração e transmissão de energia são extensivamente monitoradas, já que problemas nas mesmas podem levar a interrupção de energia em estados ou até mesmo em grande parte do país, as redes de distribuição não recebem o mesmo tratamento, sendo apenas parcialmente monitoradas, o que pode ser principalmente atribuído ao alto custo de equipamentos de monitoramento. Desta forma, este trabalho propõe uma ferramenta para monitoramento dos valores de corrente em transformadores de distribuição de fácil e barata implementação. Garantindo a medição de corrente de forma não invasiva, utilizando sensores de efeito Hall. Estes sensores são capazes de medir o campo magnético gerado pela corrente que circula nos condutores e converter a medida em valores de tensão que podem ser convenientemente medidos e analisados por um microcontrolador.

Palavras-chave: Redes de Distribuição. Monitoramento de Corrente. Sensores de Efeito Hall.

ABSTRACT

Electrical Energy is present in almost every Brazilian home, being essential to the modern life. Nevertheless, the electrical grid is not safe from faults, being susceptible to interruptions. Whereas the generation and transmission of electrical energy are extensively monitored, since problems on these can lead to interruption of the energy supply to whole states or even a vast part of the country, distribution grids do not receive the same treatment, being only partially monitored, what can be partially related to the high cost of monitoring equipment. Thus, this work proposes a tool for monitoring of the values of current of distribution transformers of easy and inexpensive implementation. Guaranteeing the current measurement in non-invasive manner, through the use of linear Hall effect sensors. These sensors are capable of measuring the magnetic field generated by the current circulating on the cables and converting the measurements to voltages which can be conveniently measured and analysed by a microcontroller.

Keywords: Power Distribution Grids. Current Monitoring. Hall effect sensors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Representação de Sistemas Elétricos de Potência.....	20
Figura 2	– Rede de distribuição de média tensão.....	22
Figura 3	– Rede de distribuição de baixa tensão.....	23
Figura 4	– Transformador de distribuição.....	23
Figura 5	– Fluxo de campo em um circuito magnético.....	27
Figura 6	– Curva B x H para o aço de grão orientado tipo M-5.....	29
Figura 7	– Exemplo de um laço de histerese.....	30
Figura 8	– Princípio do efeito Hall sem presença de campo magnético.....	31
Figura 9	– Princípio do efeito Hall com presença de campo magnético.....	31
Figura 10	– Sensor de efeito Hall com encapsulamento TO-92.....	33
Figura 11	– Comportamento do sensor de efeito Hall.....	34
Figura 12	– Aplicação do sensor de efeito Hall na medição de corrente.....	35
Figura 13	– Resposta em frequência do sensor de efeito Hall SS49E.....	35
Figura 14	– Circuito do amplificador de diferença.....	36
Figura 15	– Amplificador de diferença implementado.....	37
Figura 16	– Circuito de suporte do microcontrolador.....	39
Figura 17	– Módulos que podem ser conectados para expansão de funcionalidades.....	40
Figura 18	– Fonte de tensão contínua com ponte retificadora e filtro capacitivo.....	41
Figura 19	– Tensão alternada senoidal.....	42
Figura 20	– Forma de onda de tensão retificada.....	42
Figura 21	– Forma de onda de tensão retificada com filtragem capacitiva.....	43
Figura 22	– Regulador de tensão 7805 no design do dispositivo.....	44
Figura 23	– Circuito de acionamento das sinaleiras.....	45
Figura 24	– Função de inicialização do timer 1.....	47

Figura 25 – Rotina de interrupção por overflow do timer 1.....	47
Figura 26 – Função de inicialização do timer 0.....	48
Figura 27 – Rotina de interrupção por overflow do timer 0.....	49
Figura 28 – Chamada da função de captura dos valores.....	49
Figura 29 – Configuração do conversor analógico digital.....	49
Figura 30 – Função de captura do valor analógico.....	50
Figura 31 – Função utilizada para converter o valor do ADC em uma tensão.....	50
Figura 32 – Função utilizada pra converter o valor de tensão para corrente.....	50
Figura 33 – Estrutura utilizada para guardar os dados do transformador.....	51
Figura 34 – Função utilizada para atualizar os dados da medição.....	52
Figura 35 – Simplificação do software em fluxograma.....	53
Figura 36 – Layout da placa de circuito no software Eagle.....	54
Figura 37 – Placa com o circuito para monitoramento de corrente.....	55
Figura 38 – Aparelho com seletor da potência do transformador em destaque.....	56
Figura 39 – Encaixe dos sensores no aparelho.....	56
Figura 40 – Transformador de corrente utilizado nos experimentos.....	57
Figura 41 – Variac conectado ao transformador de corrente.....	58
Figura 42 – Medidor de corrente e termômetro utilizados nos ensaios.....	59
Figura 43 – Verificação das fontes de tensão do dispositivo.....	60
Figura 44 – Teste dos sensores adquiridos.....	61
Figura 45 – Sensor de efeito Hall acoplado ao núcleo de material ferromagnético.....	62
Figura 46 – Tensão de pico a pico no sensor com anel magnético.....	63
Figura 47 – Sensor de efeito Hall sem concentrador ferromagnético.....	63
Figura 48 – Tensão de pico a pico no sensor sem o anel magnético.....	64
Figura 49 – Tensão de entrada e saída em um dos amplificadores.....	66

Figura 50 – Teste das sinaleiras do aparelho.....	67
Figura 51 – Comunicação Serial.....	68
Figura 52 – Interface serial acessada através do computador.....	69
Figura 53 – Interface gráfica para visualização das medições.....	69
Figura 54 – Módulo bluetooth conectado a placa principal.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tensão Nominal das redes de distribuição no Ceará.....	24
Tabela 2 – Potência dos transformadores de distribuição no Ceará.....	24
Tabela 3 – Carregamento máximo dos transformadores de distribuição no Ceará.....	25
Tabela 4 – Valores de corrente em transformadores trifásicos.....	26
Tabela 5 – Características do Microcontrolador ATmega328p.....	38
Tabela 6 – Características da ponte retificadora KBU1010.....	43
Tabela 7 – Tensão de saída dos sensores de efeito Hall sem campo magnético.....	61
Tabela 8 – Ensaio no sensor de efeito Hall com núcleo magnético.....	62
Tabela 9 – Tensão de pico a pico no sensor sem o anel magnético.....	64
Tabela 10 – Medidas de tensão de entrada e saída em um dos amplificadores.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i> (Conversor Analógico-Digital)
COELCE	Antiga Companhia Energética do Ceará, atualmente Enel
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira
SI	Sistema Internacional de Unidades
TRIAC	<i>Triode for Alternating Current</i> (Triodo para corrente alternada)

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
Ω	Ohm - unidade de medida da resistência elétrica
A	Ampere - Unidade do SI para corrente elétrica
V	Volt – Unidade do SI para tensão elétrica
Hz	Unidade de medida para frequência
T	Tesla– Unidade do SI para densidade de fluxo magnético
G	Gauss - Unidade para densidade de fluxo magnético. Equivalente a 10^{-4} tesla
μ	Permeabilidade magnética de determinado material
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo
©	Copyright
®	Marca Registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivos.....	19
1.2	Estrutura do Trabalho.....	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Geração, Transmissão e Distribuição de Energia.....	20
2.2	Redes de Distribuição.....	21
2.3	Carregamento de transformadores.....	25
2.4	Magnetismo e Eletricidade	27
2.5	Permeabilidade e Saturação.....	28
2.6	Sensor de Efeito Hall.....	30
3	PROJETO DO DISPOSITIVO	33
3.1	Hardware.....	33
3.1.1	<i>Ponteira medidora de corrente</i>	33
3.1.2	<i>Circuito de condicionamento do sinal</i>	36
3.1.3	<i>Microcontrolador</i>	38
3.1.4	<i>Fonte CA/CC</i>	41
3.1.5	<i>Sinaleiras</i>	44
3.2	Software.....	45
3.1.1	<i>Marcação de tempo</i>	44
3.1.2	<i>Coleta dos dados</i>	48
3.1.3	<i>Processamento dos Dados</i>	51
4	RESULTADOS	54
4.1	Placa de Circuito.....	54
4.2	Configuração dos Ensaios.....	57
4.3	Fonte CA-CC.....	60
4.4	Sensores.....	60
4.5	Amplificadores.....	65
4.6	Sinaleiras.....	67
4.7	Comunicação Serial e Bluetooth.....	67

5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	71
5.1	Conclusões.....	71
5.2	Trabalhos Futuros.....	73
	REFERÊNCIAS	74
	Anexo A.....	76

1 INTRODUÇÃO

Na história do sistema elétrico Brasileiro podemos destacar como marco inicial a inauguração da primeira grande usina hidrelétrica do Brasil em 1889, em Juiz de Fora, Minas Gerais. Esta foi construída por iniciativa de Bernardo Mascarenhas para fornecer energia elétrica as máquinas de sua indústria têxtil e iluminação elétrica a cidade (JFMINAS, 2018).

Passados 130 anos, o sistema elétrico brasileiro fornece hoje energia a 97,8% dos domicílios brasileiros de acordo com o último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010). Como o sistema elétrico continua a crescer, acompanhando a expansão populacional do país, é preciso tomar medidas para assegurar o funcionamento adequado do mesmo, de forma a garantir o fornecimento de energia elétrica de qualidade a todos.

O sistema elétrico nacional é dividido em grandes blocos, desde a geração, que no Brasil em sua maioria é proveniente de usinas hidrelétricas; até a distribuição de energia em baixa tensão, seja em 127/220 ou 220/380V, que alimenta os domicílios e estabelecimentos ou indústrias de pequeno porte.

Domicílios e indústrias de pequeno porte são comumente atendidos por um transformador de distribuição. Esses reduzem a média tensão de distribuição, na ordem de dezenas de kV para baixa tensão, 220/380 ou 127/220V, a depender da região do Brasil. Um transformador de distribuição alimenta vários clientes da concessionária de distribuição de energia elétrica, de forma que a falha do mesmo ocasiona a interrupção no fornecimento de energia elétrica para todos esses clientes. Ainda assim, transformadores de distribuição geralmente não são monitorados. Os consumidores de energia elétrica normalmente só são capazes de identificar que há problemas no fornecimento de energia elétrica quando ocorre a interrupção total deste fornecimento. Normalmente nesses casos os próprios clientes avisam a concessionária que o fornecimento de energia foi interrompido.

Avárias na rede de distribuição ou nos transformadores de distribuição poderiam ser mitigadas caso houvesse o acompanhamento contínuo do carregamento do transformador. Conseqüentemente, isso evitaria a perda e substituição de equipamento por parte das concessionárias e a interrupção de fornecimento aos consumidores. Assim, esse trabalho destaca o projeto e construção de um dispositivo inteligente de simples implementação e baixo custo, projetado especificamente para monitoramento de redes de distribuição.

1.1 Objetivos

Levando em consideração os pontos discutidos anteriormente, este presente trabalho tem como objetivos:

- Apresentar a estrutura básica do sistema de distribuição de energia elétrica, listando os elementos que fazem parte destes.
- Mostrar o funcionamento de sensores de efeito Hall, e exemplificar como estes são utilizados no sensoriamento de corrente em redes de distribuição.
- Desenvolver um protótipo de uma ferramenta para monitoramento dos valores de corrente em redes de distribuição.

1.2 Estrutura do Trabalho

O capítulo 1 faz a introdução do texto, tratando da apresentação geral e também dos objetivos do trabalho.

No capítulo 2 é apresentada uma fundamentação teórica a respeito dos sistemas de distribuição de energia, a sobre a relação entre a eletricidade e o magnetismo e o funcionamento dos sensores de efeito Hall.

No capítulo 3, é apresentada a solução proposta, sendo discutidos tanto as decisões tomadas no projeto do aparelho, quanto os detalhes construtivos do mesmo. Neste capítulo são detalhados os componentes do hardware do dispositivo monitor e corrente e o dimensionamento dos mesmos.

Já no capítulo 4, são mostrados a implementação do dispositivo, baseado no projeto apresentado no capítulo 3, assim como os resultados obtidos a partir de ensaios em laboratório.

Finalmente, o capítulo 5 expressa a conclusão do trabalho, onde são apresentadas as considerações finais do autor.

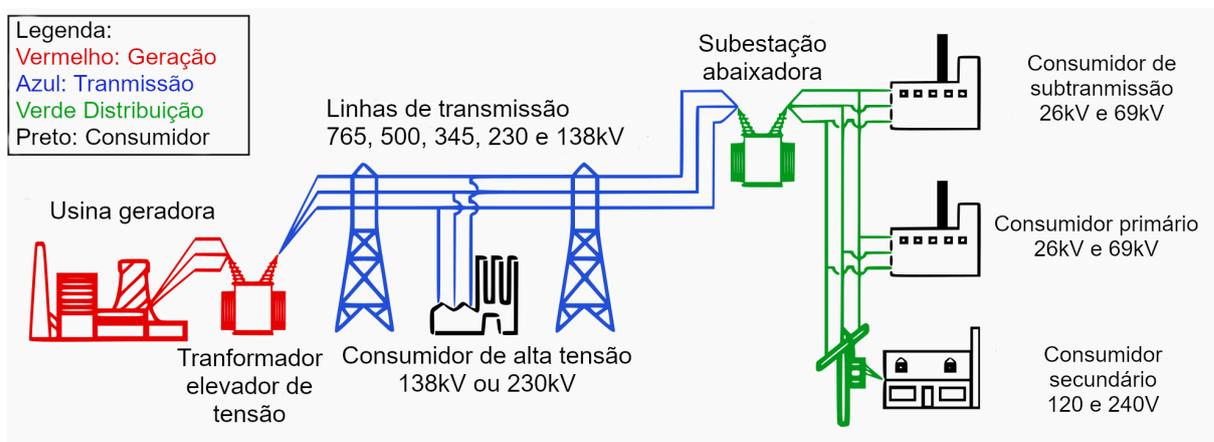
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse trabalho trata do desenvolvimento de um protótipo de um aparelho pra monitoramento contínuo de corrente em redes de distribuição. Embora o texto aborde principalmente o funcionamento do dispositivo, especificamente os circuitos do mesmo, também é necessário entender, mesmo que de forma simplista, a estrutura e funcionamento dos sistemas elétricos de potência. Esses serão abordados em mais detalhes a seguir.

2.1 Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica.

O sistema elétrico de potência é dividido basicamente em três níveis: sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Ao longo das etapas do sistema, a energia elétrica gerada nas usinas é transportada até chegar aos consumidores finais. A Figura 1 mostra uma representação simplificada de um sistema elétrico de potência.

Figura 1 – Representação de Sistemas Elétricos de Potência



Fonte: Adaptado de CSANYI, 2017

Na geração de energia elétrica, é produzida uma tensão alternada senoidal. De fato, no Brasil essa tensão alternada oscila em uma frequência de 60 ciclos por segundo, ou 60 Hz. A tensão senoidal alternada é uma característica dos sistemas mecânicos (usinas hidrelétricas, eólicas, térmicas), mas pode ser gerada através do uso de conversores eletrônicos, como no caso de usinas fotovoltaicas, que transformam tensões e correntes CC em CA. Essa energia gerada tem sua tensão elevada (69kV a 230kV) para ser então transportada pelo sistema elétrico de transmissão nacional (ABRADEE, 2018).

Nas redes de transmissão, a energia é transferida a altas tensões, da ordem de dezenas a centenas de kV. Estas redes conectam as usinas elétricas aos centros urbanos, sendo esse um trecho crítico do sistema elétrico, pois falhas no sistema de transmissão podem afetar várias cidades ou até mesmo estados. A energia é convertida para níveis mais baixos de tensão nas subestações de distribuição das cidades.

A rede de distribuição é a última etapa do sistema elétrico, atendendo domicílios e indústrias de médio porte. Nestes sistemas, a alta tensão é abaixada para média ou baixa tensão. Esse trabalho concentra-se em propor uma ferramenta para monitoramento dos sistemas de distribuição de energia elétrica, e por isso os mesmos são abordados em mais detalhes aqui. A seguir, esses são discutidos de maneira mais aprofundada.

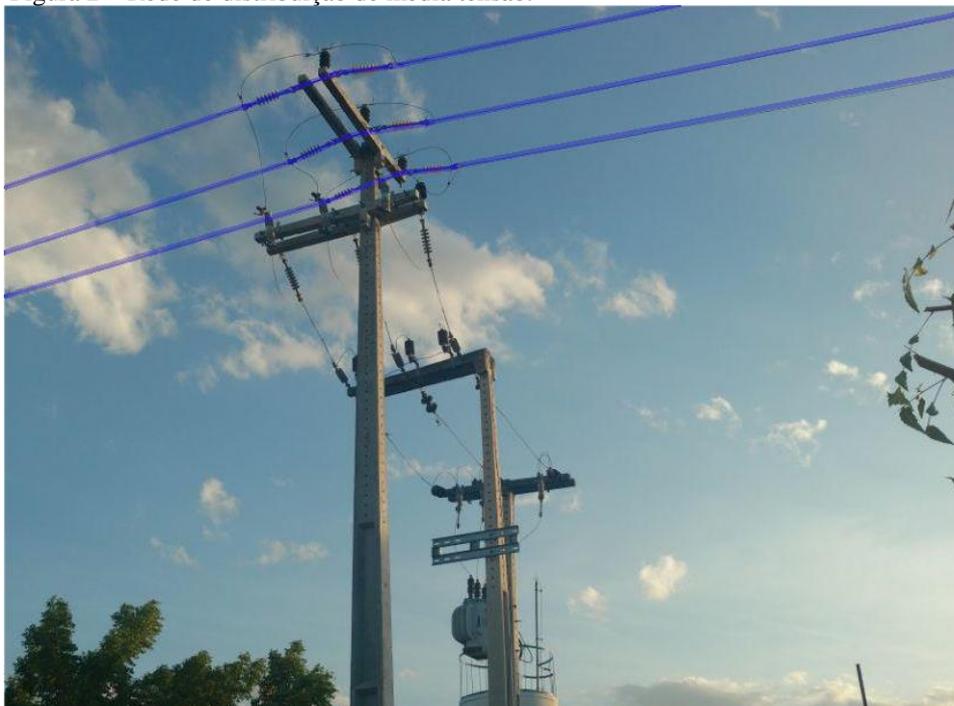
2.2 Redes de Distribuição

Redes de distribuição são compostas por linhas de alta, média e baixa tensão. Apesar de parte das linhas de alta tensão (redes de subtransmissão) serem de responsabilidade das distribuidoras, estas operam principalmente linhas de média e baixa tensão. Abaixo são listados alguns componentes dos sistemas de distribuição, sendo estes a subestação de distribuição, os alimentadores de média tensão, os circuitos secundários de baixa tensão e por fim os transformadores de distribuição.

As Subestações de distribuição são estações abaixadoras atendidas por linhas de alta tensão do sistema de transmissão ou distribuição AT. Estas são responsáveis pelo suprimento do sistema de distribuição em média tensão.

Os alimentadores de média tensão são a parte primária da rede de distribuição. Compõem a rede de média tensão que alimenta, diretamente ou através de ramais, os primários dos transformadores de distribuição da concessionária e/ou consumidores. Constitui-se de tronco e ramais. As linhas de média tensão carregam tensões entre 2,3kV e 44kV. Estas podem ser facilmente avistadas nas ruas e avenidas das cidades, sendo compostas por três condutores aéreos nus (ELETROBRAS, 2012). Um exemplo desse tipo de rede pode ser visto destacado em azul na Figura 2.

Figura 2 – Rede de distribuição de média tensão.



Fonte: Próprio Autor

No Ceará, consumidores com potência instalada superior a 100kVA devem estar obrigatoriamente no grupo de média tensão, isto é, conectados a rede primária de distribuição. Estes clientes devem realizar a transformação para baixa tensão através de subestação própria.

Os circuitos secundários de baixa tensão são alimentados por um transformador de distribuição, de onde derivam os ramais de ligação para os consumidores de BT e para o suprimento da iluminação pública. As linhas de baixa tensão no Brasil carregam tensões entre 110V e 440V (ELETROBRAS, 2012). Estas atendem residências, comércios e indústrias de pequeno porte. Os circuitos de baixa tensão podem possuir número variado de condutores, sejam monofásicos, bifásicos ou trifásicos. Na Figura 3 é possível observar, destacado em azul, um exemplo de uma linha trifásica de baixa tensão.

Figura 3 – Rede de distribuição de baixa tensão.



Fonte: Próprio Autor

Os transformadores de distribuição transformam os níveis de média tensão em baixa tensão. Comumente reduzem a tensão de 13,8kV para 220/380V ou 127/220V. Estes transformadores podem ser facilmente encontrados em postes nas grandes cidades. Um transformador de distribuição pode ser visto destacado em azul na Figura 4 a seguir.

Figura 4 – Transformador de distribuição



Fonte: Próprio Autor

Um único transformador alimenta vários consumidores finais. Isso implica que falha em um único transformador pode levar a falta de energia de vários consumidores até que o mesmo seja verificado ou substituído pela concessionária local. Visto isso, é importante que o transformador opere nas condições para qual o mesmo foi construído. Operar o transformador fora de suas especificações pode levar a danificações e até mesmo a destruição do mesmo.

Transformadores são caracterizados pela sua potência nominal e relação de transformação. No Brasil, a tensão de distribuição que atende as residências é 120/220V ou 220/380V, dependendo da região. Este trabalho está focado principalmente em redes de distribuição no Ceará, operadas atualmente pela Enel Distribuição, anteriormente Companhia Energética do Ceará, COELCE. As tensões utilizadas na distribuição de energia no Ceará atualmente, assim como os limites de variação, estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Tensão Nominal das redes de distribuição no Ceará

Tensão Nominal (Volts)	Limites de Variação (Volts)	
	Mínimo	Máximo
220	201	231
380	348	396
13.800	12.834	14.490

Fonte: COELCE, 2014

As tensões de 220V e 380V são usadas para distribuição em baixa tensão, enquanto a tensão de 13,8 kV é usada para distribuição em média tensão, alimentando transformadores de distribuição. A potência dos transformadores utilizados na distribuição pela Enel Ceará está listada na Tabela 2.

Tabela 2 – Potência dos transformadores de distribuição no Ceará

Potência dos transformadores de Distribuição (kVA)							
Monofásicos	10,0						
Bifásicos	10,0						
Trifásicos	15,0	45,0	75,0	112,5	150,0	225,0	300,0

Fonte: COELCE 2012.

2.3 Carregamento de Transformadores

A norma técnica NBR 5416 define o carregamento admissível como a capacidade de corrente admissível do transformador, em amperes, podendo ser, inclusive, superior a corrente nominal (ABNT, 1997). Já a sobrecarga é definida como o carregamento que excede os limites estabelecidos na mesma norma.

Também é especificado na NBR 5416 as condições de carregamento admissível de transformadores de acordo com a temperatura ambiente, temperatura do óleo e enrolamento e tempo de carga. Estas informações são listadas para diversas condições de carga inicial.

Já a Enel distribuição, que detém os direitos de concessão de energia no Ceará, recomenda o carregamento máximo especificado para transformadores de distribuição de acordo com a Tabela 3 a seguir. O carregamento máximo admissível em área residencial e rural é 40% por um período máximo de 2h, enquanto o carregamento máximo em área comercial é de 20% por um período máximo de 4h (COELCE, 2014).

Tabela 3 – Carregamento máximo dos transformadores de distribuição no Ceará

Potência nominal (kVA)	Carregamento em Área Residencial e Rural (kVA)	Carregamento em Área Comercial (kVA)
10,0	14,0	12,0
15,0	21,0	18,0
30,0	42,0	36,0
45,0	63,0	54,0
75,0	105,0	90,0
112,5	157,5	135,0
150,0	210,0	180,0
225,0	315,0	270,0
300,0	420,0	360,0

Fonte: COELCE, 2014

Apesar de serem especificados pela norma, esses valores em muitas ocasiões não podem ser garantidos de forma fidedigna, já que os sistemas de distribuição em baixa tensão não são completamente monitorados. Isso se deve principalmente ao fato de equipamentos de medição serem relativamente caros para serem aplicados a todos os transformadores. Dito isto, esse trabalho propõe um aparelho para monitoramento de redes de distribuição de baixa tensão.

Assim, monitorando-se o carregamento do transformador, espera-se que seja possível intervir quando verificar que este esteja sobrecarregado. Seja realocando clientes para outro transformador ou fazendo a substituição do mesmo para um de maior potência, a fim de evitar a danificação do mesmo. Na Tabela 4 abaixo são apresentados os valores de corrente nominal por fase para transformadores trifásicos, de acordo com a Tabela 3 anterior, levando em consideração que a tensão de fase é fixa em 220/380V.

Tabela 4 – Valores de corrente em transformadores trifásicos

Potência nominal (kVA)	Corrente Nominal (A)	Corrente com 20% de sobrecarga (A)	Corrente com 40% de sobrecarga (A)
10,00	15,15	18,18	21,21
15,00	22,73	27,27	31,82
30,00	45,45	54,55	63,64
45,00	68,18	81,82	95,45
75,00	113,64	136,36	159,09
112,50	170,45	204,55	238,64
150,00	227,27	272,73	318,18
225,00	340,91	409,09	477,27
300,00	454,55	545,45	636,36

Fonte: Adaptado de COELCE, 2014

O monitor de corrente é um aparelho desenvolvido para o monitoramento de redes de distribuição de baixa tensão. Este foi projetado para ser acoplado magneticamente aos condutores do transformador de distribuição, monitorando em tempo real a corrente no lado de baixa tensão do transformador através de sensores de efeito Hall. Assim é possível estimar o carregamento do transformador e verificar por quanto tempo o mesmo opera sobrecarregado durante o dia.

Nas próximas seções desse capítulo são abordados a relação entre magnetismo e eletricidade; os tipos de materiais magnéticos e o conceito de permeabilidade magnética; assim como o funcionamento de sensores de efeito Hall.

2.4 Magnetismo e Eletricidade

Entende-se que o magnetismo está intrinsecamente relacionado a eletricidade. Especificamente, uma corrente elétrica irá gerar um campo magnético. A Equação (1) relaciona o campo magnético com a corrente que o produz (FITZGERALD et al., 2006).

$$\oint_C \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{a} \quad (1)$$

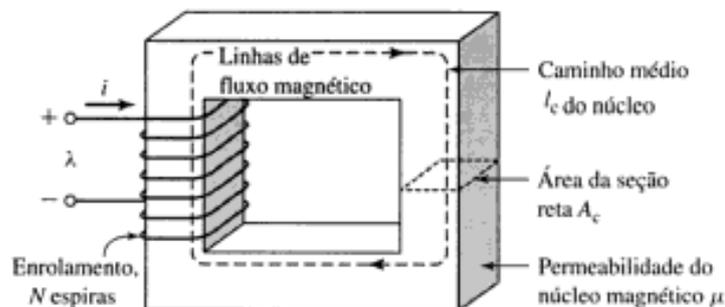
A equação (1) afirma que a integral de linha do campo magnético \mathbf{H} , em um contorno fechado C é igual a corrente total que passa através de uma superfície S delimitada por esse contorno. Dessa forma, o campo H é originado da densidade de corrente \mathbf{J} .

A densidade de fluxo \mathbf{B} , é conservada, isto é, em uma determinada área não há entrada nem saída líquida de fluxo. Isso é expresso na equação (2).

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} = 0 \quad (2)$$

O conceito de circuito magnético produz simplificações na análise do campo magnético \mathbf{H} e da densidade de fluxo \mathbf{B} . Este circuito consiste em uma estrutura de material magnético de permeabilidade muito maior que ar, de forma que o campo magnético fica confinado a estrutura. Um exemplo de circuito magnético pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 – Fluxo de campo em um circuito magnético.



Fonte: FITZGERALD et al., 2006

Em um circuito magnético, força magnetomotriz (FMM) é a fonte do campo magnético que percorre o núcleo. Esta é o produto entre a corrente i e o número de espiras do

enrolamento de corrente N . Desta forma, a FMM que atua em circuito magnético é relacionada a intensidade de campo no mesmo através da equação (3).

$$F = Ni = \oint \mathbf{H} d\mathbf{l} \quad (3)$$

Em unidades do SI, \mathbf{H} é medido em A/m, enquanto F é força magnetomotriz, sendo medida em Ampere-espiras.

2.5 Permeabilidade e Saturação

A reação de um determinado material ao campo magnético depende da sua estrutura cristalográfica. O momento atômico, que é o torque experimentado por um átomo sujeito a um campo magnético, depende de três fatores: a carga positiva do núcleo girando em seu eixo, a carga negativa do elétron girando em seu eixo e o movimento dos elétrons em suas orbitas. Esse momento magnético também é afetado por moléculas adjacentes. (DEL TORO, 1999)

Os materiais geralmente são classificados em três grupos:

- a) **Materiais Diamagnéticos:** São materiais que quando sujeitos a um campo magnético, causam a aparição de um campo no sentido oposto ao original. A prata e o cobre são materiais desse que fazem parte desse grupo.
- b) **Materiais Paramagnéticos:** Esses materiais, quando expostos a um campo magnético, tem seu momento magnético resultante alinhado com o campo original, gerando um pequeno aumento na densidade de fluxo. O alumínio e a platina são materiais paramagnéticos.
- c) **Materiais Ferromagnéticos:** Materiais cujo momento magnético resultante contribui consideravelmente com o campo original, realçando notavelmente a magnitude do campo resultante. Fazem parte desse grupo o ferro e suas ligas

Fica claro então que os materiais ferromagnéticos são extremamente importantes para a Engenharia Elétrica, sendo comumente aplicados em transformadores e em motores elétricos.

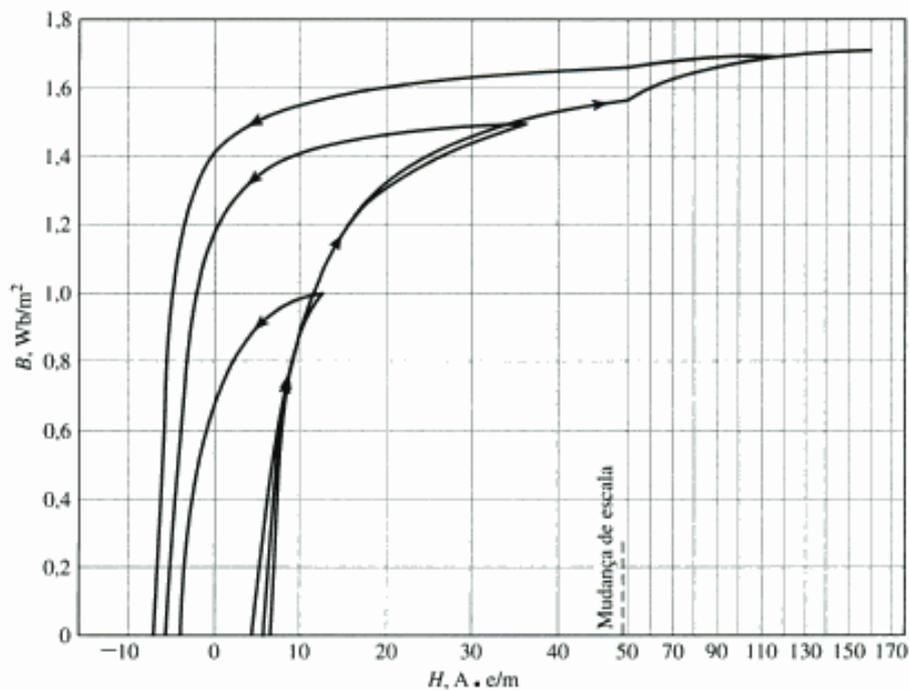
A relação entre a intensidade de campo magnético \mathbf{H} e a densidade de fluxo magnético \mathbf{B} é uma propriedade do material no qual se encontra o campo. Geralmente costuma-se utilizar a relação linear da equação (4) (FITZGERALD et al., 2006).

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (4)$$

Na equação (4), μ é denominado permeabilidade magnética e é característico do material. A permeabilidade do vácuo é $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$ henrys por metro, e costumeiramente a permeabilidade dos materiais magnéticos lineares pode ser expressa em termos de μ_0 .

Embora pareça que μ seja constante, na realidade este varia com a densidade de fluxo magnético. De fato, a relação entre \mathbf{B} e \mathbf{H} é não linear e plurívoca. A medida que a intensidade de campo \mathbf{H} cresce, a densidade de campo varia cada vez menos, tornando a curva cada vez mais horizontal. Esse efeito é chamado de saturação magnética. Na Figura 6 pode ser visto a relação entre \mathbf{B} e \mathbf{H} o aço elétrico de grão orientado tipo M5.

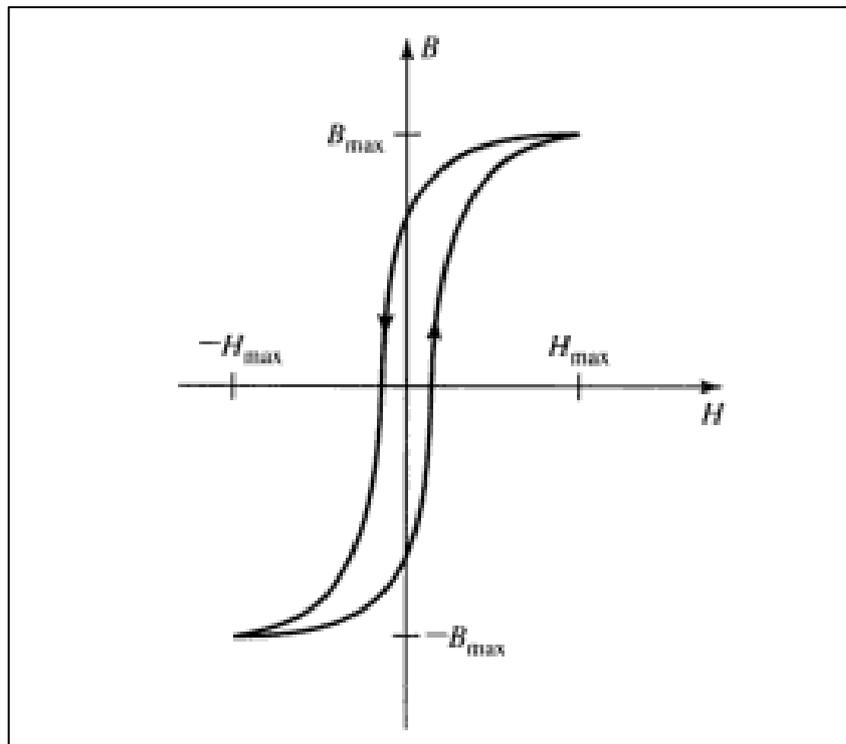
Figura 6 – Curva B x H para o aço de grão orientado tipo M-5



Fonte: FITZGERALD et al., 2006

Também é importante notar que a relação entre \mathbf{B} e \mathbf{H} é plurívoca, isto é, pode assumir curvas diferentes. Quando a intensidade do campo \mathbf{H} é removida, o material ainda apresenta magnetismo residual, de forma que o valor de \mathbf{B} não é zero. Assim, a curva $\mathbf{B} \times \mathbf{H}$ assume a forma de um laço, presente na Figura 7, denominado laço de histerese. É necessária a adição de energia extra para remover o magnetismo residual do material, essas perdas de energia são chamadas de perdas por histerese.

Figura 7 – Exemplo de um laço de histerese



Fonte: FITZGERALD et al., 2006

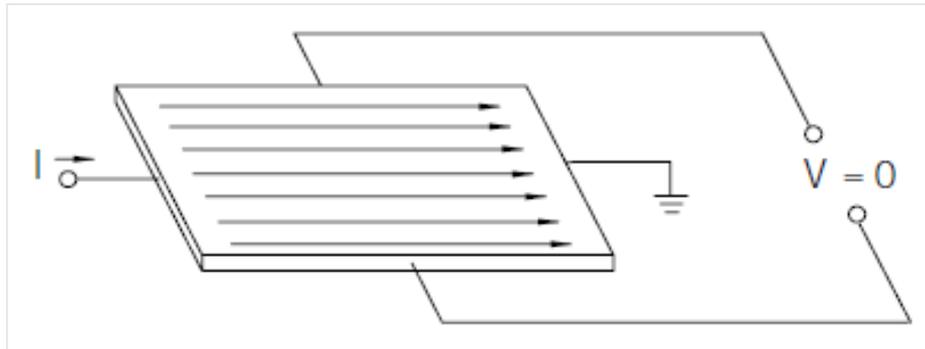
Ainda assim, para várias aplicações na engenharia, a relação entre a densidade e a intensidade de campo pode ser considerada linear, desde que respeitadas as limitações do material. Neste trabalho, um circuito magnético é utilizado para captar o campo magnético gerado pela corrente em um condutor. O fluxo magnético é concentrado pela estrutura magnética na face do sensor de efeito Hall.

2.6 Sensor de Efeito Hall

Quando um condutor de corrente é exposto a um campo magnético, uma tensão é gerada perpendicularmente a ambos o campo e a corrente. Esse princípio é conhecido como efeito Hall (HONEYWELL, 1998).

A Figura 8 a seguir ilustra o princípio de funcionamento do efeito Hall, onde é representada uma fina camada de material semicondutor, no qual uma corrente é conduzida. As conexões de saída são conectadas de forma perpendicular à direção da corrente. Quando não há campo magnético atravessando a camada semicondutora, a distribuição de corrente é uniforme e não há diferença de potencial entre os terminais de saída.

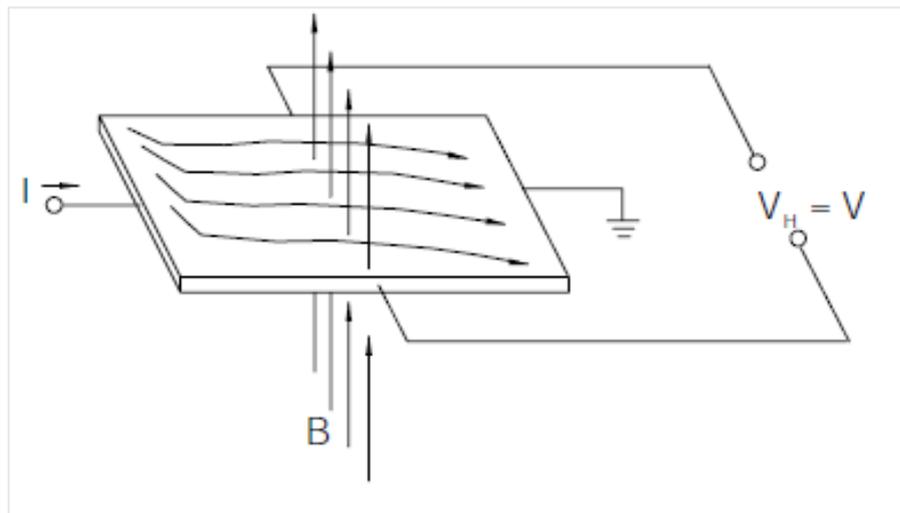
Figura 8 – Princípio do efeito Hall sem presença de campo magnético



Fonte: HONEYWELL, 1998

No entanto, quando um campo magnético é aplicado, uma força de Lorentz é exercida na corrente. Essa força desorganiza a distribuição de corrente, resultando na criação de uma diferença de potencial nos terminais. A Figura 9 representa a influência do campo magnético sobre a distribuição de corrente e conseqüentemente diferença de potencial no semicondutor.

Figura 9 – Princípio do efeito Hall com presença de campo magnético



Fonte: HONEYWELL, 1998

A tensão criada entre os terminais é chamada de tensão de Hall. A tensão de Hall é expressa em função da corrente e campo magnético através da equação (5).

$$V_H \propto \mathbf{I} \times \mathbf{B} \quad (5)$$

O efeito Hall pode ser aplicado em vários tipos de sensores. Se a grandeza a ser medida incorpora ou pode ser relacionada ao campo magnético, um sensor de efeito Hall pode ser aplicado na medição.

Sensores de efeito Hall são produzidos a partir de uma fina camada de material condutivo com conexões perpendiculares a direção do fluxo de corrente. Quando este é sujeito a um campo magnético, este responde com uma tensão proporcional a magnitude do campo. Essa tensão é muito pequena, sendo necessário o uso de circuitos eletrônicos para torna-la adequada ao uso. Geralmente esses circuitos de condicionamento estão integrados nos próprios sensores disponíveis comercialmente (HONEYWELL,1998).

Baseado nos princípios abordados até este ponto, o próximo capítulo discute a construção do dispositivo, assim como o funcionamento de cada bloco que compõe o monitor de corrente.

3 PROJETO DO DISPOSITIVO

O aparelho desenvolvido para monitoramento de corrente em redes de distribuição em baixa tensão é baseado em uma placa microcontrolada, equipada de circuitos para condicionamento, registro e avaliação dos sinais de corrente captados através de sensores de efeito Hall.

3.1 Hardware

Nessa seção são abordados detalhadamente os elementos que formam o aparelho monitor de corrente. Para tal são justificadas as escolhas dos mesmos e como estes contribuem para o funcionamento adequado do dispositivo.

3.1.1 Ponteira Medidora de Corrente

O sensor que realiza a medição de corrente é baseado em um sensor linear de efeito Hall. Este sensor produz em seu terminal de saída um valor de tensão proporcional a um campo magnético que atravessa sua face. Dessa forma, o mesmo é utilizado nessa aplicação para captar e mensurar um campo magnético produzido pela corrente em um condutor. Um exemplo de sensor de efeito Hall pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Sensor de efeito Hall com encapsulamento TO-92

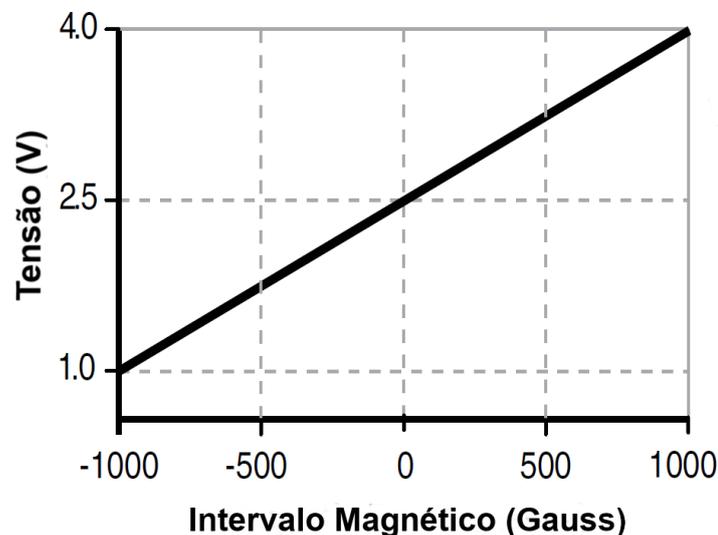


Fonte: ALLEGRO, 2016

Dentre as soluções que podem ser utilizadas para este propósito estão os sensores SS49E e o AH3503, sendo o SS49E utilizado nos ensaios deste trabalho. Ambos sensores funcionam da mesma forma e podem ser intercambiados, além de serem amplamente disponíveis no mercado e custarem em média menos de um dólar americano por unidade. No entanto, é importante notar que há diversos sensores de efeito Hall cuja saída não é um valor analógico, e servem apenas para indicar a presença, ou ausência, de um campo magnético, dado um certo limiar. Estes não podem ser utilizados para o propósito abordado nesse texto.

Quando não há campo atravessando a face dos sensores lineares, a tensão na saída dos mesmos é de 2,5V. Um campo magnético atravessando a face do sensor faz surgir uma tensão no terminal de saída cujo valor depende da magnitude e direção do campo magnético. Dessa forma é possível observar tensões alternadas, cujo sentido do campo é variante, com um microcontrolador, dentro da faixa de zero a cinco volts, sem a necessidade de lidar com tensões negativas. A Figura 11 mostra o gráfico de tensão de saída (Volts) para densidade de fluxo magnético (Gauss) que atravessa o sensor SS49E.

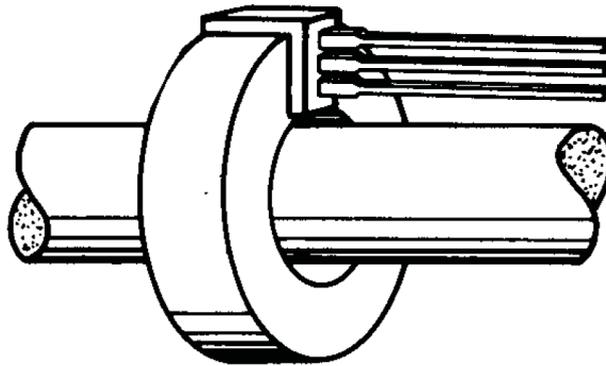
Figura 11 – Comportamento do sensor de efeito Hall



Fonte: Adaptado de HONEYWELL, 2015

Para garantir o melhor funcionamento do sensor, é utilizado um núcleo construído de material ferromagnético que confina o campo magnético. O sensor é introduzido nesse, de forma que o campo magnético passe pela sua face. Esse tipo de configuração pode ser visto na Figura 12 abaixo.

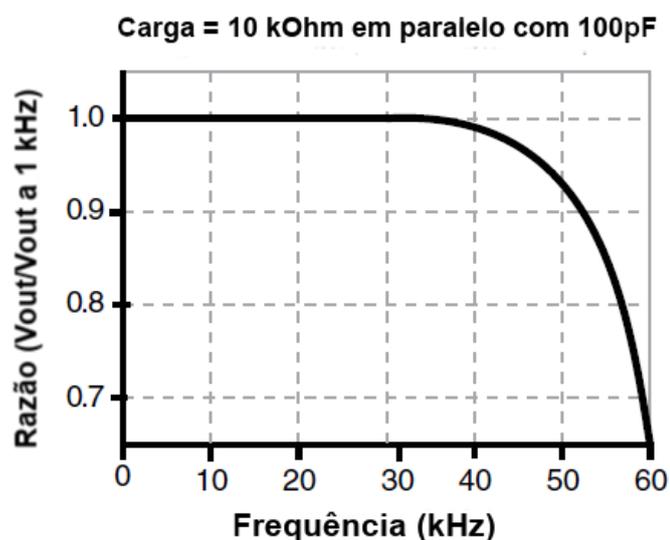
Figura 12 – Aplicação do sensor de efeito Hall na medição de corrente.



Fonte: ALLEGRO, 2013

Um parâmetro importantíssimo que deve ser levado em conta é resposta em frequência do sensor utilizado. Embora a tensão da rede no Brasil possua frequência de 60Hz, a corrente assume forma de onda dependente da carga e pode exibir componentes de alta frequência, como em cargas não-lineares. De acordo com o datasheet do SS49E (HONEYWELL, 2015), o sensor possui tempo de resposta de três microssegundos. O gráfico da resposta em frequência do mesmo sensor pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 – resposta em frequência do sensor de efeito Hall SS49E



Fonte: Adaptado de HONEYWELL, 2015

Assim percebe-se que o sensor é capaz de operar corretamente para medir sinais com frequência máxima de 30kHz. Sinais com frequência maior que essa sofrem degradação. Esse valor também limitará a frequência de amostragem do dispositivo.

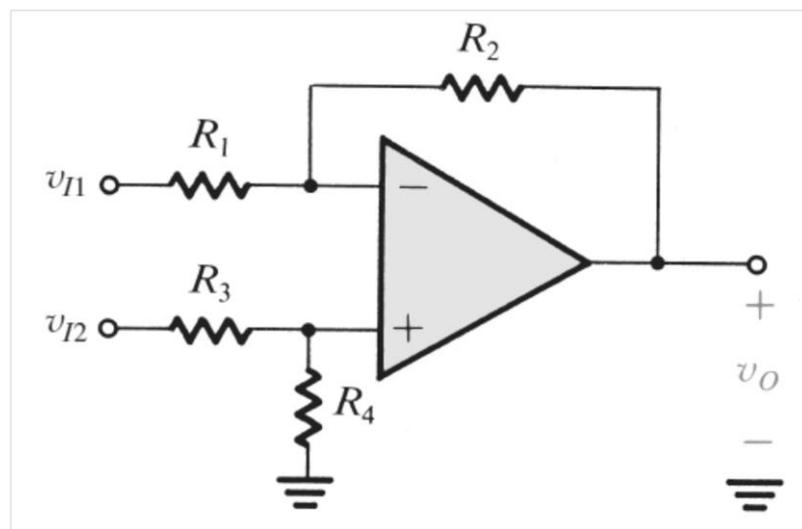
3.1.2 Circuito de Condicionamento do Sinal

O sinal gerado no sensor depende da corrente no condutor monitorado. O sensor de efeito Hall pode ser utilizado para medir tanto correntes contínuas como alternadas. Sendo essa uma vantagem sobre o sensor composto de um transformador de corrente, que pode ser usado apenas para medição de correntes alternadas.

Dependendo da configuração utilizada, mesmo valores da ordem de centenas de amperes são traduzidos em apenas alguns milivolts na saída do sensor de efeito Hall. Dito isso, é preciso amplificar esse valor para aproveitar a faixa de tensão oferecida pelo conversor analógico digital do microcontrolador.

Para garantir os requerimentos explicados anteriormente, um amplificador de diferença foi utilizado (SEDRA, 2007). Essa configuração de amplificador subtrai o valor de entrada de outro valor, que nesse caso é uma tensão fixa de referência, e amplifica tal diferença. Isso é utilizado para expandir um sinal que fica em uma pequena faixa para uma faixa maior, porém utilizando a tensão de referência como offset. A configuração do amplificador de diferença pode ser vista na Figura 14.

Figura 14 – Circuito do amplificador de diferença.



Fonte: SEDRA, 2007

O valor da tensão na saída em função das tensões de entrada e dos resistores é dado pela equação (6).

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_{i1} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) v_{i2} \quad (6)$$

Que pode ser simplificada fazendo-se $R_3 = R_1$ e $R_4 = R_1$. Assim, a tensão de saída é dada pela equação (7).

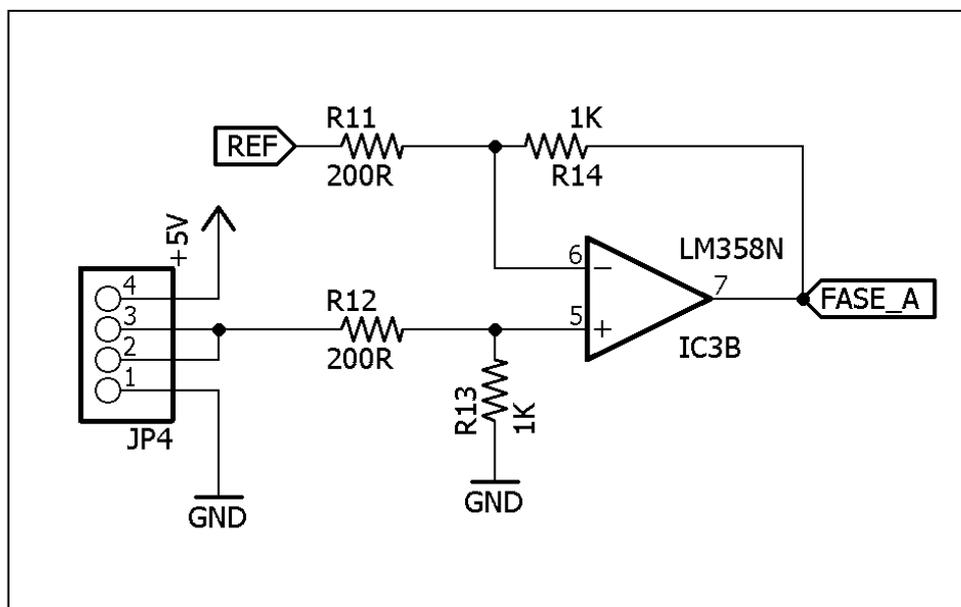
$$v_o = \frac{R_2}{R_1}(v_{I2} - v_{I1}) \quad (7)$$

Claramente percebe-se que o ganho do amplificador de diferença, A_d , é dado pela equação (8):

$$A_d = \frac{R_2}{R_1} \quad (8)$$

Para os amplificadores neste trabalho foi admitido $R_1 = 200\Omega$ e $R_2 = 1k\Omega$, totalizando um ganho de cinco volts por volt. O valor de entrada v_{i1} foi fixado através de uma tensão fixa de referência de 2,1 V. Esse valor foi escolhido por ser o valor de diodo zener mais próximo de 2,0 V. Desta forma o amplificador só irá amplificar os sinais acima de 2,1V. A Figura 15 mostra o circuito de amplificador de diferença adotado para amplificação do sinal proveniente do sensor. Esse circuito é replicado para cada fase da rede trifásica.

Figura 15 – Amplificador de diferença implementado



Fonte: Próprio Autor

No projeto do circuito foi tomado o cuidado necessário para garantir a precisão no condicionamento do sinal. Foram utilizados amplificadores *single-rail*, capazes de operar com apenas uma fonte de tensão positiva, porém sem distorcer valores próximos a 0V, como é comum em amplificadores operacionais tradicionais. Os resistores utilizados são de precisão,

com tolerância de 1% para garantir uniformidade para todas as fases. Para gerar a tensão de referência para os amplificadores foi utilizado um diodo zener padrão por estar disponível. No entanto, há no mercado alternativas mais precisas e menos sensíveis a variações na temperatura

3.1.3 Microcontrolador

Um microcontrolador é um pequeno computador em um único circuito integrado. Este é responsável pela coleta dos sinais após esses serem condicionados. No microcontrolador são executados os algoritmos de controle do conversor alógico digital (ADC), contagem de tempo, avaliação dos sinais capturados e reportar estado do transformador.

O microcontrolador escolhido foi o ATmega328p. Este cumpre perfeitamente os requisitos de desempenho do projeto, porém foi escolhido principalmente pela facilidade em ser adquirido. Como este microcontrolador também é utilizado na placa Arduino UNO, o mesmo possui preço baixo e alta disponibilidade no mercado. Atualmente esse microcontrolador é fabricado pela Microchip, que adquiriu a desenvolvedora e fabricante anterior do mesmo, Atmel. As características de tal microcontrolador podem ser observadas na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5 – Características do Microcontrolador ATmega328p

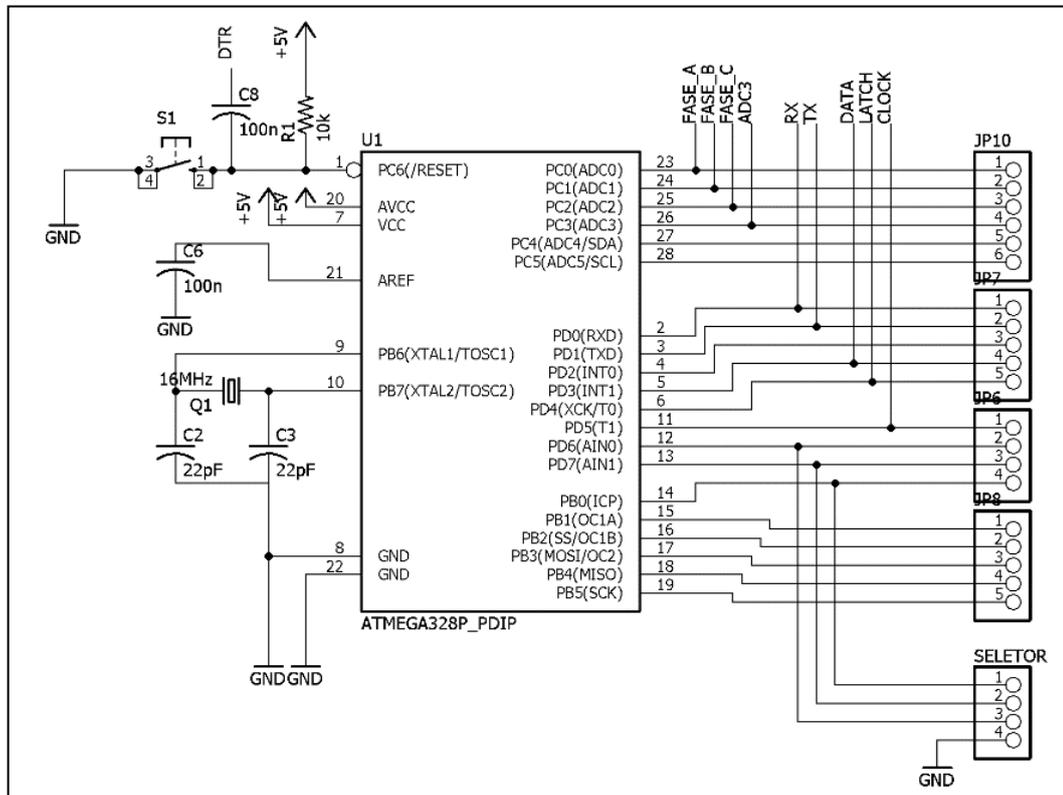
Microcontrolador	ATmega328p
Frequência de operação	Até 20 MIPS
SRAM	2KB
ADC (10 bits)	15kSP
Tensão de operação	1,8 – 5,5V
Consumo (1MHz, 1.8V, 25°C)	0.2mA
Timers	1x de 16 bits e 2x de 8 bits

Fonte: Microchip, 2018

O microcontrolador é alimentado com uma tensão de 5V, com frequência de operação ditada por um cristal de 16MHz. Três dos seis canais do conversor analógico digital

foram utilizados para captar sinais de corrente trifásicos. O circuito de suporte do microcontrolador pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 – Circuito de suporte do microcontrolador



Fonte: Próprio Autor

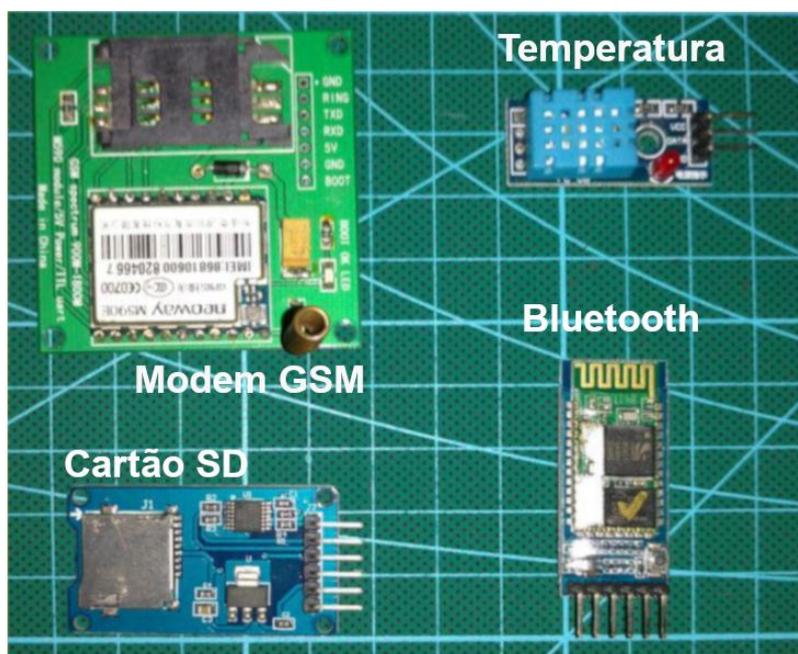
O conversor analógico-digital do ATmega328p é multiplexado, isto é, apesar de possuir 6 canais, apenas um dos canais pode ser utilizado de cada vez. Ainda assim, dividindo a taxa de amostragem do ADC entre os sensores correspondentes as três fases da rede elétrica trifásica mantêm-se uma alta taxa de amostragem. A resolução do ADC é de 10 bits, sendo possível a representação de 1024 valores distintos de tensão. Esta ainda pode ser diminuída para elevar a taxa de amostragem a um máximo de 76.9kSP (Microchip, 2018)

Pode se visualizar na Figura 16 que todas as conexões do microcontrolador foram expostas em *headers*. Isso foi feito por dois motivos, sendo o primeiro permitir que a placa seja atualizada com módulos externos para adição de funções sem a necessidade de se construir uma nova placa e o segundo é a possibilidade de facilmente se conectar uma ponte de teste nos pinos para medições e ensaios. Entre as funções extras que foram pensadas, porém não puderam ser implementadas a tempo estão:

- a) Armazenamento em massa, para salvar em um cartão SD ou memória flash todas as medições realizadas.
- b) Relógio de tempo real, para determinar a hora e dia em que o transformador é sobrecarregado.
- c) Comunicação celular, para transmissão dos dados a longa distância.

Módulos para realizar essas expansões das funcionalidades da placa podem ser conectados nos pinos livres do microcontrolador. Ambas as interfaces SPI e I2C do mesmo estão livres, de forma que adicionar um módulo novo à placa se torna simplesmente uma questão de conectar o mesmo aos pinos livres e fazer as atualizações adequadas no firmware. Na Figura 17 são apresentados alguns módulos que podem ser utilizados para dar outras aplicabilidades ao dispositivo, incluindo um módulo GSM para comunicação através da rede telefônica; um sensor de temperatura, para possíveis correções matemáticas de valores que variam com a temperatura; um adaptador para cartões SD, para armazenamento em massa, e um módulo bluetooth para comunicação sem fio.

Figura 17– Módulos que podem ser conectados para expansão de funcionalidades



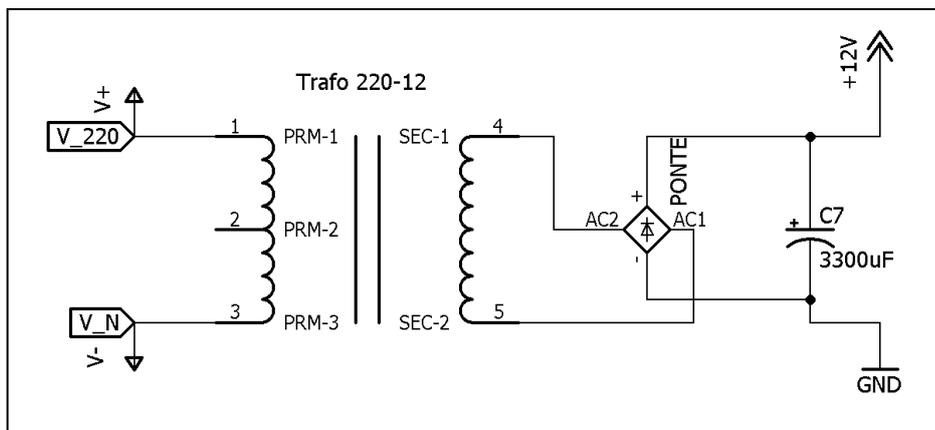
Fonte: Próprio Autor

3.1.4 Fonte CA/CC

O microcontrolador e os circuitos de captura e condicionamento dos sinais operam em tensão contínua, a 5V. O aparelho, no entanto, é conectado ao secundário do transformador monitorado, em tensão alternada com valor eficaz de 220V. Para obter a tensão necessária, uma fonte com ponte retificadora completa e filtro capacitivo foi utilizada. Essa configuração foi escolhida por ser bastante simples de ser implementada e ser capaz de fornecer a corrente necessária ao circuito. Foi cogitada a implementação de uma fonte sem transformador, porém essa ideia foi descartada após verificar-se que essa topologia não ofereceria corrente suficiente para alimentar todos os circuitos integrados do dispositivo (MICROCHIP, 2004).

O circuito de fonte adotado, presente na Figura 18, é composto de um transformador abaixador, no caso foi utilizado em transformador de 220V para 12V; uma ponte retificadora e um ou mais capacitores.

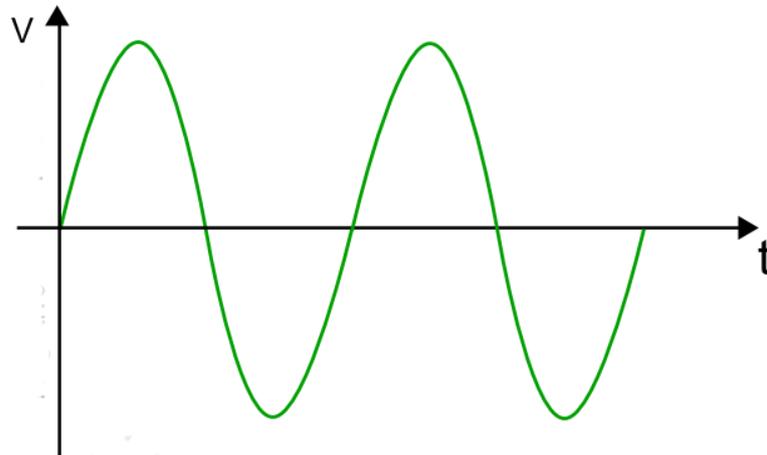
Figura 18– Fonte de tensão contínua com ponte retificadora e filtro capacitivo.



Fonte: Próprio Autor

O transformador é utilizado para abaixar a tensão da rede de 220V para 12V. Porém essa ainda é uma tensão alternada senoidal, com valores alternando rapidamente entre tensões positivas e negativas, não podendo ser aplicada aos circuitos. A Figura 19 abaixo mostra um exemplo de tensão alternada senoidal.

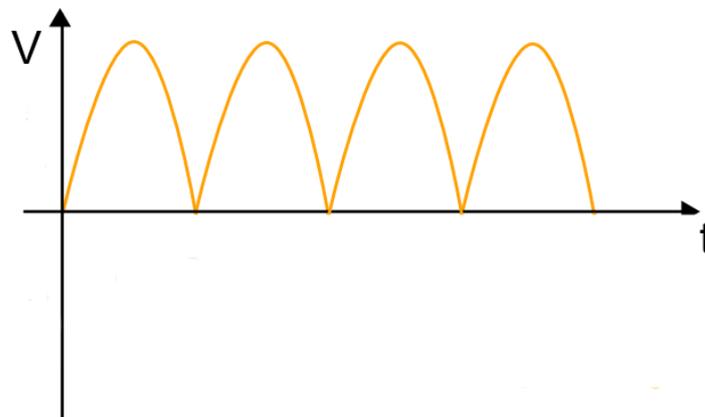
Figura 19 – Tensão alternada senoidal.



Fonte: Adaptado de ADAFRUIT, 2018

A ponte retificadora, composta de diodos, é utilizada para tornar positivos os semiciclos negativos da tensão. A forma de onda de tensão retificada pode ser vista na Figura 20.

Figura 20 – Forma de onda de tensão retificada.



Fonte: Adaptado de ADAFRUIT, 2018

No projeto foi adotada uma ponte retificadora comercial, porém esta pode ser construída a partir de quatro diodos. O modelo utilizado foi a ponte KBU1010, que possui algumas características listadas na Tabela 6 a seguir. As condições em que esses parâmetros foram testados e mais informações sobre a performance estão disponíveis no datasheet (SEP ELECTRONIC CORP, 2003).

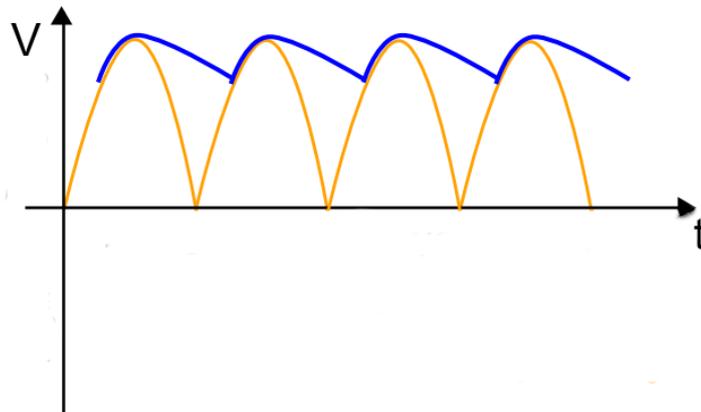
Tabela 6 – Características da ponte retificadora KBU1010

Máxima tensão reversa de pico	1000V
Máxima corrente retificada direta	10A
Máxima queda de tensão	1.05 V
Temperatura de operação	-55 a +150

Fonte: SEP ELECTRONIC CORP, 2003

O valor do capacitor é escolhido de forma a se reduzir a variação na saída de tensão, conhecida como tensão de *ripple*. Sem o mesmo, é visto que a tensão na saída varia entre zero e o valor máximo, como na Figura 20. Porém o capacitor tem a característica intrínseca se opor a variações de tensão, suavizando a forma de tensão retificada, como pode ser visto em azul na Figura 21.

Figura 21 – Forma de onda de tensão retificada com filtragem capacitiva.



Fonte: Adaptado de ADAFRUIT, 2018

A tensão de *ripple* em uma fonte retificadora de onda completa pode ser calculada através da equação (9) (RASHID, 2001):

$$V_{r(pp)} = \frac{V_m}{f_r RC} \quad (9)$$

Onde:

$V_{r(pp)}$ é a tensão de *ripple* na saída do filtro;

V_m é a tensão máxima na saída;

f_r é a frequência do *ripple*, que para o retificador de onda completa é 120 Hz;

R é a resistência da carga alimentada pela fonte;

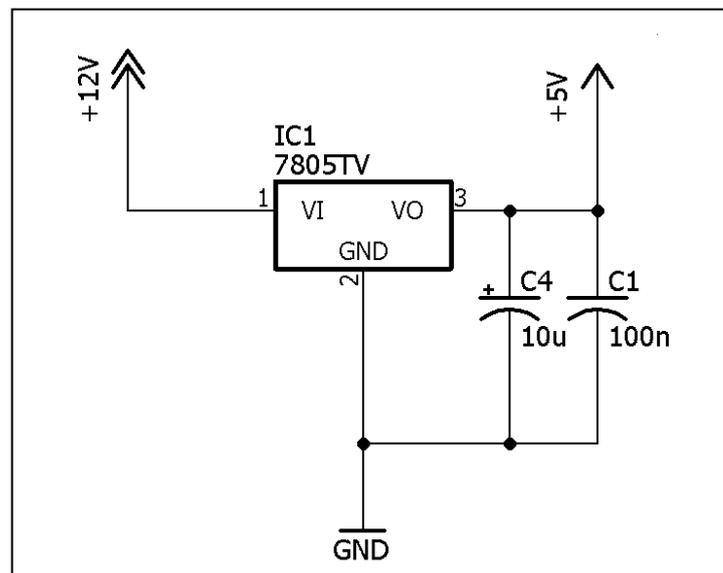
C é o capacitor utilizado no filtro, no caso 3300 μ F.

O fator $\frac{V_m}{R}$ pode ser substituído pela corrente máxima no circuito. Que se considera nesse caso 50mA. Dessa forma tem-se:

$$V_{r(pp)} = \frac{I_m}{f_r C} = \frac{0,05A}{120Hz * 3300\mu F} = 0.126V$$

O regulador linear 7805, que é utilizado para reduzir a tensão contínua de 12V para 5V também é capaz de suprimir parte do *ripple*, estabilizando a tensão de 5V (TEXAS INSTRUMENTS, 2003). O circuito de regulação dos 5V é mostrado na Figura 22.

Figura 22– Regulador de tensão 7805 no design do dispositivo

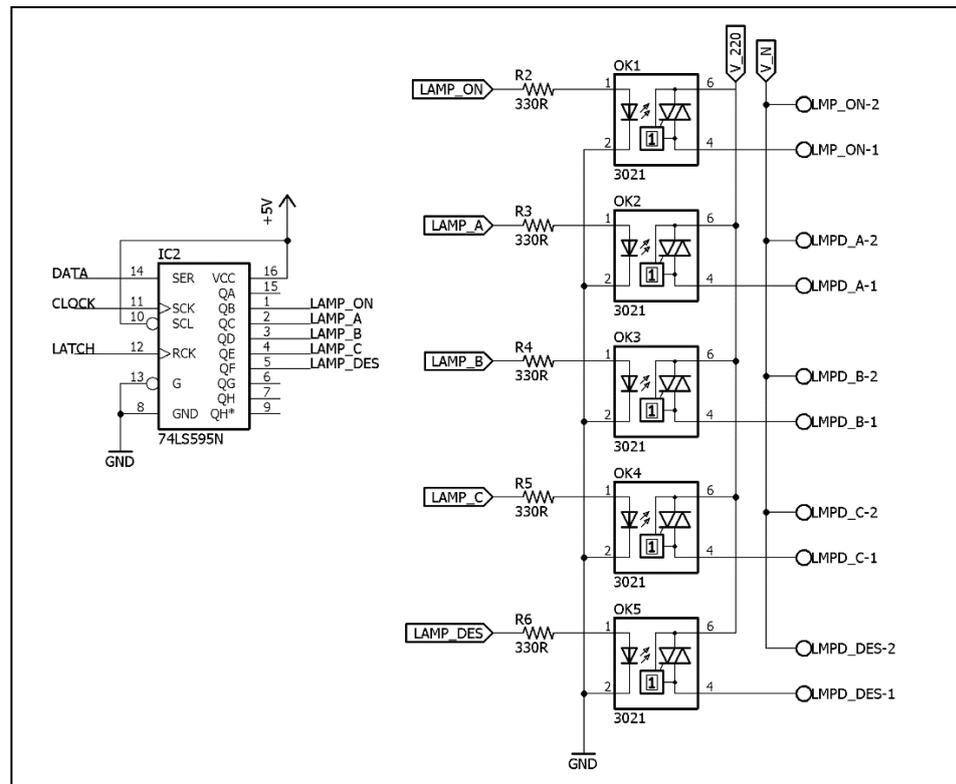


Fonte: Próprio Autor

3.1.6 Sinaleiras

Para reportar o status do carregamento do transformador, sinalleiras são utilizadas. Desta forma, um técnico da concessionária pode verificar o status do transformador mesmo do solo. As sinalleiras são conectadas na rede de baixa tensão (220V) através de opto-acopladores MOC3021, estes garantem o isolamento entre o circuito de 220V e o a tensão de operação (5V). Um registrador de deslocamento é utilizado para controlar até 8 sinalleiras fazendo uso de apenas 3 pinos do microcontrolador, deixando outros pinos livres para expansões. O circuito de acionamento das sinalleiras pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 – Circuito de acionamento das sinalleiras



Fonte: Próprio Autor

O driver de saída do opto-acoplador MOC3021 é capaz de conduzir até 1A em pulsos (FAIRCHILD SEMICONDUCTOR, 2000), desta forma sendo utilizado para acionar as sinalleiras, já que estas são baseadas em LEDs e necessitam de apenas 20mA para acender. Porém, os opto-acopladores utilizados para acionar cargas na tensão de fornecimento precisam de um componente extra para acionar a carga, um TRIAC, que funciona como um transistor para corrente alternada. Assim, essa parte do circuito deve ser corrigida em uma próxima revisão.

3.2 Software

Para que o aparelho funcione como esperado, é necessário que este seja programado com os algoritmos corretos. As tarefas executadas pelo microcontrolador são:

- a) Amostrar periodicamente os valores de corrente;
- b) Processar os dados coletados;
- c) Reportar, através das sinalleiras, se foi identificado inconformidade na operação do transformador.

O código completo utilizado encontra-se no endereço disponível no Anexo A. Nessa seção são detalhados alguns trechos do código que executam tarefas de extrema importância para o propósito geral do dispositivo.

O microcontrolador utilizado no projeto é o ATmega328. Embora muitas das definições mencionadas no texto são válidas para outros microcontroladores da família AVR, em especial o ATmega168 e ATmega88, não é garantido no funcionamento do código nestes. Dito isso, o código foi escrito em C e é de fácil adaptação para outros microcontroladores, dado que estes possuam os periféricos exigidos.

3.2.1 Marcação de Tempo

O dispositivo precisa de uma forma de marcar o tempo por dois motivos. Primeiramente, para calcular a corrente eficaz, esta deve ser matematicamente integrada no tempo. Segundamente, é preciso marcar por quanto tempo o transformador opera em sobrecarga.

Para calcular a passagem do tempo em segundos, um dos três *timers* presentes no microcontrolador foi utilizado. O ATmega328p possui dois *timers* de 8 bits (timer 0 e timer 2) e um timer de 16 bits (timer 1), que podem ser configurados para marcar a passagem de tempo (MICROCHIP, 2018). O timer de 16 bits foi utilizado para contar o número de segundos passados, por sua maior resolução, podendo contar facilmente longos intervalos, sem a necessidade de múltiplas interrupções.

O timer de 16 bits do microcontrolador é configurado para funcionar no modo normal, isto é, incrementado seu valor positivamente até alcançar seu valor máximo ($2^{16}-1=65535$) e reiniciar a contagem a partir de zero. Os outros modos que esse timer pode operar são os modos CTC (*Clear Timer on Compare Match*) e PWM (*Pulse Width Modulation*) que são utilizados gerar ondas quadradas em determinados pinos do microcontrolador automaticamente e não relevantes nesse caso e por isso serão discutidos aqui.

Um cristal de 16MHz é a fonte de *clock* do sistema, esse valor é dividido no timer através de um *prescaler*. Os valores que podem ser aplicados ao *prescaler* do timer 0 são 1, 8, 64, 256 e 1024.

Utilizando-se um valor de *prescaler* de 256, a frequência do oscilador a cristal é dividida pra 62,5kHz ou 62500 oscilações por segundo. Esse valor está dentro do valor contável pelo timer, e é o valor que deve ser contado para medir-se a passagem de um segundo completo.

Para isso o timer é carregado com um valor de offset antes de ser iniciado e a cada interrupção, este valor é:

$$2^{16} - 1 - 62500 = 3036$$

Assim, o timer começa a contar a partir de 3036 (0x0BCD em hexadecimal), e depois de um segundo, quando este alcança 65535 uma interrupção para atualização do número de segundos passados é ativada. A rotina de inicialização do timer é listada na Figura 24 abaixo.

Figura 24 – Função de inicialização do *timer 1*.

```
void init_tim1(void){
    //configurar para 1 segundo
    TCCR1A=0x00;//Normal mode
    TCNT1H=0x0B;//3036 = 0x0bcd;
    TCNT1L=0xDC;
    TCCR1B=(1<<CS12); //256 prescaller
    TIMSK1=(1<<TOIE1);// interrupção ativada
}
```

Fonte:Próprio Autor

Depois que o código acima for executado, o timer irá ativar a interrupção do timer 1 a cada segundo. Essa rotina, junto com funções para verificação da ativação da interrupção podem ser vistas na Figura 25 abaixo.

Figura 25 – Rotina de interrupção por overflow do *timer 1*

```
volatile uint8_t ready;
//interrupção
ISR(TIMER1_OVF_vect){
    //reseta o valor inicial do timer
    TCNT1H=0x0B;
    TCNT1L=0xDC;
    ready=1;
}
//função para verificação da flag de um segundo
uint8_t one_sec_passed(void){
    return ready;
}
//função para reset da da flag de um segundo
void clear_one_sec_flag(void){
    ready=0;
}
```

Fonte: Próprio Autor

A interrupção não muda o número de segundos passados diretamente. Em vez disso, a mesma ativa uma flag que é verificada no loop principal. Baseado nisso, o programa atualiza quando necessário não apenas um contador de tempo, mas três contadores independentes, que correspondem as três fases do sistema trifásico.

3.2.2 Coleta dos Dados

O microcontrolador deve capturar e processar os sinais dos sensores conectados as três fases do secundário do transformador. Os valores de corrente são convertidos pelo sensor de efeito Hall em valores de tensão, que são amplificados pelos amplificadores de diferença. Os valores amplificados são então captados pelo conversor analógico-digital do microcontrolador.

Os valores de tensão no ADC são amostrados através do uso de um segundo timer, esse com frequência maior, que é utilizado para temporizar a captura de cada valor. O timer 0 foi utilizado, possuindo menor resolução, 8 bits, que é o suficiente ainda assim.

O timer 0 é configurado de forma similar ao timer 1, porém com uma frequência de 10kHz, em vez de 1Hz. Esse valor foi escolhido por ser suficiente para capturar a onda de corrente com fidelidade. O teorema de Nyquist-Shannon afirma que para amostrar uma forma de onda sem perda de dados, a frequência de amostragem deve ser o dobro da maior componente do sinal amostrado (OPPENHEIM, 1998). Assim, a frequência de amostragem de 10kHz é capaz de capturar sem perda as componentes do sinal de até 5kHz. A configuração do timer 0 pode ser vista na Figura 26.

Figura 26 – Função de inicialização do timer 0

```
void init_tim0(void){ //timer 0
    TCCR0A=0x00; //Normal mode
    TCCR0B=(1<<CS01); // prescaller de 8 -> 2MHz
    TCNT0=56; // 256-56=200 (2Mhz/200=10KHz)
    TIMSK0=(1<<TOIE0);
}
```

Fonte: Próprio Autor

Quando o timer 0 é ativado, este gera uma interrupção a cada 100us. Essa interrupção é utilizada como temporizador da amostragem. É recomendado que o microcontrolador passe o menor tempo possível executando a interrupção, de forma que a

mesma é utilizada apenas para atualizar uma variável que permite que a amostragem seja executada no loop principal. A rotina de interrupção do timer 0 pode ser vista na Figura 27.

Figura 27 – Rotina de interrupção por overflow to timer 0.

```
ISR(TIMER0_OVF_vect) {
    TCNT0=56; //reseta o timer
    samp_flag=1; //flag que permite a amostragem
}
```

Fonte: Próprio Autor

No loop principal, como representado na Figura 28, o algoritmo espera a chegada do momento de amostragem. Quando a interrupção ativa a variável que permite a amostragem procede. Isso garante uma frequência fixa de captura.

Figura 28 – Chamada da função de captura dos valores.

```
while(!sample_time()); // espera a interrupção
    update_status(&tr); // amostra o próximo valor
```

Fonte: Próprio Autor

O código faz a amostragem dos dados durante um intervalo completo de um segundo. Como a memória do microcontrolador é limitada, os valores não são guardados individualmente, mas sim integrados em uma variável que é utilizada para calcular o valor eficaz da corrente naquele segundo.

A tensão de alimentação do microcontrolador, cinco volts, é utilizada como tensão de referência do conversor analógico digital. Dessa forma, o ADC é capaz de identificar valores na faixa de zero a cinco volts, com resolução de 10 bits. O conversor analógico-digital é inicializado através do seguinte trecho de código na Figura 29.

Figura 29 – Configuração do conversor analógico digital.

```
// adc
ADMUX = (1<<REFS0); // AVCC como referência
// ADC ativado e frequência = clock do sistema/32
ADCSRA = (1<<ADEN) | (1<<ADPS2) | (1<<ADPS0);
```

Fonte: Próprio Autor

O valor instantâneo de tensão em cada canal é coletado através do uso da seguinte função presente na Figura 30.

Figura 30 – Função de captura do valor analógico.

```
uint16_t get_adc(uint8_t channel){
    ADMUX&=0xF0; // limpa o canal
    ADMUX|=channel; // novo canal de medição
    ADCSRA |= (1<<ADSC); // inicia medição
    while(ADCSRA & (1<<ADSC)); //espera até a conversão
    terminar
    return (ADCW); //retorna o valor medido
}
```

Fonte: Próprio Autor

Essa função retorna o valor medido pelo ADC diretamente, sem nenhuma conversão. Dessa forma, 0 equivale a 0V e 1023 equivale a 5.0V, destacando-se novamente que a resolução do conversor é de 10 bits. Para converter o valor do ADC para uma medida de tensão, a função na Figura 31 a seguir é usada.

Figura 31 – Função utilizada para converter o valor do ADC em uma tensão

```
float get_voltage(uint8_t channel){
    float sample;
    sample=get_adc(channel);
    sample*=V_REFERENCE/1024;
    return sample;
}
```

Fonte: Próprio Autor

A função acima simplesmente mapeia a faixa de valores inteiros de 0 a 1023 para a faixa de 0 a 5.0V. O valor de tensão é muito útil para verificar o funcionamento do ADC, porém esse valor ainda deve ser convertido para um valor correspondente a corrente no sensor para ser usado efetivamente, como representado na Figura 32.

Figura 32 – Função utilizada pra converter o valor de tensão para corrente

```
float get_current(voltage){
    return (float) voltage*gain*(0.00488281)+offset;
}
```

Fonte: Próprio Autor

Como a relação entre a corrente no condutor e tensão no sensor é linear, dois coeficientes, o coeficiente linear e o angular da reta tensão x corrente devem ser calibrados, medindo-se os valores amostrados sem a presença de campo magnético no sensor.

3.2.3 Processamento dos Dados

Para organização dos dados, as variáveis relevantes ao transformador são guardadas em uma estrutura. Esta estrutura é listada na Figura 33 a seguir

Figura 33 – Estrutura utilizada para guardar os dados do transformador

```
typedef struct tranf_t {
    uint8_t potencia;           // potência do transformador
    float criterio_20;         // corrente de 20% de sobrecarga
    float criterio_40;         // corrente de 40% de sobrecarga
    uint32_t tempo_20[3];      // tempo em sobrecarga de 20%
    uint32_t tempo_40[3];      // tempo em sobrecarga de 40%
    uint16_t media[3];         // último valor média medida
    uint16_t max[3];           // último valor máximo medido
    uint16_t min[3];           // último valor mínimo medido
    uint16_t delta[3];         // máximo - média
    uint16_t overload[3];      // sobrecarga atual (0,>20%,40%)
    unsigned long soma[3];     // integração do valor de corrente
    uint16_t num_amstras;      // número de amostras coletadas no
    último segundo
} transformador;
```

Fonte: Próprio Autor

Essa estrutura é inicializada quando o dispositivo é ligado, preenchendo alguns dos valores de acordo com a potência do transformador, que é escolhida manualmente pelo operador do monitor através de um seletor presente no aparelho. Depois de executada a inicialização, os valores da estrutura são constantemente atualizados de acordo com as medições realizadas, como exemplificado pelo código na Figura 34 a seguir.

Figura 34 – Função utilizada para atualizar os dados da medição.

```
void update_status(transformador* tr){
    uint16_t sample=0;
    //SENSOR A
    sample=get_adc(SENS_A);
    sample*=sample;//sample2
    if(sample>tr->max[SENS_A]){
        tr->max[SENS_A]=sample;
    }
    if(sample<tr->min[SENS_A]){
        tr->min[SENS_A]=sample;
    }
    tr->soma[SENS_A]+=sample;

    //SENSOR B
    sample=get_adc(SENS_B);
    sample*=sample;//sample2
    if(sample>tr->max[SENS_B]){
        tr->max[SENS_B]=sample;
    }
    if(sample<tr->min[SENS_B]){
        tr->min[SENS_B]=sample;
    }
    tr->soma[SENS_B]+=sample;

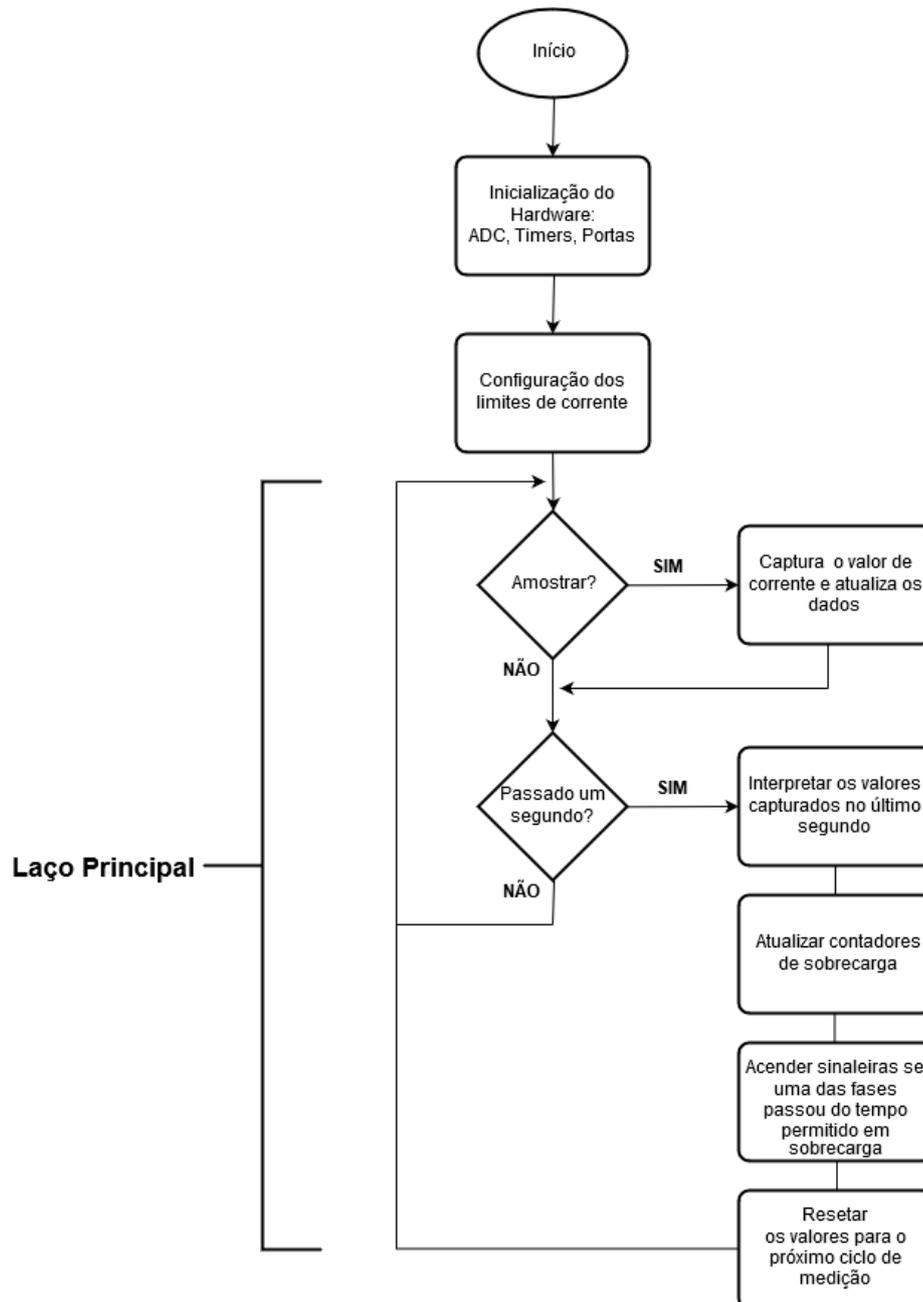
    //SENSOR C
    sample=get_adc(SENS_C);
    sample*=sample;//sample2
    if(sample>tr->max[SENS_C]){
        tr->max[SENS_C]=sample;
    }
    if(sample<tr->min[SENS_C]){
        tr->min[SENS_C]=sample;
    }
    tr->soma[SENS_C]+=sample;

    tr->num_amostras++;
    samp_flag=0;
}
```

Fonte: Próprio Autor

Vistas as funções mais relevantes do software, uma simplificação do algoritmo completo pode ser vista na Figura 35 a seguir.

Figura 35 – Simplificação do software em fluxograma



Fonte: Próprio Autor

Os algoritmos explicados anteriormente são uma parte importantíssima do projeto. Estes, controlam o hardware do dispositivo para garantir o funcionamento correto do mesmo. No próximo capítulo é apresentada a implementação dos circuitos e algoritmos discutidos anteriormente na forma de uma placa microcontrolada.

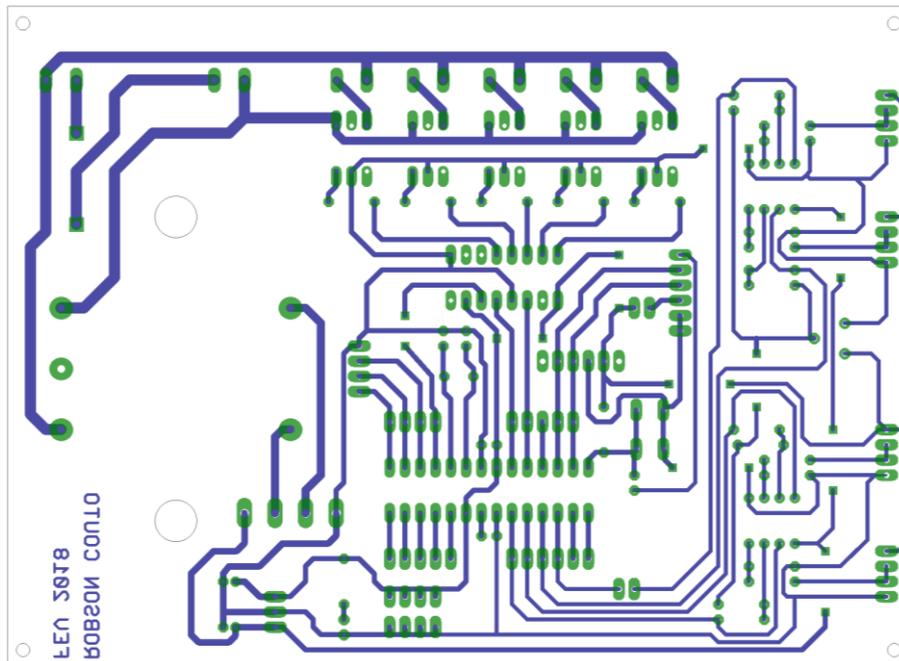
4 RESULTADOS

Os circuitos descritos no capítulo 3 foram reunidos em um protótipo de aparelho para monitoramento de corrente em redes de baixa tensão. Nesse capítulo são descritos a construção e a verificação do funcionamento de tal protótipo.

4.1 Placa de Circuito

Primeiramente, os circuitos mencionados foram condensados em um layout de placa de circuito utilizando-se o software para desenho de esquemáticos e placas de circuito Eagle. O desenho da placa de circuito pode ser visto na Figura 36.

Figura 36 – Layout da placa de circuito no software Eagle

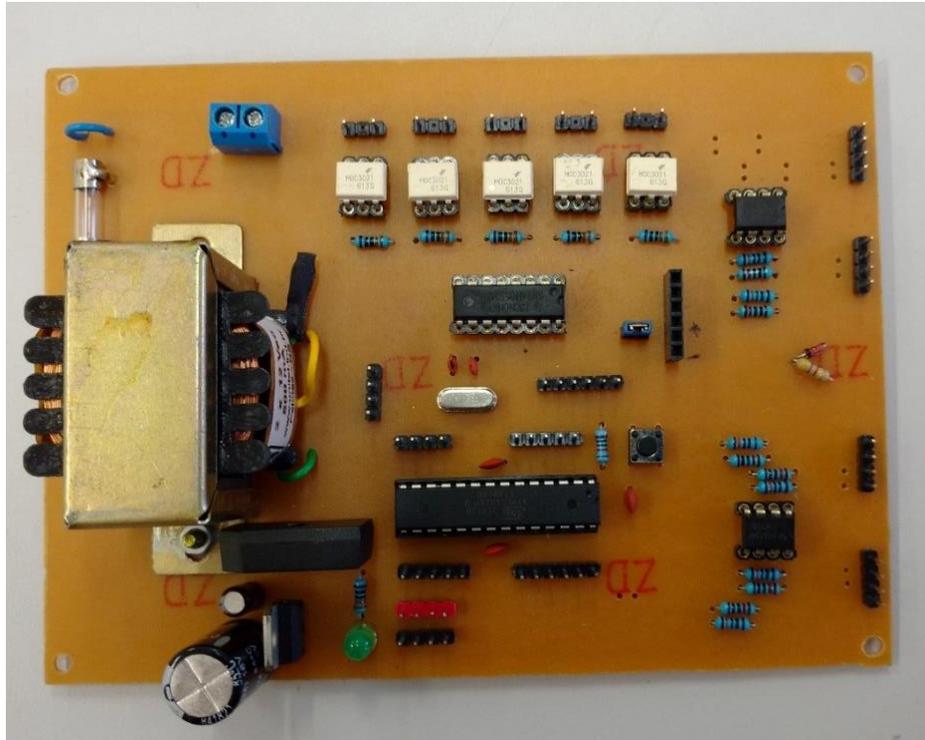


Fonte: Próprio Autor

Logo após finalizado o desenho da placa de circuito, esta foi confeccionada utilizando-se de métodos artesanais para menor tempo de prototipagem. Ainda assim, é válido notar que atualmente empresas no mercado Brasileiro e internacional que confeccionam placas de circuito por encomendas de pequenas quantidades a partir dos arquivos de CAD ou gerber.

Depois de fabricada a placa de circuito, os componentes necessários foram soldados a mesma. A Figura 37 representa a placa do dispositivo completamente construída.

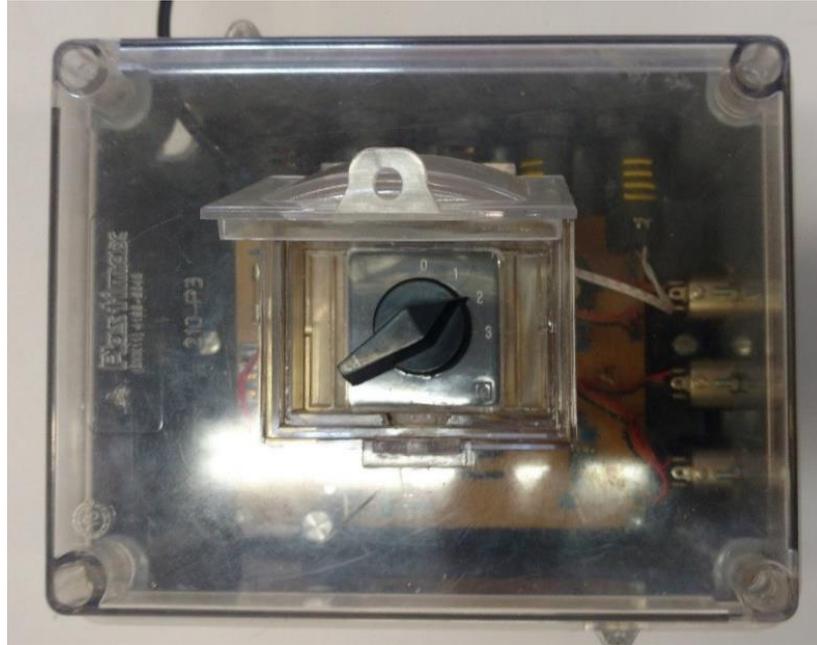
Figura 37– Placa com o circuito para monitoramento de corrente.



Fonte: Próprio Autor

Repara-se na Figura 37 que todos os pinos de uso geral estão expostos na placa através de *headers*, para permitir a adição de novos módulos no futuro, ou mesmo facilitar a conexão de ponteiros para medição durante os ensaios desse capítulo. A placa é montada em uma caixa plástica de tamanho adequado, que possui em sua face um seletor que permite escolher a potência do transformador. O dispositivo com o seletor de potência do transformador pode ser visto na Figura 38.

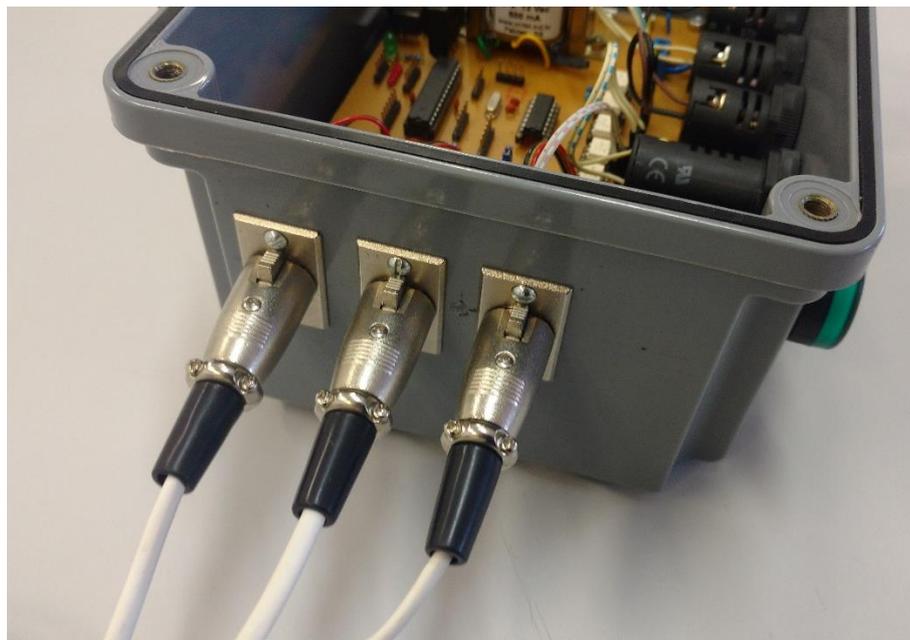
Figura 38 – Aparelho com seletor da potência do transformador em destaque



Fonte: Próprio Autor

Os sensores são conectados a placa através de conectores. Dessa forma é possível substituir os mesmos sem a necessidade de desmontar o aparelho. O encaixe dos sensores pode ser visto na Figura 39 abaixo.

Figura 39 – Encaixe dos sensores no aparelho.



Fonte: Próprio Autor

Estando finalizada a construção do dispositivo, o desempenho de cada bloco do circuito foi testado individualmente em laboratório. A seguir é comentado a configuração dos ensaios e após é comentado as medidas obtidas.

4.2 Configuração dos Ensaios

Em uma rede de distribuição de baixa tensão, a corrente no enrolamento secundário do transformador é altíssima, da ordem de centenas de amperes. Percebe-se que é difícil fazer experimentos com o circuito conectado diretamente a rede de distribuição de energia, por isso foi elaborada uma forma de se observar a resposta do circuito a altas correntes em laboratório.

A fim de se gerar correntes de centenas de amperes em laboratório, um transformador de corrente, modelo SDD-24 da Alstom, foi utilizado com seu lado de alta corrente em curto circuito. O transformador de corrente empregado nos experimentos está representado na Figura 40.

Figura 40 – Transformador de corrente utilizado nos experimentos.



Fonte: Próprio Autor

O transformador mencionado possui relação de transformação configurável de 400:5, 600:5, 800:5 e 1200:5, sendo utilizada a relação de 400:5. Desta forma, apenas 1A no

lado de baixa corrente é capaz de criar uma corrente de 80A no outro enrolamento. Para criar a baixa corrente necessária, um transformador variável do laboratório de eletrotécnica da Universidade Federal do Ceará foi utilizado. O transformador variável também pode ser denominado variac ou varivolt. A Figura 41 mostra o variac conectado ao transformador de corrente.

Figura 41 – Variac conectado ao transformador de corrente



Fonte: Próprio Autor

Foi verificado que uma tensão de 110V no secundário do variac é capaz de gerar até 300A no transformador de corrente. Variando-se a tensão do secundário do variac através do mecanismo de regulação da tensão de saída do mesmo é possível ditar a corrente no TC. O valor de 300A foi estabelecido como limite para os testes, sendo raramente alcançado, visto que esse é capaz de causar um aquecimento excessivo do condutor, dificultando as medições e manuseio do experimento.

Para tornar válidos os experimentos realizados, foi necessário o uso de um equipamento de medição que pudesse informar o valor real de corrente no circuito. Um alicate medidor de corrente foi utilizado, esse pode ser visto junto termômetro laser na Figura 42. O termômetro foi utilizado para monitorar o sobreaquecimento do condutor ou dos sensores acoplados a este.

Figura 42 – Medidor de corrente e termômetro utilizados nos ensaios.

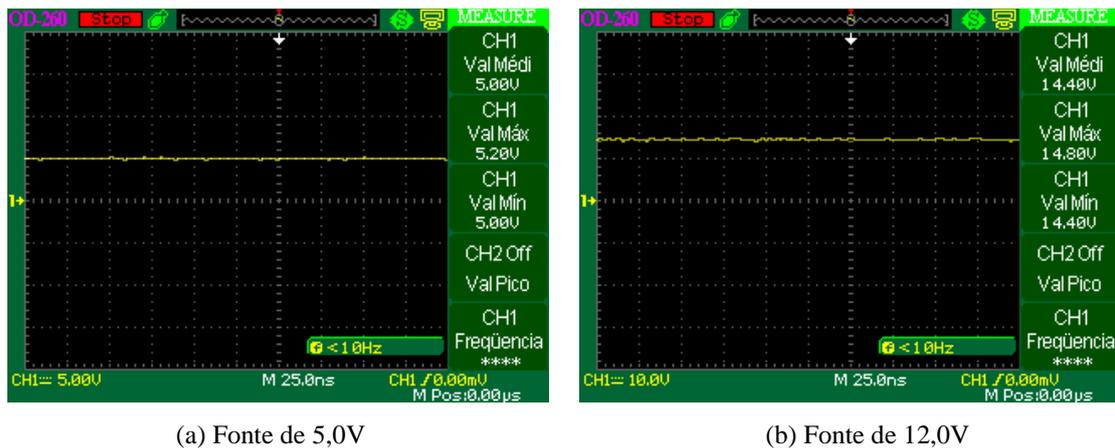


Fonte: Próprio Autor

4.3 Fonte CA-CC

As fontes de tensão de 5V e 12V tiveram seu desempenho avaliada em termos da tensão gerada e do *ripple* através do osciloscópio. Na Figura 43 pode ser visto a forma de onda das mesmas.

Figura 43 – Verificação das fontes de tensão do dispositivo



Fonte: Próprio Autor

Percebe-se que a fonte de 5V cumpre o esperado, fornecendo um valor contínuo de 5,0V sem *ripple*. Tanto os capacitores na linha de 5V, quanto o regulador de tensão suprimem a variação na tensão, oferecendo boa estabilidade. Na fonte de 12V observou-se um valor de 14,40V. Porém isto já era esperado, pois um transformador de 12V fornece esse valor em RMS. Assim, o valor de pico na saída do transformador é de $12 * \sqrt{2} = 16,97$. Dito isso, a tensão de 12V não é estritamente utilizada em nenhuma parte do circuito e o valor obtido não afeta negativamente o mesmo. Apenas é necessário que a tensão do transformador seja convertida para um valor contínuo que é então regulado para 5V.

4.4 Sensores

Dois tipos de sensores de efeito Hall foram testados, o SS49E e o AH3503. Foram adquiridos dois conjuntos de dez unidades de forma a se testar a uniformidade desses. Os conjuntos de sensores foram testados sobre a mesma temperatura e tensão de alimentação sem a presença de um campo no sensor. As medições estão listadas na Tabela 7.

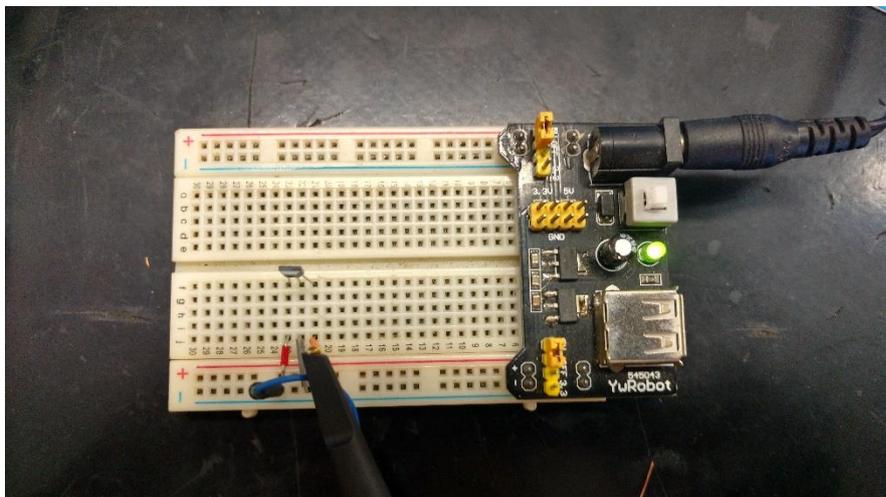
Tabela 7 – Tensão de saída dos sensores de efeito Hall sem campo magnético

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SS49E	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60
AH3503	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60

Fonte: Próprio Autor

Esse primeiro teste tem o propósito de garantir que os sensores exibem as mesmas características sob condições constantes. Sensores de baixa qualidade utilizados anteriormente, ainda que de um mesmo lote, apresentaram diferença nos valores mesmo quando não sujeitos a um campo, dificultando seu uso em uma aplicação como esta, onde mais de um sensor é utilizado. Na Figura 44 é apresentado a configuração dos testes dos sensores.

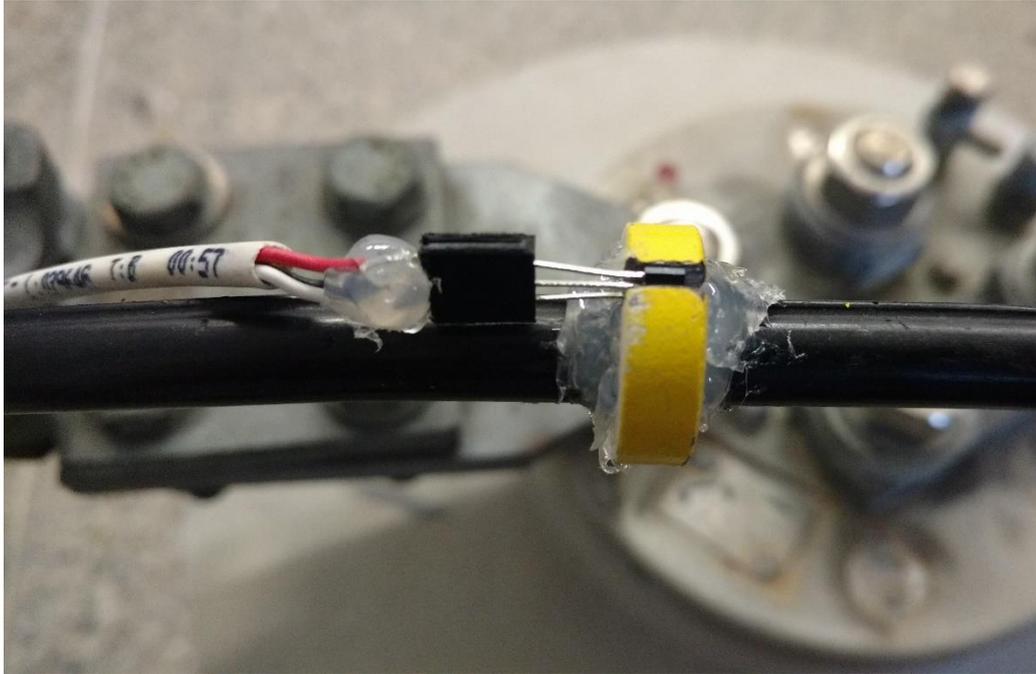
Figura 44 – Teste dos sensores adquiridos



Fonte: Próprio Autor

A seguir, foi verificado a resposta do sensor ao campo produzido por uma corrente alternada em um condutor. Para isso, o sensor foi experimentado em duas situações. Primeiramente foi utilizado um núcleo de material magnético para confinar o campo produzido pela corrente. O sensor é introduzido no *gap* do núcleo, como pode ser visto na Figura 45. Depois, o sensor foi aproximado do condutor sem um núcleo para confinar o campo magnético. Para tal fim, um suporte de plástico mantém o sensor numa posição adequada.

Figura 45 – Sensor de efeito Hall acoplado ao núcleo de material ferromagnético



Fonte: Próprio Autor

Quando o núcleo ferromagnético foi utilizado, percebeu-se uma resposta linear na saída no sensor. Porém, certamente devido ao material utilizado o sensor, houve saturação no sensor para um valor de baixo de corrente, em relação propósito do aparelho. As medidas da tensão diretamente na saída do sensor, com o núcleo magnético, podem ser vistas na Tabela 8.

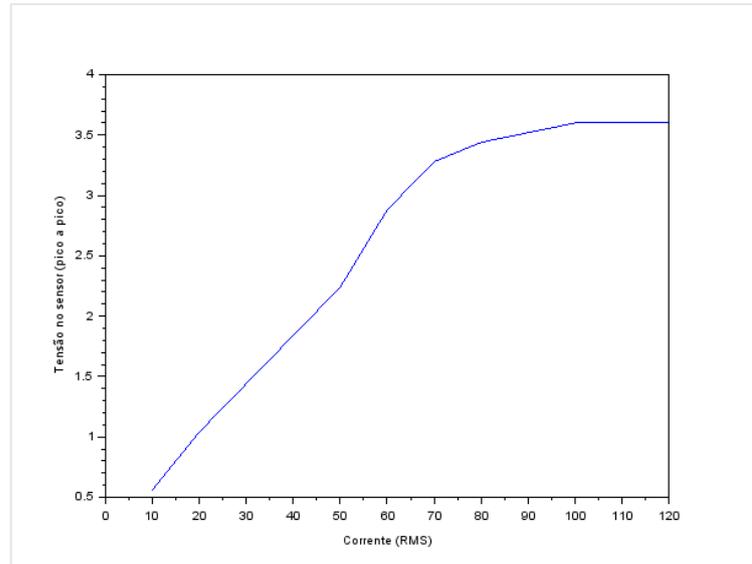
Tabela 8 – Ensaio no sensor de efeito Hall com núcleo magnético

Corrente (A)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Tensão no sensor (V)	0,56	1,04	1,44	1,84	2,24	2,88	3,28	3,44	3,52	3,6	3,6	3,6

Fonte: Próprio Autor

Os valores listados na Tabela 8 foram plotados na forma de um gráfico, para melhor visualização, na Figura 46.

Figura 46 – Tensão de pico a pico no sensor com anel magnético.

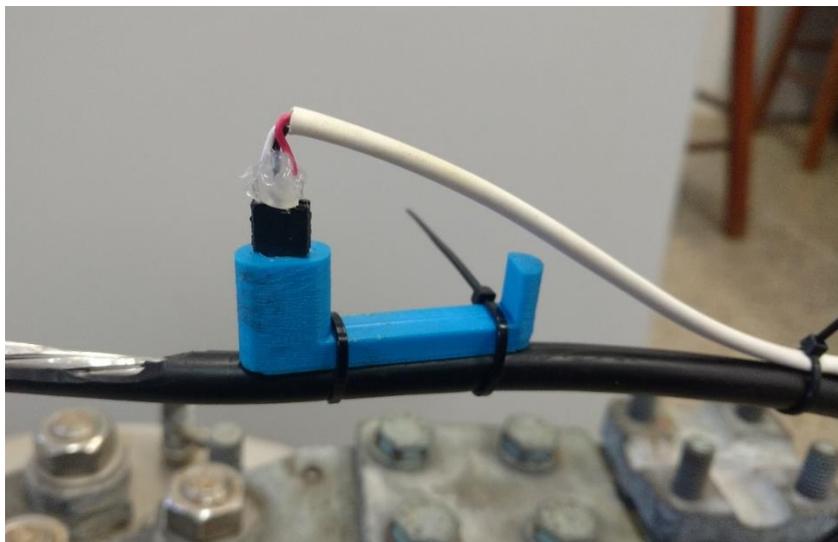


Fonte: Próprio Autor

Percebe-se que o sensor, quando acoplado de um núcleo magnético é capaz de transferir os valores de corrente corretamente de forma linear apenas até 60 amperes. Depois disso a saturação causa a distorção dos valores medidos. Isso mostra que o núcleo utilizado é incompatível com a aplicação, apesar disso o sensor se provou eficiente na faixa de 10 a 60A.

Visto que o sensor acoplado a um concentrador magnético não foi capaz de medir correntes maiores de 60A, este foi também avaliado sem o núcleo, a fim de evitar a saturação. Para isso, um suporte foi utilizado, que segura o sensor numa posição paralela ao condutor. O sensor e o suporte fixados ao condutor podem ser vistos na Figura 47 abaixo.

Figura 47 – Sensor de efeito Hall sem concentrador ferromagnético



Fonte: Próprio Autor

Da mesma forma, a corrente no condutor foi variada e os valores de tensão foram anotados. Os valores colhidos estão dispostos na Tabela 9 a seguir.

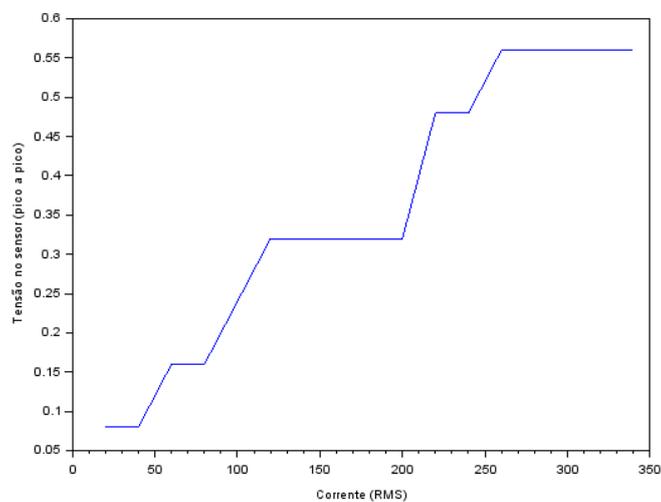
Tabela 9 - Tensão de pico a pico no sensor sem o anel magnético.

Corrente RMS (A)	Tensão pico-a-pico (V)	Corrente RMS (A)	Tensão pico-a-pico (V)
10	0,08	140	0,32
20	0,08	160	0,32
30	0,08	180	0,32
40	0,08	200	0,32
50	0,08	220	0,48
60	0,16	240	0,48
70	0,16	260	0,56
80	0,16	280	0,56
90	0,24	300	0,56
100	0,24	320	0,56
120	0,32	340	0,56

Fonte: Próprio Autor

Os valores coletados e listados na Tabela 8 foram plotados no gráfico da Figura 48 a seguir para mais fácil interpretação.

Figura 48 - Tensão de pico a pico no sensor sem o anel magnético.



Fonte: Próprio Autor

Percebe-se que o sensor sem o núcleo magnético teve uma péssima performance. Isso ocorre porque o campo magnético por si só não é capaz de excitar o sensor, precisando estar confinado em um material magnético que o amplifique. Sem o núcleo, qualquer movimentação causada no sensor irá afetar profundamente o valor medido. Além disso, como os valores de tensão são muito pequenos, suspeita-se que a resolução do osciloscópio não seja suficiente para medir corretamente os mesmos.

4.5 Amplificadores

Para verificar o desempenho dos amplificadores de diferença, a resposta dos mesmos foi medida para diferentes valores de tensão de entrada. Esses valores estão listados na Tabela 10.

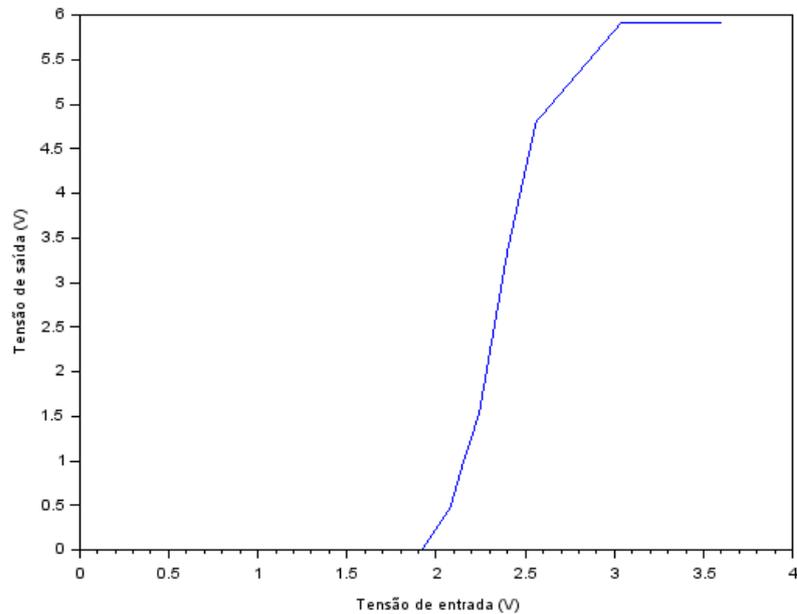
Tabela 10 – Medidas de tensão de entrada e saída em um dos amplificadores

Tensão de entrada (V)	Tensão de saída (V)
0,00	0,00
0,96	0,00
1,36	0,00
1,76	0,00
1,92	0,00
2,08	0,48
2,16	1,04
2,24	1,52
2,40	3,36
2,56	4,80
3,04	5,92
3,60	5,92

Fonte: Próprio Autor

A partir dos dados apresentados na Tabela 10, o gráfico disponível na Figura 49 foi plotado para mais fácil interpretação.

Figura 49 – Tensão de entrada e saída em um dos amplificadores



Fonte: Próprio Autor

Apesar de ser um pouco contraditório, foi verificado que o amplificador funciona como projetado. Nota-se que o amplificador de diferença amplifica apenas a diferença entre dois valores de entrada. Neste caso, a tensão de referência utilizada foi de 2.1V, assim o amplificador só passa a exibir uma tensão na saída próximo a esse valor, devido as suas características não ideais. Ademais, o ganho do amplificador foi escolhido como ganho de 5 vezes, de forma que uma diferença de 1V irá saturar o amplificador, causando uma tensão de 5V na saída, que é o limite do microcontrolador. Pode-se notar que a partir de 3V na entrada, a saída do amplificador é constante.

Para aperfeiçoar a performance dos amplificadores, algumas medidas devem ser tomadas. Primeiramente, o ganho do amplificador deve ser reduzido para aumentar a faixa em que esse trabalha e evitar a saturação prematura. Segundamente, a tensão de alimentação, que neste caso é 14,4V, deve ser reduzida para um valor próximo a tensão de alimentação do microcontrolador. Um regulador adicional pode ser utilizado. Finalmente, dependendo do material utilizado para concentrar o campo magnético, o sinal pode ser forte o suficiente para dispensar por completo uso de amplificadores.

4.7 Sinaleiras

As sinaleiras são utilizadas para indicar que uma sobrecarga foi detectada além do tempo aceitável. Estas foram empregadas para permitir que um técnico da concessionária possa verificar facilmente se uma sobrecarga foi detectada no transformador. Além desse mecanismo, a interface serial do dispositivo pode ser acessada através de algum dispositivo com comunicação bluetooth, seja um computador ou *smartphone*.

As sinaleiras utilizadas são alimentadas com 220V, por isso se faz necessário empregar um circuito para isolamento entre as mesmas e o microcontrolador que faz seu acionamento quando adequado. Opto-acopladores MOC3021 foram utilizados para esse propósito. O protótipo com algumas das sinaleiras acesas pode ser visto na Figura 50.

Figura 50 - Teste das sinaleiras do aparelho



Fonte: Próprio Autor

O circuito para acionamento das sinaleiras funcionou da maneira esperada. Foi possível acionar qualquer das sinaleiras através do software do dispositivo.

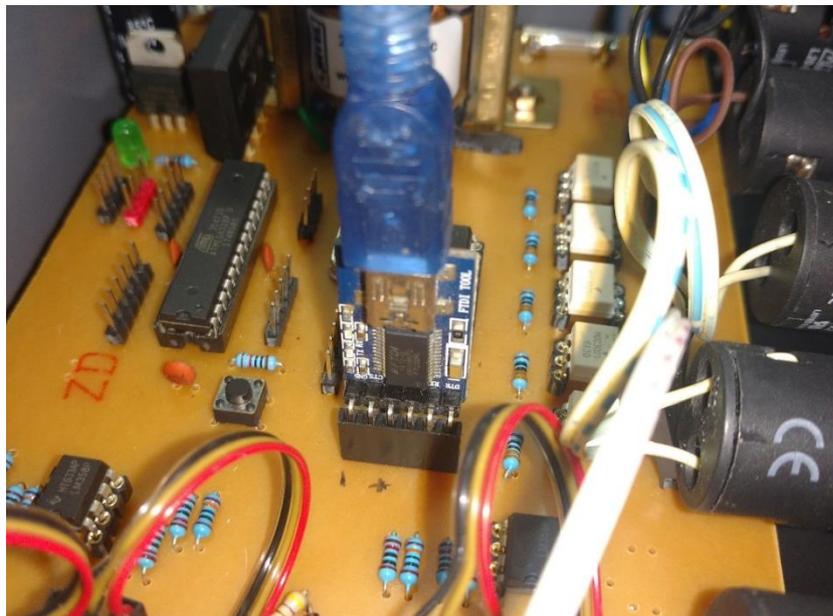
4.8 Comunicação Serial e Bluetooth

Visto que as sinaleiras funcionam apenas como um sinal de que o dispositivo encontrou alguma inconformidade no funcionamento do transformador, é necessária a

implementação de um mecanismo de comunicação que possa reportar em números o estado das medições atuais ou passadas.

A interface USART do microcontrolador utilizado fornece a possibilidade de comunicação serial. Tal interface foi extensamente utilizada para *debug* do código e teste do circuito de medição. Utilizando-se de tal interface, é possível informar em tempo real as medições realizadas. A interface serial do protótipo, conectada a um conversor USB para serial FT232 pode ser vista na Figura 51.

Figura 34 – Comunicação Serial



Fonte: Próprio Autor

No momento a interface serial é utilizada de forma unilateral, apenas para imprimir as medidas mais recentes, podendo ser acessada através de qualquer programa terminal serial. No entanto seria adequado no futuro criar-se uma ferramenta para comunicação full duplex, que permitisse configurar o dispositivo e acessar valores passados, por exemplo.

A interface serial funcionou sem maiores problemas, permitindo o acesso das medidas em tempo real. As informações acessadas através da interface serial podem ser vistas em duas medidas apresentadas na Figura 52. O terminal serial minicom foi utilizado em ambiente Linux para visualizar o texto impresso. Os três canais foram utilizados para a mesma medida.

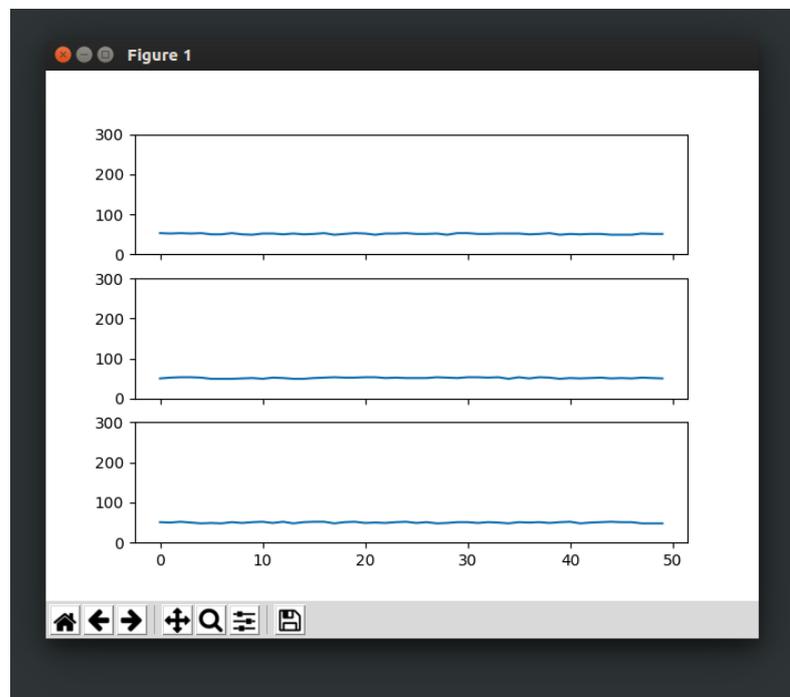
Figura 52 – Interface serial acessada através do computador

```
Em 1 segundo:  
corrente : A:22.786425 B:19.531221 C:19.531221  
criterio 20 : 272.73  
criterio 40 : 318.18  
sobrecarga : A:0 B:0 C:0  
cronometro 20 : A:0 B:0 C:0  
cronometro 40 : A:0 B:0 C:0  
Em 1 segundo:  
corrente : A:19.531221 B:19.531221 C:19.531221  
criterio 20 : 272.73  
criterio 40 : 318.18  
sobrecarga : A:0 B:0 C:0  
cronometro 20 : A:0 B:0 C:0  
cronometro 40 : A:0 B:0 C:0
```

Fonte: Próprio Autor

Visto que as medidas em texto são difíceis de acompanhar em tempo real, pois os valores atualizam rápido no terminal, uma interface de visualização gráfica dos valores eficazes de corrente foi escrita em linguagem Python. Essa recebe as medidas em texto e as apresenta convenientemente como uma forma de onda. A interface gráfica de visualização pode ser vista na Figura 53.

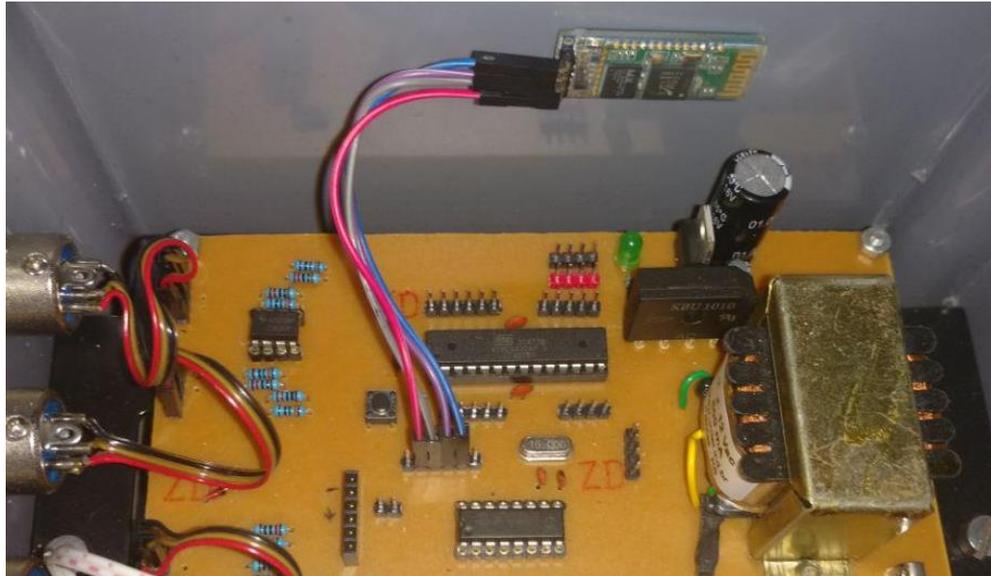
Figura 53 – Interface gráfica para visualização das medições



Fonte: Próprio Autor

A comunicação sem fio pode ser implementada através de um módulo conversor serial-bluetooth. Com a adição do mesmo ao dispositivo, as medidas podem ser resgatadas através de um computador ou smartphone com bluetooth. Um módulo bluetooth serial conectado a placa pode ser visto na Figura 54.

Figura 54 – Módulo bluetooth conectado a placa principal.



Fonte: Próprio Autor

O módulo bluetooth se apresenta ao computador como uma interface serial padrão, de forma que as mesmas ferramentas mencionadas anteriormente podem ser utilizadas. Para smartphones Android há vários aplicativos gratuitos disponíveis capazes de utilizar a conexão bluetooth como porta serial.

Ao todo o dispositivo funcionou de forma esperada, desconsiderando-se os problemas relacionados ao sensor de efeito Hall, que podem ser facilmente remediados. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões sobre o projeto.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

A partir dos resultados obtidos em laboratório e discutidos no capítulo anterior, é possível afirmar que o dispositivo cumpriu em parte o que era esperado do mesmo. Foi possível, sobre certas condições, mensurar valores de centenas de amperes com o aparelho, porém o mesmo deve ser revisado a fim de aperfeiçoar seu desempenho.

O dispositivo construído foi apenas um protótipo, revelando através dos ensaios vários problemas que devem ser remediados para o funcionamento correto do mesmo. Esses problemas estão ligados principalmente ao sensor de efeito Hall, mas podem ser remediados conforme explicado a seguir.

Um sensor de efeito Hall foi empregado na medição de corrente em cada fase. Quando submetido a um campo magnético concentrado por um anel composto de material magnético, o sensor mostra alta confiabilidade, porém estando extremamente limitado a valores de corrente menores que 60A para o anel utilizado. Neste caso, observa-se que ocorreu saturação do material magnético. A fim de resolver esse problema, um material magnético de menor permeabilidade magnética deve ser utilizado.

Ademais, sem o Anel de material magnético ao redor do condutor, o sensor apresentou elevada instabilidade. Sem o caminho magnético, o campo na face do sensor é altamente dependente da distância entre o sensor e o condutor, de acordo com a equação (3). Conseqüentemente, pequenos movimentos no sensor, influenciam negativamente os valores medidos. Além disso, sem o uso de um caminho magnético para amplificar o campo magnético no sensor, este apresenta sinais de tensão da ordem de alguns mV de pico a pico, sendo altamente suscetíveis ao ruído eletromagnético, que também influencia os valores de corrente medidos.

Infelizmente a reação do sensor a temperatura não foi analisada, o que se deve principalmente a dificuldade de se criar um ambiente com temperatura controlada para o experimento. No entanto foi percebido que o condutor pode alcançar temperaturas acima de 150° C, isso medido com o isolamento. Essa ordem de temperatura pode não apenas afetar as propriedades elétricas e magnéticas do sensor, mas também os materiais utilizados para fixar este ao condutor.

Quanto a construção do dispositivo, foram notadas mais dificuldades relacionadas ao projeto do hardware, que a construção do mesmo em si, apesar de este ter sido um protótipo fabricado por meios artesanais. Assim, alguns aspectos devem ser mudados em relação ao projeto, para se alcançar um melhor desempenho do monitor. Alguns destes detalhes são discutidos a seguir.

Primeiramente, os amplificadores precisam de uma tensão levemente mais alta que os 5V utilizados pelo microcontrolador. Isso ocorre porque amplificadores operacionais comumente distorcem sinais muito próximos do valor da fonte de tensão que os alimenta. No projeto, os amplificadores são alimentados com 14V, provenientes do transformador, apenas filtrados. Desta forma, os sinais condicionados pelos amplificadores podem facilmente sair da faixa de tensão compreendida pelo microcontrolador, causando danos no segundo. Assim, um regulador de 6V ou 7V deve também ser adicionado ao circuito, a fim de evitar sinais de saída dos amplificadores maiores que esses valores.

Segundamente, também em relação aos amplificadores da placa, foi notado que o ganho escolhido para os mesmos foi muito alto. Quando o sensor é acoplado ao anel de material magnético, ocorre a saturação não apenas no sensor, mas também nos amplificadores. Infelizmente esse é um processo de certa forma empírico, pois esse valor se mostrou suficiente quando foi utilizado o sensor de efeito Hall por si só, sem o anel magnético. Quando outros materiais magnéticos de menores valores de permeabilidade forem utilizados para concentrar o campo no sensor, será possível adequar o ganho dos amplificadores de acordo.

Inicialmente era esperado poder transmitir os dados coletados através da rede celular, no entanto não foi possível implementar essa funcionalidade a tempo. Ainda assim, além das sinaleiras que reportam que o monitor detectou uma sobrecarga por determinado tempo, é possível utilizar a interface serial do microcontrolador para acessar leituras em tempo real, seja através de um cabo adaptador USB-Serial ou de um módulo bluetooth.

Em suma, embora o projeto tenha apresentado algumas adversidades, várias dessas podem ser resolvidas através de pequenas mudanças. Para a primeira iteração do projeto, os resultados foram bastante positivos. Foi possível mensurar valores da ordem de centenas de amperes, que são considerados altíssimos e fora da faixa de sensores padrão, com materiais de baixo custo. Além disso, o dispositivo proposto é capaz de analisar os valores no tempo, permitindo análises mais complexas dos valores.

5.2 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros pode se apontar primeiramente a realização de novos estudos e ensaios com núcleos magnéticos de outros materiais e dimensões, afim de aumentar o intervalo linear do sensor. Nos ensaios foi observado bom desempenho do sensor acoplado ao núcleo magnético, mas a saturação do núcleo impediu a leitura de correntes mais altas.

Segundamente, deve ser estudada a influência da temperatura nas medições do sensor. Se necessário um sensor de temperatura pode ser adicionado ao projeto para permitir correções matemáticas dos valores medidos.

Finalmente, também é necessária implementação de protocolo de transmissão das medidas através da rede celular, ou através de outra tecnologia de comunicação de longo alcance, que não foi abordada neste trabalho. Isso permitiria obter verificar as condições de trabalho dos transformadores a qualquer momento e sem a necessidade da visita de um técnico especializado.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR5416 Aplicação de cargas em transformadores de potência - Procedimento**. [S.l.: s.n.], 1997.
- ABRADEE. **Redes de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 30 out. 2018.
- ADAFRUIT. **Transformer-based AC/DC converters**. 2017. Disponível em: <<https://learn.adafruit.com/power-supplies/transformer-based-ac-dc-converters>>. Acesso em: 13 out. 2018.
- ALLEGRO. Datasheet: **Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensor ICs A1301 and A1302**. Publicação Eletrônica, 2016.
- ALLEGRO. Notas de Aplicação: **Linear Hall-Effect Sensor ICs**. Publicação Eletrônica, 2013. p. 4
- COELCE. **Critério de Projeto CP-001/2014 R-03, Redes de distribuição Aérea de Média e Baixa Tensão**. 2014.
- COELCE. **Norma Técnica NT-001/2012 R-05, Fornecimento De Energia Elétrica Em Tensão Secundária De Distribuição**. 2012.
- CSANYI, Edvard. **The Structure of Electric Power Systems: Generation, Distribution and Transmission Of Energy**. 2017. Disponível em: <<https://electrical-engineering-portal.com/electric-power-systems>>. Acesso em: 21 out. 2018.
- DEL TORO, Vincent. **Fundamentos De Maquinas Eletricas**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1999. p. 2-11
- ELETRORBRAS. **Manual De Procedimentos De Redes De Distribuição, Projetos De Redes De Distribuição Aéreas Urbanas**. 2012.
- FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. **6-Pin DIP Random-Phase Optoisolators Triac Driver Output**. Publicação Eletrônica, 2000.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: Com introdução a eletrônica de potência**. 6. ed. Brasil: Bookman, 2006. p. 20-37
- HONEYWELL. **Hall Effect Sensing And Application**. Publicação Eletrônica, 1998.
- HONEYWELL. Datasheet: **SS39ET/SS49E/SS59ET Series: Linear Hall-effect Sensor ICs**. Publicação Eletrônica, 2015.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA (IBGE), **Censo Demográfico 2010**.

JFMINAS. **Usina de Marmelos Zero**. Disponível em:
<<http://www.jfminas.com.br/portal/pontos-turisticos/usina-de-marmelos-zero>>. Acesso em:
21 out. 2018.

MICROCHIP. **Application Note AN954: Transformerless Power Supplies: Resistive and Capacitive**. Publicação Eletrônica, 2004.

MICROCHIP. **ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P megaAVR® Data Sheet**. Publicação Eletrônica, 2018.

OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W.; BUCK, John R. **Discrete-Time Signal Processing**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998. p. 146

RASHID, Muhammad H. **Power Electronics Handbook**. 1. ed. Pensacola, Florida: Academic Press, 2001. p. 153

SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth. C. **Microeletrônica**. 5. ed. Pearson, 2007

SEP ELECTRONIC CORP. **Datasheet KBU10005 thru KBU1010**. Publicação Eletrônica, 2003.

TEXAS INSTRUMENTS. **μA7800 SERIES POSITIVE-VOLTAGE REGULATORS**. Publicação Eletrônica, 2003.

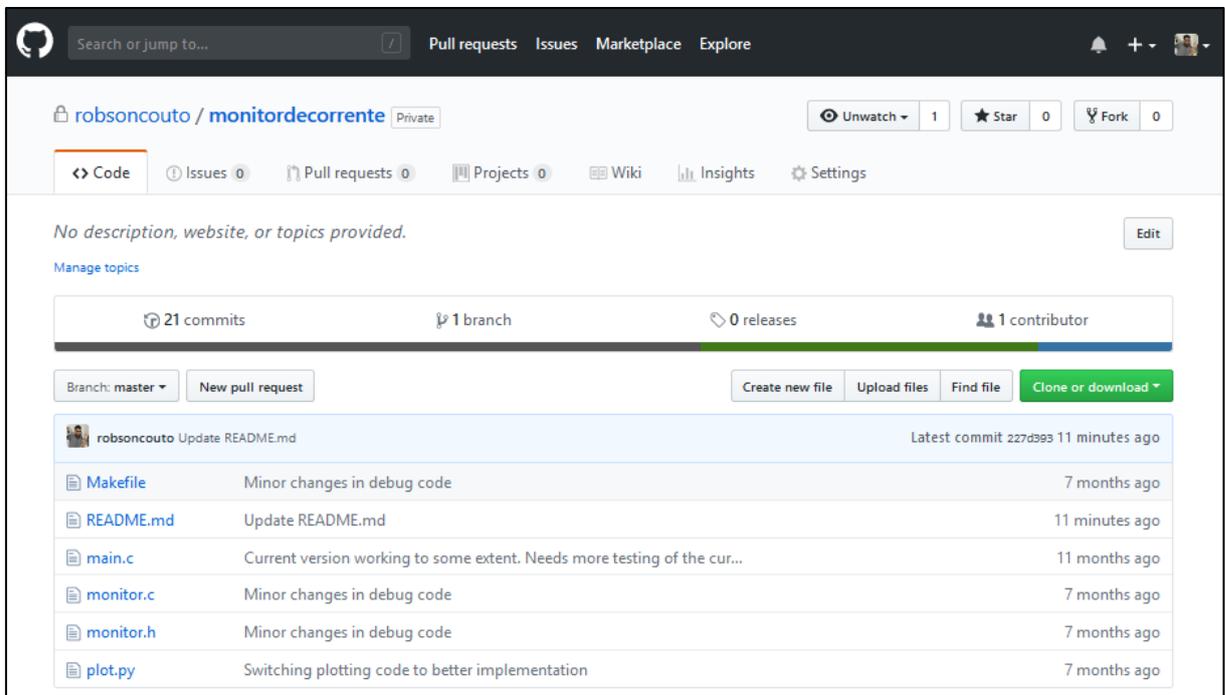
ANEXO A

O código completo não foi adicionado aqui por ser muito longo e dividido em alguns arquivos, por isso foi decidido compartilhar na ferramenta de hospedagem de código online GitHub. Hospedar o código online também permite possíveis correções e atualizações após a catalogação desse trabalho.

O código completo pode ser visualizado e baixado em:

<<https://github.com/robsoncouth/monitordecorrente>>

Para baixar o código em formato zip basta utilizar o botão verde “Clone or download” representado a direita na figura abaixo. Além disso, para visualizar qualquer arquivo através do navegador, basta clicar no próprio arquivo.



Fonte: Próprio Autor