



Pós-Graduação em Ciência da Computação

Andrea Maria Nogueira Cavalcanti Ribeiro

**DESENVOLVIMENTO DE *PLUG* COM INTERFACE PARA MEDIÇÃO DE
INTENSIDADE DE CORRENTE E PROTEÇÃO CONTRA SOBRECARGA**

Dissertação



Universidade Federal de Pernambuco

posgraduacao@cin.ufpe.br

www.cin.ufpe.br/~posgraduacao

RECIFE

2016

ANDREA MARIA NOGUEIRA CAVALCANTI RIBEIRO

**DESENVOLVIMENTO DE *PLUG* COM INTERFACE PARA MEDIÇÃO DE
INTENSIDADE DE CORRENTE E PROTEÇÃO CONTRA SOBRECARGA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração/Linha de Pesquisa:
Redes e Sistemas Distribuídos/ Multidisciplinar

Orientador: Prof. Djamel Fawzi.Hadj Sadok, PhD

Coorientador: Prof. Marcio Evaristo da Cruz
Brito, Doutor

RECIFE

2016

Catálogo na fonte
Bibliotecária Monick Raquel Silvestre da S. Portes, CRB4-1217

R484d Ribeiro, Andrea Maria Nogueira Cavalcanti
 Desenvolvimento de plug com interface para medição de intensidade de corrente e proteção contra sobrecarga / Andrea Maria Nogueira Cavalcanti Ribeiro. – 2016.
 105 f.: il., fig.

 Orientador: Djamel Fawzi Hadj Sadok.
 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CIn, Ciência da Computação, Recife, 2016.
 Inclui referências e apêndices.

 1. Redes de computadores. 2. Internet das coisas. I. Sadok, Djamel Fawzi Hadj (orientador). II. Título.

 004.6 CDD (23. ed.) UFPE- MEI 2017-39

Andrea Maria Nogueira Cavalcanti

**DESENVOLVIMENTO DE PLUG COM INTERFACE PARA MEDIÇÃO DE
INTENSIDADE DE CORRENTE E PROTEÇÃO CONTRA SOBRECARGA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ciência da Computação da
Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para a obtenção do título de Mestre
em Ciência da Computação

Aprovado em: 02/03/2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Abel Guilhermino da Silva Filho
Centro de Informática / UFPE

Prof. Dr. Francisco Madeiro Bernardino Junior
Escola Politécnica de Pernambuco / UPE

Prof. Dr. Djamel Fawzi Hadj Sadok
Centro de Informática / UFPE
(Orientador)

Dedico este trabalho a todos os profissionais do Grupo de Pesquisa de Redes e Telecomunicação (GPRT) e do Grupo de Realidade Virtual e Aumentada (GRVM) que desempenham suas atividades em prol do desenvolvimento de conhecimentos em tecnologia.

“Se temos de esperar, que seja para colher a semente boa que lançamos hoje no solo da vida. Se for para semear, então que seja para produzir milhões de sorrisos, de solidariedade e amizade.”

(Cora Coralina)

RESUMO

O acompanhamento da intensidade de corrente em um circuito elétrico residencial tem uma importância fundamental para antever defeitos e, consequentemente, falhas de equipamentos. Usualmente, a medição de corrente é realizada de forma intermitente, com uso de amperímetro portátil, por um profissional especializado para, *in loco*, realizar tal medição, representando um custo que não justifica o benefício do monitoramento. O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um equipamento híbrido, que possa realizar a medição da intensidade de corrente e proteja individualmente cada carga remotamente, explorando assim a área de gerenciamento/monitoramento de corrente no âmbito da internet das coisas. Para elaborar um protótipo do medidor de corrente foi realizada uma análise comparativa de três tecnologias de transdutores (transformador de corrente, resistor shunt e efeito *hall*), com a finalidade de definir o melhor tipo para o medidor de corrente. Após o desenvolvimento do protótipo, foi implementada uma interface gráfica para visualização da corrente e ocorrência de sobrecargas, através de comunicação por rádio frequência subsidiada por padrões bem estabelecidos na área de internet das coisas. O sistema híbrido proposto (medição e proteção) contribuirá para atenuar/eliminar conflitos entre concessionárias e clientes, relativos às falhas no fornecimento de energia elétrica, como também para reduzir acidentes com danos materiais e pessoais no ambiente residencial.

Palavras-chave: Medição de corrente. Proteção contra sobrecarga. Plug. Transdutor. Interface. Internet das coisas.

ABSTRACT

The monitoring of the current intensity in a household's electric system is of fundamental importance to the anticipation of failures in electrical devices. Usually, current measurement is performed intermittently and in loco by a specialized professional using a portable ammeter, having a cost that is not matched by the benefit of monitoring. The main objective of this work, is to develop a hybrid device in the form of a smart plug with a user interface for data visualization, which can perform both current measurement and individual load protection remotely, exploring the fields of electrical power management and Internet of Things. During the prototyping phase of the device, a comparative analysis of three different technologies of current measuring transducers (current transformer, shunt resistor and hall effect) was performed, in order to choose the one which suits the most. After the development of the prototype, a graphic user interface was implemented, featuring remote measurement data acquisition via radio frequency, a technology well-established in Internet of Things projects. The proposed hybrid system will contribute to mitigate and, possibly, eliminate conflicts between electric companies and its clients due to failures on the electrical power supply, and will also help reduce home accidents.

Keywords: Current measurement. Overload protection. Plug. Transducer. Interface. Internet of things.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aumento de interesse na pesquisa de IoT com o passar dos anos.....	17
Figura 2 - Representação do sinal de corrente contínua.....	23
Figura 3 - Representação do sinal corrente contínua pulsante.....	24
Figura 4 - Representação do sinal de uma onda senoidal corrente alternada.....	25
Figura 5 - Análise da exatidão nos valores medidos pelos transdutores.....	32
Figura 6 - Efeito <i>hall</i> no condutor.....	33
Figura 7 – Transdutor de efeito <i>hall</i> na presença de um campo magnético.....	34
Figura 8 - Representação de um transformador ideal.....	35
Figura 9 - Circuito equivalente de um transformador de corrente de instrumentação.....	37
Figura 10 - Circuito com resistor shunt como sensor de corrente.....	39
Figura 11 - Curva típica de suportabilidade térmica.....	41
Figura 12 - Curva de suportabilidade térmica de uma TV de 29”.....	42
Figura 13 - Curva de suportabilidade térmica de um microcomputador.....	42
Figura 14 - Curva de suportabilidade térmica de um aparelho de som.....	43
Figura 15 - Esquema de montagem do ensaio de corrente aplicada.....	53
Figura 16 – Os três circuitos utilizados para o ensaio de corrente aplicada. (a) Uso do resistor <i>shunt</i> ; (b) Uso do TC; (c) Uso do Sensor de efeito <i>hall</i>	53
Figura 17 - Caixa de aferição de relés de proteção Omicron, modelo CMC 256-6.....	54
Figura 18 - Tela do osciloscópio com o valor da tensão RMS da saída do circuito com TC, corrente aplicada de 7 A.....	55
Figura 19 - Análise da exatidão nos valores medidos pelos transdutores.....	56
Figura 20 - Corrente medida x corrente verdadeira do sensor efeito <i>hall</i>	59
Figura 21 - Corrente medida x corrente verdadeira do TC.....	59
Figura 22 - Corrente medida x corrente verdadeira <i>shunt</i>	60
Figura 23 - Corrente verdadeira x erro de medição de transdutores numa faixa de corrente de 0,05A até 0,5A.....	63
Figura 24 - Análise do erro de medição dos transdutores no intervalo de medição de 1 A até 7 A.....	64
Figura 25 - Procedimento ROC para definição de peso por critério.....	65
Figura 26 - <i>Plugs</i> conectados em diferentes cargas.....	67
Figura 27 - Arquitetura do <i>plug</i> com interface e <i>software</i> envolvidos.....	68
Figura 28 - Máquina de estado do <i>firmware</i> do nó coordenador.....	70
Figura 29 - Máquina de estado do <i>firmware</i> do <i>plug</i>	71
Figura 30 – Módulos funcionais do medidor de corrente.....	72
Figura 31 - Tipo estrela.....	74
Figura 32 - Interface do programa do medidor de corrente, inserção do login e senha.....	77
Figura 33 - Interface do programa do medidor de corrente, escolha dos equipamentos.....	78
Figura 34 - Interface do programa do medidor de corrente com os equipamentos elétricos cadastrados..	79
Figura 35 - Interface do programa medição de corrente com a solicitação de medição de corrente.....	80

Figura 36 - Esquema de montagem do ensaio de validação da medição de corrente	82
Figura 37 - Esquema de montagem do ensaio de validação da atuação da proteção	85
Figura 38 - Vistas da caixa do <i>plug</i>	104
Figura 39 - <i>Render</i> da caixa do <i>plug</i>.....	105

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estrutura da dissertação	20
Quadro 2 - Modelos de equipamentos de medição de corrente	27
Quadro 3 - Especificação técnica de equipamento de medição de corrente	28
Quadro 4 - Modelos de equipamentos de proteção.....	29
Quadro 5 - Especificação técnica de disjuntores termomagnéticos	30
Quadro 6 - Classificação dos transdutores.....	31
Quadro 7 – Comparação das características entre os trabalhos relacionados.....	50
Quadro 8 - Condições do ensaio de corrente aplicada	52
Quadro 9 - Fontes de erro e incertezas em circuitos eletrônicos	57
Quadro 10 - Análise qualitativa da linearidade dos transdutores.....	60
Quadro 11 – Análise quantitativa da linearidade dos transdutores, através do cálculo de A% e B%	61
Quadro 12 - Matriz de decisão da escolha do transdutor	66
Quadro 13 – Descrição dos <i>endpoints</i> expostos pela API	69
Quadro 14 - Especificação de potência e corrente nominal das três cargas medidas.....	81
Quadro 15 - Medida da intensidade de corrente elétrica do amperímetro e do protótipo de três cargas residenciais	83

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Abracopel	Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade
AC	Alternating Current (Corrente Alternada)
ADC	Analog-to-Digital Converter (Conversor Analógico-Digital)
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
API	Application Programming Interface (Interface de Programação de Aplicação)
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
Celpe	Companhia de Eletricidade de Pernambuco
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (Semicondutor de Metal-Óxido Complementar)
DC	Direct Current (Corrente Contínua)
ddp	Diferença de potencial
DR	Diferencial Residual
FMM	Força magnetomotriz
GMR	Giant Magnetoresistive
GPRT	Grupo de Pesquisa de Redes e Telecomunicação
HTTP	Hypertext Transfer Protocol (Protocolo de Transferência de Hipertexto)
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado)
I/O	In/Out (Entrada/Saída)
ID	Identificador
IEC	International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica)
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)

IP	Internet Protocol (Protocolo de internet)
JSON	JavaScript Object Notation (Notação de Objetos JavaScript)
MI	Magnetoimpedance (Magnetoimpedância)
PCB	Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impresso)
REST	Representational State Transfer (Transferência de Estado Representacional)
RMS	Root mean square (Valor eficaz)
RF	Rádio frequência
ROC	Rank-Order Centroid
TC	Transformador de Corrente
TCP	Transmission Control Protocol (Protocolo de controle de transmissão)
TCR	Temperature Coefficient of Resistance (Coeficiente de Temperatura da Resistência)
TI	Texas Instruments
THD	Total Harmonic Distortion (Distorção Harmônica Total)
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USB	Universal Serial Bus (Barramento serial universal)

UNIDADES

A	Ampère
Hz	Hertz
V	Volt
W	Watt
Wh	Watt-hora
°C	Grau Celsius
S/s	Amostra por segundo

SÍMBOLOS

Ω	Letra grega ômega maiúscula. Unidade de medida de resistência (Ohm).
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	MOTIVAÇÃO.....	17
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	18
1.3	METODOLOGIA.....	19
1.4	ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1	CORRENTE ELÉTRICA	21
2.2	EFEITOS DA CORRENTE ELÉTRICA	25
2.3	EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE E PROTEÇÃO.....	26
2.4	TRANSDUTORES PARA MEDIÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA.....	30
2.5	SUPORTABILIDADE TÉRMICA.....	40
2.6	INTERNET DAS COISAS	43
3	TRABALHOS RELACIONADOS	45
3.1	MEDIDORES DE CORRENTE	45
3.2	<i>SMART PLUG</i>	48
3.3	PROTEÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE BAIXA TENSÃO.....	48
4	ANÁLISE COMPARATIVA DE TRANSDUTORES.....	51
4.1	TECNOLOGIA.....	51
4.2	ENSAIO DE CORRENTE APLICADA	52
4.3	APLICAÇÃO DE MÉTODO MULTICRITÉRIO PARA A ESCOLHA DO TRANSDUTOR.....	64
4.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	66
5	DESENVOLVIMENTO DE <i>PLUG</i> COM INTERFACE	67
5.1	VISÃO GERAL DO SISTEMA	67
5.2	ARQUITETURA.....	68
5.3	SISTEMA DE MEDIÇÃO	71
5.4	SISTEMA DE PROTEÇÃO	74
5.5	ESPECIFICAÇÃO DO <i>PLUG</i>	75
5.6	INTERFACE	76
5.7	VALIDAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE.....	81
5.8	VALIDAÇÃO DA ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO.....	84
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86
6.1	LIMITAÇÕES E DIFICULDADES ENCONTRADAS	86
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86

REFERÊNCIAS	87
APÊNDICE A – MODELOS DE TRANSDUTORES COMERCIAIS	94
APÊNDICE B – CAIXA DO <i>PLUG</i>	104

1 INTRODUÇÃO

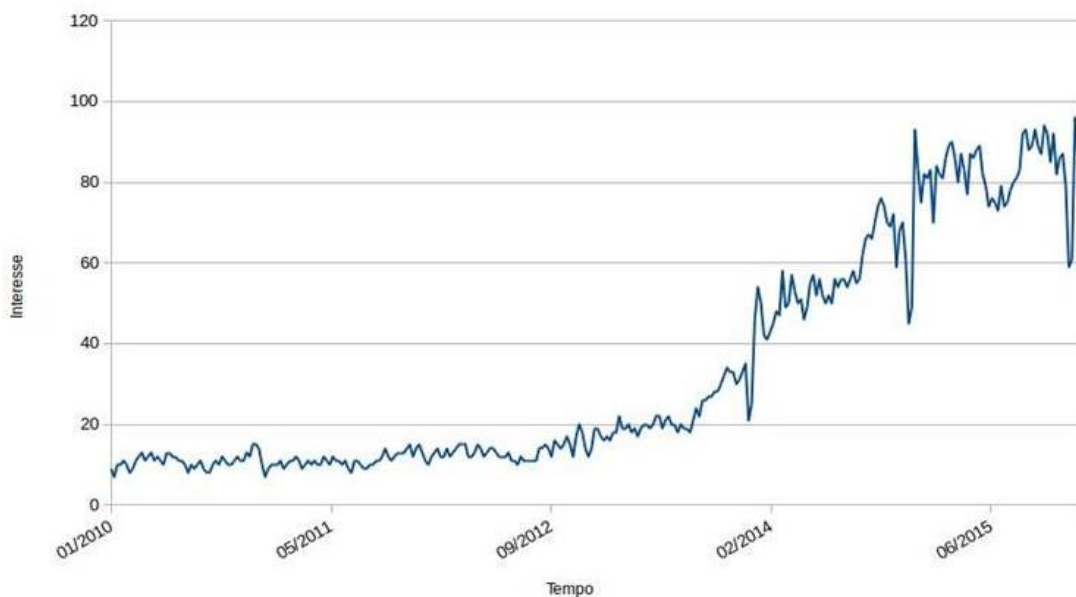
Com quase um século e meio de existência no Brasil, a eletricidade tem sido um pilar do desenvolvimento econômico e social, porém, a falta de controle tem trazido danos pessoais e materiais. Apesar da extensão do sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica do Brasil ter uma configuração de “condutores nus”, em sua grande maioria, acidentes de perdas graves também acontecem dentro do ambiente residencial.

Segundo a Abracopel (2014), ocorreram 627 acidentes fatais por choque elétrico, dentre os quais 180 no ambiente residencial em 2014. Outro dado importante é com relação ao uso inadequado de tomadas, conexões e sobrecargas de equipamentos, dentre outras causas, que são responsáveis também por curtos-circuitos nas instalações e, em sua maioria, evoluindo para incêndios residenciais. Dos 311 casos de curtos-circuitos em 2014, 295 evoluíram para incêndios em residências.

Para Jucá (2003), uma forma adequada de diminuir os conflitos entre consumidores e as empresas distribuidoras de energia elétrica é reduzir a probabilidade de que os danos provenientes da qualidade da energia fornecida possam ocorrer. O autor propõe o equilíbrio de responsabilidades entre as partes, na instalação de dispositivos protetores, para diminuir os surtos transitórios sobre os aparelhos.

Acidentes, problemas provenientes da rede elétrica, podem ser mitigados através do monitoramento facilitado pelo uso da internet das coisas. O tema está sendo cada vez mais procurado e aplicado na área do desenvolvimento tecnológico. No gráfico representado na figura 1, é possível observar o crescimento das pesquisas realizadas no *google* a respeito do tema Internet das Coisas, num período de janeiro de 2010 até janeiro de 2016 em todo o mundo.

Figura 1 – Aumento de interesse na pesquisa de IoT com o passar dos anos



Fonte: <https://www.google.com/trends/?hl=pt-BR>

O desenvolvimento de *plug* com interface de medição de intensidade de corrente e proteção contra sobrecarga tem como objetivo implementar o acompanhamento do fluxo de corrente em um circuito elétrico de forma individualizada com proteção contra surtos de corrente, atenuando riscos de acidentes e danos materiais.

O acompanhamento da intensidade de corrente em um circuito elétrico residencial tem uma importância fundamental para antever defeitos e, consequentemente, falhas de equipamentos. Usualmente, a medição de corrente é realizada de forma intermitente, com uso de amperímetro portátil e profissional especializado para, *in loco*, realizar tal medição, representando um custo que não justifica o benefício do monitoramento.

1.1 Motivação

A partir da fundamentação teórica adquirida no Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) outros aprendizados subsidiaram a formação do tema da pesquisa: a experiência vivenciada na Celpe nas áreas de eficiência energética, automação e telecomunicação, bem como os trabalhos de pesquisas desenvolvidos no Grupo de Pesquisa de Redes e Telecomunicação (GPRT).

Diante das estatísticas de acidentes e incêndios residenciais, surgiu o desejo em contribuir para a redução dos riscos pessoais e materiais que conduziram a idealização deste

trabalho de pesquisa na direção de disponibilizar um modelo de sistema híbrido (medição e proteção).

A qualidade do fornecimento de energia elétrica pelas concessionárias no Brasil tem provocado conflitos entre empresas e clientes, devido aos danos causados por queima de equipamentos. Diante disto, um sistema capaz de proteger os equipamentos contra surtos e registrar as intensidades de corrente contribuiria para a mitigação dos conflitos.

As dificuldades apresentadas atualmente para o monitoramento da intensidade de corrente individualizada incentivaram o desenvolvimento de um sistema de monitoramento que apresentasse as seguintes características: baixo custo, medição de corrente sem seccionamento do circuito, envio de dados remotamente, dentro do contexto de internet das coisas, evitando a presença de profissional especializado *in loco* e a possibilidade de armazenamento contínuo das informações.

A Internet das Coisas é uma tendência atual na área do desenvolvimento tecnológico e seu crescimento tem sido exponencial ao longo dos anos. Diante deste contexto e devida à carência de equipamentos com fácil interação e integração à Internet das Coisas, foi relevante desenvolver um equipamento que pudesse ser facilmente integrável à Internet das Coisas.

1.2 Objetivos do trabalho

Objetivo geral

Desenvolver um equipamento híbrido que possa realizar a medição da intensidade de corrente e proteja individualmente cada carga, subsidiado pelo conceito de *smart plug* com interface para visualização da corrente e ocorrência de sobrecargas.

Objetivos específicos

- Propor um modelo de *plug* de medição de intensidade de corrente e proteção contra sobrecarga baseado no *plug* de medição de energia;
- Escolher o transdutor mais adequado às características do *plug*;
- Definir as características da unidade de tratamento do sinal;
- Escolher a tecnologia *wireless*;
- Elaborar a interface gráfica;
- Elaborar protótipo de *plug* com interface;
- Validar o sistema de medição e proteção proposto;
- Analisar os resultados da validação;
- Propor recomendações, a partir da análise da funcionalidade do *plug* com interface.

1.3 Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida a partir da literatura, coletando informações sobre *smart plug*, medição de corrente, proteção contra sobrecarga e módulos de comunicação, bem como das informações de projetos realizados no GPRT sobre o tema de estudo.

O trabalho tem como característica predominante a experimentação, uma vez que seu objetivo principal é o desenvolvimento de produto, através de elaboração de protótipo no laboratório do GPRT com ensaios de medição e posterior avaliação dos dados.

O sistema de medição de intensidade de corrente e proteção contra sobrecarga foi desenvolvido através das seguintes etapas:

- 1- Realização de pesquisa na literatura sobre *smart plug*, transdutores, amperímetros, internet das coisas;
- 2- Discussão com o grupo de pesquisa sobre a montagem do *plug* com interface para medição de intensidade de corrente e proteção contra sobrecarga;
- 3- Projeto do protótipo do *plug*;
- 4- Realização de ensaio comparativo para a escolha de transdutor;
- 5- Confeção da placa de circuito impresso e montagem do *plug*;
- 6- Realização de testes de funcionalidade e ajustes;
- 7- Implementação da interface gráfica;
- 8- Elaboração da arquitetura;
- 9- Realização de testes e ajustes do *plug* com interface;
- 10- Validação da funcionalidade do *plug* com interface.

1.4 Estruturação da dissertação

A dissertação está estruturada em seis capítulos (Quadro 1), iniciando com uma abordagem sobre o tema, uma fundamentação teórica, trabalhos relacionados, análise comparativa dos transdutores, desenvolvimento de *plug* com interface, finalizando com as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Quadro 1 - Estrutura da dissertação

Capítulo 1	Introdução do tema da dissertação: Desenvolvimento de <i>plug</i> com interface para medição de intensidade de corrente e proteção contra sobrecarga; Motivação para realização do trabalho de pesquisa; Caracterização dos objetivos do trabalho.
Capítulo 2	Fundamentação teórica relacionada ao tema escolhido, na qual estão contidos os principais referenciais teóricos sobre os seguintes assuntos: - Corrente elétrica - Efeitos fisiológicos da corrente elétrica - Equipamentos de medição de corrente e proteção - Transdutores para medição de corrente elétrica - Suportabilidade térmica - Internet das coisas
Capítulo 3	Apresentação de trabalhos relacionados ao tema da pesquisa
Capítulo 4	Análise comparativa para a escolha do transdutor mais adequado às características do <i>plug</i>
Capítulo 5	Definição dos módulos do sistema de medição para o desenvolvimento do <i>plug</i> com interface
Capítulo 6	Apresentação das conclusões, com algumas propostas para trabalhos futuros

Fonte: Esta pesquisa.

Este capítulo propiciou uma visão geral da pesquisa, facilitando o entendimento dos capítulos seguintes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com o intuito de relacionar esta pesquisa com os principais conceitos que darão suporte ao desenvolvimento da dissertação, neste capítulo são apresentados assuntos relativos à corrente elétrica e seus efeitos, equipamentos de medição de corrente e proteção, transdutores para medição da corrente elétrica, suportabilidade térmica e internet das coisas.

2.1 Corrente elétrica

Um dos primeiros fenômenos da eletricidade surgiu com um experimento realizado pelo físico Stephen Gary, que, em 1729, conseguiu conduzir eletricidade de um corpo para outro, confirmando a existência de materiais condutores e não condutores (BOSS, 2011). É possível afirmar que, desde este momento, o fenômeno da corrente elétrica foi conhecido. Mas, apenas no século XVIII foi possível estabelecer a ideia de corrente contínua e duradoura, através da descoberta da pilha. Embora o nome corrente elétrica propriamente dito tenha sido estabelecido apenas em 1820, quando o físico André-Marie Ampère formalizou a lei de Ampère, a qual relaciona a corrente elétrica e o campo magnético.

O experimento realizado por Hans Cristian Oersten comprovou que, quando um fio retilíneo é percorrido por uma corrente elétrica, o mesmo gera um campo magnético ao seu redor. Ampère formulou matematicamente este experimento, com a equação 1:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot i \quad (\text{Equação 1})$$

$\vec{B}$ é o vetor campo magnético;

$d\vec{l}$ vetor do elemento diferencial de comprimento;

i é a intensidade da corrente elétrica;

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ é a permeabilidade magnética do vácuo.

A lei de Ampère, como ficou conhecida esta formulação do experimento de Oersted, estabelece que a integral de linha da componente tangencial de $\vec{B}$ em torno de um caminho fechado é igual ao produto da corrente elétrica com a permeabilidade magnética do vácuo.

A corrente elétrica está relacionada ao movimento ordenado das cargas elétricas, quando submetidas a uma diferença de potencial (ddp). A ausência desta ddp no condutor elétrico faz com que as cargas elétricas apresentem movimentos aleatórios, já que não há a presença de uma força elétrica para orientá-los. A intensidade da corrente pode ser definida por uma expressão matemática (Equação 2):

$$I = \frac{dq}{dt} = \iint_S \vec{J} \cdot \vec{dS} \quad (\text{Equação 2})$$

I intensidade da corrente elétrica instantânea;

dq elemento diferencial de quantidade de carga elétrica;

dt intervalo de tempo infinitesimal;

$\vec{J}$ vetor densidade de corrente elétrica;

$\vec{dS}$ vetor do elemento diferencial de área.

Logo, é possível afirmar, através da equação 2, que a corrente elétrica é a taxa com que as cargas elétricas passam por uma seção transversal de um fio. É definida também pelo fluxo de densidade de corrente elétrica através desta superfície.

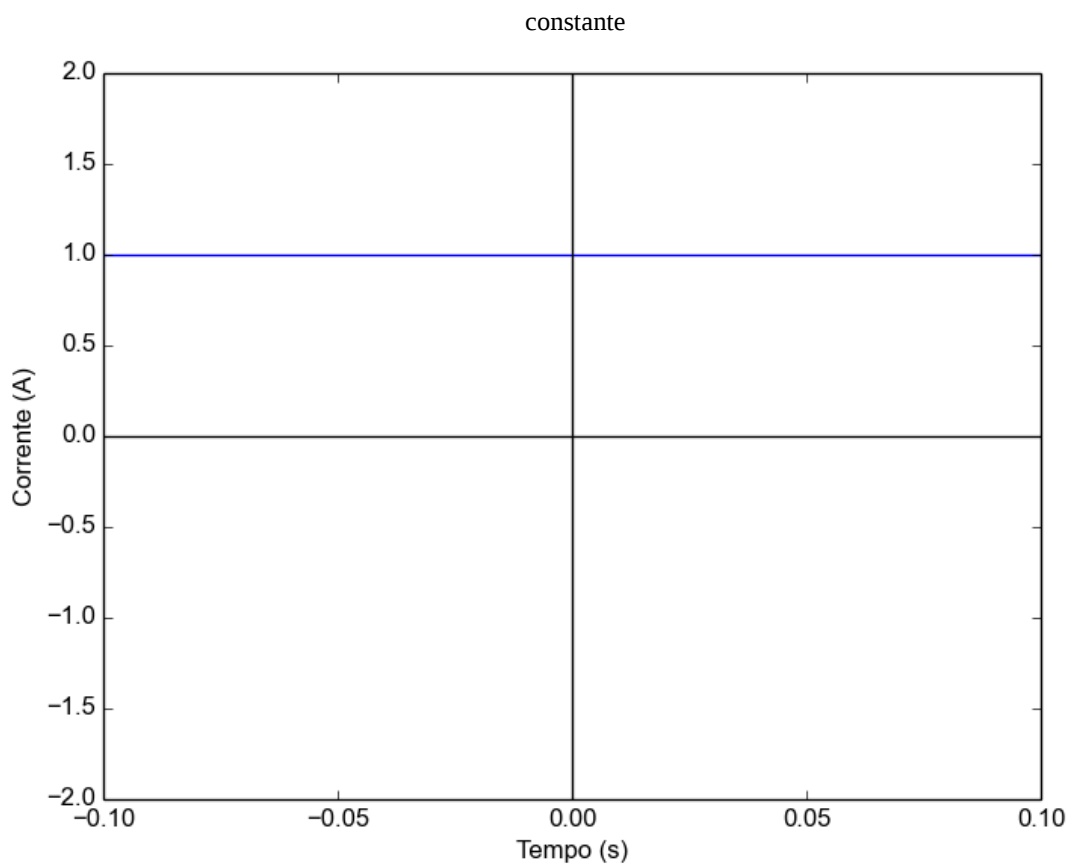
O sentido da corrente elétrica é determinado pelo sentido do movimento das cargas elétricas que, na prática, é dado do polo negativo para o polo positivo, sentido real, pois as cargas elétricas são os elétrons. Já o sentido que é normalmente utilizado, conhecido como sentido convencional é o movimento hipotético de cargas positivas, polo positivo para o polo negativo.

As cargas elétricas se movimentam em um mesmo sentido. Dependendo do circuito, a corrente pode se movimentar sempre no mesmo sentido ao longo do tempo, mas em outros circuitos este sentido pode ser variado com o tempo. De acordo com este comportamento, as correntes podem ser classificadas como corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA).

As CCs são definidas como o fluxo unidirecional, isto é, apresentam o sentido de movimento constante. Podem ser classificadas como constante ou pulsante, de acordo com o comportamento da intensidade da corrente.

- Corrente contínua constante: é aquela que circula em um único sentido e apresenta intensidade constante (Figura 2).

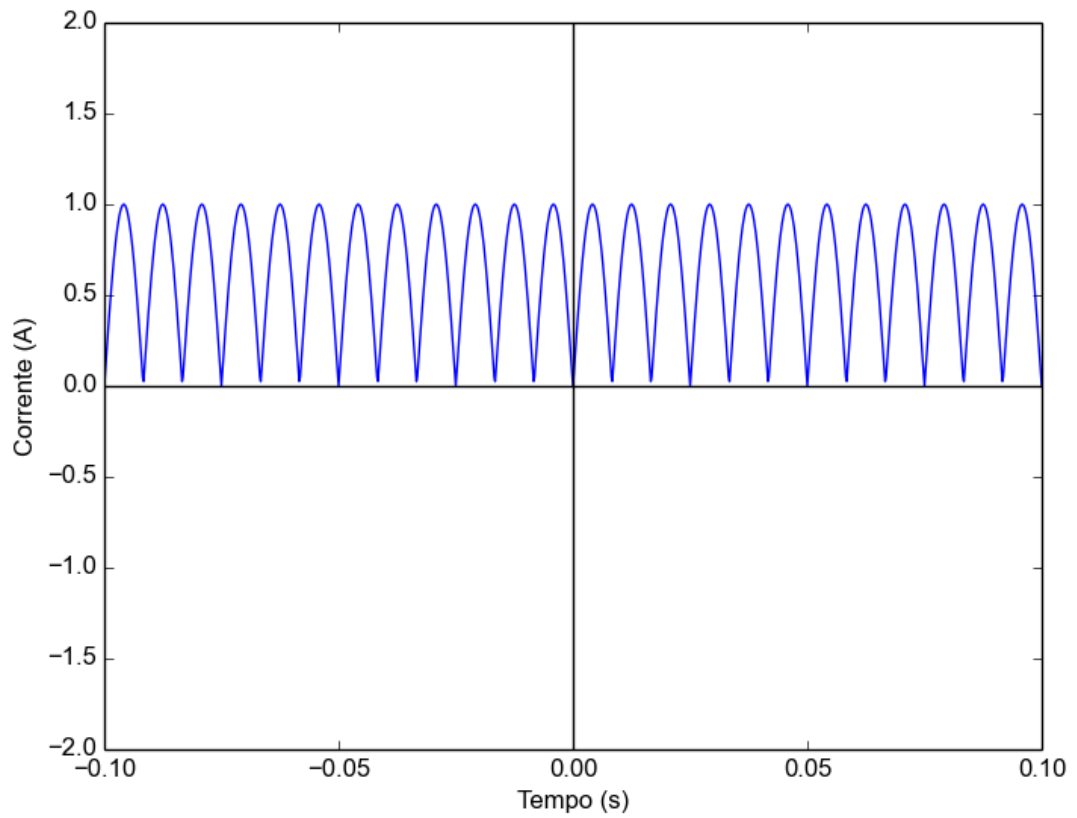
Figura 2 - Representação do sinal de corrente contínua



Fonte: Esta pesquisa.

- Corrente contínua pulsante: é aquela que circula em um único sentido e com alteração periódica na intensidade da corrente elétrica numa determinada frequência (Figura 3).

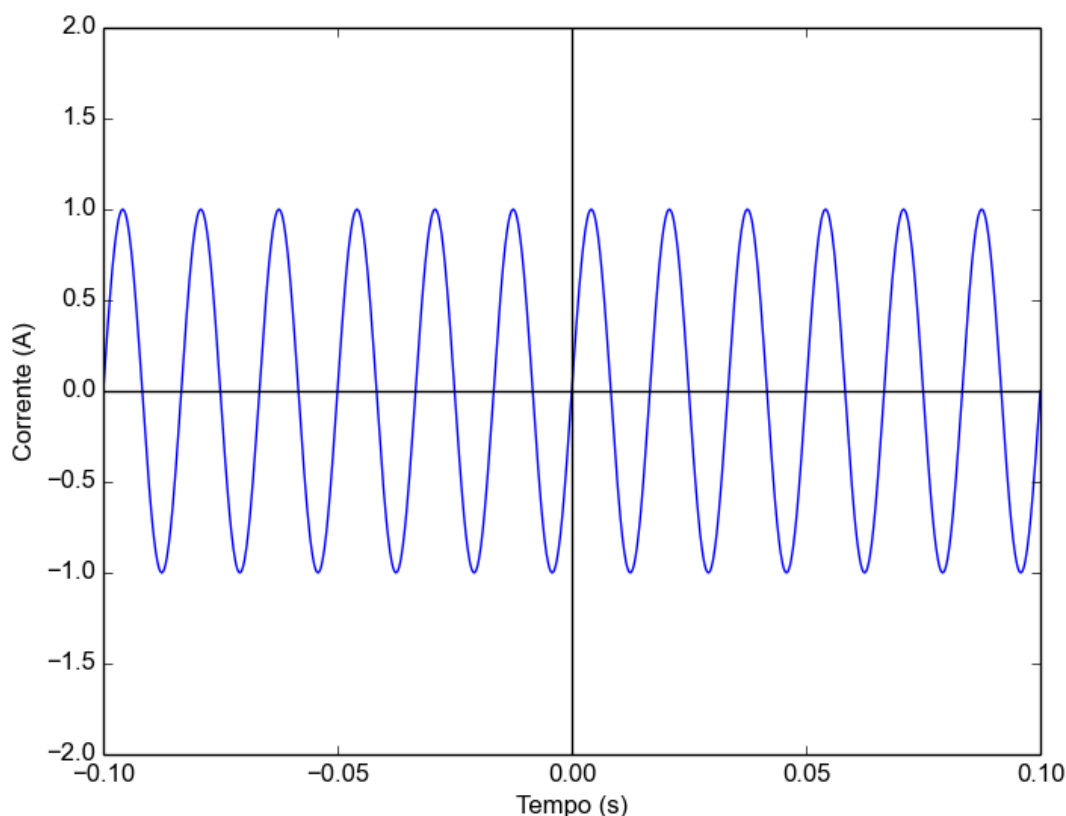
Figura 3 - Representação do sinal corrente contínua pulsante



Fonte: Esta pesquisa.

A principal característica da CA é a variação periódica do sentido do movimento das cargas elétricas, sendo representada no sinal da corrente elétrica como positiva em um intervalo de tempo e como negativa em um outro intervalo de tempo (Figura 4).

Figura 4 - Representação do sinal de uma onda senoidal corrente alternada



Fonte: Esta pesquisa.

2.2 Efeitos da corrente elétrica

O movimento ordenado das cargas elétricas em um condutor pode provocar diferentes efeitos dependendo da sua intensidade e da natureza do condutor. Os efeitos magnéticos, químicos, fisiológicos, Joule, luminosos, são os principais efeitos da corrente elétrica. Tendo em vista a pesquisa focada na medição e proteção, serão destacados o efeito Joule e o efeito fisiológico.

Os condutores sofrem influência do efeito Joule quando uma corrente elétrica é estabelecida. O efeito Joule é a transformação da energia elétrica em energia térmica devido à agitação dos elétrons, quando submetidos a uma diferença de potencial; assim, os choques dos elétrons provocam a elevação da temperatura nos condutores. Este efeito, em muitos casos,

constitui a base do funcionamento dos equipamentos. Em outros casos, é necessário dosar este efeito para que o equipamento não trabalhe de forma inadequada.

Os estímulos elétricos são os responsáveis por realizar a transmissão dos impulsos nervosos nos organismos dos seres vivos. O efeito fisiológico acontece quando os organismos dos seres vivos são submetidos a uma diferença de potencial, logo, por menor que seja a intensidade de corrente elétrica, na ordem de microampères, provocará contrações musculares, conhecidas como choque elétrico.

2.3 Equipamento de medição de corrente e proteção

2.3.1 Equipamentos de medição de corrente

Há diversos modelos de equipamentos com a função de medir a intensidade da corrente elétrica. A seguir, serão detalhadas as características técnicas e funcionalidades de alguns modelos de equipamentos comercializados no mercado.

Os amperímetros são instrumentos projetados para medir a intensidade da corrente elétrica. Inseridos em série com o circuito que se deseja medir e projetados, na sua maioria, para não interferir na medição (NILSSON; RIEDEL, 2008).

O amperímetro analógico é baseado no medidor de movimento de d'Arsonval em paralelo com um resistor. O medidor de movimento de d'Arsonval implementa o mecanismo de leitura do amperímetro e o resistor em paralelo é responsável em limitar a corrente que passa pela bobina do medidor (NILSSON; RIEDEL, 2008).

Os amperímetros digitais são mais utilizados, pois oferecem vantagens, quando comparados com os analógicos. Introduzem menos resistência no circuito ao qual estão ligados, são mais fáceis de ligar, apresentam maior precisão de medição devido à natureza do mecanismo de leitura.

Serão descritos, alguns modelos de alicates amperímetros e suas características. Todos os amperímetros listados apresentam a característica de não serem invasivos ao sistema que está sendo medido, permitindo testes sem que seja necessário o desligamento do sistema medido (desconectar equipamentos ou desligar instalações elétricas), além de serem portáteis e alimentados por baterias, normalmente pilhas alcalinas (Quadro 2). No quadro 3, serão expostas algumas características técnicas de alicates amperímetros e seus respectivos custos.

Quadro 2 - Modelos de equipamentos de medição de corrente

	<u>Alicate amperímetro fluke 360:</u> É uma solução robusta e precisa para medição de corrente de fuga. Mede apenas correntes alternadas. Consegue reduzir os efeitos dos campos magnéticos externos. Mesmo na medição de correntes baixas, o efeito dos campos magnéticos é de 0,0005% de valor típico em termos da magnitude da corrente em condutores adjacentes. Apresenta um consumo máximo de 6 mW, tensão máxima 300 V RMS, a bateria dura aproximadamente 90 horas de operação contínua.
	<u>Alicate amperímetro fluke 305:</u> Mede correntes alternadas de até 999,9 A. Além de medir tensões contínuas e alternadas em dois intervalos 400 V e 600 V. Mede resistências de, no máximo, 400 Ω. No quadro 3, é possível verificar mais detalhes técnicos do fluke 305.
	<u>Alicate amperímetro fluke 365:</u> É um equipamento bastante utilizado para medições de corrente em fios de difícil acesso, pois apresenta uma garra removível. Mede correntes alternadas e correntes contínuas, numa faixa de 0 até 200 A. Também mede tensões alternadas e contínuas até 600 V. As resistências são medidas em dois intervalos 600 Ω e 6 000 Ω.
	<u>Alicate amperímetro fluke 355:</u> É um equipamento que mede corrente de partida e faz medição de tensão e corrente <i>true-rms</i>. Mede CA e CC até 2000; logo, é utilizado em aplicações de medição de alta corrente. Com este equipamento é possível medir resistências, frequência e tensões de CC e CA de até 1000 V e 600 V, respectivamente, numa frequência de 10 Hz até 100 Hz.
	<u>Alicate amperímetro fluke 381:</u> É um amperímetro com possibilidade de comunicação remota, pois é possível remover o visor do equipamento, deixar o alicate no condutor realizando a medição e os dados são enviados remotamente, através da tecnologia sem fio 802.15.4 de baixa potência. Com o alicate amperímetro é possível realizar medições de correntes contínuas e alternadas de até 999,9 A e 2500 A, respectivamente. É possível também realizar medições de tensão CC e AC de até 1000 V, frequência e resistência.
	<u>Pinça amperimétrica fluke 773:</u> É uma pinça mili amperimétrica, capaz de medir corrente contínua num intervalo de 0 até 100 mA, além de funcionar como fonte de tensão e de corrente, ambas contínuas. O equipamento pode fornecer correntes contínuas em um intervalo de 0 até 24 mA e tensões de até 10 V. Mede tensão de até 30 V em circuito com correntes contínuas.
	<u>Alicate amperímetro fluke 902:</u> É um amperímetro específico para uso em aplicações relacionadas com sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC). É um equipamento bastante completo, pois faz medição de CC, AC, tensões CC e AC, frequência, temperatura, capacitância, resistência.

Fonte: FLUKE, 2016.

Quadro 3 - Especificação técnica de equipamento de medição de corrente

Modelo	Precisão	Corrente CA (A)	Corrente DC (A)	Frequência (Hz)	Custo (R\$)
Fluke 360	1,5% ± 5 dígitos	0,003 – 60	-	50 – 60	5.365,03
Fluke 305	2% ± 5 dígitos	999,9	-	-	383,16
Fluke 365	2% ± 5 dígitos	200	200	45 – 65	1.888,85
Fluke 355 true-rms	1,5% ± 5 dígitos	2000	2000	50 – 60	6.195,94
Fluke 381 true-rms	2% ± 5 dígitos	999,9	999,9	10 – 100	3.859,17
Fluke 773	1% + 2 contagens	-	0 – 0,1	5 – 500	10.853,96
Fluke 902 true-rms	2% ± 5 dígitos	600	0 -0,0002	50 – 60	1.722,52

Fonte: Esta pesquisa.

2.3.2 Equipamentos de proteção

Nesta seção serão apresentados os conceitos de alguns equipamentos de proteção. Também serão apresentados modelos de produtos comercializados nos dias atuais, com suas respectivas características.

Os dispositivos de proteção são definidos como "dispositivos cuja operação evita situações de perigo que possam ocorrer em condições anormais de funcionamento" (ABNT, 2010).

A seguir, serão descritos alguns conceitos de alguns equipamentos de proteção como: fusível, disjuntor termomagnético, disjuntor DR.

- Fusível: é um "dispositivo de proteção que, pela fusão de uma parte especialmente projetada, abre o circuito no qual se acha inserido e interrompe a corrente, quando esta excede um valor especificado durante um tempo especificado."(ABNT, 2004b), (Quadro 4).

Disjuntores: são dispositivos mecânicos utilizados para manobra e proteção. Com ele é possível interromper o circuito em condições normais e fazer manobras no circuito, além de proteger o circuito quando submetido a condições anormais (curto-circuito, sobrecarga etc.), através da desativação do fluxo de energia no momento em que a corrente que passa no disjuntor ultrapassa a corrente suportada por ele (ABNT, 2004).

- Disjuntores termomagnéticos: Além das características dos disjuntores relatadas anteriormente, os disjuntores termomagnéticos disparam através do efeito térmico.

Isto é, quando a temperatura atinge um valor limite o disjuntor dispara instantaneamente, protegendo o circuito contra incêndios (Quadro 4).

- Disjuntores DR (diferencial residual): são capazes de proteger os circuitos ou sistemas de baixa tensão contra as correntes de fuga, fluxo de corrente indesejado proveniente do aparecimento de uma baixa impedância de um circuito. Além de proteger o sistema elétrico de sobrecarga e curto-circuito. É indicado em instalações em que há limitação de espaço (Quadro 4).

Quadro 4 - Modelos de equipamentos de proteção

	<u>Fusível Diazed:</u> O 5SB2 81 é o modelo de um fusível Diazed, normalmente utilizado em instalações elétricas residenciais, industriais e comerciais aplicados em proteção de curto-circuito. Apresenta categoria de utilização gG, corrente nominal de 25 A, corrente de interrupção 50 KA em V CA.
	<u>Disjuntor termomagnético:</u> O 5SX1 120-7 é um modelo de disjuntor termomagnético monopolar da Siemens. Suporta corrente nominal de 20 A, apresenta disparo em curto-circuito numa faixa de corrente entre 100 A até 200 A e obedece a curva C, curva característica de disparo.
	<u>Disjuntor DR:</u> O 5SU1 653-1KK20 é um de disjuntor DR monopolar (fase e neutro) da Siemens. Detecta correntes residuais alternadas de 300 mA e suporta corrente nominal de 20 A. Bastante utilizado em instalações elétricas residenciais, comerciais e prediais.

Fonte: Siemens (2016a).

No quadro 5, são expostas algumas características técnicas de disjuntores termomagnéticos comercializados e seus respectivos custos.

Quadro 5 - Especificação técnica de disjuntores termomagnéticos

Modelo	Corrente Nominal (A)	Corrente de Disparo (A)	Custo (R\$)
Siemens 5SX1 120-7	20	100 – 200	7,66
Siemens 5SX2 120-7	20	100 – 200	7,66
Siemens EZ9F33120	20	4500 – 6000	11,12
Siemens EZ9F34120	20	5000 – 3000	14,93

Fonte: Esta pesquisa.

2.4 Transdutores para medição de corrente elétrica

Medir ou registrar valores de grandezas físicas é a função de um sistema de medição, que é composto basicamente pelos dispositivos de entrada, unidade de tratamento do sinal e um dispositivo de indicação. O dispositivo de entrada é responsável por capturar a informação relativa à grandeza que se quer medir e enviar essa informação para o dispositivo processador de sinais. Em muitas aplicações a natureza da grandeza medida é não-elétrica. No entanto, não há problema para utilizar métodos elétricos com a grandeza não-elétrica, pois essa grandeza pode ser convertida em sinal elétrico por meio de um dispositivo chamado transdutor; por exemplo, há transdutores que convertem sinais correspondentes a pressão, força, temperatura etc, em sinais elétricos. O transdutor é o elemento responsável pela primeira etapa do sistema de medição, está em contato com o mensurando (HELFRICK, COOPER, 1994).

O transdutor é definido como o módulo do sistema de medição “...que fornece uma grandeza de saída, a qual tem uma relação especificada com a grandeza de entrada” (FILIPE et al., 2012). Os transdutores podem ser formados por vários estágios, sendo que o primeiro estágio é o sensor. O sensor “...é o elemento do sistema de medição que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância que contém a grandeza a ser medida” (FILIPE et al., 2012). Nos casos em que o transdutor tem apenas o primeiro estágio o transdutor é o próprio sensor (GONÇALVES JR; SOUZA, 2008).

A classificação dos transdutores pode ser baseada em diversos aspectos. No quadro 6 a grandeza elétrica de saída envolvida na transdução será o critério de classificação.

Quadro 6 - Classificação dos transdutores

Parâmetro elétrico e tipo de transdutor	Princípio de funcionamento e natureza do dispositivo	Aplicação típica
Transdutores Passivos		
Resistivos		
Potenciômetro	Uma força externa produz o deslocamento de um cursor que origina a variação de uma resistência	Deslocamento, pressão
Célula fotoelétrica	A resistência da célula varia com intensidade de luz incidente	Relé fotossensível
Capacitivos		
Sensor de capacitância variável	A distância entre duas placas paralelas varia com uma força externa	Deslocamento, pressão
Capacitância de dielétrico	Há uma variação de capacitância devida à variação de características do dielétrico	Nível de líquidos, espessura
Indutivos		
Transdutor magnético	A auto-indução ou a indução mútua de uma bobina alimentada em AC varia por alteração do circuito magnético	Pressão, deslocamento
Transformador diferencial	A tensão diferencial em dois enrolamentos secundários de um transformador varia com a posição do núcleo magnético de uma bobina	Pressão, deslocamento, vibração, posição
Tensão e Corrente		
Efeito hall	Geração de uma diferença de potencial em uma superfície semicondutora quando o fluxo magnético interage com uma corrente	Fluxo magnético, corrente
Transdutores Ativos		
Termopar	Gera-se uma diferença de potencial que é uma função da diferença de temperatura em duas junções de materiais diferentes	Temperatura, fluxo térmico, radiação
Bobina móvel	O movimento de uma bobina móvel num campo magnético gera uma tensão	Velocidade e vibração

Fonte: (GONÇALVES JR; SOUZA, 2008).

2.4.1 Transdutores de efeito *hall*

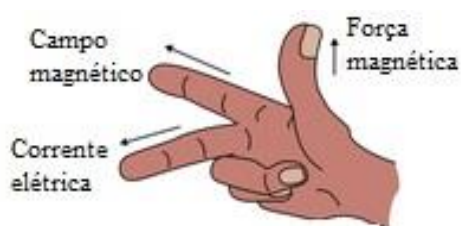
Sensores magnéticos convertem informações magnéticas ou magneticamente codificadas em sinais elétricos para processamento por circuitos eletrônicos. São dispositivos que estão se tornando cada vez mais populares, pois podem ser utilizados em diferentes aplicações. Uma aplicação dessa tecnologia é o sensor de efeito *hall*, um tipo de sensor magnético cujo sinal de saída é função da densidade de campo magnético.

O sensor de efeito *hall* é um sensor de campo magnético baseado no efeito *hall*. O efeito *hall* é um princípio que foi descoberto por Edwin Hebert Hall, no ano de 1879. No ano

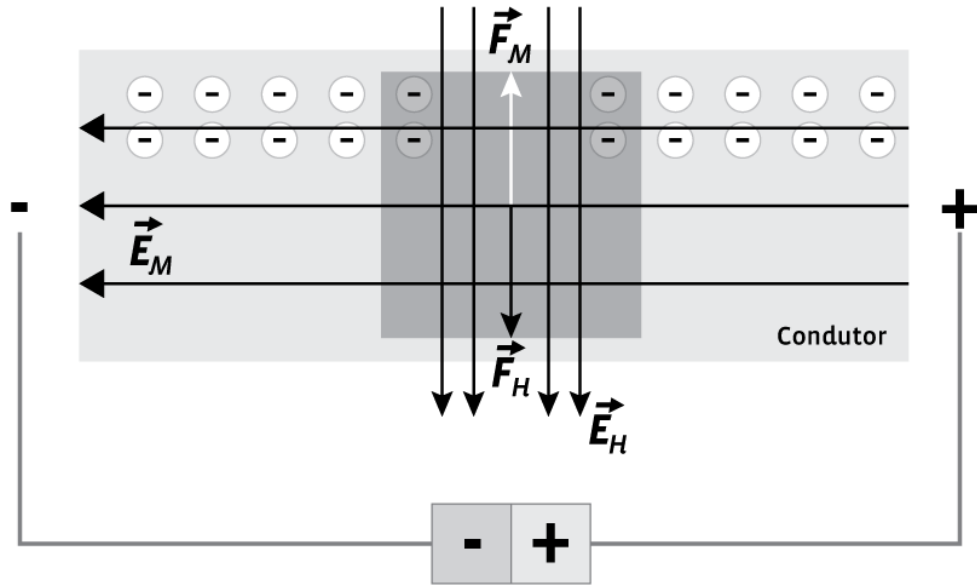
seguinte de sua descoberta os detalhes dos experimentos foram publicados no *The American Journal of Science* e no *Philosophical Magazine* (HALL, 1879).

O condutor elétrico, quando submetido a uma diferença de potencial, gera um campo elétrico, E_M , e o movimento dos elétrons livres presentes nele. A inserção de um campo magnético perpendicular ao condutor fará com que os elétrons livres sofram a ação da força magnética, determinada pela regra da mão direita (Figura 5). A força elétrica faz com que os elétrons livres se concentrem na parte superior do condutor (Figura 6), gerando assim um potencial negativo na parte superior do condutor, e na parte inferior é gerado um potencial positivo, devido à ausência de elétrons livres, originando assim a diferença de potencial de *hall*, esta por sua vez gera o campo elétrico de *hall*, E_H . A força elétrica de *hall*, F_H , tem a mesma intensidade e sentido contrário da força magnética, F_M , e é gerada através do campo elétrico de *hall*. Neste sistema as velocidades de deriva, v dos elétrons devem ser consideradas constantes.

Figura 5 - Análise da exatidão nos valores medidos pelos transdutores



Fonte: <http://alunosonline.uol.com.br/fisica/lei-biotsavart.html> em 6jan2016

Figura 6 - Efeito *hall* no condutor

Fonte: Esta pesquisa

Na prática, a aplicação do efeito *hall* acontece em materiais que apresentam uma boa mobilidade dos elétrons, semicondutores. A mobilidade diminui com o grau de contaminação do semicondutor e com o aumento da temperatura.

a. Funcionamento do sensor de efeito *hall*

O sensor de efeito *hall* é utilizado nos sistemas de medição, sendo responsável por converter o campo magnético gerado pelo condutor numa tensão proporcional na saída, V_H , medida por um circuito externo. O seu princípio de funcionamento é dado pelo aparecimento de uma ddp (diferença de potencial), V_H , que será produzida através de um material semicondutor com corrente passante sob influência de um campo magnético gerado perpendicularmente por um condutor.

A força de *Lorentz* é a responsável pelo aparecimento da diferença de potencial, V_H , pois as cargas elétricas tendem a se desviar de sua trajetória, acumulando-se nas superfícies laterais do semicondutor, gerando assim uma tensão na saída (Figura 7). Através da equação 3 é possível calcular a força de *Lorentz*:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{V} \times \vec{B}) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

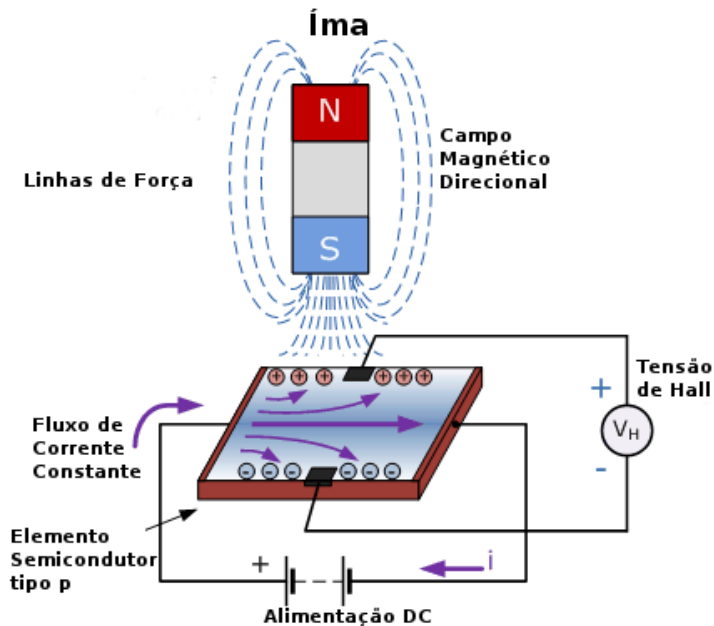
$\vec{F}$ é o vetor força de *Lorentz*;

q representa a carga do elétron;

$\vec{V}$ é o vetor da velocidade elétrica das cargas elétricas;

$\vec{B}$ é o vetor do campo magnético ao qual a carga é submetida, que é perpendicular ao vetor força elétrica.

Figura 7 – Transdutor de efeito *hall* na presença de um campo magnético



Fonte: Electronics Tutorials, ([s.d.]).

Devido ao acoplamento magnético, o sensor de efeito *hall* apresenta um isolamento elétrico. Pode ser aplicado para detectar correntes contínuas e correntes alternadas até centenas de kHz. Devido à sua simples estrutura e compatibilidade com a microeletrônica, um dispositivo *hall* pode ser integrado monoliticamente em um sensor magnético completamente integrado e ser fabricado usando a tecnologia CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) convencional (XIAO et al., 2003).

A sensibilidade dos sensores de efeito *hall* está diretamente ligada a alguns fatores: tipo do material se é p ou n; mobilidade da carga elétrica no material; espessura da placa do material, geometria do transdutor.

b. Características

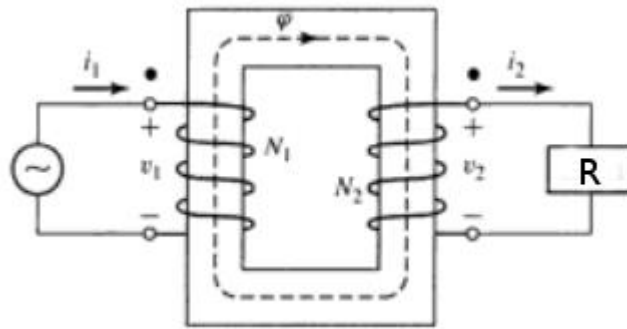
- Medição de corrente contínua e corrente alternadas;
- Detecta corrente de até centenas de kHz;
- Princípio de funcionamento é baseado no efeito *hall*;

- Apresenta isolamento galvânica;
- Sensível a mudança de temperatura;
- Invólucro pequeno.

2.4.2 Transformador de corrente (TC)

O TC é um dispositivo constituído por dois ou mais enrolamentos acoplados por um núcleo ferromagnético, circuito magnético comum. A maioria dos transformadores de corrente apresenta dois enrolamentos, o enrolamento primário, conhecido como, entrada do TC ou lado de “alta tensão”, e o enrolamento secundário, também chamado saída do TC ou lado de “baixa tensão” (Figura 8). Na prática, os TCs, na sua maioria, são projetados para funcionar o mais próximo dos transformadores ideais; logo, é possível aplicar suas propriedades (FITGERALD; KINGSLEY Jr.; UMANS, 2008).

Figura 8 - Representação de um transformador ideal



Fonte: Fitzgerald; Kingsley; Umans (2008).

A lei de Biot-Savart e a lei de indução de Faraday são as duas leis que regem o princípio de funcionamento do TC. Quando uma tensão variável no tempo e v_1 for aplicada nos terminais do enrolamento primário, um fluxo no núcleo do TC será estabelecido, de tal forma que a FCEM (força contra eletromotriz) seja igual à tensão aplicada, equação 4. O fluxo do núcleo também concatena o enrolamento secundário, produzindo uma força eletromotriz induzida, e é gerada uma tensão nos terminais do enrolamento secundário, v_2 , equação 5.

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{Equação 4})$$

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{Equação 5})$$

Através da razão entre as equações 4 e 5 é obtida a equação 6, que mostra que um transformador de corrente ideal transforma tensões na razão direta de seus enrolamentos.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (\text{Equação 6})$$

Ao conectar uma carga nos terminais do enrolamento secundário aparecerá uma corrente i_2 e uma FMM (força magnetomotriz, que é equivalente ao produto $N \cdot i$) $N_2 \cdot i_2$, na saída do transformador. É suposto normalmente que a permeabilidade do núcleo seja muito elevada e o fluxo do núcleo seja estabelecido pela tensão aplicada ao enrolamento primário, logo o fluxo do núcleo não sofrerá alteração com a presença da carga conectada e a FMM de excitação que atua no núcleo também não irá se alterar, e assim é possível obter as equações abaixo, equações 7 e 8:

$$N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2 = 0 \quad (\text{Equação 7})$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (\text{Equação 8})$$

É possível verificar, na equação 8, que os transformadores de corrente ideal apresentam uma corrente de secundário de saída igual a N_1/N_2 vezes a corrente de entrada do primário e a mesma fase.

Quando uma CC é aplicada na entrada do TC, o fluxo magnético produzido é constante, já que a corrente não é variável, logo a resistência do material condutor será a única oposição à corrente. Normalmente os condutores utilizados apresentam uma baixa resistência e as perdas por efeito Joule são pequenas. Assim, não utilizamos os transformadores de corrente para medição de correntes contínuas, pois a aplicação de pequenos valores de corrente poderia danificá-lo.

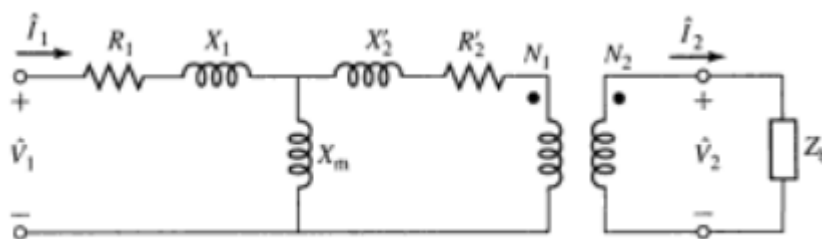
Com a corrente alternada é possível realizar a medição, pois há o fenômeno da indução eletromagnética e, conseqüentemente, a geração de uma força eletromotriz, será mais uma oposição à corrente. Nesse caso o TC é dimensionado de modo que os enrolamentos suportem correntes previsíveis.

Para que o TC (Figura 9) tenha uma boa exatidão é preciso que tenha uma impedância de magnetização (X_m) elevada, uma baixa resistência de enrolamento (R_1 e R_2) e reatância de dispersão (X_1). Além disso, a impedância de carga deverá ser mantida abaixo de um valor máximo, evitando, assim, erros adicionais excessivos no valor da corrente medida e no ângulo

de fase (FITGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2008). Através da equação fasorial (Equação 9), é possível verificar essas relações.

$$\frac{\hat{I}_2}{\hat{I}_1} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right) \cdot \frac{jX_m}{Z_b + R_2 + j(X_2 + X_m)} \quad (\text{Equação 9})$$

Figura 9 - Circuito equivalente de um transformador de corrente de instrumentação



Fonte: Fitzgerald; Kingsley; Umans (2008).

a. Aplicação

Em alguns circuitos de medição os transformadores de corrente são os elementos sensores do sistema. Eles são capazes de transferir energia elétrica de um circuito para outro e realizar medições de correntes alternadas.

Os TCs também são utilizados para permitir o funcionamento adequado de equipamentos de medição, controle e proteção, que muitas vezes não apresentam correntes nominais de acordo com a corrente de carga do circuito à qual são ligados. As relações mais utilizadas no mercado que se enquadram nessa aplicação são os transformadores de corrente xx/5A e xx/1A, isto é, uma determinada corrente no primário, xx, é mostrada em uma corrente nominal no secundário que pode variar de 0 a 5A (SIEMENS, 2015). Com o uso de TCs em relés e medidores é possível baixar os custos desses equipamentos, já que, de forma simples, será possível trabalhar com níveis de corrente reduzidas.

Como os TCs são isolados, muitos circuitos os utilizam para garantir o isolamento elétrico entre o que está sendo medido e o circuito de medição, isto é, enrolamento primário e enrolamento secundário.

b. Princípio de funcionamento no circuito de medição de corrente

Os TCs têm sido amplamente utilizados para detecção de corrente AC com a sua largura de banda até dezenas de MHz. Esta técnica de detecção fornece isolamento galvânica e consome pouca energia (XIAO et al., 2003).

Os TCs usados como elemento sensor de um circuito de medição de corrente apresentam no enrolamento primário um número de espiras muito menor que no enrolamento secundário e compatível com a corrente que se quer medir. Em alguns TCs o enrolamento primário é constituído pelo próprio condutor de medição, contendo uma única espira. A corrente aplicada na carga que está conectada num dos terminais do enrolamento primário será convertida em tensão nos terminais do enrolamento secundário; logo, é necessário a utilização de um resistor com uma resistência conhecida. Sendo assim, será possível calcular a corrente no secundário no TC através da aplicação da lei de Ohm, pois a resistência e a tensão sobre o resistor serão conhecidas. Após o cálculo da corrente no secundário do TC através da equação 8 é possível calcular o valor da corrente na carga conectada ao enrolamento primário.

c. Características

- Medição apenas de corrente alternada;
- Medição em ampla banda de frequência;
- Apresenta isolamento galvânica;
- Corrente no enrolamento secundário proporcional à corrente no primário;
- O transformador é dimensionado de modo que as seções dos condutores do primário e do secundário suportem as correntes previsíveis.

2.4.3 Resistor *shunt*

O *shunt* pode ser conhecido como um elemento derivador de corrente, isto é, “...um acessório constituído de elementos resistivos, calculado de maneira a ter uma determinada queda de tensão padronizada quando por ele passa a corrente nominal (Tensão proporcional à corrente)”(KRON, 2015). Dessa forma, em muitos casos é utilizado apenas um resistor com uma resistência bastante pequena funcionando como um *shunt*; logo, esses resistores são chamados de resistores *shunt*, que, devido à sua aplicação, funcionam como um sensor para medição de corrente.

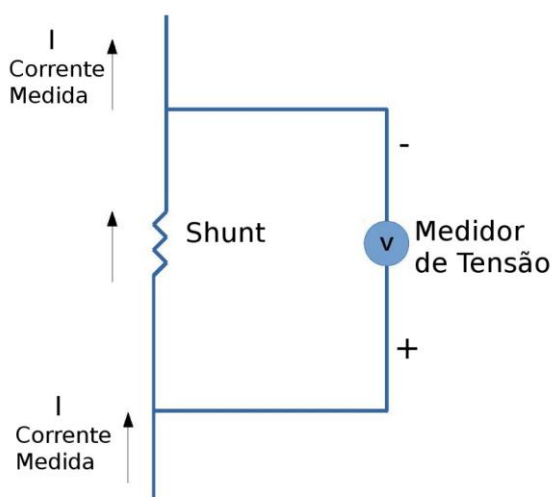
Uma característica relevante de um *shunt* é o valor da corrente máxima suportada por ele, pois, o *shunt* apresenta normalmente um TCR (*temperature coefficient of resistance*) muito

baixo (XIAO et al., 2003). Esse coeficiente é importante, pois está relacionado diretamente à estabilidade do *shunt*. O TCR é uma propriedade dos materiais, que quantifica a relação da alteração da resistência de acordo com a mudança de temperatura. É sabido que, quanto maior a corrente que flui num *shunt*, maior a elevação da temperatura; logo, haverá uma alteração significativa no valor da resistência do *shunt*.

a. Princípio de funcionamento no circuito de medição de corrente

Nos circuitos de medição de corrente, o resistor *shunt* atua como um sensor de corrente, pois ele monitora o fluxo de corrente de um determinado circuito eletrônico através da medição da queda de tensão mediante a resistência inserida na trajetória da corrente de interesse (Figura 10).

Figura 10 - Circuito com resistor shunt como sensor de corrente



Fonte: Esta pesquisa.

No sistema de medição, o dispositivo mais simples para ser usado como elemento sensor é o resistor *shunt*. O princípio de funcionamento do sistema usando o *shunt* é baseado na lei de Ohm. O interesse é na medição da corrente que passa por um determinado circuito, podendo ser apenas uma carga. Então, o sensor ficará em série com a carga (Figura 10), para que a corrente nos dois dispositivos seja a mesma. Como será utilizada a equação 10 para o cálculo da corrente é necessário a obtenção do valor da tensão, já que o valor da resistência *shunt* é conhecida.

$$I = \frac{V}{R_{Shunt}} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

R_{shunt} é a resistência *shunt*; é aconselhável que tenha um valor na ordem de mili ou micro Ω (ohms);

V é queda de tensão nos terminais do resistor *shunt*, proporcional à magnitude da corrente de interesse;

I é a corrente que será calculada a partir dos valores de corrente e tensão conhecidos.

A escolha do valor da resistência *shunt* tem que respeitar alguns parâmetros:

- Suportar a corrente máxima a ser medida;
- Ter um valor ôhmico baixo para que a resistência não interfira na medição.

b. Características

- Mede correntes alternadas e correntes contínuas até dezenas de MHz (XIAO et al., 2003);
- Apresenta um encapsulamento pequeno;
- Baixo custo;
- Não há isolamento galvânico, embora seja possível isolá-lo, utilizando algumas técnicas (FERREIRA; CRONJE; RELIHAN, 1995; CASTELLI, 1999; XU; LORENZ, 2002). Essas técnicas muitas vezes podem elevar o custo do sensor e a complexidade do mesmo;
- Apresenta uma resistência da ordem de m Ω ou $\mu \Omega$;
- Uso da ponte de Kelvin para melhorar a precisão (XIAO et al., 2003);
- Aquecimento do resistor quando submetido a correntes elevadas.

Há alteração do valor da resistência aparente do *shunt* quando submetido a frequências elevadas, devido ao efeito peculiar (Skin) (XIAO et al., 2003).

No apêndice A é possível verificar um quadro com informações de transdutores comerciais: fabricante, modelo, custo, tecnologia, faixa de medição e precisão.

2.5 Suportabilidade térmica

A suportabilidade térmica está diretamente relacionada à corrente máxima suportada por um equipamento; acima dela os limites térmicos seriam violados, o que, conseqüentemente, danificaria o equipamento (FARIA et al., 2014). As curvas de suportabilidade térmica são

obtidas considerando o conceito de energia ($I^2.t$) dissipada e suportada pelas partes mais sensíveis do equipamento. A curva de suportabilidade térmica é obtida através da equação 11:

$$\int_0^{T_D} [i(t)]^2 . dt = I^2 . T_D = J \quad (\text{Equação 11})$$

Como J é uma constante, a equação 11 pode ser representada pelas equações 12 e 13:

$$J = I^2 . T_D \quad (\text{Equação 12})$$

$$I(t) = \sqrt{\frac{J}{T_D}} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

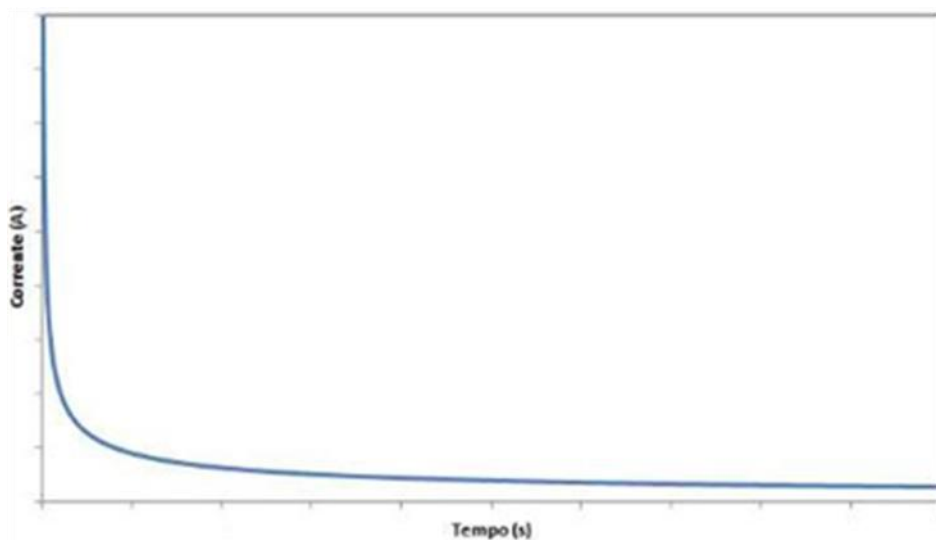
$i(t)$ - valor instantâneo da corrente, em ampère (A), responsável pela dissipação da energia térmica máxima admissível pelo equipamento;

T_D - intervalo de tempo, em segundos, durante o qual o equipamento foi submetido ao esforço de corrente supra caracterizado;

J - energia máxima admitida pelo equipamento.

A curva de suportabilidade térmica típica é apresentada na figura 11.

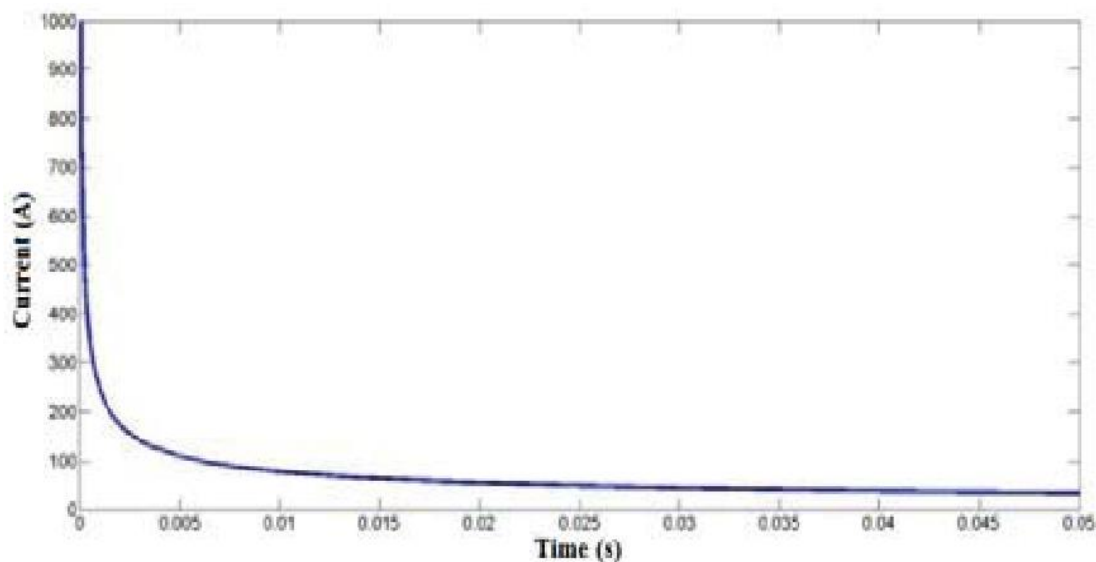
Figura 11 - Curva típica de suportabilidade térmica



Fonte: Faria et al. (2014).

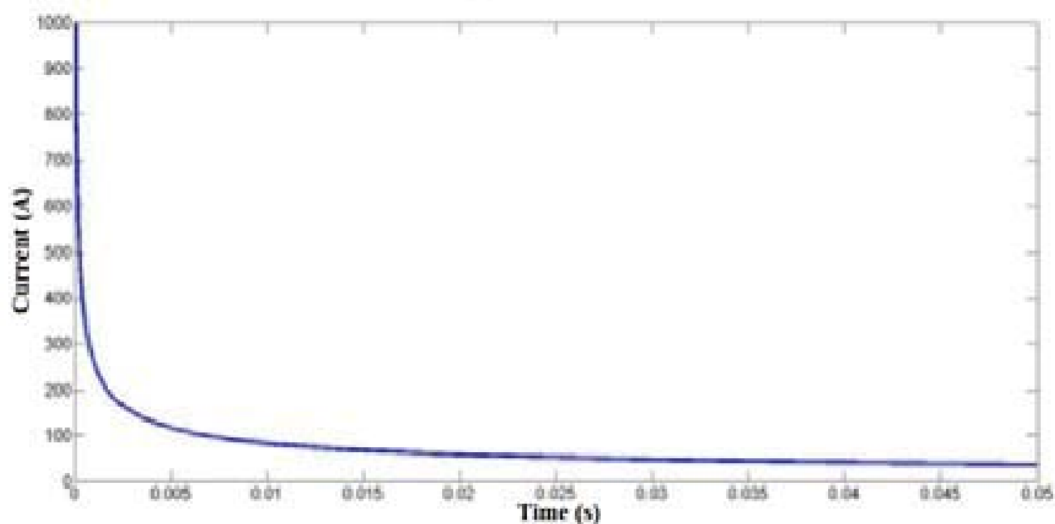
As figuras 12, 13 e 14 mostram as curvas de suportabilidade térmica de três equipamentos eletrodomésticos (TV, microcomputador e aparelho de som), obtidas através de experimentos (GONDIM et al., 2011).

Figura 12 - Curva de suportabilidade térmica de uma TV de 29"



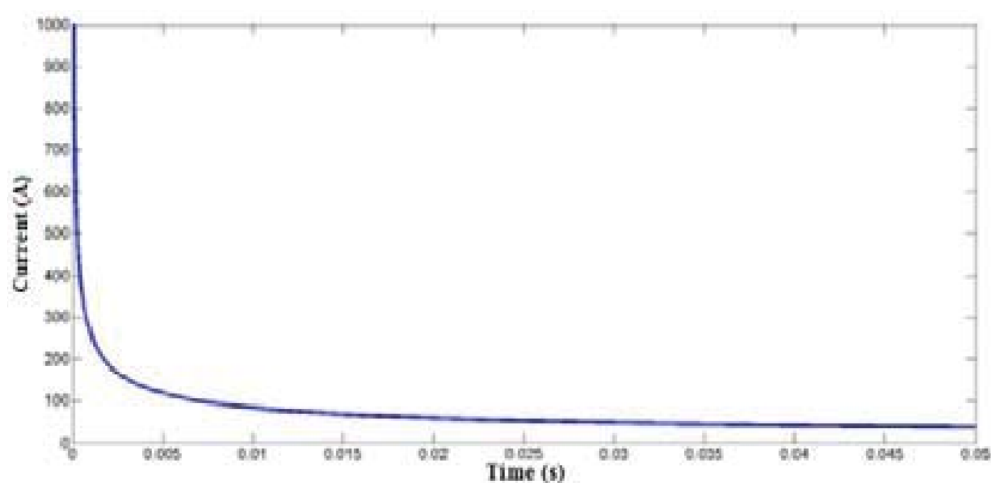
Fonte: Gondim et al. (2011).

Figura 13 - Curva de suportabilidade térmica de um microcomputador



Fonte: Gondim et al. (2011).

Figura 14 - Curva de suportabilidade térmica de um aparelho de som



Fonte: Gondim et al. (2011).

Embora existam procedimentos para obtenção de curvas de suportabilidade dos equipamentos, o mercado carece de padrões a serem obedecidos pelos fabricantes. As dificuldades de se desenvolver trabalhos nesta linha são devidas a alguns fatores, tais como: diversidade de fabricantes de produtos similares, inexistência de normas a serem atendidas, tempo de uso dos produtos etc, (ANEEL, 2011).

2.6 Internet das coisas

Para o britânico Kevin Ashton, na Procter & Gamble (P&G) as “coisas” do dia a dia, computadores, lâmpadas, televisores etc., para a realização das suas atividades dependem da atuação dos seres humanos. O autor lançou, em 1999, pela primeira vez, a ideia da possibilidade da comunicação dos objetos sem a intervenção direta dos seres humanos, isto é, as “coisas” iriam gerar dados e informações, independentes da ação humana. Nasce, assim, o conceito de internet das coisas (IoT) (ASHTON, 2009).

O conceito de internet das coisas é definido por Sector (2012) como sendo a infraestrutura global para a informação da sociedade, que propicia a prestação de serviços avançados mediante a interconexão de “coisas” (física e virtual), proveniente da interoperatividade da tecnologia da informação já existente e das que estão em desenvolvimento.

As consequências do uso da IoT são benefícios diretos aos usuários, com redução de custo e tempo de operação. Já que os objetos do dia a dia estarão conectados à internet ou a redes de computadores e com o uso da rede de sensores as informações poderão ser

processadas, será possível visualizar informações de um determinado equipamento remotamente, controlar o funcionamento de “coisas”, utilizar um equipamento, quando necessário, sem a presença de um operador etc.

A fundamentação teórica, juntamente com os trabalhos relacionados ao tema desta dissertação, contribuíram para sedimentar as ideias e o desenvolvimento da pesquisa científica.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

A pesquisa se inicia com o estudo dos trabalhos relacionados com o tema, tornando possível conhecer o que já foi desenvolvido e apresentar maiores contribuições. Então, esse capítulo consiste em apresentar a evolução histórica de trabalhos no âmbito da medição de corrente, analisando as técnicas, componentes e aplicação. A seguir, será feita uma abordagem sobre os medidores de corrente, o *smart plug*, a proteção de equipamentos de baixa tensão e uma breve conclusão.

3.1 Medidores de corrente

Ward (1993) realizou estudo demonstrando que é possível perceber o potencial da bobina de *Rogowski* na arte de medir a corrente elétrica. O autor comparou as vantagens das características da bobina de *Rogowski* em relação ao transformador de corrente.

A dissertação “Sensores Ópticos para Medição de Corrente Elétrica em Alta-Tensão” (JORGE, 2001) descreve a construção de um protótipo portátil de sensor de corrente e demonstrações do seu funcionamento através de testes em laboratórios. Os resultados confirmaram que a configuração proposta é adequada para a monitorização de correntes elétricas em ambientes de alta tensão, já que os sensores ópticos são atrativos para aplicações de medição e proteção em ambientes de alta tensão em geral.

Koon (2002) também fez uma análise de quatro sensores de corrente, avaliando suas características mais relevantes: custo, linearidade no intervalo de medição, capacidade de medir correntes elevadas, consumo de energia, problemas de saturação de altas correntes contínuas, variação do sinal de saída com a variação da temperatura, problemas com *offset* de correntes contínuas e problemas com saturação e histerese.

Xiao et al. (2003) investigaram as vantagens e limitações de seis tipos de tecnologias de sensores de corrente. As tecnologias consideradas foram: resistor *shunt*, transformador de corrente, bobina de *rogowski*, sensor de corrente de efeito *hall*, sensor de magneto resistivo (GMR – *Giant Magneto Resistive*) e sensor de magneto impedância (MI – *Magneto Impedance*). A ênfase da pesquisa foi dada às características que aumentam ou limitam o potencial de cada tecnologia avaliada no processo de empacotamento. Os resultados da pesquisa mostraram, de forma comparativa, as características e desempenho das seis tecnologias avaliadas.

Com o objetivo de realizar um estudo das tecnologias e normas existentes relativas aos transformadores de corrente eletrônico, Chaves (2008), em sua dissertação, apresenta um

transformador de corrente eletrônico com bobina de Rogowski como elemento sensor e transmissão óptica do sinal digital por meio de fibra óptica plástica (POF – *Plastic Optical Fiber*). Os resultados mostraram a aplicabilidade dos transformadores eletrônicos de corrente em sistemas de potência tanto para serviço de medição como para proteção.

O trabalho de Jiang et al. (2009) apresenta a arquitetura, o projeto e a avaliação de um sensor e atuador sem fio, utilizado para monitorar e controlar o uso da energia elétrica em ambientes amplos e diversificados. O sistema é formado por um nó que fornece uma interface de medição e controle para uma única saída; uma rede que permite que a interface seja exportada para terminais IP arbitrários; e a camada de aplicação recebe e armazena as leituras em um banco de dados e usa um servidor *web* para visualização da energia consumida.

Geng (2010) descreve um projeto de um módulo de medição de corrente utilizando um microcontrolador da *Texas Instruments*. A ideia foi desenvolver um medidor de corrente para medir altas correntes de forma segura, através de transformador de corrente em forma de pinça (*clamp current transformer*). O circuito mede correntes de até 200A, utiliza um módulo *wireless* para a comunicação.

Na tese “Desenvolvimento de um Sistema Embarcado para Medição de Corrente”, Santos (2010) estabeleceu como principal objetivo implementar um sistema embarcado para medir corrente de fuga de para-raios de alta tensão, para auxiliar as condições dos equipamentos de proteção. Com este equipamento, o autor conseguiu realizar o tratamento de sinal com controle do ganho de forma automática, calcular as correntes de pico e eficaz, fazer a análise dos harmônicos juntamente com o THD (Taxa de Distorção Harmônica). Foi utilizada a bobina de *Rogowski* como elemento sensor de corrente, sua escolha foi definida a partir das características do projeto, pois era necessário um sensor com razoável precisão, em torno de 0,5 mA, eficaz, preferência pelo método indireto e ausência de atraso de fase. Os erros na medição de corrente foram inferiores a 4% e a responsável pelos erros foi a baixa quantidade de ganho disponível no amplificador de instrumentação programável.

Com a finalidade de desenvolver um sistema capaz de localizar faltas em ramais de distribuição de energia elétrica e a determinação do seu tipo, Pinheiro (2011), em sua dissertação intitulada “Desenvolvimento de um Sistema de Medição de Baixo Custo para a Monitoração de Alimentadores Aéreos de Distribuição de Energia Elétrica da Classe 15kV”, utiliza uma rede de sensores sem fio no padrão IEEE para adquirir os dados de tensão e corrente de cada fase e, a partir do processamento das informações, identificar o ramal com falta, reduzindo o tempo de desligamento e os custos de manutenção. Os medidores aplicados

em cada fase utiliza além de sensores de tensão, sensores de corrente baseado na bobina de Rogowski.

O trabalho desenvolvido por Moraes (2011) apresenta um equipamento de medição, com comunicação sem fio, de baixo custo e fácil aplicação, com a finalidade de avaliar instalações suspeitas de fraude ou anomalia no medidor. O equipamento é dotado de um sistema com um transformador de corrente tipo “garra”, a ser ligado no ramal de entrada de baixa tensão do consumidor da concessionária.

Em sua dissertação de mestrado, Wendhausen (2011) apresenta o desenvolvimento e a análise metrológica da cadeia de medição de um transformador eletrônico de corrente, tendo como objetivo classificá-lo como um instrumento de classe de exatidão 0,5, conforme a norma IEC60044-8. O sistema desenvolvido tem um circuito eletrônico, instalado diretamente na linha de transmissão a ser medida, composto por um transdutor de corrente (bobina de Rogowski), cujo sinal é enviado a uma placa de aquisição, onde é digitalizado e posteriormente transmitido, por fibra óptica, até um módulo de processamento instalado na sala de controle.

Koizumi (2012) desenvolveu sensores e instrumentação aplicados no projeto de equipamentos analisadores de qualidade de energia elétrica, os quais consistem num conjunto de sensores de corrente e tensão elétrica. O autor concluiu que as dificuldades de condicionamento de sinal que aparecem na implementação de sensores ou instrumentação estão relacionadas com as características elétricas dos componentes utilizados e os ruídos. Mas, com uso de instalações adequadas dos equipamentos de medição, blindagens eletromagnéticas e projeto de PCBs (*Printed Circuit Board*) há possibilidade de amenizar esses problemas. Resposta em frequência, ruído, linearidade e imunidade a campo magnético externo foram os ensaios realizados para verificar o funcionamento do sensor de efeito *hall*. Após os ensaios, foi feita uma análise comparativa entre os sensores testados, concluindo que os sensores de corrente de efeito *hall* tiveram a melhor desempenho.

Em trabalho sob o título “Medição inteligente e automação residencial para próximas décadas usando a tecnologia *zigbee*”, Sethumadhavan (2015) enaltece a relevância do uso de tecnologias para obter o melhor controle do consumo e utilização da energia elétrica. Na pesquisa, realiza o controle da energia através de um medidor de energia e, para medir a corrente de até 200A, utilizou um transformador de corrente (TC). Um conversor foi o responsável por receber o sinal analógico e converter para um sinal digital. Com o auxílio do

módulo Zigbee, as informações são enviadas para o usuário. O controle do consumo da energia é feito através do estabelecimento de limites para a potência consumida.

3.2 *Smart plug*

O artigo “*Smart Plug and Play Sensors*”, de Potter (2002), descreve uma proposta de norma do grupo de trabalho IEEE P1451.4 que define uma interface de modo misto que mantém o sinal analógico tradicional do sensor, mas com baixo custo ligação serial digital para acessar as informações do transdutor.

O *smart plug* com rede de sensores sem fio para monitoramento do uso de energia elétrica em casa inteligente é apresentado por Lee (2011). O *smart plug* integra um soquete de energia AC, um relé para comutar a tomada ON / OFF, um sensor de transformador de corrente para detectar a carga atual do aparelho e uma interface de comunicação sem fio. Foram avaliados *smart plug* em um laboratório, analisados e apresentados os dados de consumo de energia de aquecedor elétrico por 3 meses.

Dhond (2012) descreve, em seu artigo “*Sub-metering made easy using Texas Instruments energy measurement ICs*”, as características e benefícios de um modelo de *smart plug* aplicados na medição de energia elétrica individualizada de equipamentos conectados a ele. Utiliza um resistor *shunt* para medir a corrente da carga, a amostragem de tensão é realizada com um divisor de tensão, a energia é calculada no microcontrolador e utiliza um conversor A/D de 24 bits.

A Texas Instruments (2014), em sua publicação “*Smart Plug with Remote Disconnect and Wi-Fi Connectivity*”, apresenta um *design* e *software* para aplicação de *smart plug*, como também aborda os requisitos para medição de energia.

3.3 **Proteção de equipamentos de baixa tensão**

Em seu trabalho de pesquisa “Controle Eletrônico da Corrente da Bobina de Contactores Eletromagnéticos”, Moraes (2004) propõe um sistema de controle que pode ser empregado no acionamento de contactores eletromagnéticos convencionais, atuando diretamente sobre a corrente que circula pela bobina do contactor, protegendo a unidade contra curtos-circuitos.

Em “Metodologia Computacional para Coordenação Automática de Dispositivos de Proteção contra sobrecorrente em Sistemas Elétricos Industriais”, Soares (2009) estuda os requisitos de proteção de sobrecorrente de motores, cabos e transformadores utilizados no

ambiente industrial, bem como os dispositivos de proteção mais utilizados na baixa tensão, como fusíveis e disjuntores, com ênfase para a proteção por meio de relés digitais de sobrecorrente.

Caires (2012), em sua pesquisa de Mestrado intitulada “Aplicação de Redes Inteligentes nas Instalações Elétricas Residenciais”, realiza uma análise do potencial da aplicação dos dispositivos elétricos inteligentes no ambiente residencial e a respectiva interação com as redes inteligentes. As funções de proteção do sistema elétrico residencial podem ser otimizadas com o uso da rede inteligente, reduzindo as falhas, através da atuação preventiva do sistema.

Para facilitar a visualização e comparação das características dos trabalhos relacionados que serviram como referencial teórico para esta pesquisa foi significativo construir o quadro 7. Inicialmente foram selecionadas as características que fossem relevantes para o desenvolvimento deste trabalho, assim foram estudados os trabalhos que fizeram uma comparação qualitativa e ou quantitativa entre as características dos transdutores; medição de corrente utilizando diversos transdutores de corrente como sensor de efeito *hall*, resistor *shunt*, TC, bobina de Rogowski; projetos de proteção contra sobrecarga e ou curto circuito e desenvolvimentos de *smart plugs*.

É possível observar a singularidade da pesquisa proposta neste trabalho. O desenvolvimento de *plug* com interface para medição de intensidade de corrente e medição contra sobrecarga culmina em um *smart plug* com duas principais funcionalidades, proteção das cargas contra sobrecarga e medição de corrente elétrica, utilizando o transdutor de efeito *hal*. Para alcançar esses resultados foi realizado um estudo comparativo de forma qualitativa e quantitativa de algumas características das três tecnologias de transdutores de corrente existentes no mercado. Por ser um *plug* se diferencia dos equipamentos que apresentam um perfil semelhante, pois na sua maioria eles são alimentados por uma bateria, sujeitos a energia de consumo limitada, eleva o custo e peso.

Quadro 7 – Comparação das características entre os trabalhos relacionados

<i>Trabalhos</i>	<i>Comparação entre transdutores</i>		<i>Medição de Corrente</i>					<i>Proteção</i>		<i>Smart Plug</i>
	<i>Qualitativa</i>	<i>Quantitativa</i>	<i>Sensor Hall</i>	<i>Resistor Shunt</i>	<i>TC</i>	<i>Bobina de Rogowski</i>	<i>Sensor Óptico</i>	<i>Curto- Circuito</i>	<i>Contra sobrecarga</i>	
Ward (1993)	X					X				
JORGE, 2001							X			
Potter (2002)										X
Koon (2002)	X									
Xiao et al. (2003)	X									
Moraes (2004)								X		
Chaves (2008)					X	X				
Soares (2009)								X	X	
Jiang et al. (2009)				X	X					X
Geng (2010)					X					
Santos (2010)						X				
Lee (2011)					X					X
Pinheiro (2011)						X				
Morais (2011)					X					
Wendhausen (2011)						X				
Caires (2012)								X	X	
Dhond (2012)				X						X
Koizumi (2012)			X							
Texas Instruments (2014)										X
Sethumadhavan (2015)					X					
Este trabalho	X	X	X						X	X

Fonte: Esta pesquisa.

4 ANÁLISE COMPARATIVA DE TRANSDUTORES

O objetivo do capítulo é a realização de um estudo comparativo entre três tecnologias de sensores: sensor de efeito *hall*, TC e resistor *shunt*, através de um ensaio de medição de corrente utilizando um modelo de sensor existente no mercado para cada tecnologia. A peculiaridade da aplicação tem influência direta na escolha do sensor, logo foi construída uma matriz de decisão para facilitar a escolha do elemento a ser utilizado no circuito do *plug* e através dos resultados obtidos com o ensaio comparativo a matriz foi preenchida.

4.1 Tecnologia

O transdutor é um dispositivo de entrada do sistema de medição, responsável por capturar alguma forma de energia relacionada a uma variável física de entrada, como a corrente elétrica, e fornecer uma resposta em outra forma de energia como, por exemplo, um sinal elétrico semelhante à variável de entrada. A precisão da medida está diretamente relacionada com o transdutor, o que o torna um elemento crítico na obtenção de medidas precisas. É necessário bastante cuidado no momento de fazer a escolha do transdutor a ser utilizado num sistema de medição. Desta forma, foi feito um estudo detalhado da bibliografia e realizados ensaios em laboratório para a seleção do melhor transdutor a ser utilizado neste trabalho. Foram verificadas as características de três transdutores (HELFRICK; COOPER, 1994) muito utilizados em sistemas de medição.

Foi estabelecida inicialmente 10 A como sendo a corrente máxima que o protótipo conseguiria medir. Em seguida foi realizada a escolha das tecnologias que seriam analisadas no ensaio, através dos trabalhos relacionados foi possível verificar qual a tecnologia mais adequada para cada aplicação. Assim, foram selecionadas as tecnologias de sensor de efeito *hall*, TC e sensor *shunt* para serem estudadas. Foi necessário selecionar um modelo de transdutor de corrente das diversas possibilidades existentes no mercado para representar cada tecnologia as três que seriam avaliadas.

Os transdutores comerciais selecionados apresentam as características elétricas abaixo:

- Transdutor de efeito hall com capacidade de medição de corrente até 20 A;
- Transformador de corrente com capacidade de medição de corrente até 100 A, embora o circuito dimensionado tenha sido para 20 A;
- Resistor shunt de 0,1 Ω , capacidade de medição de 4,5 A.

4.2 Ensaio de corrente aplicada

O ensaio de corrente aplicada é o principal ensaio a ser realizado em um transdutor de corrente e tem por objetivo verificar características, tais como linearidade, precisão e exatidão. Para realização do teste aplicam-se sistematicamente correntes em dois intervalos: 0,05 A até 0,5 A com incrementos de 0,05 A e 1 A até 7 A com incrementos de 0,5 A. A faixa de corrente aplicada no ensaio foi dividido em dois intervalos para possibilitar a análise do comportamento de cada tecnologia dos transdutores de corrente na ordem de mili ampère, pois nessa faixa de corrente o sinal analisado é mais sensível a interferências e ruídos da rede elétrica.

No quadro 8 é possível verificar a funcionalidade de cada equipamento utilizado no circuito do ensaio. O osciloscópio foi responsável em exibir o sinal do circuito com o transdutor de corrente possibilitando extrair valores relevantes como tensão RMS. A caixa de aferição de relé de proteção operou como uma fonte de corrente alternada ajustável, assim, foi possível injetar correntes de entradas específicas na faixa de 0,5 A até 7A. Os circuitos com os transdutores de corrente selecionados foram responsáveis em medir a intensidade de corrente que estava sendo injetada (Figura 16).

Quadro 8 - Condições do ensaio de corrente aplicada

<i>Equipamentos utilizados</i>	<i>Função</i>
Osciloscópio	Mostrador do sinal
Caixa de aferição de relé de proteção	Fonte de corrente ajustável
Sensor de efeito <i>hall</i>	Medição de corrente
TC	Medição de corrente
Resistor <i>shunt</i>	Medição de corrente

Fonte: Esta pesquisa.

A Figura 15 mostra a ligação do circuito com o transdutor, fonte de corrente e osciloscópio. Já a Figura 17 mostra o painel frontal da caixa de aferição de relé fabricada pela Omicron, modelo CMC256-6, que foi utilizada como fonte de corrente ajustável.

Figura 15 - Esquema de montagem do ensaio de corrente aplicada

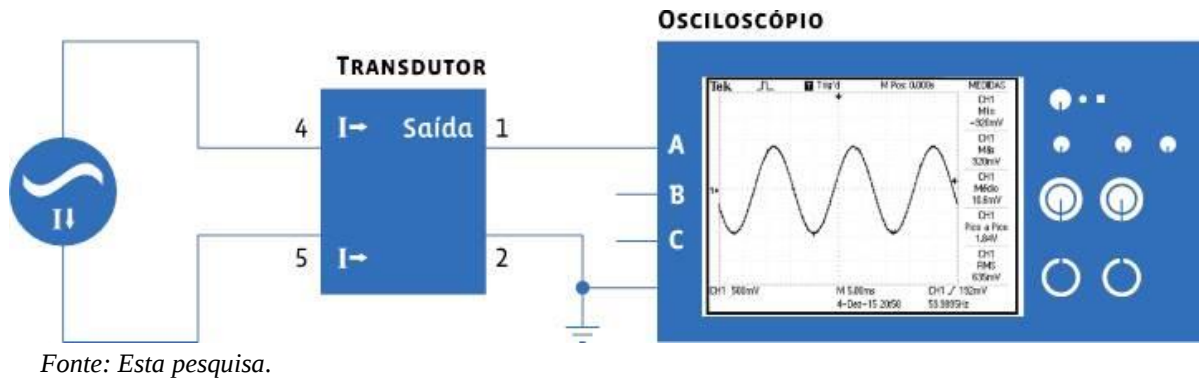
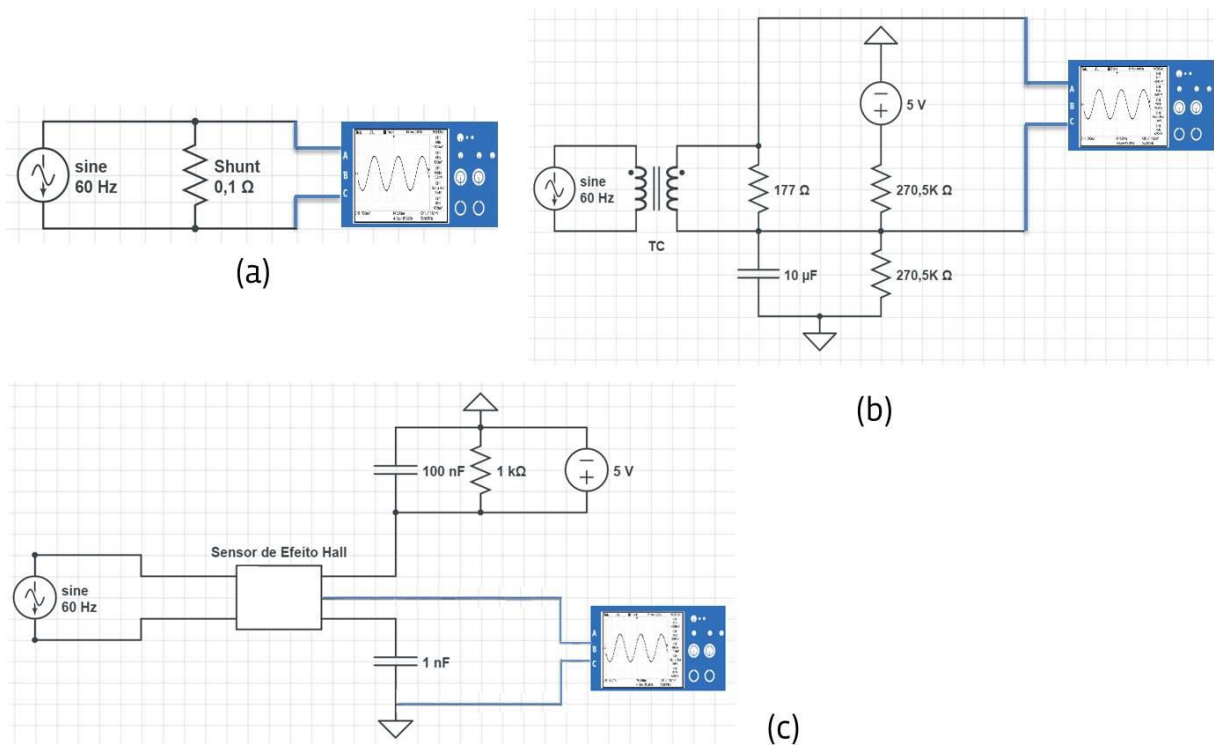


Figura 16 – Os três circuitos utilizados para o ensaio de corrente aplicada. (a) Uso do resistor *shunt*; (b) Uso do TC; (c) Uso do Sensor de efeito *hall*



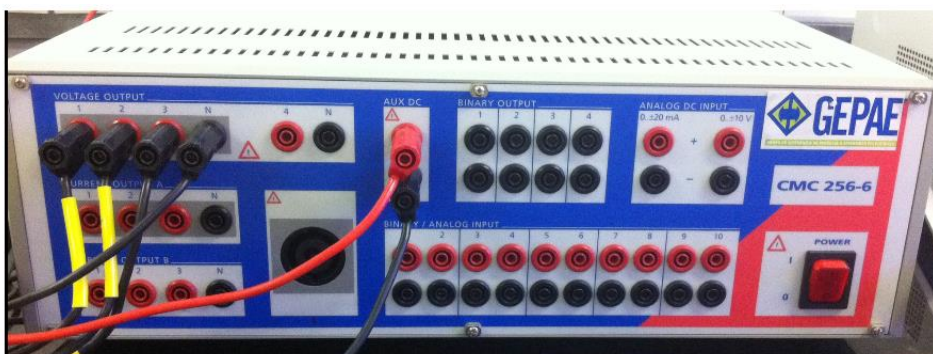
Fonte: Esta pesquisa.

Os procedimentos adotados para o ensaio seguiram as seguintes etapas:

- Realização das conexões, seguindo o diagrama da figura 15;
- Energização dos equipamentos e circuito;
- Aplicação dos valores de corrente, com o auxílio da caixa de teste, figura 17;
- Para cada valor de corrente aplicada foram salvos os valores de todos os pontos que formam a curva senoidal da tensão da saída do circuito com o transdutor, além da imagem do osciloscópio com as informações de medição relevantes, como mostrado na figura 18. Esta etapa fornece informações importantes para análise do ensaio.

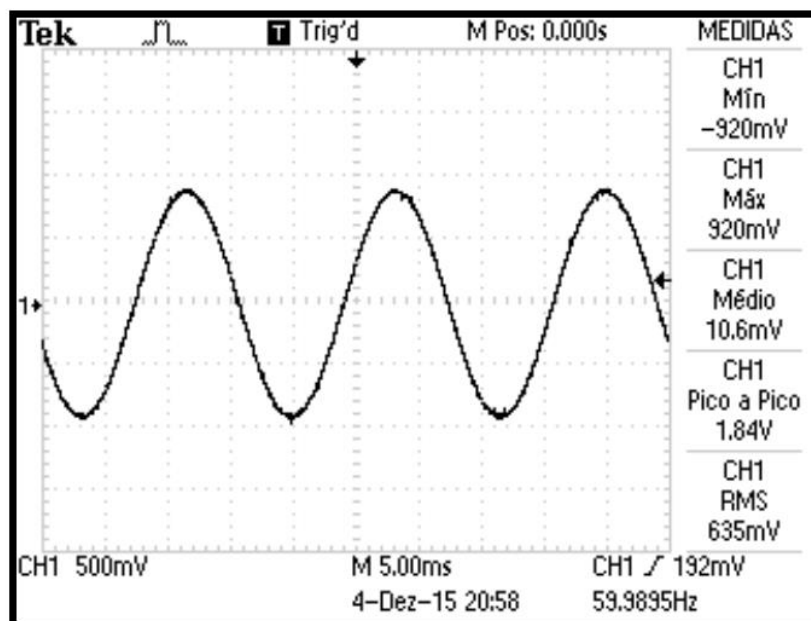
O procedimento descrito acima foi realizado para cada circuito separadamente, isto é, o procedimento foi realizado três vezes: no primeiro momento foi utilizado o sensor de efeito *hall*; no segundo momento, o transformador de corrente como elemento transdutor; e no último momento, o resistor *shunt*.

Figura 17 - Caixa de aferição de relés de proteção Omicron, modelo CMC 256-6



Fonte: Esta pesquisa.

Figura 18 - Tela do osciloscópio com o valor da tensão RMS da saída do circuito com TC, corrente aplicada de 7 A



Fonte: Esta pesquisa.

Como foi mencionado, o equipamento utilizado para aplicação das correntes desejáveis foi a caixa de aferição de relé de proteção Omicron, modelo CMC 256-6 (Figura 17), que foi responsável pela aplicação de corrente e tensões senoidais, ajustáveis em frequência, fase e amplitude. O *software* Omicron Test Universe é responsável pelas configurações e controles do equipamento e é a interface da caixa de teste, este contém diferentes módulos de teste desenvolvidos especificamente para a realização de testes de medidores, relés e transdutores (OMICRON, |s.d.|).

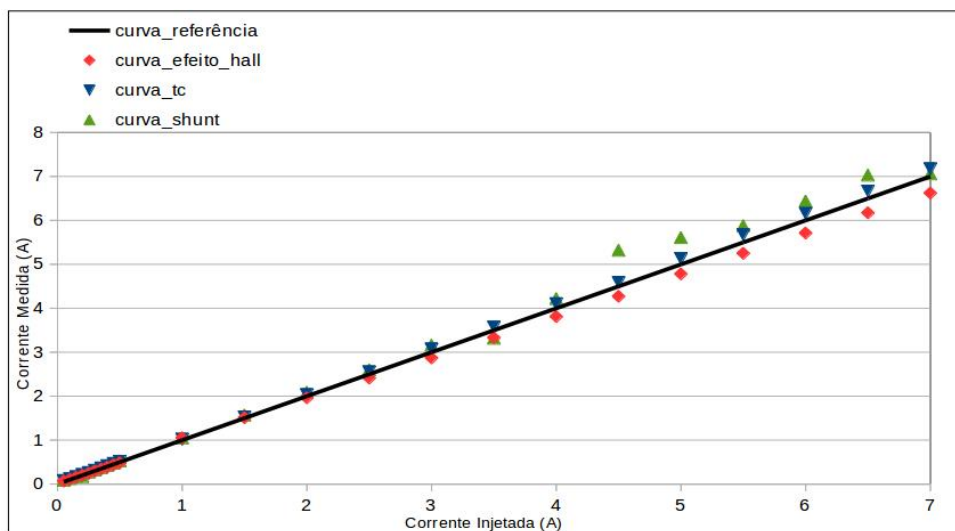
Após a realização do experimento foi necessário selecionar os dados relevantes para a análise. Assim, os dados foram organizados numa tabela, com a inserção dos valores da tensão RMS, correspondente a cada circuito e à corrente verdadeira, que corresponde à corrente determinada pelo usuário e injetada no circuito.

Com o objetivo de observar o comportamento dos transdutores testados, foi elaborado um gráfico que relaciona a corrente verdadeira (eixo das abcissas) e a corrente medida (eixo das coordenadas) (Figura 19). Os transdutores testados foram representados por três cores diferentes (vermelha, azul e verde), uma para cada tecnologia. Vermelho para o transdutor de efeito *hall*, azul para o resistor *shunt* e verde para o transformador de corrente (TC). Foi traçada também uma linha preta que representa a medição real do que está sendo mensurado, ou seja, quanto mais próximo o ponto desta reta, mais exato será o valor medido.

4.4.1 Exatidão

De acordo com Helfrick e Cooper (1994): “Exatidão refere-se ao grau de proximidade ou concordância entre o valor medido e o valor verdadeiro”. Analisando o gráfico (Figura 19), é possível concluir que o transformador de corrente é o transdutor com maior exatidão, ou seja, é o transdutor que fornece valores medidos mais próximos dos valores verdadeiros.

Figura 19 - Análise da exatidão nos valores medidos pelos transdutores



Fonte: Esta pesquisa.

Os erros e incertezas presentes em instrumentos eletrônicos são provenientes das partes envolvidas no sistema: aquisição de sinais, conversão e reconstrução (UFRJ, 2013). O quadro 9 mostra possíveis fontes de erro e incerteza em circuitos eletrônicos.

É possível observar que no sistema de aquisição de sinais uma das fontes de erro é o transdutor utilizado. Logo, em virtude do estudo comparativo entre os três transdutores, é relevante analisar a linearidade e fazer uma análise comparativa desta característica, já que a não linearidade do transdutor resulta em erros e incertezas na medição.

Quadro 9 - Fontes de erro e incertezas em circuitos eletrônicos

<i>Sistema</i>	<i>Fonte de Erro</i>	<i>Descrição</i>
Aquisição de Sinais	Transdutor	Não linearidade
	Interface	Terminação do circuito – contatos
	Amplificador	Erro nos componentes
	Filtro passa baixa	Erro na amplitude em função do ganho e fase
	Qualidade do sinal	Exatidão do sinal
Conversão	Multiplexador	Erros de transferência e inerentes ao componente
	Amostrador	Erros de aquisição e inerentes ao componente
	Resolução	Interpolação do sinal
	<i>Aliasing</i>	Faixa de passagem, ruído
	Filtro	Atenuação devido a amostragem
	Conversor A/D	Erros de quantização
Reconstrução	Conversor D/A	Erros inerentes ao componente
	Filtro	Atenuação devido a reconstrução
	Filtro passa baixa	Erro na amplitude em função do ganho e fase
	<i>Aliasing</i>	Faixa de passagem, ruído
	Resolução	Erro na amplitude do sinal reconstruído

Fonte: Instrumentação e técnicas de medida – UFRJ 2013.

4.4.2 Linearidade

A linearidade é uma característica típica de equipamentos ou sensores cuja relação entre entrada e saída pode ser considerada linear. Assim, a reta é uma forma gráfica que representa essa relação entre a entrada e a saída para resposta nominal. Não é possível fazer a mesma afirmativa para a característica de resposta real (BARP; FLESCHE, 1998), devido às limitações construtivas, pela não idealidade dos fenômenos físicos envolvidos (GONÇALVES Jr.; SOUSA, 2008).

O erro de linearidade tem uma relevância na análise de um equipamento ou sensor de medição, pois através dele é possível analisar as características de resposta dos equipamentos ou sensores. É definido como a diferença entre duas curvas - a reta referência e a curva de calibração - obtida a partir das medições realizadas, ou seja, é um parâmetro que exprime o quanto uma resposta real se afasta de uma reta (FLESCHE, 1999; GONÇALVES Jr., 2000).

Para o cálculo do erro de linearidade é necessário determinar a reta referência. Ainda não há um procedimento único para avaliar o erro de linearidade de um sistema (HECKMANN; FLESCHE, 1998). Pois, é possível obter diferentes valores de erro de

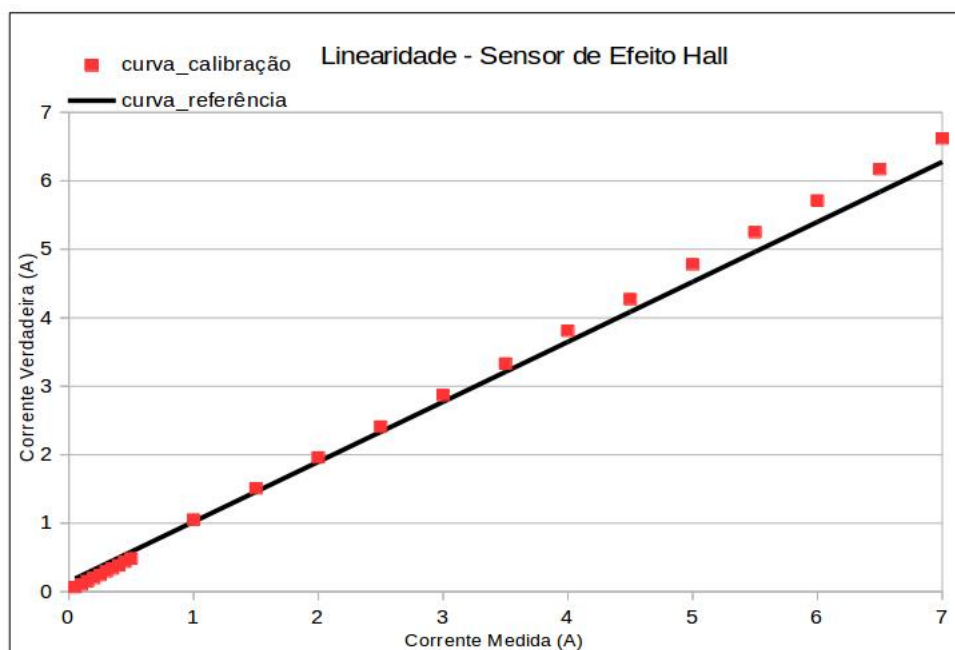
linearidade para um mesmo equipamento de medição através da aplicação de métodos de ajuste diferentes.

A linearidade independente é um dos tipos existentes de especificação de linearidade e, por ser a especificação preferível na maioria dos casos (DOEBELIN, 1976), será utilizada na análise de linearidade dos três sensores de medição de corrente avaliados.

Cálculos foram realizados para encontrar a reta referência de cada sensor. Na linearidade independente o ajuste da reta referência é dado pelo método dos mínimos quadrados. Assim, de posse dos dados das correntes medidas para cada sensor e com os dados de corrente verdadeira, os valores de “a” e “b” da equação que representa a reta referência $y_{ref} = ax + b$ foram calculados. Utilizando a lista com os valores de x foram obtidos os respectivos valores de y_{ref} , já que a lista com os valores de x e os valores de corrente verdadeira para cada sensor foram obtidos no experimento. Com os valores de y_{ref} , foi possível traçar a linha de referência (preta) representada nas figuras 20, 21 e 22, que constituem as respectivas curvas de referência dos sensores de efeito *hall*, transformador de corrente e resistor *shunt*.

Se a curva de calibração de um instrumento para uma determinada entrada não for uma linha reta, ainda assim o mesmo pode ser muito preciso. Em muitas aplicações, no entanto, o comportamento linear é o mais desejável, tendo em vista que a conversão de uma leitura para o valor medido correspondente da entrada é mais conveniente, pois é necessário realizar apenas uma multiplicação por uma constante fixa, em vez de consultar uma curva de calibração não-linear ou calcular o resultado de uma equação de calibração não-linear. Além disso, quando o instrumento é parte de um sistema maior, o comportamento linear das partes geralmente simplifica o projeto e a análise do sistema como um todo. Portanto, especificações que relacionam o grau de conformidade a um comportamento linear são comuns (DOEBELIN, 1976). Na figura 20 é possível analisar a característica linear do transdutor de efeito *hall*. Nela, alguns pontos da curva de calibração não coincidem com a reta referência.

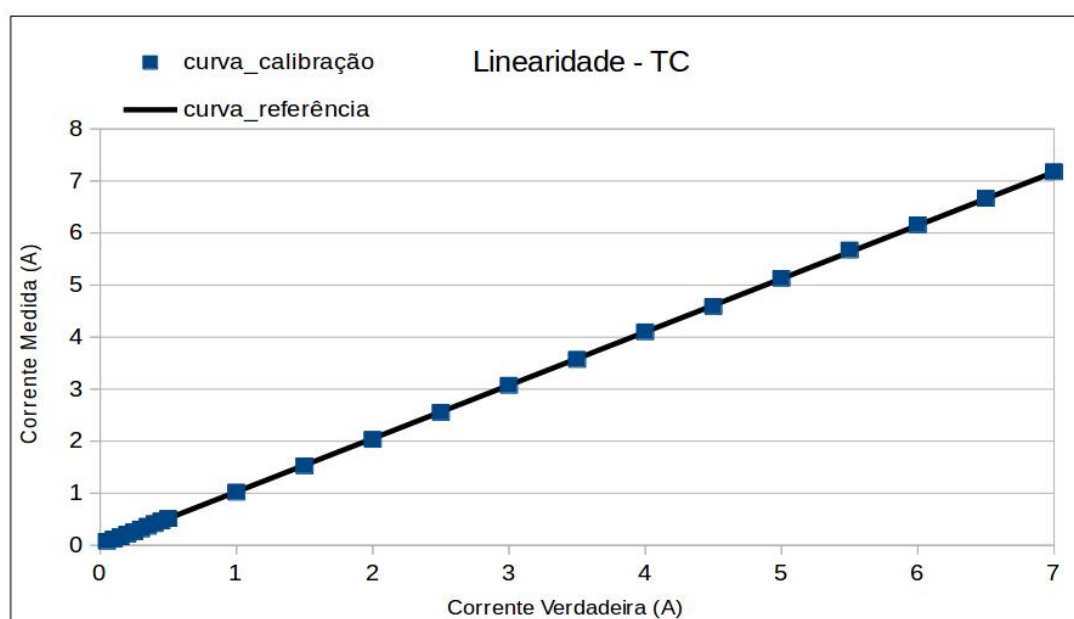
Figura 20 - Corrente medida x corrente verdadeira do sensor efeito hall



Fonte: Esta pesquisa.

A figura 21 ilustra a relação da corrente verdadeira com a corrente medida para a análise da linearidade do transformador de corrente. A curva de calibração tem aspecto linear e a maior parte dos pontos que representam a curva de calibração estão contidos na curva referência.

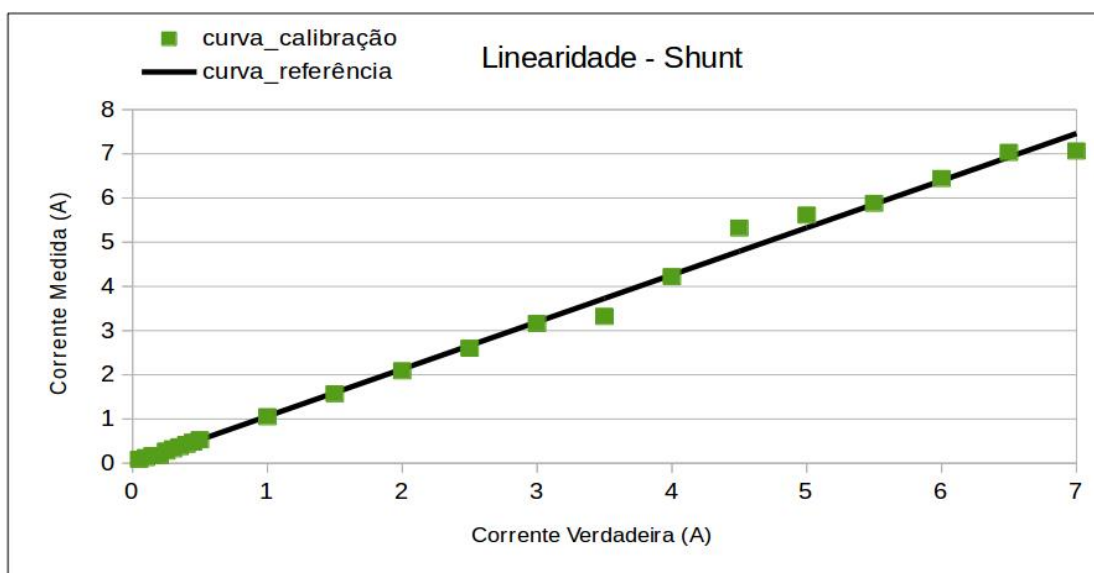
Figura 21 - Corrente medida x corrente verdadeira do TC



Fonte: Esta pesquisa.

Na figura 22 é possível observar, a partir da medição da corrente de 3,5 A, os pontos da curva de calibração que passam a não coincidir com a curva referência. Na prática, o resistor já começava a esquentar. O aumento da temperatura interfere diretamente no valor da resistência do componente prejudicando, assim, o resultado da medição.

Figura 22 - Corrente medida x corrente verdadeira *shunt*



Fonte: Esta pesquisa.

Após a análise dos gráficos representados nas figuras 20, 21 e 22, foi possível estabelecer uma relação qualitativa entre as linearidades dos sensores. O TC apresenta uma linearidade muito boa, pois maior parte dos pontos da curva de calibração coincide com a curva referência, já o sensor de efeito *hall* apresenta uma linearidade boa quando comparamos as três curvas e o resistor *shunt*, por apresentar menor quantidade de pontos da curva de calibração na curva referência tem uma linearidade razoável (Quadro 10).

Quadro 10 - Análise qualitativa da linearidade dos transdutores

Transdutor	Linearidade
Sensor de efeito <i>hall</i>	Boa
TC	Muito boa
Resistor <i>shunt</i>	Razoável

Fonte: Esta pesquisa.

Normalmente, os fabricantes de sensores e equipamentos especificam a linearidade em termos do percentual de não linearidade. Mas ela também pode ser especificada através de um valor percentual típico nominal do instrumento; um valor percentual máximo da faixa nominal de saída do instrumento; especificação da linearidade independente, através da informação do $\pm A\%$ da leitura; $\pm B\%$ da faixa nominal ou; o maior valor entre $\pm A\%$ da leitura e $\pm B\%$ da faixa nominal.

Para calcular o percentual de não linearidade é preciso calcular alguns parâmetros, já que o cálculo da não linearidade é dado pela equação 14.

$$\text{Não Linearidade (\%)} = \frac{\text{Desvio}_{\text{Máx.}}}{\text{Norm}} \cdot 100\% \quad (\text{Equação 14})$$

Para encontrar o $\text{Desvio}_{\text{Máx.}}$ é necessário calcular os Desvios de saída entre o valor medido pela curva de calibração e a reta referência (Equação 15):

$$\text{Desvio}_i = |y_i - y_{\text{ref}}| \quad (\text{Equação 15})$$

Logo, o $\text{Desvio}_{\text{Máx.}}$ será o maior valor entre os valores do Desvio_i calculados. A *Norm* é o normalizador que pode ser a saída atual, o fundo escala da saída ou a faixa dinâmica de saída. Para o sistema, temos que calcular (Equação 16 e Equação 17):

$$A (\%) = \frac{\pm \text{Desvio}_{\text{Máx.}}}{y_{\text{Máx.}}} \cdot 100\% \quad (\text{Equação 16})$$

$$B (\%) = \frac{\pm \text{Desvio}_{\text{Máx.}}}{\text{Fundo de escala de saída}} \cdot 100\% \quad (\text{Equação 17})$$

Logo, a não linearidade é representada pelo maior valor entre A% e B% (Quadro 11).

Quadro 11 – Análise quantitativa da linearidade dos transdutores, através do cálculo de A% e B%

Transdutor	Não linearidade	
	A%	B%
Sensor de efeito <i>hall</i>	8,06	6,64
TC	0,66	0,37
Resistor <i>shunt</i>	9,86	7,49

Fonte: Esta pesquisa.

Após o cálculo da não linearidade é possível analisar quantitativamente as linearidades dos transdutores, já que o que tiver menor valor da não linearidade resultará numa maior linearidade. Com o quadro 11 é possível concluir que o valor A% corresponde ao valor da não linearidade nos três casos.

A análise qualitativa coincidiu com a análise quantitativa (Quadros 10 e 11). Mas, com a análise quantitativa é possível mensurar quão linear é um determinado transdutor conhecendo assim, a origem do resultado obtido. O grau de qualidade estipulado na análise qualitativa é subjetivo por isso foi relevante para a pesquisa realizar a análise quantitativa.

4.4.2 Erro de medição

No ensaio foram realizadas medições com vinte e três valores diferentes de corrente. Cada medição foi realizada uma única vez, com cada um dos três circuitos. Comparando os valores medidos para cada transdutor de uma mesma corrente foi observado que estes valores, além de diferentes entre si, eram também diferentes entre o valor verdadeiro. Ou seja, o valor de corrente medido era diferente do valor conhecido. Logo, foi necessária a análise do erro envolvido na medição para compreender melhor a sua natureza, comparar a percentagem de erro de medição de cada transdutor e avaliar qual a faixa de corrente em que cada circuito tem menor erro.

O erro de medição é definido como a diferença entre o valor indicado pelo sistema e o valor verdadeiro do mensurando (GONÇALVES Jr.; SOUSA, 2008). É possível calcular o erro de medição percentual de uma forma muito simples, através da equação 18.

$$Erro_{Medição}(\%) = \frac{|I_{Medida} - I_{VV}|}{I_{VV}} \cdot 100\% \quad (\text{Equação 18})$$

Sendo:

$Erro_{Medição}(\%)$ erro de medição percentual

I_{Medida} valor da corrente do sistema de medição

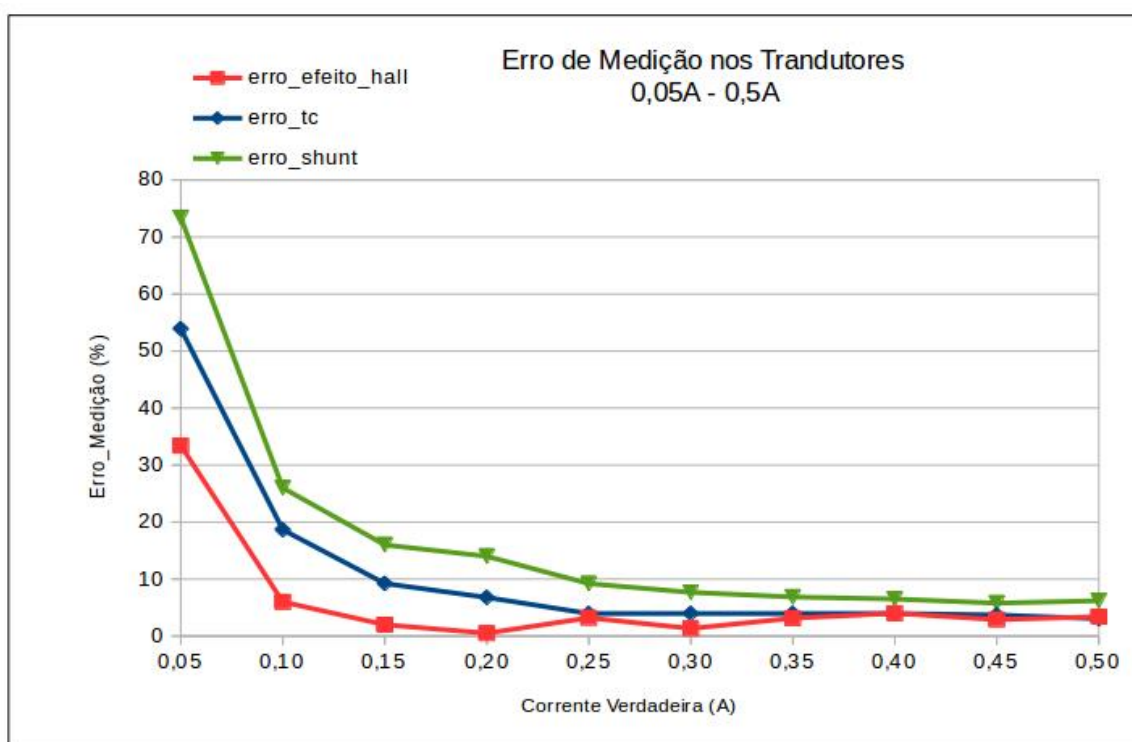
I_{VV} valor verdadeiro da corrente

Foi observado, após os cálculos do erro de medição percentual, que seus valores não são constantes. Esse comportamento já era previsto, devido a vários fatores aleatórios: ação do operador, variações das condições ambientais, passagem do tempo etc. (GONÇALVES Jr.; SOUSA, 2008). Foram elaborados os gráficos (Figuras 22 e 23), onde são representados os

erros de medição percentual nas faixas de 0,05 A até 0,5 A e 1 A até 7 A, respectivamente. Através deles, é possível observar a variação dos erros de medição. Para facilitar a análise detalhada das faixas de mili ampères para a faixa de ampères, optou-se por representar os resultados em dois gráficos, separadamente.

Na figura 23 é possível observar que os três circuitos de medição apresentam um erro de medição percentual bastante elevado quando a corrente verdadeira é 0,05 A. Este comportamento é explicado pela vulnerabilidade dos sinais de correntes baixas a ruídos e interferências. No intervalo de corrente de 0,05 A até 0,5 A o circuito com o sensor de efeito *hall* apresentou menor erro de medição percentual (curva vermelha). Já o circuito com resistor *shunt* apresentou o maior erro de medição percentual nesse mesmo intervalo de corrente. A partir do valor verdadeiro de 0,25 A, o erro de medição dos três circuitos ficou abaixo de 10%.

Figura 23 - Corrente verdadeira x erro de medição de transdutores numa faixa de corrente de 0,05A até 0,5A

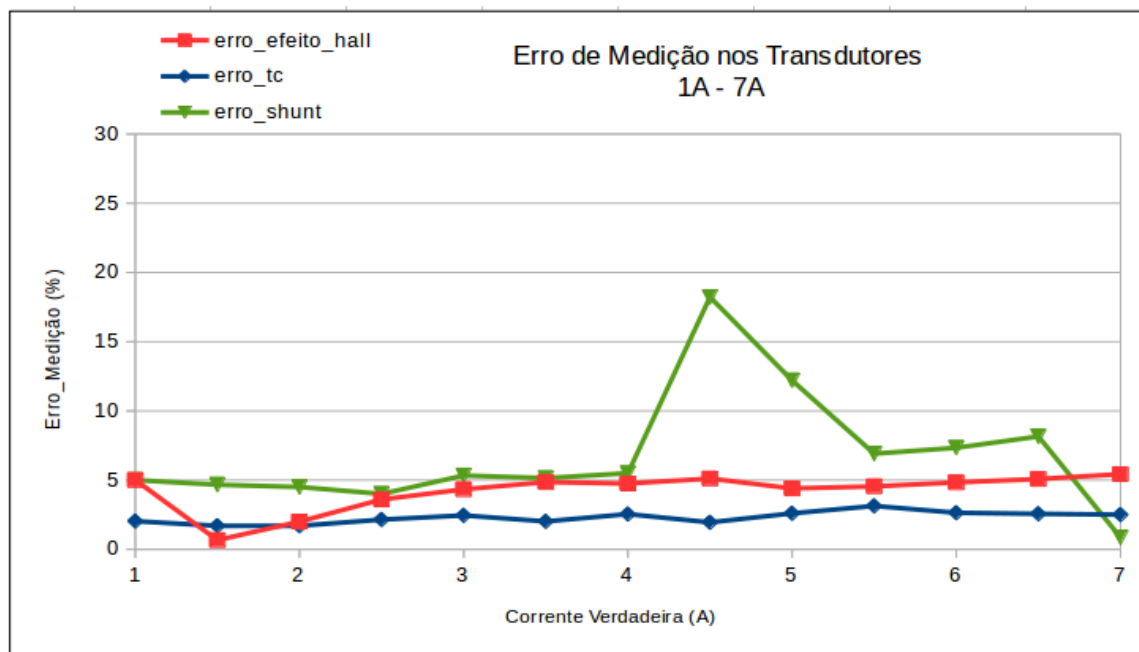


Fonte: Esta pesquisa.

Na figura 24 os valores do erro de medição com o sensor de efeito *hall* e o transformador de corrente variam no máximo 5%. O resistor *shunt* apresentou um comportamento um pouco diferente no intervalo de corrente de 4A até 7A, tendo um erro de medição de 18,22% neste intervalo. Este comportamento é devido às características do

resistor utilizado, que permite uma potência máxima de 2 W. Assim, correntes maiores que 4,5 A apresentarão erros de medição mais imprevisíveis.

Figura 24 - Análise do erro de medição dos transdutores no intervalo de medição de 1 A até 7 A



Fonte: Esta pesquisa.

4.3 Aplicação de método multicritério para a escolha do transdutor

Os transdutores, quando utilizados em circuitos de medição, devem apresentar uma precisão compatível com o tipo de medição desejada, assim como uma boa linearidade em toda faixa de utilização e uma taxa de distorção do sinal principal irrelevante para não interferir no sinal de saída (ANDREOLI, 2005).

Cada transdutor apresenta suas características, como faixa de operação, linearidade, sensibilidade, incerteza de medição, condições de funcionamento, estabilidade, repetitividade, velocidade de resposta, potência termoelétrica, exatidão, custo etc. Essas características apresentam uma influencia direta na aplicação. Logo, foram selecionadas custo, tamanho, isolamento galvânica, erro de medição e linearidade como as características mais influentes no projeto do protótipo do *plug* com interface, as características eleitas foram conhecidas como os critérios para decisão do transdutor mais adequado para o projeto.

Para auxiliar na escolha do transdutor foi utilizado o método multicritério de apoio à decisão *Smarter*, conforme Almeida (2011) atribui ponderações aos critérios pré-estabelecidos através de pesos, procedimento este chamado de ROC (*Ranking Ordered*

Centroid). O procedimento chamado ROC (*Ranking Ordered Centroid*), consiste na aplicação da equação abaixo (Equação 19):

$$w_k = \frac{1}{m} \sum_{i=k}^m \frac{1}{i} \quad (\text{Equação 19})$$

m representa o nº de critérios e w cada peso aplicado aos respectivos critérios, sendo $w_1 > w_2 > w_3 > w_k$, conforme Almeida (2011). Na figura 25 é possível observar os valores dos pesos obtidos pelo procedimento ROC dos respectivos critérios em ordem de prioridade. A prioridade foi estabelecida previamente de acordo com o impacto na aplicação da pesquisa.

Figura 25 - Procedimento ROC para definição de peso por critério



Fonte: Esta pesquisa.

Após estabelecido o peso para cada critério, foram levantados os valores de cada critério para cada tipo de transdutor, apresentando-os de forma que representassem a melhor situação quanto menor fosse o valor. Após o preenchimento dos valores (Quadro 12), foi realizada a normalização dos valores de cada critério pelo valor total e em seguida, realizada a operação soma produto para calcular a priorização dentre os transdutores. Aquele que obteve o menor resultado e, portanto, o definido pelo procedimento, foi o transdutor de efeito *hall*.

Quadro 12 - Matriz de decisão da escolha do transdutor

TRANSDUTOR	VALORES POR CRITÉRIOS					NORMALIZAÇÃO PELO VALOR TOTAL						PRIORIZAÇÃO
	Custo (\$)	Tamanho (mm²)	Isolamento (inexistência)	Erro de Medição (classificação)	Não Linearidade (%)	TRANSDUTOR	Custo	Tamanho	Isolamento	Erro de Medição	Não Linearidade	
TOTAL	17	1953	1	6	19	CONSTANTES DE ESCALA	0,46	0,26	0,16	0,09	0,04	
Efeito hall	4,82	29,40	0,00	2,00	8,06	Efeito hall	0,29	0,02	0,00	0,33	0,43	0,18
TC	11,50	1824,00	0,00	1,00	0,66	TC	0,70	0,93	0,00	0,17	0,04	0,57
Shunt	0,19	100,00	1,00	3,00	9,86	Shunt	0,01	0,05	1,00	0,50	0,53	0,24

Fonte: Esta pesquisa.

4.4 Análise dos resultados

Na literatura, quando o tema é a comparação das características entre os transdutores de corrente (sensor de efeito *hall*, TC, *shunt*, bobina de *rogowski*, GMR, GMI) na sua maioria os resultados expostos são qualitativos, com poucos detalhes do processo utilizado para obtenção dos resultados, além da inexistência de uma clareza da definição do grau de qualidade normalmente utilizado nos trabalhos (KOON, 2002; XIAO et al., 2003).

O método de multicritério foi responsável pela obtenção de resultados quantitativos para a indicação do transdutor mais apropriado para a aplicação desejada. O peso é responsável por estabelecer as prioridades de cada critério, logo, seu valor será alterado de acordo com a aplicação do transdutor.

Com o ensaio comparativo foi possível obter os valores qualitativos e quantitativos das características: erro de medição, não linearidade, para inserir na matriz de decisão, juntamente com os valores obtidos previamente do custo e tamanho dos sensores utilizados.

A análise comparativa dos transdutores permitiu eleger o sensor de efeito *hall* como sendo o transdutor mais adequado às necessidades do desenvolvimento de *plug* com interface.

5 DESENVOLVIMENTO DE *PLUG* COM INTERFACE

Este capítulo é dedicado à explicação do desenvolvimento do *plug* com interface, através do detalhamento da arquitetura do sistema, funcionamento do sistema de medição e de proteção, além das especificações técnicas do *plug*. São apresentados também os resultados experimentais para a validação dos sistemas de medição e proteção, juntamente com a utilização da interface desenvolvida.

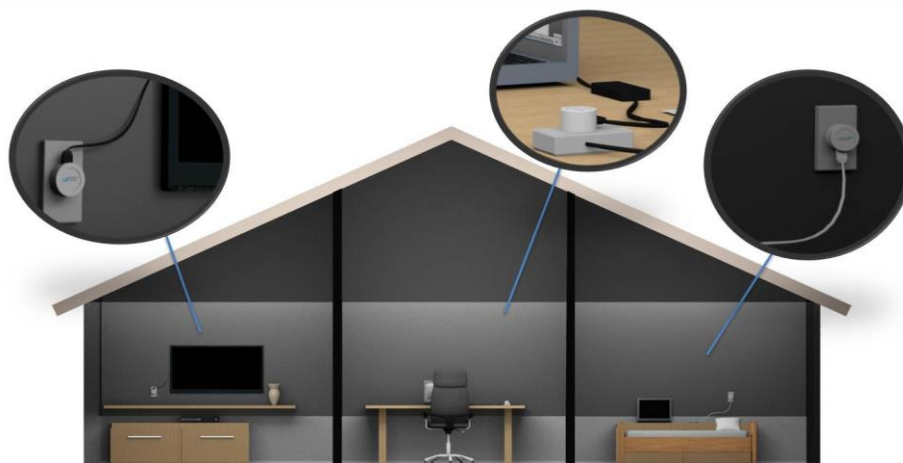
5.1 Visão geral do sistema

O sistema desenvolvido nesse projeto de pesquisa está inserido em um cenário residencial. Visa proteger as cargas no interior de uma casa contra sobrecarga e monitorar a intensidade de corrente dos equipamentos que estão conectados ao *plug*.

Para que o sistema possa funcionar é necessário que o usuário faça a aquisição de um ou mais *plugs* (rede de *plugs*), conecte-os nas cargas em diferentes cômodos (Figura 26) do apartamento, tenha acesso a internet, um computador e baixe no computador o software da interface gráfica.

A medição e a proteção são realizadas individualmente, pois cada *plug* está conectado a uma única carga. Os dados da intensidade de corrente e ocorrência de surtos são enviados remotamente para o computador e armazenados em um banco de dados localizado na internet. Desta forma se usuário com acesso a internet estiver viajando, ou em outro lugar, continuará tendo acesso as informação, monitorando sua residência. As “coisas” estão conectadas a uma rede, produzindo e processando informação em tempo real e de forma autônoma o usuário precisa apenas visualizar a informação quando desejar.

Figura 26 - *Plugs* conectados em diferentes cargas

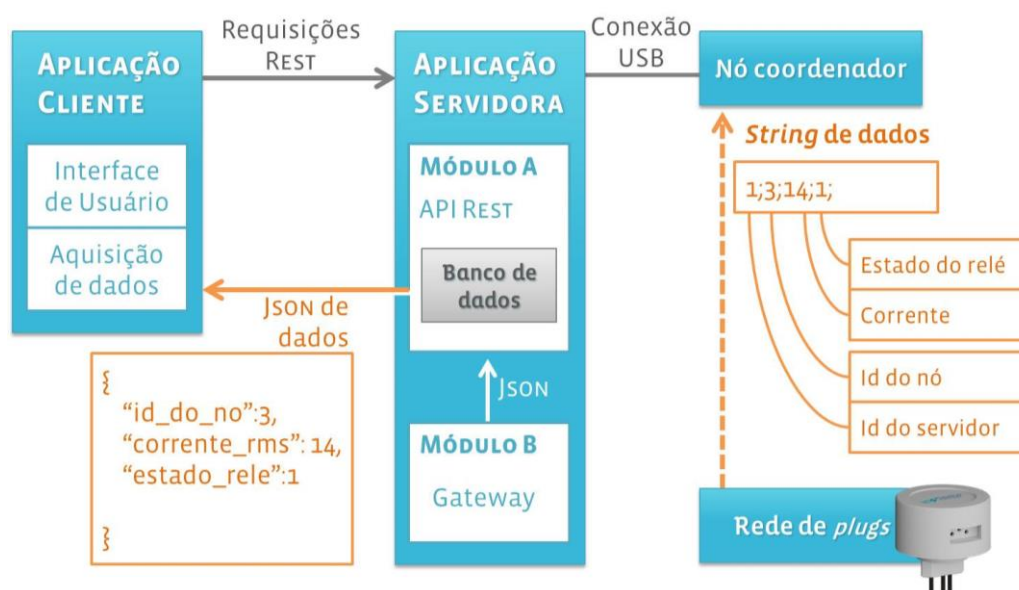


Fonte: Esta pesquisa.

5.2 Arquitetura

Depois de ter tido uma visão geral do funcionamento do sistema desenvolvido nesta pesquisa é relevante conhecer as partes que compõem esse sistema e como essas partes se comunicam. Desta forma, foi estruturado um diagrama representado na figura 27, os retângulos representam as partes: rede de *plugs*; nó coordenador; aplicação servidora formada pelo módulo A e módulo B; e a aplicação cliente constituída pela aquisição de dados e interface gráfica e as setas representam como a comunicação entre essas partes são realizadas.

Figura 27 - Arquitetura do *plug* com interface e *software* envolvidos



Fonte: Esta pesquisa.

Essas aplicações permitem ao usuário visualizar e/ou trabalhar com os dados oriundos das medições dos *plugs*.

Os nós medidores, ou seja, os *plugs*, medem a intensidade de corrente dos dispositivos conectados a eles e são responsáveis por enviar periodicamente uma mensagem com informações pré-definidas (e.g. IDs, corrente rms, estado do relé). Essas informações são formatadas na forma de *string* e separadas ordenadamente por “;” (Figura 27). As mensagens são enviadas ao nó coordenador da rede, as quais são acessadas pela aplicação servidora por meio da porta USB que o nó coordenador dispõe.

A aplicação servidora possibilita que as aplicações cliente tenham acesso aos dados recebidos pelo nó coordenador, por meio da interface REST (*Representational State Transfer*) desta. Esta aplicação é constituída por dois módulos principais:

- Módulo B: é um *gateway* de transição entre a rede IEEE802.15.4 dos *plugs* e a rede TCP/IP na qual as aplicações clientes se encontram. O *gateway* recebe os

dados do nó coordenador via USB e reformata a *string* de dados supracitada em um JSON (*JavaScript Object Notation*), de modo a facilitar a integração com aplicações que queiram fazer uso dos dados recebidos.

O *gateway* então envia o JSON, para o módulo A, no corpo de uma requisição HTTP do tipo POST. Um exemplo de uma *string* de dados recebida e do JSON equivalente criado pelo *gateway* podem ser observados na figura 26.

- Módulo A: expõe uma API (*Application Programming Interface*) REST. A qual implementa requisições GET (leitura), POST (inserção), PUT (atualização) e DELETE (remoção). O serviço web foi implementado em *Python* e utiliza o MongoDB versão 3.2 para o armazenamento dos dados recebidos do módulo B. O MongoDB é um banco de dados NoSQL baseado em documentos e foi escolhido pois permite o uso nativo de JSONs (MONGODB, [s.d.]). Os *endpoints* expostos pela API bem como suas respostas à cada requisição HTTP, estão no quadro 13.

Quadro 13 – Descrição dos *endpoints* expostos pela API

Endpoint	GET	POST	PUT	DELETE
/dispositivos	Lista todos os dispositivos cadastrados no banco. Por padrão divide os dispositivos em grupos de 25 (páginas) e retorna o primeiro grupo. A ordem padrão de exibição é do dispositivo mais recente.	Permite adicionar um novo dispositivo, enviando um formulário/ JSON com os dados necessários. Se o processo for bem sucedido uma mensagem informativa é retornada.	Não permitido.	Não permitido.
/dispositivos/<id>	Retorna um JSON contendo os dados dos dispositivos com o ID especificado.	Não permitido.	Permite a atualização dos dados do dispositivo com o ID especificado. Os novos dados devem ser enviados em um formulário/ JSON. Se o processo for bem sucedido uma mensagem informativa é retornada.	Remove o dispositivo com o ID especificado. Se o processo for bem sucedido uma mensagem informativa é retornada.
/medicoes	Lista todas as medições cadastradas no banco. Por padrão divide as medições em grupos de 25 (páginas) e retorna o primeiro grupo. A ordem padrão de exibição é da medição mais recente.	Permite adicionar uma nova medição, enviando um formulário/ JSON com os dados necessários. Se o processo for bem sucedido uma mensagem informativa é retornada.	Não permitido.	Não permitido.
/medicoes/<id>	Retorna um JSON contendo os dados da medição com o ID especificado.	Não permitido.	Permite a atualização dos dados da medição com o ID especificado. Os novos dados devem ser enviados em um formulário/ JSON. Se o processo for bem sucedido uma mensagem informativa é retornada.	Remove a medição com o ID especificado. Se o processo for bem sucedido uma mensagem informativa é retornada.

Fonte: Esta pesquisa.

A aplicação cliente também possui dois módulos: o módulo de aquisição de dados e o módulo de interface de usuário.

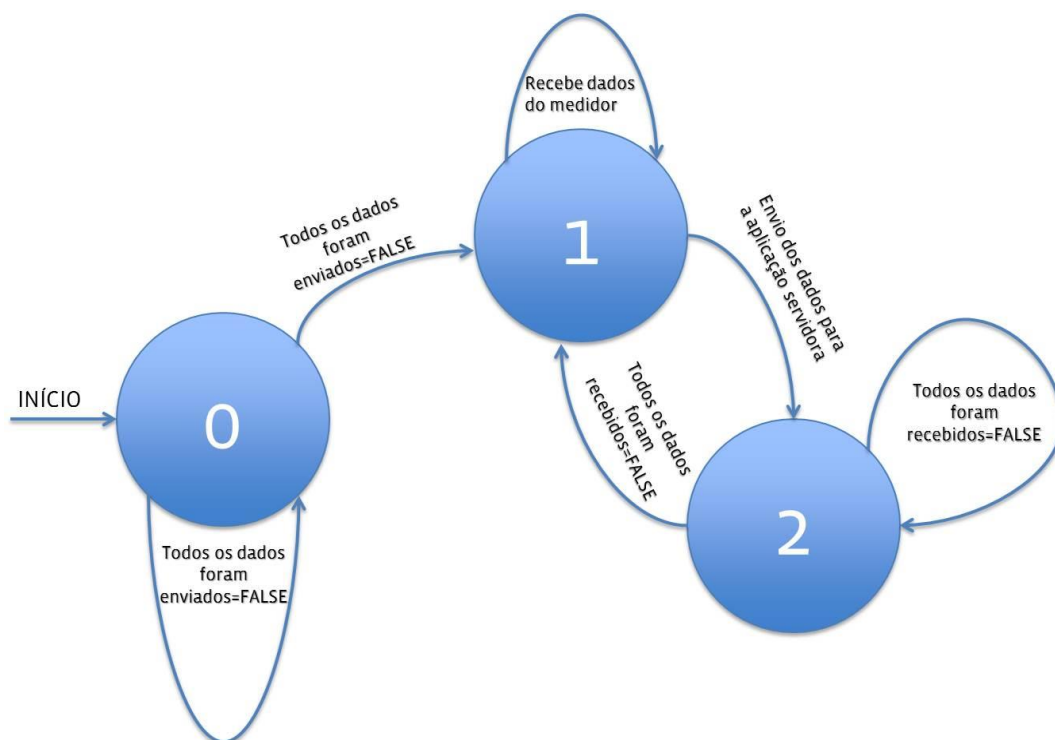
A aquisição de dados é responsável pelo processo de obtenção e processamento dos dados da aplicação servidora. Os dados são obtidos via requisições HTTP do tipo GET, assim como especificado no quadro 13. Como resposta, um JSON é recebido e as informações podem ser extraídas, de forma que sejam disponibilizadas para o usuário na interface gráfica.

O *design* escolhido, que separa as aplicações foi definido com o intuito de melhorar a modularização do sistema e facilitar a integração de soluções de terceiros, possibilitando o reuso do sistema desenvolvido.

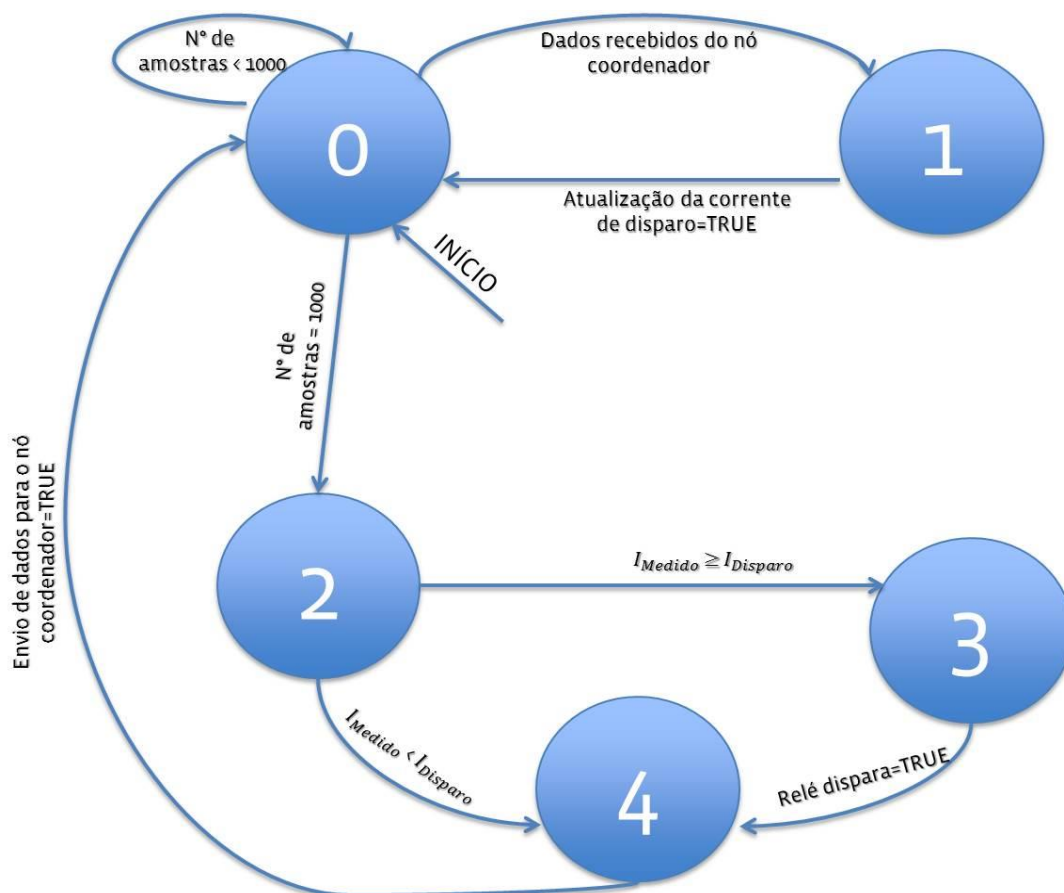
É possível observar após o detalhamento da arquitetura que o sistema proposto é resultado de esforços tanto a nível de *hardware* quanto de *software*, explicitado na figura 26. O *hardware* sendo representado pelo *plug* desenvolvido, enquanto que o *software* é função do *firmware* do *plug*, nó coordenador, da aplicação servidora e da aplicação cliente.

Máquinas de estado são normalmente utilizadas para direcionar o funcionamento de softwares, determinando uma sequência de execução de um programa. Nas figuras 28 e 29 estão representadas as máquinas de estado do *firmware* do nó coordenador e do nó medidor respectivamente.

Figura 28 - Máquina de estado do *firmware* do nó coordenador



Fonte: Esta pesquisa.

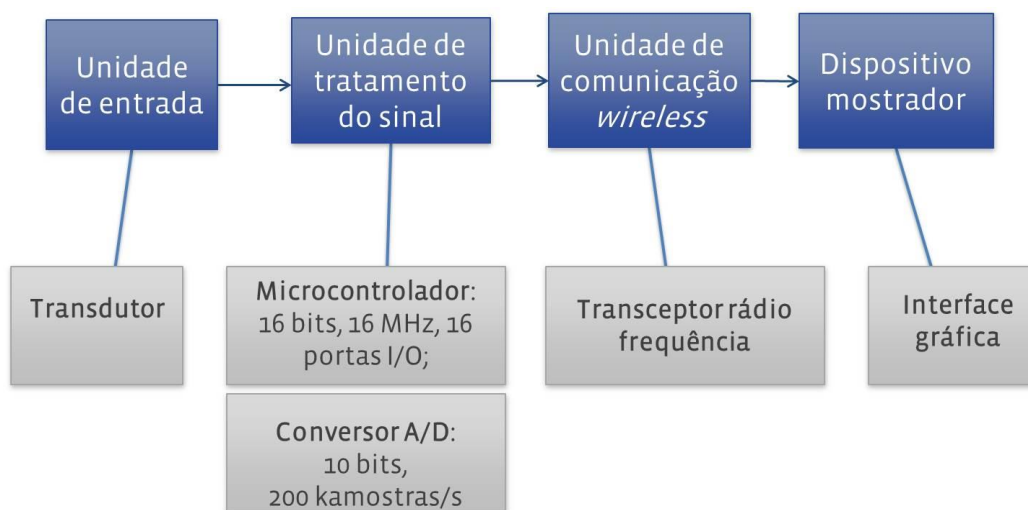
Figura 29 - Máquina de estado do *firmware* do *plug*

Fonte: Esta pesquisa.

5.3 Sistema de medição

Para que os *plugs* funcionem na forma desejada foi desenvolvido um sistema de medição embarcado no *plug*. O sistema de medição proposto utiliza o método da indicação, já que o valor proporcional ao mensurando é exibido na tela de um computador, para o usuário (ALBERTAZZI, 2008). Os módulos funcionais do medidor projetado são: transdutor, unidade de tratamento do sinal, unidade de comunicação *wireless* e dispositivo mostrador (Figura 30).

Figura 30 – Módulos funcionais do medidor de corrente



Fonte: Esta pesquisa.

A unidade de entrada do sistema de medição é responsável em gerar um sinal proporcional ao valor do mensurando. É um módulo importante, pois está diretamente relacionado com a precisão da medição. É formado por um transdutor de efeito *hall*, invasivo, capaz de suportar corrente nominal de 20 A, apresenta um encapsulamento reduzido, facilitando projetos compactos. A escolha do transdutor está associada a aplicação do projeto, no qual será utilizado, assim foi feito alguns estudos das características de três tecnologias de sensores diferentes e com o auxílio do método multicritério e de uma matriz de decisão o transdutor mais adequado foi selecionado.

A unidade de tratamento do sinal é formada por um microprocessador e por um conversor analógico digital (ADC). Responsável por receber o sinal gerado pelo sensor de corrente processá-lo e convertê-lo em um sinal digital.

O microprocessador utilizado foi de baixo custo, contendo 16 bits de largura de barramento de dados, frequência máxima de operação 16 MHz e 16 portas de I/O. O ADC utilizado tem uma resolução de 10 bits, 2000k amostras/s e apresenta um nível de quantização igual a 2,44 mV.

Para o cálculo da frequência de amostragem foi necessário primeiramente estabelecer quantos harmônicos seriam considerados e obedecer ao teorema da amostragem de Nyquist. Foi definido que o instrumento de medição de corrente avalie um espectro harmônico que considere desde a componente fundamental até a 8ª ordem harmônica. Desta forma, para não haver perda de informação do sinal reconstituído posteriormente, é preciso que a frequência de amostragem (f_s) do sinal analógico seja maior que o dobro da largura de banda (B) desse

sinal, teorema da amostragem de Nyquist (OPPENHEIM; SCHAFER, 2012), isto é (Equação 20):

$$f_s \geq 2 \cdot B \quad (\text{Equação 20})$$

Assim, como a largura de banda tem que ser proporcional à componente fundamental, que foi de 60 Hz, $B = 60 \times 8 = 480 \text{ Hz}$, e para respeitar o teorema da amostragem de Nyquist (Equação 20), $f_s > 960 \text{ Hz}$, foi escolhida uma frequência de amostragem de 1 kHz. Isto quer dizer que o intervalo medição foi de 1 ms.

A unidade de comunicação será responsável por enviar informações para que o usuário possa visualizar os dados de corrente medida e de ocorrência de falhas. Este módulo é formado por um transceptor RF (rádio frequência), o qual implementa o protocolo IEEE802.15.4.

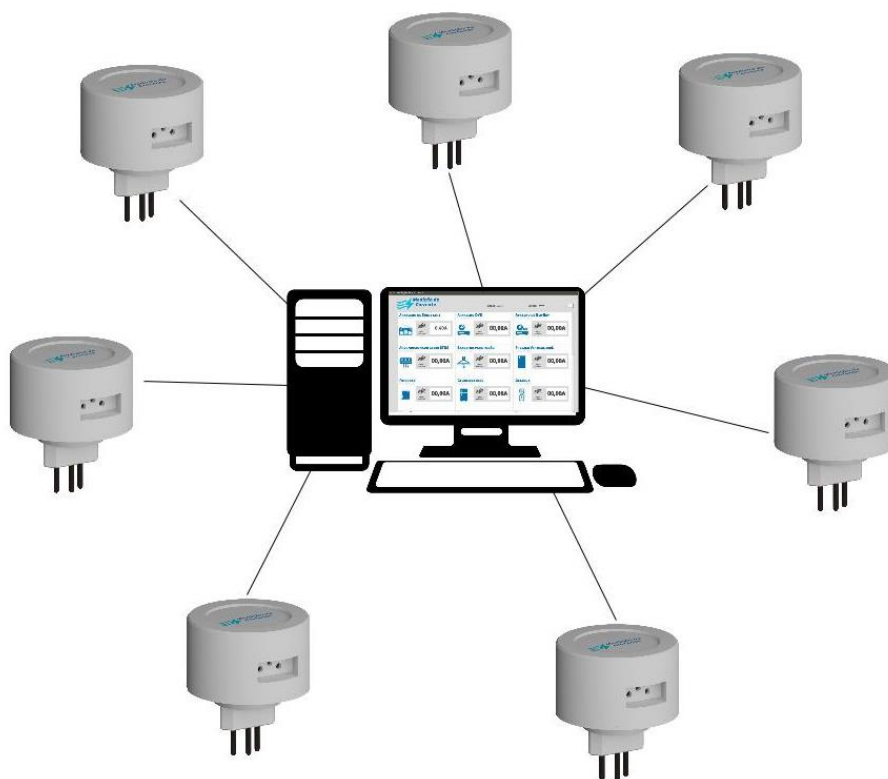
O sistema de medição realiza uma medição RMS, para isso é necessário que o sistema colete um número mínimo de amostras equivalente a um ciclo. Através da equação 21, o valor da corrente RMS é calculada. Foi escolhido trabalhar com 60 ciclos, logo, o período para o cálculo da corrente é de um segundo e são coletadas 1000 amostras, pois como o período de um ciclo é $1/60=16,7 \text{ ms}$ e as medições são realizadas a cada 1 ms, então, 16,7 amostras são coletadas em um ciclo, por fim basta multiplica por 60 que é o número de ciclos que será analisado e o valor total de amostras analisadas será determinada.

$$i_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_n^2} = \sqrt{\frac{i_1^2 + i_2^2 + \dots + i_N^2}{N}} \quad (\text{Equação 21})$$

Em que i é a corrente coletada a cada 1 ms, N é o número de amostras coletadas para o cálculo da corrente RMS.

A topologia de rede utilizada para o uso de uma rede de medidores de corrente é a tipo estrela. Esta topologia é caracterizada pela centralização do processo de informação. No sistema desenvolvido as conexões físicas entre os componentes foram realizados da seguinte forma, um nó coordenador e diversos nós medidores, os quais tem a comunicação controlada pelo nó coordenador (Figura 31). A topologia da rede foi escolhida devida as características de comunicação dos componentes envolvidos no sistema, *plugs* e nó medidor. Pois os mesmos conseguem trocar informações a uma distância máxima de 15 m, considerando os obstáculos, como, paredes, equipamentos, etc. Como o cenário da aplicação do sistema é um cenário residencial, a comunicação com a topologia escolhida irá funcionar devidamente.

Figura 31 - Tipo estrela



Fonte: Esta pesquisa.

5.4 Sistema de proteção

Um das funcionalidades desejáveis é que fosse possível agregar uma proteção adicional para as cargas, instalações e para as pessoas. Parra isso foi desenvolvido um sistema de proteção baseado na mensuração da intensidade de corrente, isto é, quando a corrente medida for igual a corrente de disparo um comando de disparo irá se agregar ao circuito defeituoso minimizando o dano e evitando maiores consequências.

Todo sistema de proteção de sobrecorrente apresenta dois parâmetros de configuração:

- Proteção instantânea: curto circuito, quando é preciso eliminar o defeito o mais rápido possível;
- Proteção temporizada: sobrecarga, quando não é necessário atuar de maneira imediata;

O sistema de proteção desenvolvido é focado na proteção contra sobrecarga, voltada diretamente para a carga diferente do que acontece com os equipamentos de proteção que é específico para a proteção da rede elétrica, por exemplo, os disjuntores termomagnéticos.

Para que o sistema de proteção atue corretamente é necessário escolher uma corrente de disparo adequada, bem como fazer os cálculos do tempo máximo para a atuação. A corrente de disparo está relacionada diretamente com as características elétricas da carga e é definida como a corrente que ativará o sistema de proteção, isto é, se o sistema identificar uma corrente maior ou igual a corrente de disparo preestabelecida o componente de proteção será disparado e o circuito do *plug* abrirá impedindo que nenhuma corrente passe para a carga, retirando a carga defeituosa do circuito, evitando que a sobrecarga evoluísse para um incêndio.

Para a escolha da corrente de disparo foi necessário realizar um estudo da suportabilidade térmica das cargas, pois consiste na máxima corrente elétrica suportada por um determinado equipamento sem que haja nenhuma alteração no seu funcionamento. Infelizmente, não foram encontrados muitos estudos nessa área. A corrente de disparo do sistema desenvolvido foi definida como sendo 135% da corrente nominal da carga, esse valor foi selecionado para que a proteção não dispare quando houver um transitório de energização. Mas, como a corrente é uma característica bastante particular da carga, dependendo diretamente do circuito elétrico, foi imprescindível disponibilizar um arquivo de configuração para o usuário inserir o valor da corrente de disparo para cada carga visando a obtenção da melhor desempenho da proteção.

É significativo expor que o sistema de proteção também está embarcado no *plug*, pois a proteção não pode depender da comunicação. Isto é, independente do estabelecimento da comunicação entre o *plug* e o nó coordenador, a proteção será acionada.

5.5 Especificação do *plug*

Como já foi comentado anteriormente, o sistema foi desenvolvido e resultou em um equipamento com as seguintes especificações técnicas:

- Corrente nominal: 10 A;
- Corrente de disparo variável, suporta até 7 A;

- Tensão de alimentação: 220 V e 110 V, não havendo a necessidade de utilizar baterias, pois a própria energia da rede elétrica alimentar o circuito que irá medir a corrente elétrica e atuar, além de alimentar a carga;
- Frequência: 60 Hz;
- Custo: R\$ 60,00 cotado em janeiro de 2016, sabendo que numa produção em larga escala o custo reduzirá ainda mais;
- *Design*: foi projetado um equipamento com uma *case* simples e compacta, com a funcionalidade de *plug* (Apêndice B).

5.6 Interface

Visando facilitar o acesso dos usuários aos dados oriundos dos *plugs* foi projetado e desenvolvido uma interface gráfica, bastante intuitiva e amigável (Figura 34). Foram utilizados imagens nos ícones que representavam as cargas relacionadas a um *plug* específico. Com a interface gráfica o sistema desenvolvido nesta pesquisa tornou-se mais completo.

O sistema foi implementado para que o usuário pudesse interagir com o dispositivo, através de cadastro de novos equipamentos, visualização de correntes instantâneas da carga e avisos de sobrecarga. A interface gráfica foi implementada com a linguagem de programação *Python* versão 2.7 e é compatível apenas com o sistema operacional LINUX.

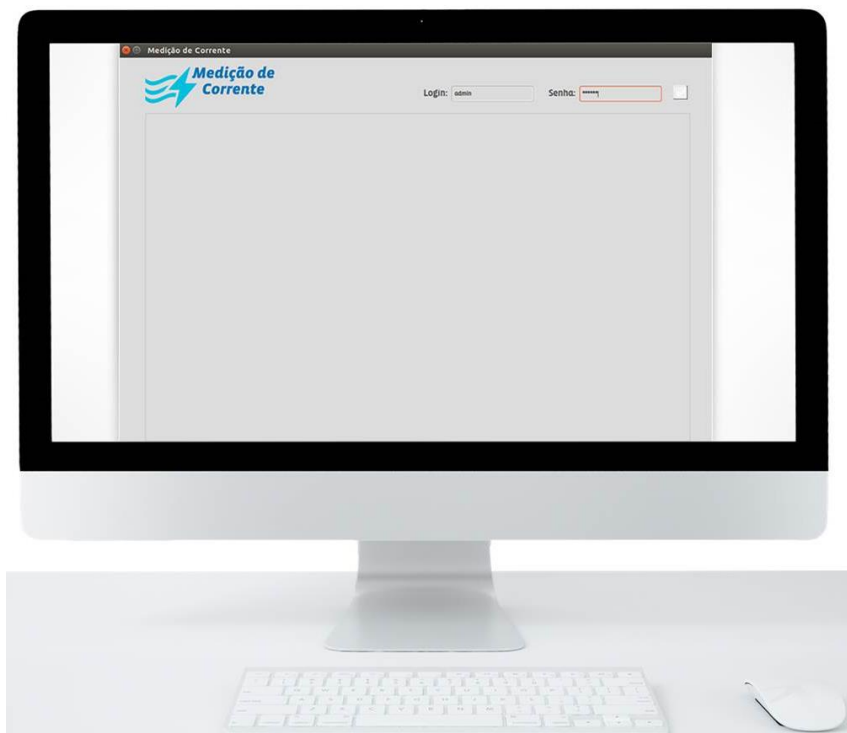
A interface gráfica foi implementada com uso da linguagem de programação *Python*. A linguagem escolhida facilita a implementação de sistemas e possui uma comunidade ativa, que proporciona informações relevantes em caso de dúvidas no uso de ferramentas, bibliotecas, funções e etc.

O cadastro dos equipamentos elétricos será realizado no primeiro acesso do usuário à interface, mas antes o usuário terá que seguir alguns procedimentos :

- A biblioteca PyQT terá que ser instalada;
- *Download* do programa do medidor de corrente;
- Executar o programa do medidor de corrente;
- Informar previamente ao desenvolvedor quais são os equipamentos elétricos que deseja inserir na lista do sistema de medição de corrente. Assim, o desenvolvedor terá a informação da corrente nominal do equipamento para inserir no código e, em caso de sobrecarga, o *plug* pode atuar.

Após o atendimento aos procedimentos técnicos, o programa do medidor de corrente será aberto (Figura 32), sendo necessário inserir o *login* e a senha padrão, que são admin e 123456, respectivamente.

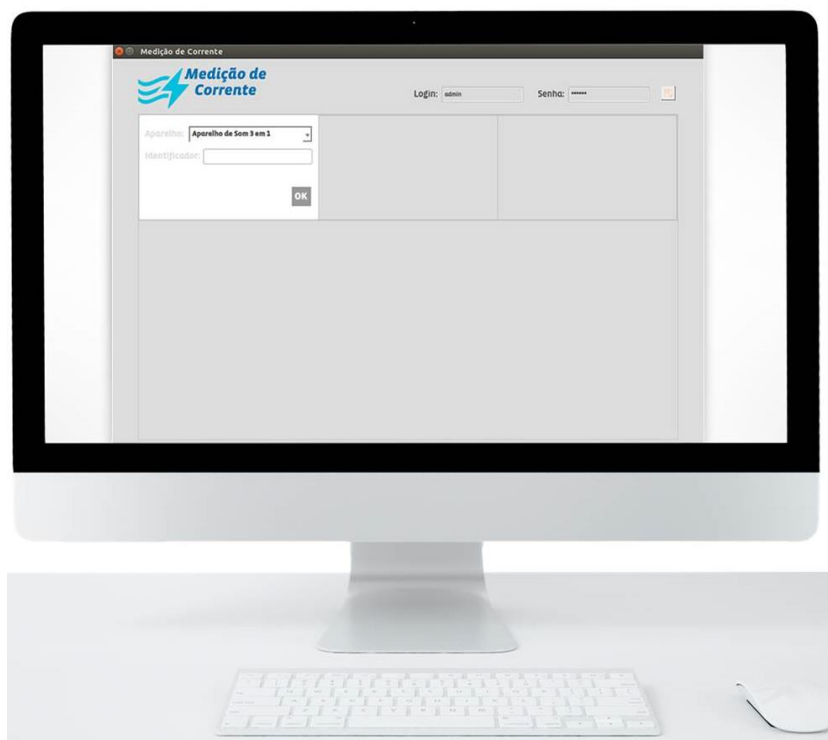
Figura 32 - Interface do programa do medidor de corrente, inserção do login e senha



Fonte: Esta pesquisa.

Após logar o sistema abrirá uma aba (Figura 33), para que o usuário possa escolher os equipamentos que serão associados a cada medidor de corrente adquirido e seus respectivos IDs (identificadores).

Figura 33 - Interface do programa do medidor de corrente, escolha dos equipamentos



Fonte: Esta pesquisa.

O usuário pode cadastrar os equipamentos de forma gradativa, isto é, à medida que for adquirindo mais medidores de corrente, ou pode preferir cadastrar todos os equipamentos de uma só vez, caso tenha interesse em fazer a instalação de mais de um medidor. Na figura 34, é possível observar a interface com o cadastro de alguns equipamentos, cada um associado a um *plug* diferente.

Figura 34 - Interface do programa do medidor de corrente com os equipamentos elétricos cadastrados



Fonte: Esta pesquisa.

O usuário pode solicitar *plug* à informação sobre a intensidade da corrente elétrica instantânea de um determinado equipamento elétrico. Desta forma, basta o usuário apertar o botão "medir corrente", correspondente ao equipamento elétrico do qual deseja solicitar a informação e, após no máximo 1 segundo, a informação será mostrada na interface. Na figura 35, o usuário solicitou a informação da corrente do aparelho de som 3 em 1, o valor medido foi 0,4 A. O *plug* envia periodicamente o valor da corrente para o sistema, mas o usuário só irá visualizá-lo se solicitar.

Figura 35 - Interface do programa medição de corrente com a solicitação de medição de corrente



Fonte: Esta pesquisa.

Em caso de sobrecarga o equipamento elétrico será protegido pelo *plug*, o qual tem a informação prévia da corrente nominal do equipamento elétrico. A intensidade da corrente de interrupção foi determinada como sendo 135% do valor da corrente nominal da carga (ABNT, 2004a). Desta forma, quando a corrente lida pelo *plug* for igual ou superior à corrente de interrupção o relé dispara e o valor da corrente será enviado para o sistema. Apenas na proteção a interface receberá e mostrará o valor da intensidade de corrente, sem que o usuário precise solicitar. Neste caso o valor da corrente ficará destacado com a cor vermelha, para indicar que o sistema de proteção foi acionado, isto é, houve uma falha no circuito.

Quando o relé dispara, impede que a corrente elevada atinja a carga. Logo, após a atuação do relé o sistema terá que ser reinicializado para que o relé volte ao seu estado inicial, permitindo a passagem de energia à carga e, conseqüentemente, seu funcionamento. Assim, basta tirar o *plug* da energia e colocar novamente e a partir do momento em que o usuário solicitar a intensidade de corrente elétrica o medidor já estará trabalhando corretamente.

Como as cargas apresentam características elétricas diferentes, será bastante relevante inserir um valor de corrente de interrupção diferente para cada uma delas. Assim, será disponibilizado um arquivo de configuração em que o usuário poderá alterar apenas um

parâmetro (percentual que multiplica a corrente nominal) para melhor adequação da corrente de interrupção e ajustar a proteção.

Em caso de corrente de *inrush* (corrente de energização) o *plug* não irá atuar de forma indevida, já que o tempo de envio da medição é de 1 (um) segundo. O tempo de duração da corrente de magnetização é da ordem de mili segundos.

5.7 Validação da medição de corrente

O objetivo do ensaio da medição de corrente do protótipo foi verificar quão bom é a medição realizada pelo sistema proposto. Desta forma, para validar a medição de corrente do protótipo do *plug* foi realizado um experimento caracterizado pela medição da intensidade de corrente de cargas residências através do protótipo e um equipamento de medição de corrente comercial simultaneamente, os dados das correntes expostas pelos equipamentos eram anotados. Após a captura, os dados foram analisados e o protótipo foi validado.

Para a realização do experimento proposto foi necessária à utilização de alguns equipamentos de medição:

- Protótipo do *plug* com uma corrente nominal de 10 A;
- Alicata amperímetro da Fluke 305 com precisão de 2% e corrente nominal de 999,9 A.

O alicata amperímetro foi o equipamento de referência do experimento, através dele foram realizadas as comparações dos resultados das correntes medidas.

As cargas residências escolhidas para fazer parte da etapa da validação da medição apresentam características elétricas diferentes, seus respectivos valores de potência e corrente nominal das três cargas selecionadas foram expostas no quadro 14.

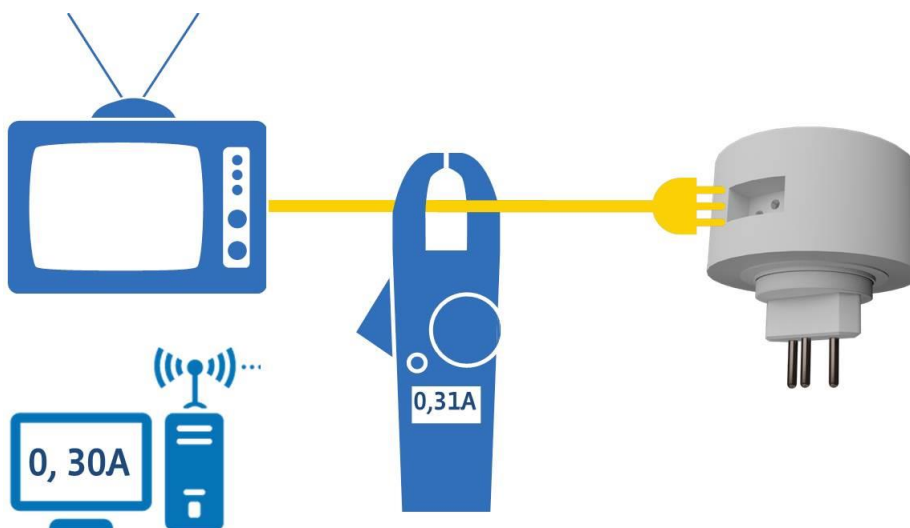
Quadro 14 - Especificação de potência e corrente nominal das três cargas medidas

Cargas	Potência (W)	Corrente Nominal (A)
Secador	2000	9,09
Lâmpada Fluorescente	20	0,09
Televisão	1100	5,00

Fonte: Esta pesquisa.

O esquema de montagem dos equipamentos que fizeram parte da realização do experimento foi representado pela figura 36. As medições eram solicitadas simultaneamente em ambos os equipamentos e foram realizadas dez vezes para cada uma das três cargas residenciais selecionadas.

Figura 36 - Esquema de montagem do ensaio de validação da medição de corrente



Fonte: Esta pesquisa.

Os dados mostrados pelo protótipo e pelo amperímetro em cada medição foram anotados e concentrados no quadro 15. Em seguida foram calculados os erros percentuais que exhibe a relação entre as medidas obtidas pelo amperímetro e pelo protótipo; e o desvio padrão que apresenta a relação entre as dez medidas proveniente do protótipo (Quadro 15).

Quadro 15 - Medida da intensidade de corrente elétrica do amperímetro e do protótipo de três cargas residenciais

Carga	Aperímetro	Protótipo	Erro (%)	Desvio Padrão
Secador	6,05	6,05	0,00	0,01
	6,01	6,05	0,67	
	6,00	6,04	0,67	
	6,01	6,03	0,33	
	5,99	6,03	0,67	
	6,00	6,04	0,67	
	6,00	6,03	0,50	
	5,99	6,03	0,67	
	6,01	6,03	0,33	
	5,98	6,02	0,67	
Lâmpada Fluorescente	0,12	0,17	41,67	0,00
	0,10	0,17	70,00	
	0,13	0,18	38,46	
	0,14	0,17	21,43	
	0,13	0,17	30,77	
	0,12	0,17	41,67	
	0,12	0,17	41,67	
	0,11	0,18	63,64	
	0,11	0,18	63,64	
	0,12	0,17	41,67	
Televisão	0,30	0,30	0,00	0,00
	0,30	0,30	0,00	
	0,30	0,30	0,00	
	0,31	0,30	3,23	
	0,31	0,30	3,23	
	0,31	0,30	3,23	
	0,31	0,30	3,23	
	0,31	0,30	3,23	
	0,30	0,30	0,00	
	0,30	0,30	0,00	

Fonte: Esta pesquisa.

Analisando o quadro 15 é possível declarar que o secador, a lâmpada fluorescente e a televisão exibiram um erro máximo de 0,67%, 70% e 3,23% respectivamente. E um desvio padrão de nulo referente o lâmpada fluorescente e televisão e 0,01 para o secador. É válido ressaltar que por ser uma carga não linear a lâmpada fluorescente apresentou esses resultados.

Os erros apurados expressam a confiança dos valores medidos pelo protótipo do *plug* para cargas com valores nominais na ordem de um ampère, uma vez que apresentam erros percentuais menores que 3,23%, comparado com o amperímetro.

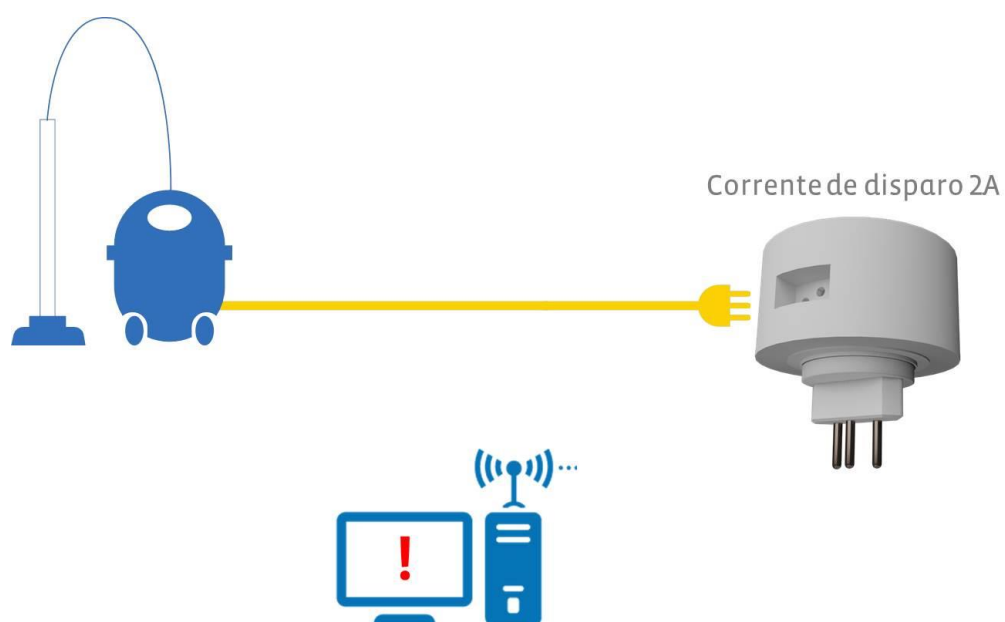
Para analisar o erro aleatório do *plug* foi realizado o estudo da repetitividade das medições. Segundo Filipe et al (2012), a repetitividade é a “aptidão de um instrumento de medição em fornecer indicações muito próximas, em repetidas aplicações do mesmo mensurando, sob as mesmas condições de medição”. Com a análise do desvio padrão foi possível certificar que o protótipo apresenta pequenos desvios entre uma medida e outra, garantindo que os erros aleatórios são irrelevantes.

5.8 Validação da atuação da proteção

Para a validação da atuação da proteção do *plug* foi necessário realizar um ensaio através da execução de testes que verificassem o acionamento da proteção quando necessário. Foi utilizado o aspirados de pó com corrente nominal de 5 A e o protótipo do *plug* como equipamento de proteção. O teste foi iniciado com a escolha da corrente de disparo, em seguida conexão da carga com o protótipo e energização do sistema através da rede elétrica (Figura 37).

Para simular uma sobrecarga a corrente de disparo selecionada tinha que ser inferior a corrente nominal do aspirador para que quando a carga começasse a necessitar de mais corrente o sistema de proteção fosse acionado. Desta forma o sistema a corrente de disparo escolhida foi 2 A.

Figura 37 - Esquema de montagem do ensaio de validação da atuação da proteção



Fonte: Esta pesquisa.

Não foi viável realizar um teste real, pois para que isso acontecesse era preciso danificar os equipamentos, mas com a simulação proposta para validar a atuação da proteção foi verificado que o sistema executou perfeitamente as atividades e protegeu a carga contra uma sobrecarga, retirando-a do circuito.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O sistema desenvolvido é comercialmente viável e, além do baixo custo, possibilita um acompanhamento de medição de corrente individualizada, de forma ininterrupta, possibilitando a análise dos dados a fim de antever defeitos e falhas nos equipamentos conectados ao sistema elétrico residencial, como também é capaz de proteger esses equipamentos de sobrecarga.

A medição da intensidade de corrente pelo equipamento proposto não requisitará seccionamento/intervenção de condutores, instrumentos de medição portátil ou mesmo profissionais especializados.

Além disso, o sistema de medição proposto poderá atenuar os conflitos entre concessionárias e clientes, relativos às falhas no fornecimento de energia elétrica.

6.1 Limitações e dificuldades encontradas

- Escassez de literatura sobre suportabilidade dos equipamentos elétricos residenciais.
- Dificuldades na aquisição de componentes eletrônicos devido a deficiências de fabricação nacional.
- Dificuldades na realização, em laboratório, de testes de proteção de equipamentos eletrodomésticos.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

A pesquisa subsidiará o desenvolvimento de estudos futuros sobre suportabilidade, tendo em vista a estrutura de acompanhamento de medidas elétricas individualizadas por equipamentos ligados ao sistema elétrico, como também possibilitará o desenvolvimento do projeto, ampliando-o para medição de energia, sistema de monitoramento mais completo, fazendo uso de gráficos e determinação de tarefas predefinidas.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 5361:1998 – **Disjuntores de baixa tensão**. Rio de Janeiro, 2014a.

_____. **Disjuntores para proteção de sobrecorrentes para instalações domésticas e similares** (IEC 60898:1995, MOD). Rio de Janeiro, 2014b.

_____. NBR NM 60335-1:2010 – **Segurança de aparelhos eletrodomésticos e similares**. Rio de Janeiro, 2010. p. 15.

ABRACOPEL. Estatística, 2014. Disponível em: < <http://abracopel.org/estatisticas/>> Acesso em: 20 jan. 2016.

ALMEIDA, A.T. **O conhecimento e o uso de métodos multicritério de apoio a decisão**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, Editora Universitária, 2011.

ANEEL. Anexo III da Nota Técnica nº 0075/2011 – SRD/ANEEL, de 21/12/2011. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA APLICAÇÃO DO DECRETO No 97.280 DE 16 DE DEZEMBRO DE 1988. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica_0075_DANIEL%20VIEIRA_SRD_ANEXO%20III.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2016.

ANDREOLI, André Luiz. **Controlador de demanda e fator de potência de baixo custo para unidades consumidoras de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Industrial, Universidade Estadual Paulista Campus Bauru, 2005.

ASHTON, Kevin. That ‘internet of things’ thing. **RFiD Journal**, v. 22, n. 7, p. 97-114, 2009. Disponível em: <<http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>>. Acesso em: 12 fev. 2016.

BARP, A.; FLESCHE, C. A. Avaliação da incerteza de medição durante o projeto de cadeias de medição. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE METROLOGIA ELÉTRICA, 3, 1998. **Anais**. Rio de Janeiro:[s.n.], 1998. v. 15, CD-ROM.

BOSS, Sergio Luiz Bragatto. **Tradução comentada de artigos de Stephen Gray (1666-1736) e reprodução de experimentos históricos com materiais acessíveis: subsídios para**

o ensino de eletricidade. 2011. 349p. Tese (Doutorado)- Programa de Pós- graduação em educação para a ciência, Universidade Estadual Paulista, Baruru (SP): 2011.

CAIRES, L.E. **Aplicação de redes inteligentes nas instalações elétricas residenciais.** 2012. 276p. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

CASTELLI, Franco. **The flat strap sandwich shunt. Instrumentation and Measurement,** IEEE Transactions on, v. 48, n. 5, p. 894-898, 1999.

CHAVES, C.F. **Transformador de corrente eletrônico utilizando bobina de Rogowski e interface óptica com POF para aplicação em sistemas de potência.** 2008. 98p. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

DHOND, Prasad. **Sub-metering made easy using Texas Instruments energy measurement ICs.** [S.I.:s.n.] 2012.

DOEBELIN, Ernest O. **Measurement systems-application and design.** New York: McGraw-Hill Kogakusha, 1976.

ELETRONICS TUTORIALS. **Hall Effect Sensor Principals.** Disponível em: <<http://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>>. Acesso em: 6 jan. 2016.

FARIA, G.H et al. **Suportabilidade de eletrodomésticos frente a distúrbios de qualidade de energia elétrica.**[S.I.]: Universidade Federal de Itajubá. 2014.

FERREIRA, J. A.; CRONJE, W. A.; RELIHAN, W. A. Integration of high frequency current shunts in power electronic circuits. **Power Electronics, IEEE Transactions on,** v. 10, n. 1, p. 32-37, 1995.

FILIPPE, Eduarda et al. **Vocabulário internacional de Metrologia- conceitos fundamentais e gerais e termos associados** (VIM 2012) (1a edição luso-brasileira, autorizada pelo BIPM, da 3. ed. internacional do VIM-International Vocabulary of Metrology). Rio de Janeiro: 2012.

FITGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr., Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas**. 6. ed. Porto Alegre: 2008.

FLESCH, C. A. **Medição de grandezas mecânicas**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, 1999. 1a parte: Metrologia.

FLUKE. **Instrumentos de medição**. 2016. Disponível em: <<http://www.fluke.com/fluke/brpt/products/>>. Acesso em: 12 jan. 2016.

GENG, Liwei. Current measurement device design based on MSP430 single-chip microcontroller. E-product, E-service and E-entertainment (ICEEE). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON IEEE, 2010. [**Trabalho Apresentado**]. [S.I.:s.n.], 2010. p. 1-3.

GONÇALVES Jr., A. A. **Metrologia**; apostila do Curso de Mestrado em Metrologia Científica e Industrial. Florianópolis, 2000. Parte I.

GONÇALVES JR, Armando Albertazzi; SOUZA, AR de. **Fundamentos de metrologia científica e Industrial**. Editora Manole, 1. ed. São Paulo, 2008. 424p.

GONDIM, I.N. et al. **Electronic equipment dielectric and thermal withstand capability curves for refunding analysis purposes**. Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU), 2011.

HALL, Edwin H. On a new action of the magnet on electric currents. **American Journal of Mathematics**, v. 2, n. 3, p. 287-292, 1879.

HECKMANN, J. R.; FLESCH, C. A. Minimização de incertezas em circuitos de linearização de transdutores através de algoritmos genéticos. In: SEMETRO– SEMINÁRIO

INTERNACIONAL DE METROLOGIA ELÉTRICA, 3. **Anais**. Rio de Janeiro, v. 15.1998. CD-ROM.

HELFRICK, Albert D.; COOPER, William D. **Instrumentação eletrônica moderna e técnicas de medição**. [Tradução: Antônio Carlos Inácio Moreira]. Rio de Janeiro: Copyright, 1994.

JIANG, Xiaofan et al. **Design and implementation of a high-fidelity ac metering network. Information processing in sensor network. IPSN 2009**. In: International Conference on IEEE, 2009. p. 253-264.

JORGE, P.A.S. **Sensores ópticos para medição de corrente eléctrica em alta-tensão**. 2001. 156 p. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação do Departamento de Física. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, 2001.

JUCÁ, A. S. **Avaliação do relacionamento entre consumidores e concessionárias na solução de conflitos por danos elétricos: proposta de adequação**. 2003. 178p. Tese (Doutorado)- Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

KOIZUMI, M.T. **Desenvolvimento de sensores e instrumentação aplicados no projeto de equipamentos analisadores de qualidade de energia elétrica**. 2012. 150p. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/505/1/CT_CPGEI_M_Koizumi%2c%20Marcos%20Tsuyoshi_2012.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2016.

KOON, W. **Current sensing for energy metering**. In: Conference Proceedings IIC-China/ESC-China. 2002, p. 321-324.

KRON. **Medidores**. 2015. Disponível em: < <http://www.kron.com.br/br/index.php>>. Acesso em: 30 dez. 2015.

LEE, Min Goo et al. Wireless Electricity Monitoring System for Smart House using Smart Plug. **Trans Tech Publications, USA**, 2011.

MONGODB. **The MongoDB 3.2 Manual**. Disponível em: <<https://www.mongodb.org/>>. Acesso em: 12 jan. 2016.

MORAES, P.M.S.D. **Controle eletrônico da corrente da bobina de contactores eletromagnéticos**. 2004. 124p. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2004.

MORAIS, F.J.O. **Equipamento eletrônico de baixo consumo com comunicação sem fio para auxílio nas inspeções de detecção de roubo de energia elétrica**. 2011. 51p. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2011.

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A. **Circuitos elétricos**. Editora Pearson Prentice Hall, 8. ed. São Paulo, 2008. 592p.

OMICRON. **Catálogo linha CM: teste secundário**. Disponível em: <www.omicronusa.com/support/literature>. Acesso em: 24 jan. 2016.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Processamento em tempo discreto de sinais**. 3. ed. 2012. São Paulo, Pearson Education do Brasil.

PINHEIRO, J. R. G. **Desenvolvimento de um sistema de medição de baixo custo para a monitoração de alimentadores aéreos de distribuição de energia elétrica da classe 15kV**. 2011. 123p. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. Bauru, 2011.

POTTER, David. Smart plug and play sensors. **Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE**, v. 5, n. 1, p. 28-30, 2002.

SANTOS, Túlio Luiz dos. **Desenvolvimento de um sistema embarcado para medição de corrente**. 2010. 88p. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

SECTOR, Standardization; **Series y: global information infrastructure, internet protocol aspects and next-generation networks- Next generation networks–frameworks and functional architecture models**. ITU-T. p. 1-22. [S.l.: s.n.], 2012.

SETHUMADHAVAN, S. Smart metering and home automation solutions for the next decade using zigbee technology. **SSRG International Journal of Electronics and Communication Engineering** (SSRG-IJECE), v.2, n.6, June 2015.

SIEMENS. **Transformadores de corrente**. 2015. Disponível em: <http://w3.siemens.com.br/automation/br/pt/dispositivos-baixa-tensao/transformadores/transformadores-de-corrente/pages/transformador-de-corrente.aspx>. Acesso em: 31 dez. 2015.

_____. **Instrumentos de proteção**. 2016a. Disponível em: <http://www.siemens.com/entry/br/pt/#pf-tab3>. Acesso em: 12 jan. 2016.

_____. **Proteção contra choques elétricos e incêndios**. 2016b. Disponível em: <https://w3.siemens.com.br/buildingtechnologies/br/pt/produtos-baixa-tensao/protecao-eletrica/saiba-mais/Documents/Cat%C3%83%C2%A1logo%20Dispositivos%20DR%20.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2016.

SOARES, A.H.M. **Metodologia computacional para coordenação automática de dispositivos de proteção contra sobrecorrente em sistemas elétricos industriais**. 2009. 231p. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP. 2009.

TEXAS INSTRUMENTS. **Smart plug remote disconnect and wi-fi connectivity**. 29p. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ug/tidu531/tidu531.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2016.

UFRJ. **Instrumentação e técnicas de medida**. Rio de Janeiro. [s.n.], 2013. p. 1-26.

WARD, D. A. **Measurement of current using Rogowski coils**. In: IEE Colloquium on Instrumentation in the Electrical Supply Industry. 1993. p. 1/1-1/3.

WENDHAUSEN, M. **Desenvolvimento de um sistema de medição de corrente elétrica para aplicação em linhas de transmissão de alta tensão**. 2011. 258f. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2011.

XIAO, Chucheng et al. **An overview of integratable current sensor technologies**. In: INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE, 2003. 38th IAS ANNUAL MEETING. Conference Record of the IEEE, 2003. p. 1251-1258.

XU, Yue; LORENZ, R. D. Design of integrated shunt current sensors for IPEMs. In: **Proc. of CPES Seminar 2002**. 2002. p. 404-411.

APÊNDICE A – MODELOS DE TRANSDUTORES COMERCIAIS

FABRICANTE	MODELO	CUSTO	TECNOLOGIA	FAIXA DE MEDIÇÃO	PRECISÃO
Allegro MicroSystems, LLC	ACS709LLFTR-20BB-T	\$1.65	Hall Effect, Open Loop	20A	2.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS709LLFTR-20BB-T	\$4.53	Hall Effect, Open Loop	20A	2.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS709LLFTR-20BB-T	\$4.53	Hall Effect, Open Loop	20A	2.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS713ELCTR-20A-t	\$1.81	Hall Effect, Open Loop	20A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS713ELCTR-20A-t	\$4.82	Hall Effect, Open Loop	20A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS713ELCTR-20A-t	\$4.82	Hall Effect, Open Loop	20A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS712ELCTR-20A-t	\$1.81	Hall Effect, Open Loop	20A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS712ELCTR-20A-t	\$4.82	Hall Effect, Open Loop	20A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS712ELCTR-20A-t	\$4.82	Hall Effect, Open Loop	20A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS715ELCTR-20A-t	\$1.86	Hall Effect, Open Loop	20A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS715ELCTR-20A-t	\$4.97	Hall Effect, Open Loop	20A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS715ELCTR-20A-t	\$4.97	Hall Effect, Open Loop	20A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS714LLCTR-20A-t	\$1.89	Hall Effect, Open Loop	20A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS714LLCTR-20A-t	\$5.05	Hall Effect, Open Loop	20A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS714LLCTR-20A-t	\$5.05	Hall Effect, Open Loop	20A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS715LLCTR-20A-t	\$1.89	Hall Effect, Open Loop	20A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS715LLCTR-20A-t	\$5.05	Hall Effect, Open Loop	20A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS715LLCTR-20A-t	\$5.05	Hall Effect, Open Loop	20A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722LLCTR-20AU-t	\$1.97	Hall Effect, Open Loop	20A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722LLCTR-20AU-t	\$5.32	Hall Effect, Open Loop	20A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722LLCTR-20AU-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	20A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS724LLCTR-20AU-t	\$2.06	Hall Effect, Open Loop	20A	0.70%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS724LLCTR-20AU-t	\$5.50	Hall Effect, Open Loop	20A	0.70%

Allegro MicroSystems, LLC	ACS724LLCTR-20AU-t	\$5.50	Hall Effect, Open Loop	20A	0.70%
LEM EUA Inc.	HLSR 20-P / SP33	\$12.26	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
LEM EUA Inc.	HLSR 20-P	\$12.26	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
LEM EUA Inc.	HX 20-P	\$17.03	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
Tamura	L18P020S05	\$12.62	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723KMATR-20AB-t	\$2.39	Hall Effect, Open Loop	20A	2.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723KMATR-20AB-t	\$6.17	Hall Effect, Open Loop	20A	2.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723KMATR-20AB-t	\$6.17	Hall Effect, Open Loop	20A	2.00%
AKM Semiconductor Inc.	CQ209B	\$7.48	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
AKM Semiconductor Inc.	CQ209D	\$7.48	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
AKM Semiconductor Inc.	CQ2092	\$7.48	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
AKM Semiconductor Inc.	CQ209A	\$7.48	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
AKM Semiconductor Inc.	CQ2093	\$7.48	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS726LLFTR-20B-t	\$1.83	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS726LLFTR-20B-t	\$4.90	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS726LLFTR-20B-t	\$4.90	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS714ELCTR-20A-t	\$1.86	Hall Effect, Open Loop	20A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS714ELCTR-20A-t	\$4.97	Hall Effect, Open Loop	20A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS714ELCTR-20A-t	\$4.97	Hall Effect, Open Loop	20A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723LLCTR-20AU-t	\$1.97	Hall Effect, Open Loop	20A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723LLCTR-20AU-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	20A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723LLCTR-20AU-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	20A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722LLCTR-20AB-t	\$1.97	Hall Effect, Open Loop	20A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722LLCTR-20AB-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	20A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722LLCTR-20AB-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	20A	3.00%

Allegro MicroSystems, LLC	ACS723LLCTR-20AB-t	\$1.97	Hall Effect, Open Loop	20A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723LLCTR-20AB-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	20A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723LLCTR-20AB-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	20A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS718KMATR-20B-t	\$2.04	Hall Effect, Open Loop	20A	2.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS718KMATR-20B-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	20A	2.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS718KMATR-20B-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	20A	2.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS717KMATR-20B-t	\$2.04	Hall Effect, Open Loop	20A	2.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS717KMATR-20B-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	20A	2.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS717KMATR-20B-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	20A	2.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS725LLCTR-20AB-t	\$2.06	Hall Effect, Open Loop	20A	0.80%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS725LLCTR-20AB-t	\$5.50	Hall Effect, Open Loop	20A	0.80%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS725LLCTR-20AB-t	\$5.50	Hall Effect, Open Loop	20A	0.80%
AKM Semiconductor Inc.	CQ330A	\$3.22	Hall Effect, Open Loop	20A	0.50%
AKM Semiconductor Inc.	CQ330A	\$8.30	Hall Effect, Open Loop	20A	0.50%
AKM Semiconductor Inc.	CQ330A	\$8.30	Hall Effect, Open Loop	20A	0.50%
AKM Semiconductor Inc.	CQ3300	\$3.22	Hall Effect, Open Loop	20A	0.50%
AKM Semiconductor Inc.	CQ3300	\$8.30	Hall Effect, Open Loop	20A	0.50%
AKM Semiconductor Inc.	CQ3300	\$8.30	Hall Effect, Open Loop	20A	0.50%
AKM Semiconductor Inc.	CQ3303	\$3.22	Hall Effect, Open Loop	20A	0.50%
AKM Semiconductor Inc.	CQ3303	\$8.30	Hall Effect, Open Loop	20A	0.50%
AKM Semiconductor Inc.	CQ3303	\$8.30	Hall Effect, Open Loop	20A	0.50%
AKM Semiconductor Inc.	CQ3302	\$3.22	Hall Effect, Open Loop	20A	0.50%
AKM Semiconductor Inc.	CQ3302	\$8.30	Hall Effect, Open Loop	20A	0.50%
AKM Semiconductor Inc.	CQ3302	\$8.30	Hall Effect, Open Loop	20A	0.50%
AKM Semiconductor Inc.	CQ3301	\$3.22	Hall Effect, Open Loop	20A	0.50%

AKM Semiconductor Inc.	CQ3301	\$8.30	Hall Effect, Open Loop	20A	0.50%
AKM Semiconductor Inc.	CQ3301	\$8.30	Hall Effect, Open Loop	20A	0.50%
LEM EUA Inc.	20 SM-HLSR	\$12.26	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
LEM EUA Inc.	HLSR 20-SM / SP33	\$12.26	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
LEM EUA Inc.	HMS 20-P	\$10.70	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
LEM EUA Inc.	HMS 20-P	\$15.25	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS724LLCTR-20AB-t	\$2.06	Hall Effect, Open Loop	20A	0.80%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS724LLCTR-20AB-t	\$5.50	Hall Effect, Open Loop	20A	0.80%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS724LLCTR-20AB-t	\$5.50	Hall Effect, Open Loop	20A	0.80%
Tamura	L18P020D15	\$12.35	Hall Effect, Open Loop	20A	-
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722KMATR-20AB-t	\$2.39	Hall Effect, Open Loop	20A	2.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722KMATR-20AB-t	\$6.17	Hall Effect, Open Loop	20A	2.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722KMATR-20AB-t	\$6.17	Hall Effect, Open Loop	20A	2.50%
LEM EUA Inc.	HMS 20-P	\$16.91	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
LEM EUA Inc.	HY 20-P	\$29.84	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
Tamura	L18P020S05R	\$7.98	Hall Effect, Open Loop	20A	-
Tamura	L18P020S12	\$7.98	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
Tamura	L07P020D15	\$11.78	Hall Effect, Open Loop	20A	1.00%
LEM EUA Inc.	NP-15 LTSR	\$21.44	Hall Effect, Closed Loop	15A	0.20%
LEM EUA Inc.	NP-15 LTS	\$21.68	Hall Effect, Closed Loop	15A	0.20%
Tamura	S22P015S05	\$15.56	Hall Effect, Closed Loop	15A	-
Tamura	S22P015S05M2	\$10.17	Hall Effect, Closed Loop	15A	-
LEM EUA Inc.	HO 15-NP / SP33-1000	\$14.09	Hall Effect, Open Loop	15A	1.00%
LEM EUA Inc.	HO 15-NSM-0000	\$14.09	Hall Effect, Open Loop	15A	1.00%
LEM EUA Inc.	HX 15-P	\$17.03	Hall Effect, Open Loop	15A	1.00%

Tamura	L18P015D15	\$12.35	Hall Effect, Open Loop	15A	-
LEM EUA Inc.	HO 15-NP-0000	\$14.09	Hall Effect, Open Loop	15A	1.00%
LEM EUA Inc.	HY 15-P	\$24.53	Hall Effect, Open Loop	15A	1.00%
LEM EUA Inc.	HO-15 NSM / SP33-1000	\$14.09	Hall Effect, Open Loop	15A	1.00%
LEM EUA Inc.	HMS 15-P	\$10.35	Hall Effect, Open Loop	15A	1.00%
LEM EUA Inc.	HMS 15-P	\$10.70	Hall Effect, Open Loop	15A	1.00%
LEM EUA Inc.	L18P015S05	\$7.98	Hall Effect, Open Loop	15A	-
Tamura	L18P015S05R	\$7.98	Hall Effect, Open Loop	15A	-
Tamura	L18P015S12	\$7.98	Hall Effect, Open Loop	15A	-
Tamura	L07P015D15	\$11.78	Hall Effect, Open Loop	15A	-
CR Magnetics Inc.	CR9580-20	\$33.31	Transformer w/Conditioning	20A	0.50%
CR Magnetics Inc.	CR9521-20	\$33.31	Transformer w/Conditioning	20A	0.50%
Silicon Labs	SI8503-C-IS	\$1.42	Transformer w/Conditioning	20A	5.00%
Silicon Labs	SI8519-C-IS	\$1.55	Transformer w/Conditioning	20A	5.00%
Silicon Labs	SI8503-C-IMR	\$0.85	Transformer w/Conditioning	20A	5.00%
Silicon Labs	SI8513-C-IMR	\$0.93	Transformer w/Conditioning	20A	5.00%
Silicon Labs	SI8519-C-IMR	\$0.93	Transformer w/Conditioning	20A	5.00%
Silicon Labs	SI8503-C-IM	\$0.96	Transformer w/Conditioning	20A	5.00%
Silicon Labs	SI8513-C-IM	\$1.05	Transformer w/Conditioning	20A	5.00%
Silicon Labs	SI8519-C-IM	\$1.05	Transformer w/Conditioning	20A	5.00%
Silicon Labs	SI8503-C-ISR	\$1.16	Transformer w/Conditioning	20A	5.00%
Silicon Labs	SI8513-C-ISR	\$1.28	Transformer w/Conditioning	20A	5.00%
Silicon Labs	SI8519-C-ISR	\$1.28	Transformer w/Conditioning	20A	5.00%
Silicon Labs	SI8513-C-IS	\$1.49	Transformer w/Conditioning	20A	5.00%
CR Magnetics Inc.	CR9550-20-M	\$33.31	Transformer w/Conditioning	20A	0.50%

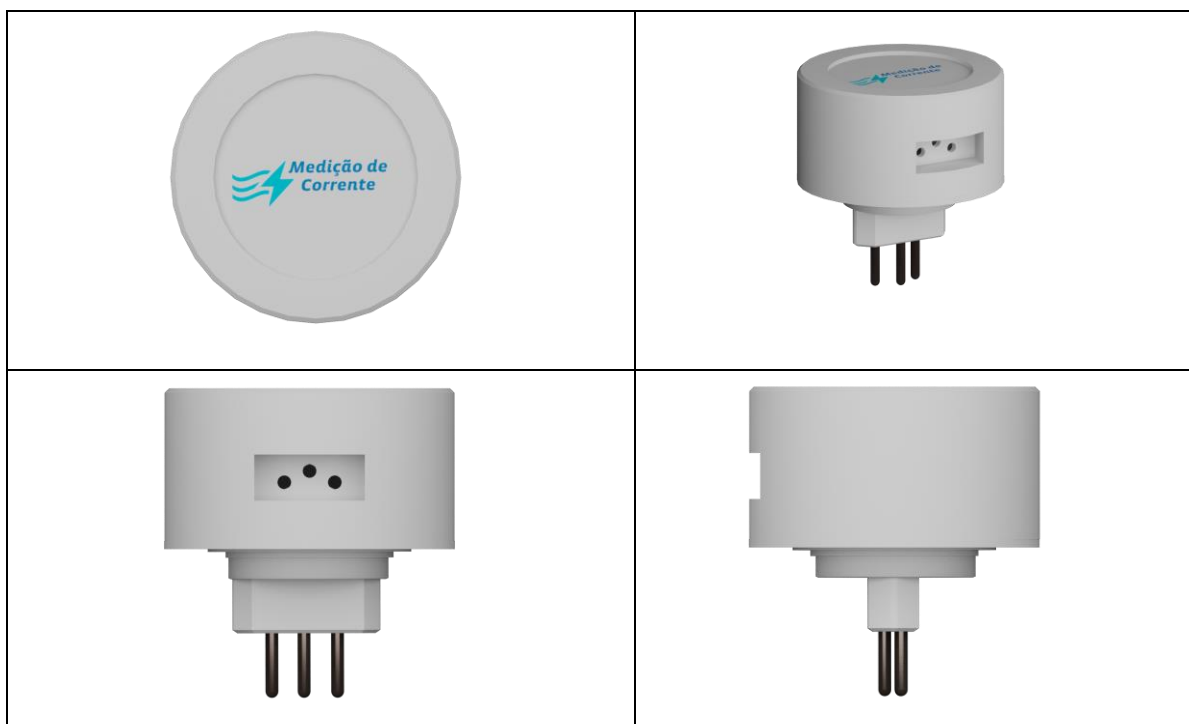
CR Magnetics Inc.	CR9580-20-M	\$33.31	Transformer w/Conditioning	20A	0.50%
CR Magnetics Inc.	CR9550-20	\$33.31	Transformer w/Conditioning	20A	0.50%
Silicon Labs	SI8502-C-IM	\$0.99	Transformer w/Conditioning	10A	5.00%
CR Magnetics Inc.	CR9521-10	\$33.31	Transformer w/Conditioning	10A	0.50%
CR Magnetics Inc.	CR9550-10	\$33.31	Transformer w/Conditioning	10A	0.50%
CR Magnetics Inc.	CR9580-10-M	\$33.31	Transformer w/Conditioning	10A	0.50%
CR Magnetics Inc.	CR9550-10-M	\$33.31	Transformer w/Conditioning	10A	0.50%
Silicon Labs	SI8502-C-IS	\$1.35	Transformer w/Conditioning	10A	5.00%
Silicon Labs	SI8512-C-IS	\$1.48	Transformer w/Conditioning	10A	5.00%
Silicon Labs	SI8502-C-IMR	\$0.81	Transformer w/Conditioning	10A	5.00%
Silicon Labs	SI8512-C-IMR	\$0.88	Transformer w/Conditioning	10A	5.00%
Silicon Labs	SI8518-C-IMR	\$0.88	Transformer w/Conditioning	10A	5.00%
Silicon Labs	SI8512-C-IM	\$1.00	Transformer w/Conditioning	10A	5.00%
Silicon Labs	SI8518-C-IM	\$1.00	Transformer w/Conditioning	10A	5.00%
Silicon Labs	SI8502-C-ISR	\$1.11	Transformer w/Conditioning	10A	5.00%
Silicon Labs	SI8512-C-ISR	\$1.21	Transformer w/Conditioning	10A	5.00%
Silicon Labs	SI8518-C-ISR	\$1.21	Transformer w/Conditioning	10A	5.00%
Silicon Labs	SI8518-C-IS	\$1.43	Transformer w/Conditioning	10A	5.00%
LEM USA Inc.	LA 10-PB	\$30.45	Hall Effect, Closed Loop	10A	1.50%
LEM USA Inc.	HY 10-P	\$23.53	Hall Effect, Open Loop	10A	1.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722LLCTR-10AB-t	\$1.97	Hall Effect, Open Loop	10A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722LLCTR-10AB-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	10A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722LLCTR-10AB-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	10A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS724LLCTR-10AB-t	\$2.06	Hall Effect, Open Loop	10A	1.00%

Allegro MicroSystems, LLC	ACS724LLCTR-10AB-t	\$5.50	Hall Effect, Open Loop	10A	1.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS724LLCTR-10AB-t	\$5.50	Hall Effect, Open Loop	10A	1.00%
LEM USA Inc.	HLSR 10-P	\$12.26	Hall Effect, Open Loop	10A	1.00%
LEM USA Inc.	10 SM-HLSR	\$12.26	Hall Effect, Open Loop	10A	1.00%
Tamura	L18P010D15	\$12.35	Hall Effect, Open Loop	10A	-
LEM USA Inc.	HO 10-P / SP33	\$13.84	Hall Effect, Open Loop	10A	1.40%
LEM USA Inc.	HO 10-P	\$13.84	Hall Effect, Open Loop	10A	1.40%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722KMATR-10AB-T	\$2.39	Hall Effect, Open Loop	10A	2.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722KMATR-10AB-t	\$6.17	Hall Effect, Open Loop	10A	2.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722KMATR-10AB-t	\$6.17	Hall Effect, Open Loop	10A	2.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723KMATR-10AB-t	\$2.39	Hall Effect, Open Loop	10A	2.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723KMATR-10AB-t	\$6.17	Hall Effect, Open Loop	10A	2.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723KMATR-10AB-t	\$6.17	Hall Effect, Open Loop	10A	2.00%
LEM EUA Inc.	HLSR 10-SM / SP33	\$12.26	Hall Effect, Open Loop	10A	1.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722LLCTR-10AU-T	\$1.97	Hall Effect, Open Loop	10A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722LLCTR-10AU-T	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	10A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722LLCTR-10AU-T	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	10A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS718KMATR-10B-t	\$2.04	Hall Effect, Open Loop	10A	2.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS718KMATR-10B-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	10A	2.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS718KMATR-10B-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	10A	2.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS717KMATR-10B-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	10A	2.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS725LLCTR-10AU-T	\$2.06	Hall Effect, Open Loop	10A	0.90%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS725LLCTR-10AU-T	\$5.50	Hall Effect, Open Loop	10A	0.90%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS725LLCTR-10AU-T	\$5.50	Hall Effect, Open Loop	10A	0.90%
LEM EUA Inc.	HX 10-P	\$17.03	Hall Effect, Open Loop	10A	1.00%

LEM EUA Inc.	HLSR 10-P / SP33	\$12.26	Hall Effect, Open Loop	10A	1.00%
LEM EUA Inc.	HMS 10-P	\$10.70	Hall Effect, Open Loop	10A	1.00%
LEM EUA Inc.	HMS 10-P	\$15.25	Hall Effect, Open Loop	10A	1.00%
LEM EUA Inc.	HMS 10-P	\$15.25	Hall Effect, Open Loop	10A	1.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723LLCTR-10AB-t	\$1.97	Hall Effect, Open Loop	10A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723LLCTR-10AB-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	10A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723LLCTR-10AB-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	10A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723LLCTR-10AU-T	\$1.97	Hall Effect, Open Loop	10A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723LLCTR-10AU-T	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	10A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723LLCTR-10AU-T	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	10A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS724LLCTR-10AU-T	\$2.06	Hall Effect, Open Loop	10A	1.00%
LEM USA Inc.	HMS 10-P	\$10.70	Hall Effect, Open Loop	10A	1.00%
LEM USA Inc.	HAW 10-P	\$1.79	Hall Effect, Open Loop	10A	1.00%
Tamura	L18P010S05	\$7.98	Hall Effect, Open Loop	10A	1.00%
Tamura	L18P010S05R	\$7.98	Hall Effect, Open Loop	10A	-
Tamura	L18P010S12	\$7.98	Hall Effect, Open Loop	10A	-
Tamura	L07P010D15	\$11.78	Hall Effect, Open Loop	10A	-
Tamura	L07P010S05	\$12.63	Hall Effect, Open Loop	10A	-
Allegro MicroSystems, LLC	ACS712ELCTR-05B-T	\$1.81	Hall Effect, Open Loop	5A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS712ELCTR-05B-T	\$4.82	Hall Effect, Open Loop	5A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS712ELCTR-05B-T	\$4.82	Hall Effect, Open Loop	5A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS714ELCTR-05B-T	\$4.97	Hall Effect, Open Loop	5A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS714ELCTR-05B-T	\$4.97	Hall Effect, Open Loop	5A	1.50%
LEM EUA Inc.	HMS 05-P	\$10.70	Hall Effect, Open Loop	5A	1.00%
LEM EUA Inc.	HMS 05-P	\$18.60	Hall Effect, Open Loop	5A	1.00%

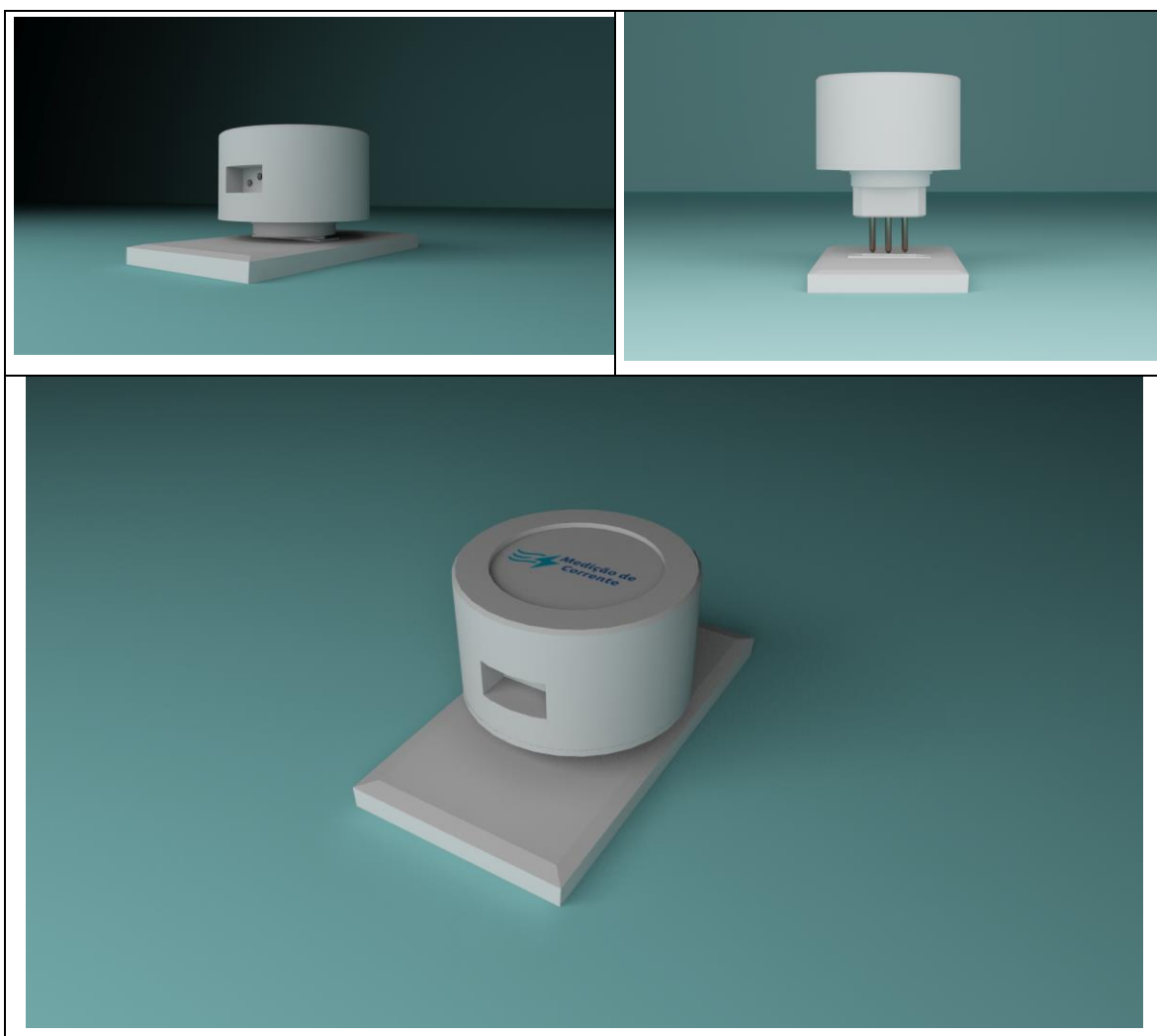
LEM EUA Inc.	HMS 05-P	\$18.60	Hall Effect, Open Loop	5A	1.00%
LEM EUA Inc.	HX 05-P	\$17.03	Hall Effect, Open Loop	5A	1.00%
Tamura	L18P005D15	\$12.35	Hall Effect, Open Loop	5A	-
Diodes Incorporated	ZMC05TA	\$8.25	Hall Effect, Open Loop	5A	-
Diodes / Zetex	ZMC05TA	\$3.20	Hall Effect, Open Loop	5A	-
Allegro MicroSystems, LLC	ACS714LLCTR-05B-T	\$1.89	Hall Effect, Open Loop	5A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS714LLCTR-05B-T	\$5.05	Hall Effect, Open Loop	5A	1.50%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS714LLCTR-05B-T	\$5.05	Hall Effect, Open Loop	5A	1.50%
Silicon Labs	SI8501-C-IM	\$0.96	Hall Effect, Open Loop	5A	5.00%
LEM EUA Inc.	HY 5-P	\$24.53	Hall Effect, Open Loop	5A	1.00%
Silicon Labs	SI8511-C-IS	\$1.42	Hall Effect, Open Loop	5A	5.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722LLCTR-05AB-t	\$1.97	Hall Effect, Open Loop	5A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722LLCTR-05AB-T	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	5A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS722LLCTR-05AB-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	5A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723LLCTR-05AB-t	\$1.97	Hall Effect, Open Loop	5A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723LLCTR-05AB-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	5A	3.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS723LLCTR-05AB-t	\$5.27	Hall Effect, Open Loop	5A	3.00%
Silicon Labs	SI8501-C-IS	\$1.31	Hall Effect, Open Loop	5A	5.00%
Honeywell Sensing and Productivity Solutions	CSLW6B5	\$23.26	Hall Effect, Open Loop	5A	-
Silicon Labs	SI8501-C-IMR	\$0.78	Hall Effect, Open Loop	5A	5.00%
Silicon Labs	SI8511-C-IMR	\$0.85	Hall Effect, Open Loop	5A	5.00%
Silicon Labs	SI8517-C-IMR	\$0.91	Hall Effect, Open Loop	5A	5.00%
Silicon Labs	SI8511-C-IM	\$0.96	Hall Effect, Open Loop	5A	5.00%
Silicon Labs	SI8517-C-IM	\$1.02	Hall Effect, Open Loop	5A	5.00%
Silicon Labs	SI8501-C-ISR	\$1.07	Hall Effect, Open Loop	5A	5.00%

Silicon Labs	SI8511-C-ISR	\$1.16	Hall Effect, Open Loop	5A	5.00%
Silicon Labs	SI8517-C-ISR	\$1.16	Hall Effect, Open Loop	5A	5.00%
Silicon Labs	SI8517-C-IS	\$1.37	Hall Effect, Open Loop	5A	5.00%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS724LLCTR-05AB-t	\$2.06	Hall Effect, Open Loop	5A	0.60%
Allegro MicroSystems, LLC	ACS724LLCTR-05AU-t	\$2.06	Hall Effect, Open Loop	5A	0.60%
LEM EUA Inc.	HAW 05-P	\$1.79	Hall Effect, Open Loop	5A	1.00%
Tamura	L18P005S05	\$7.98	Hall Effect, Open Loop	5A	-
Tamura	L18P005S05R	\$7.98	Hall Effect, Open Loop	5A	1.00%
Tamura	L18P005S12	\$7.98	Hall Effect, Open Loop	5A	-
Tamura	L07P005D15	\$11.78	Hall Effect, Open Loop	5A	-
Silicon Labs	SI8501-C-IM	\$0.96	Transformer w/Conditioning	5A	5.00%
Silicon Labs	SI8511-C-IS	\$1.42	Transformer w/Conditioning	5A	5.00%
Silicon Labs	SI8501-C-IS	\$1.31	Transformer w/Conditioning	5A	5.00%
Silicon Labs	SI8501-C-IMR	\$0.78	Transformer w/Conditioning	5A	5.00%
Silicon Labs	SI8511-C-IMR	\$0.85	Transformer w/Conditioning	5A	5.00%
Silicon Labs	SI8517-C-IMR	\$0.91	Transformer w/Conditioning	5A	5.00%
Silicon Labs	SI8511-C-IM	\$0.96	Transformer w/Conditioning	5A	5.00%
Silicon Labs	SI8517-C-IM	\$1.02	Transformer w/Conditioning	5A	5.00%
Silicon Labs	SI8501-C-ISR	\$1.07	Transformer w/Conditioning	5A	5.00%
Silicon Labs	SI8511-C-ISR	\$1.16	Transformer w/Conditioning	5A	5.00%
Silicon Labs	SI8517-C-ISR	\$1.16	Transformer w/Conditioning	5A	5.00%
Silicon Labs	SI8517-C-IS	\$1.37	Transformer w/Conditioning	5A	5.00%

APÊNDICE B – CAIXA DO PLUGFigura 38 - Vistas da caixa do *plug*

Fonte: Esta pesquisa.

Figura 39 - *Render da caixa do plug*



Fonte: Esta pesquisa.