

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

VITOR DIEFENBACH DA SILVA

**ESTIMADOR DE POTÊNCIA APARENTE UTILIZANDO SENSOR DE CORRENTE
PARA APLICAÇÃO RESIDENCIAL**

**SANTA MARIA
2014**

VITOR DIEFENBACH DA SILVA

**ESTIMADOR DE POTÊNCIA APARENTE UTILIZANDO SENSOR DE CORRENTE
PARA APLICAÇÃO RESIDENCIAL**

Trabalho de conclusão de curso, para obtenção
de título de Engenheiro de Computação,
Universidade Federal de Santa Maria.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Barriquello

**SANTA MARIA
2014**

RESUMO

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

ESTIMADOR DE POTÊNCIA APARENTE UTILIZANDO SENSOR DE CORRENTE PARA APLICAÇÃO RESIDENCIAL

**AUTOR: Vitor Diefenbach da Silva
ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Henrique Barriquello**

No contexto atual, onde muito se preocupa com sustentabilidade e sobre as fontes de energias renováveis e não renováveis, a tendência com o passar do tempo será otimizar a maneira onde essa energia será empregada. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um instrumento capaz de estimar a potência individualmente de cada dispositivo residencial ou industrial a fim de monitorar seu consumo. A partir de um sensor de corrente, juntamente com um circuito amplificador e um microcontrolador o medidor desenvolvido consegue medir a corrente RMS presente em determinados aparelhos, conseqüentemente pode se estimar a potência aparente. Com as medições é possível monitorar a potência ativa e o consumo de cargas puramente resistivas, que não apresentem componentes que adiantem ou atrasem a forma de onda de corrente.

Palavras-chave: Medidor, Sensor, Corrente, Potência

ABSTRACT
FEDERAL UNIVERSITY OF SANTA MARIA
TECHNOLOGY CENTER
WORK FROM COMPLETION OF COURSE

**APPARENT POWER ESTIMATOR USING CURRENT SENSOR FOR
RESIDENTIAL AND INDUSTRIAL APPLICATION**

AUTHOR: Vitor Diefenbach da Silva
ADVISER: Prof. Dr. Carlos Henrique Barriquello

In the current context, where much cares about sustainability and renewable and non-renewable energy, the trend over time will optimize the way in which this energy will be used. This work aims to develop an instrument who estimate the apparent power of each individual residential or industrial device to monitor their consumption and return the user to the efficiency. From a current sensor together with an amplifier circuit and a microcontroller developed meter can measure the RMS current in this particular apparatus, may thus estimate its apparent power. With the measures, it is possible monitorate the consumption of active power loads purely components that do not exhibit delays on waveform of current.

Keywords: Meter, Sensor, Current, Power

LISTA DE SIGLAS

ABRACE - Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia e de Consumidores Livres

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

FIRJAN - Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro

IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1 – Produção de energia elétrica nacional.	11
Figura 1 - Potencial hidroelétrico brasileiro.	12
Gráfico 2 - Consumo de energia.	13
Figura 2 - Medidor do tipo indução.	15
Figura 3 - Modelagem do sistema.	20
Figura 4 - ACS 712.	21
Figura 5 - Faixa de operação ACS 712.	22
Figura 6 - Saída para 0 a ACS 712.	22
Figura 7 - Sensibilidade de acordo com a temperatura ACS 712.	23
Figura 8 - Sensibilidade de acordo com a corrente ACS 712.	23
Figura 9 – Buffer.	25
Figura 10 - Amplificador com filtro ativo passa baixa.	26
Tabela 1 - Limite para os Harmônicos de Corrente.	27
Figura 11 - - Modelagem do hardware do medidor.	29
Gráfico 3 - Medições das correntes para uma lâmpada de 25W.	32
Gráfico 4 - Medições das correntes para uma lâmpada de 40W.	33
Gráfico 5 - Medições das correntes para uma lâmpada de 200W.	33
Gráfico 6 - Medições das correntes para uma lâmpada de 200W em paralelo.	34
Gráfico 7 - Medições das potências mínima e máxima para lâmpada de 25W.	35
Gráfico 8 - Medições das potências mínima e máxima para lâmpada de 40W.	35
Gráfico 9 - Medições das potências mínima e máxima para lâmpada de 200W.	36
Gráfico 10 - Medições das potências mínima e máxima para lâmpada de 200W em paralelo.	36
Quadro 1 - Características da faixa de operação de 0A a 0,5A.	37
Quadro 2 - Características da faixa de operação de 0,5A a 5A.	37

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	8
1 REVISÃO DE LITERATURA	11
1.1 Atual situação energética do Brasil	11
1.2 Medidor energia eletromecânico	14
1.3 Potência	16
1.4 Sensores	18
2 METODOLOGIA	20
2.1 Hardware	21
2.2 Software	29
3 RESULTADOS	32
4 CONCLUSÕES	38
REFERÊNCIAS	39
APÊNDICE A – Dados relativos ao gráfico das medições das correntes para lâmpada de 25W	40
APÊNDICE B – Dados relativos ao gráfico das medições das correntes para lâmpada de 40W	41
APÊNDICE C – Dados relativos ao gráfico das medições das correntes para lâmpada de 200W	42
APÊNDICE D – Dados relativos ao gráfico das medições das correntes para lâmpada de 200W em paralelo	43
APÊNDICE E – Dados relativos ao gráfico das medições das potências mínima e máxima para lâmpada de 25W em paralelo	43
APÊNDICE F – Dados relativos ao gráfico das medições das potências mínima e máxima para lâmpada de 40W	44
APÊNDICE G – Dados relativos ao gráfico das medições das potências mínima e máxima para uma lâmpada de 200W	45
APÊNDICE H – Dados relativos ao gráfico das medições das potências mínima e máxima para uma lâmpada de 200W em paralelo	45

INTRODUÇÃO

Sustentabilidade é uma habilidade muito comentada e trabalhada em nossa sociedade nos tempos atuais. É uma característica de um processo ou de um sistema que permite a sua permanência por um determinado período de tempo. O conceito de sustentabilidade está relacionado principalmente com fazer o uso dos recursos naturais no presente, para não comprometer as necessidades das futuras gerações. Sustentabilidade possui um conceito muito amplo pois atende a um conjunto de variáveis que se correlacionam e abrangem principalmente questões sociais, energéticas, econômicas e ambientais.

Sobre essas questões que formam o conceito de sustentabilidade uma que se destaca é a questão energética. O grande desenvolvimento da sociedade atual acarreta um maior consumo de energia, que conseqüentemente cria a necessidade de gerar mais energia. Muito se preocupa em sustentabilidade energética porém, a maior parte da energia gerada não é produzida de uma maneira sustentável. Por exemplo, em uma usina termoeletrica gera energia através do calor, a energia é gerada após queima de combustíveis fósseis, o que causa um impacto ambiental negativo pela emissão excessiva de gás carbônico. Por outro lado uma usina hidroeletrica não emite gás carbônico mas ainda gera impacto ambiental, devido a quantidade de água represada para obter uma força necessária para girar as turbinas. Com isso observa-se a necessidade de gerenciar bem onde essa energia será usada, para que seu proveito seja da maneira mais eficiente, ou sustentável, possível.

Para conseguir gerenciar melhor o uso da energia é necessário primeiramente saber onde essa energia está sendo empregada. Para isso, instrumentos de medição são necessários, eles serão os responsáveis para retornar ao usuário final uma grandeza, que será proporcional a quantidade de energia que esse mesmo usuário está gastando em algum determinado período de tempo, seja em indústria, fábrica ou residência. Esse instrumento de medição é normalmente eletromecânico, ou seja, de acordo com a energia que é consumida, um mostrador mecânico varia, normalmente ponteiros, para que a leitura possa ser realizada. Este equipamento está presente na maioria das habitações do mundo moderno.

Porém essa medição não nos retorna especificamente o que está sendo consumido discriminadamente, ela retorna o que está sendo gasto em toda a rede. É interessante para o usuário dessa energia que ele saiba onde a energia está sendo

gasta, pois muitas vezes dispositivos conectados à rede não estão funcionando de acordo como deveriam e conseqüentemente estão consumindo mais energia do que deveriam, o que vai de encontro ao conceito de ser sustentável, pois energia está sendo desperdiçada. Aliado a este fato a maioria dos aparelhos modernos possuem um modo de espera (stand-by) que por mais que aparentemente eles pareçam desligados, ainda assim estão operando com uma carga muito baixa, normalmente para acionamento remoto, o que ainda gera gastos energéticos. Com isso cria-se a necessidade de ter medidores de energia individuais para cada dispositivo. Assim o usuário pode mapear e programar a disposição dos seus aparelhos de acordo com seu consumo, podendo posteriormente fazer reparos em dispositivos que não estão com um funcionamento correto ou até substituindo o mesmo por um que tenha um consumo menor.

Estima-se que atualmente no Brasil, cerca de 10% da energia, o equivalente a aproximadamente 43 terawatt-hora, é desperdiçado, segundo um estudo da Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia (Abesco) causando o custo de R\$ 15 bilhões em um ano. Reduzindo o consumo de energia, conseqüentemente a expansão na demanda de produção de energia será menor. O que impactará em uma menor ação sobre os recursos naturais, tornando uma parcela do sistema mais sustentável.

A finalidade deste trabalho é desenvolver um instrumento que possa fazer essa medição individual de aparelhos industriais ou domésticos e calcular os seus gastos energéticos. Com isso é possível fazer uma análise de tudo que é consumido e fazer cortes de energia em aparelhos que não precisam estar ligados ou até mesmo conectados à rede por um determinado período de tempo, como por exemplo sistemas de iluminação, equipamentos industriais, aparelhos eletrônicos, carregadores conectados à rede sem ter uma carga para carregar ou até mesmo aparelhos que possuam um modo de espera. Com este trabalho será possível identificar as principais fontes de consumo, para que após essa análise e a obtenção dos resultados, proceda-se o gerenciamento para melhor uso da energia, reduzindo ao máximo o consumo.

A seguir, na primeira parte do trabalho, serão abordados os referências teóricos que fundamentam este estudo. Já na segunda parte são relatados os procedimentos metodológicos. Na continuidade, são expostos os resultados e finalizando, como fecho argumentativo, constam as considerações finais. Espera-se que o conjunto de

informações trazidas por esta pesquisa contribua efetivamente para redução dos impactos ambientais e economia de energia.

1 REVISÃO DA LITERATURA

1.1 Atual situação energética do Brasil

Para entender mais sobre a motivação do trabalho é interessante conhecer a atual situação energética do Brasil. O Brasil apresenta uma matriz energética com grande presença de fontes renováveis de energia, com mais de 85%, muito maior que a média mundial que é de apenas 19%.

No Gráfico1 observa-se a produção energética em 2012 segundo os dados do balanço energético nacional de 2013 do Ministério de Minas e Energia.

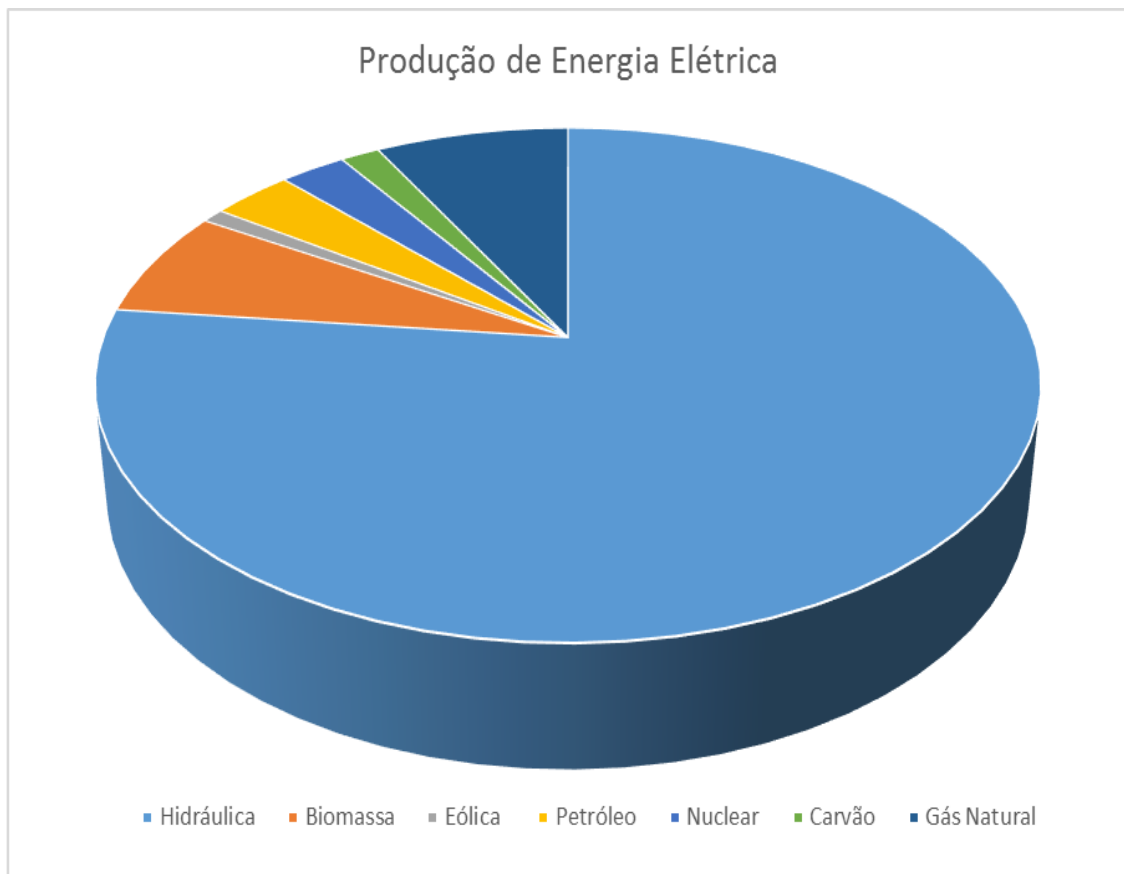


Gráfico 1 – Produção de energia elétrica nacional.
Fonte: Balanço energético nacional, 2013.

A maior parte da matriz energética do Brasil é derivada das hidroelétricas. A hidroeletricidade foi priorizada, no Brasil, desde a década de 1960, com a atuação da Eletrobrás, sendo a mais adequada fonte energética para produção de eletricidade no país.

Atualmente estima-se que apenas 30% do potencial hidrelétrico do Brasil foi utilizado, o que pode ser observado na Figura 1. O potencial hidrelétrico brasileiro é de 260 gigawatts (GW), o quarto maior do mundo, atrás apenas de Estados Unidos, Rússia e China. Deste total, os estudos consideram que apenas uma faixa entre 160 e 180 GW como sendo aproveitável. Os 80 a 100 gigawatts adicionais apresentam dificuldades para o seu aproveitamento por razões ambientais, por estarem em áreas de proteção ambiental ou reservas indígenas, que pode ser observado no mapa a seguir, retirado do atlas de energia elétrica do Brasil, produzido pela Agência elétrica do Brasil.

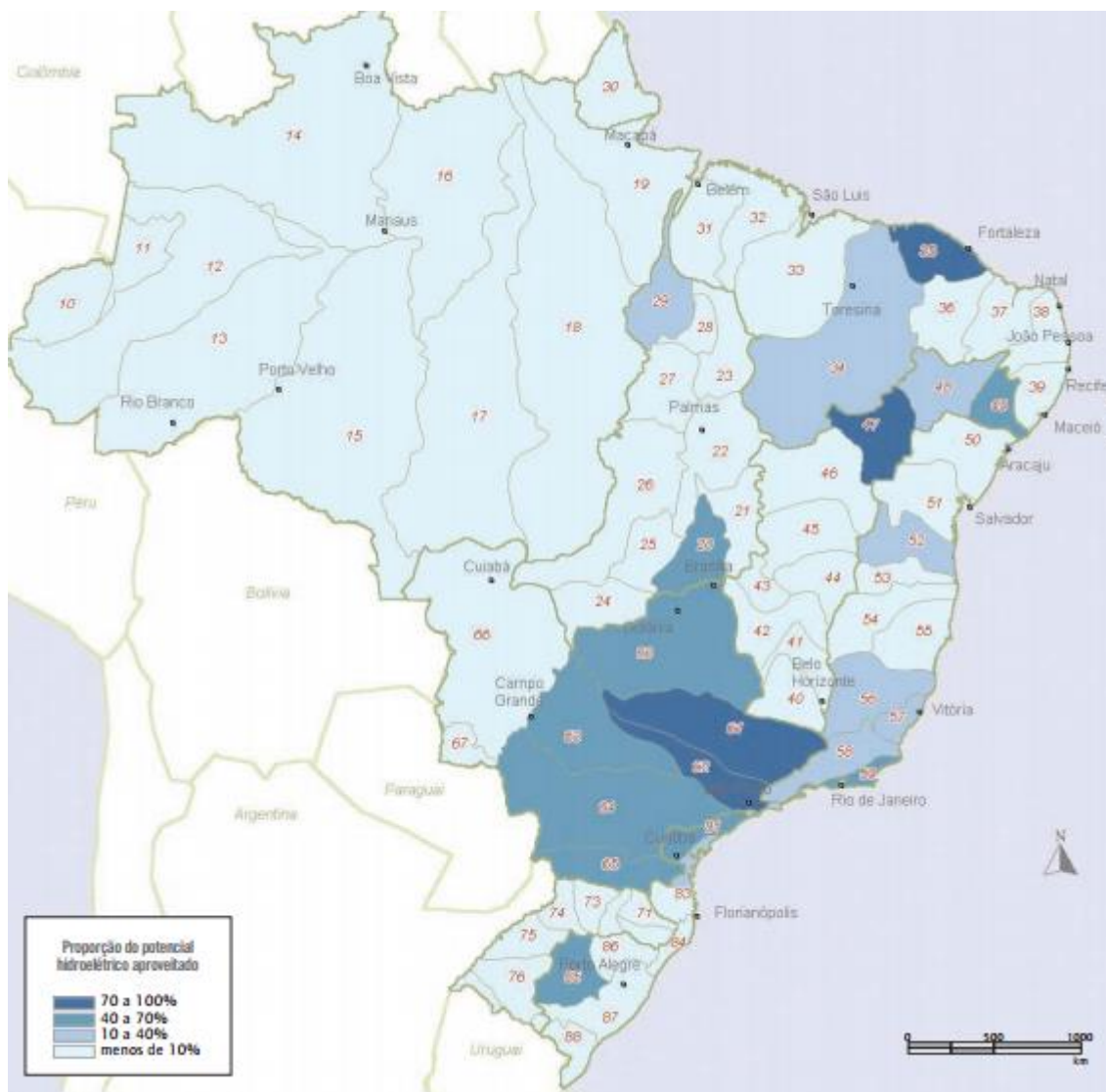


Figura 1 - Potencial hidroelétrico brasileiro.
Fonte: Atlas de energia elétrica do Brasil, 2012

Segundo estudos do Ministério de Minas e Energia, estima-se que na década de 2020-2030, ocorrerá a saturação do potencial hidrelétrico do Brasil. Para solucionar esse problema fontes alternativas de produção de energia estão sendo estudadas. A princípio será usada a energia térmica, porém não é a solução mais sustentável devido aos resíduos que as usinas termoelétricas produzem, para isso está sendo investido em energia limpa, principalmente eólica.

O Gráfico 2 à seguir mostra o consumo de energia por setor em 2012 segundo a Eletrobrás.

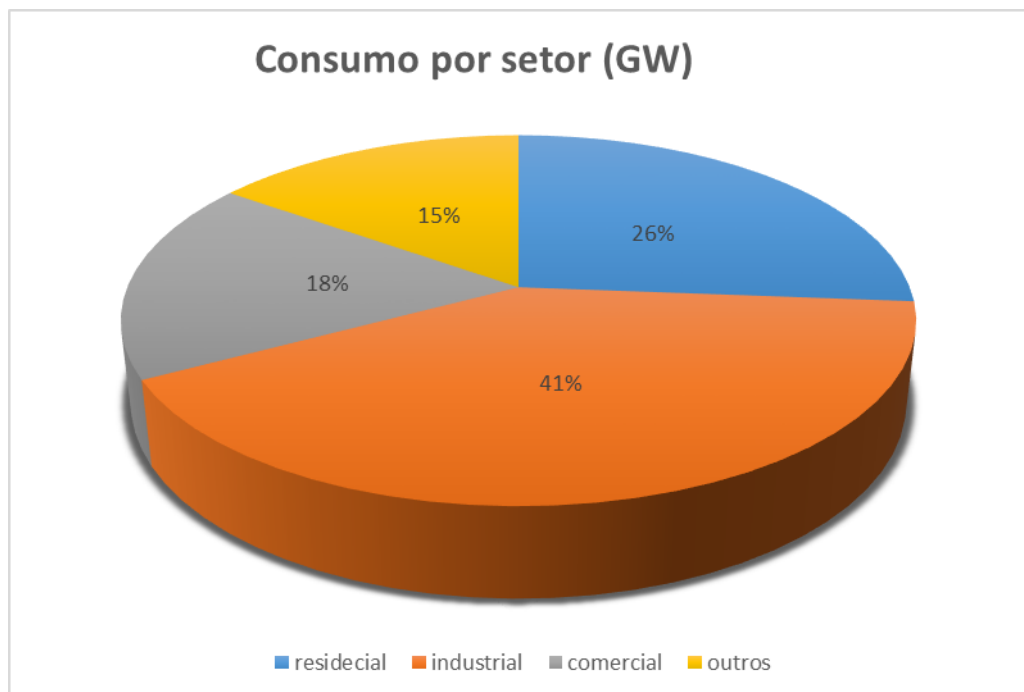


Gráfico 2 - Consumo de energia.
Fonte: Balanço energético nacional, 2013.

O setor que mais consome energia elétrica no país é o industrial, com mais de 180 mil gigawatts-hora, seguido pelo setor residencial com quase 120 mil gigawatts-hora. O setor comercial e os demais totalizam o restante do consumo, com cerca de 80 mil gigawatts-hora e 70 gigawatts-hora aproximadamente.

No Brasil o custo da energia para as indústrias é um dos maiores do mundo. A partir da análise da Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (FIRJAN), a partir das tarifas de consumo de energia elétrica industrial das 64 distribuidoras nos

27 estados, foi possível calcular a tarifa média de energia elétrica para a indústria no Brasil que é de 329 reais por megawatt-hora. Em comparação com outros países, o Brasil fica atrás apenas de Itália, República Tcheca e Turquia no que diz respeito ao custo de energia para a indústria. Esse alto valor se dá pelo fato de que quase metade do valor da tarifa é destinado ao Estado, com encargos setoriais ou impostos.

No setor residencial e comercial, os dados são semelhantes. O consumidor brasileiro paga uma das maiores tarifas de energia do mundo, fato ocasionado pela alta carga tributária. Em 2012 houve uma medida do Governo do Brasil, que eliminou 14 encargos setoriais na conta de luz, reduzindo o valor final da energia em aproximadamente 12%. Mesmo com esse corte de tributos a tarifa ainda é maior que a maioria dos países desenvolvidos.

Segundo pesquisa da ABRACE (Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia e de Consumidores Livres), o alto custo da tarifa acaba impactando o bolso das famílias. Para cada valor que um cidadão brasileiro pagar em sua conta de energia, indiretamente ele pagará o dobro considerando o preço da energia elétrica industrial embutida em todos os produtos que ele consome.

De acordo com o balanço energético de 2013, do total de energia disponibilizada, cerca de 590 terawatts-hora, estima-se que 15 % dessa energia foi perdida, por motivos comerciais ou técnicos.

1.2 Medidor de energia eletromecânico

Para desenvolver um aparelho que faça a medição individual, além do conhecimento de como é calculada a potência, é necessário saber como a medição é realizada nas indústrias e residências.

O medidor de energia eletromecânico apresenta o seu funcionamento idêntico ao motor de indução, através das interações entre os campos eletromagnéticos gerados por uma bobina de potencial e por uma bobina de corrente que proporcionam a rotação de um disco de alumínio magneticamente suspenso.

Seu princípio de funcionamento é através das correntes de *Foucault*. A interação entre as correntes e o fluxo magnético presente produzirá uma força fazendo o disco girar.

Observa-se na Figura 2 a seguir o medidor do tipo indução:

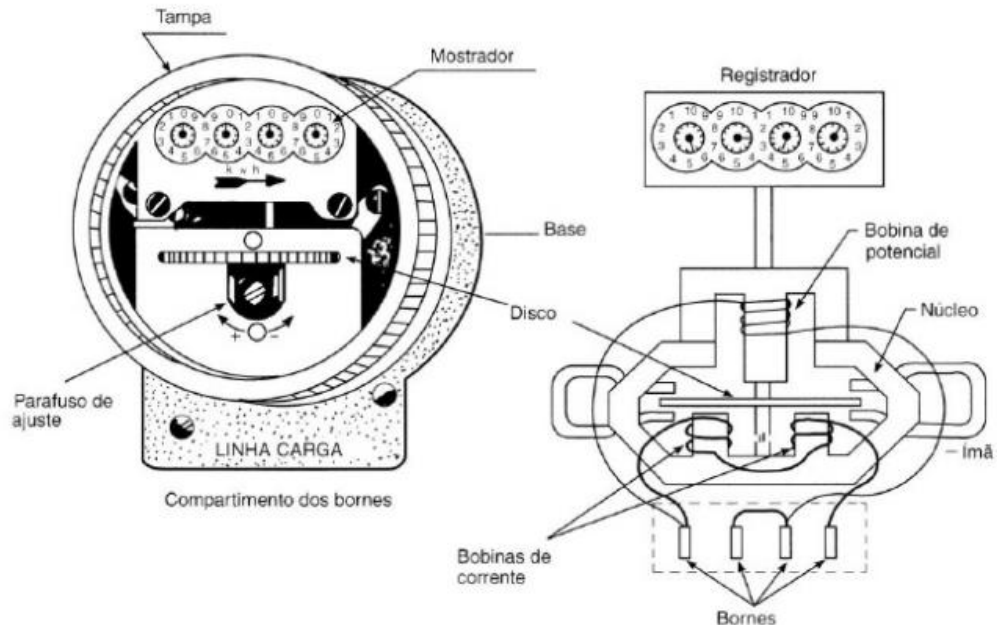


Figura 2 - Medidor do tipo indução.
Fonte: Creder, 2002

A bobina de potencial recebe esse nome por estar ligada em paralelo com a carga, assim ela será alimentada pela mesma tensão da carga. A bobina de corrente é ligada em série com a carga, assim a corrente da bobina é a mesma da carga. Sabendo que a resistência da bobina é constante, a corrente que irá circular é proporcional a tensão da bobina de potencial.

No princípio da interação eletromagnética conforme Filho (1983) um indutor percorrido por uma corrente, na presença de um campo magnético, fica submetido a uma força de sentido dado pela regra da mão direita e dado pela equação:

$$F = BiL \operatorname{sen}\alpha \quad (\text{Equação 1})$$

Onde a F é a força, B é o campo magnético, i é a corrente, L é o comprimento do condutor e α é o ângulo entre o vetor do campo magnético com o vetor da corrente.

Quando o fluxo magnético gerado pela bobina de potencial atravessar o disco, nele irá induzir correntes de *Foucault* que resulta em um torque que faz

com que o disco gire no seu próprio eixo. Essa força (ou torque) é derivada da corrente e da tensão que está sendo aplicada nas bobinas.

O número de rotações do disco é proporcional à energia consumida pela carga em um dado intervalo de tempo, calculando assim a potência ativa consumida, que é dada em quilowatt-hora (kWh).

1.3 Potência

Para mensurarmos consumo de energia, primeiramente devemos saber o que está sendo medido. Os medidores de energia tradicionais calculam a potência que está sendo consumida. Com base na física básica segundo *Halliday, Resnick e Walker* (2002) temos que potência é a taxa de variação de temporal do gasto de energia. Com a potência elétrica ocorre o mesmo, e pode ser expressa na equação 2 por (NILSON, RIEDEL, 2009).

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde p é a potência instantânea em watt (w), dw é a variação da energia em joules (J), e dt é a variação do tempo em segundos (s). Assim 1 watt é equivalente a 1 J/s.

Para uma melhor definição de potência elétrica, conceitos como tensão e corrente elétrica são fundamentais. Com isso podemos trazer o conceito abstrato de energia para dois conceitos que podem ser mais facilmente mensuráveis.

Na teoria de circuitos elétricos, Nilsson e Riedel (2009) abordam o conceito de carga elétrica relatando que é a base para descrever todos os fenômenos elétricos. A carga elétrica é bipolar, ou seja, os efeitos são descritos em forma de cargas positivas e negativas. Os efeitos elétricos são atribuídos tanto a separação entre cargas quanto a cargas em movimento. Quando existe a separação entre as cargas elétricas, uma

força é gerada, chamada tensão e o movimento das cargas dá origem a um fluxo chamado corrente, ambas são determinadas por:

$$v = \frac{dw}{dq} \quad \text{e} \quad i = \frac{dq}{dt} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde v é a tensão em volts (v), dw é a variação da energia em joules (J), dq é a variação da carga em coulombs (C), i é a corrente em ampères, e dt é a variação do tempo em segundos (s).

De acordo com as equações descritas anteriormente podemos fazer uma relação entre potência, tensão e corrente onde obtemos:

$$p = \frac{dw}{dt} = \left(\frac{dw}{dq}\right) \left(\frac{dq}{dt}\right) \quad (\text{Equação 4})$$

E conseqüentemente:

$$p = vi \quad (\text{Equação 5})$$

Com isso observamos que a potência instantânea é o produto da tensão pela corrente. Outra relação que se pode fazer com potência é a partir da primeira lei de Ohm que define

$$R = \frac{v}{i} \quad (\text{Equação 6})$$

Substituindo a equação 4 na equação 3 obtém-se

$$p = Ri^2 \quad (\text{Equação 7})$$

Que define potência em um resistor em termos de corrente.

Outro conceito importante para definição de potência é o fator de potência. Segundo Roggia (2009), fator de potência é um indicador que informa a eficiência com

a qual a carga está sendo consumida. É definido como uma relação entre a potência ativa e a potência aparente consumidas por um dispositivo.

O fator de potência é adimensional e possui uma variação entre 0 e 1. A condição ideal, ou seja, quando o fator de potência for unitário, ocorre quando as cargas obedecem a lei de ohm. Neste caso as formas de onda de tensão e corrente estão em fase.

A vantagem de se obter um fator de potência elevado é que a potência ativa é muito próxima à aparente, isso significa que praticamente toda a energia é transformada em trabalho útil, conseqüentemente maior e a quantidade de energia aproveitada

1.4 Sensores

Sensores são dispositivos que convertem uma grandeza física de qualquer espécie em um sinal que possa ser transmitido a um elemento que mostre o valor da grandeza que está sendo medida ou que seja visível para um elemento de comparação de um sistema de controle.

Os elementos sensores são denominados transdutores quando convertem a grandeza de entrada para uma grandeza elétrica, como corrente, tensão ou resistência elétrica.

Os sensores podem ser de dois tipos: digitais ou analógicos.

Quando um sinal quantifica a existência ou não de um evento, é chamado sensor digital ou discreto. Apresenta na sua saída uma tensão característica de acordo com o evento que está acontecendo, podendo ser inclusive de ligado ou desligado. Podem ser eletromecânicos como switches ou interruptores ou eletrônicos como sensores indutivos.

Sensores analógicos monitoram uma faixa de valores contínuos que tem um valor máximo e mínimo estabelecidos. Apresentam na sua saída um sinal de tensão, corrente ou resistência proporcional a grandeza física medida. Esses tipos de sensores apresentam algumas características particulares:

- **Faixa:**
A faixa do sensor é a amplitude da grandeza física medida que o sensor opera.
- **Resolução:**
Define-se resolução o menor incremento da grandeza a ser medida que provoca a mudança no sinal da saída do sensor.
- **Sensibilidade:**
É a relação entre o sinal elétrico da saída e o valor da grandeza física medida.
- **Linearidade:**
Se o valor medido varia na mesma intensidade do valor entregue o sistema é considerado linear. Uma forma de observar se o sensor é linear ou não é observando a sua sensibilidade dentro de uma determinada faixa de operação.
- **Erro:**
É a diferença absoluta entre o valor medido que é retornado pelo sensor e o valor que deveria ser fornecido realmente. O erro pode-se representar em termos percentuais dividindo essa diferença pela faixa.

2 METODOLOGIA

Para entender o processo da pesquisa inicia-se com um fluxograma representado na Figura 3, o qual demonstra o funcionamento do aparelho a ser desenvolvido. O medidor individual se posiciona em série com o dispositivo que está conectado à rede. O sensor detecta a corrente que está passando entre a rede e o dispositivo através de um fenômeno conhecido como efeito Hall e retorna um valor analógico em tensão. Essa tensão é aplicada sobre um amplificador operacional que poderá ou não dar um ganho na tensão de entrada e a sua saída será aplicada no controlador para o processamento digital do sinal. O controlador é o Arduino Mega, que irá receber o valor de saída do amplificador na sua entrada analógica e fará a conversão para um valor digital. Esse valor digital é aplicado em um algoritmo que vai fazer as relações necessárias para que a resposta final seja igual a corrente que está passando entre a rede e o aparelho.

A Figura 3 fornece uma visão geral do sistema e de como foi desenvolvido o medidor individual.

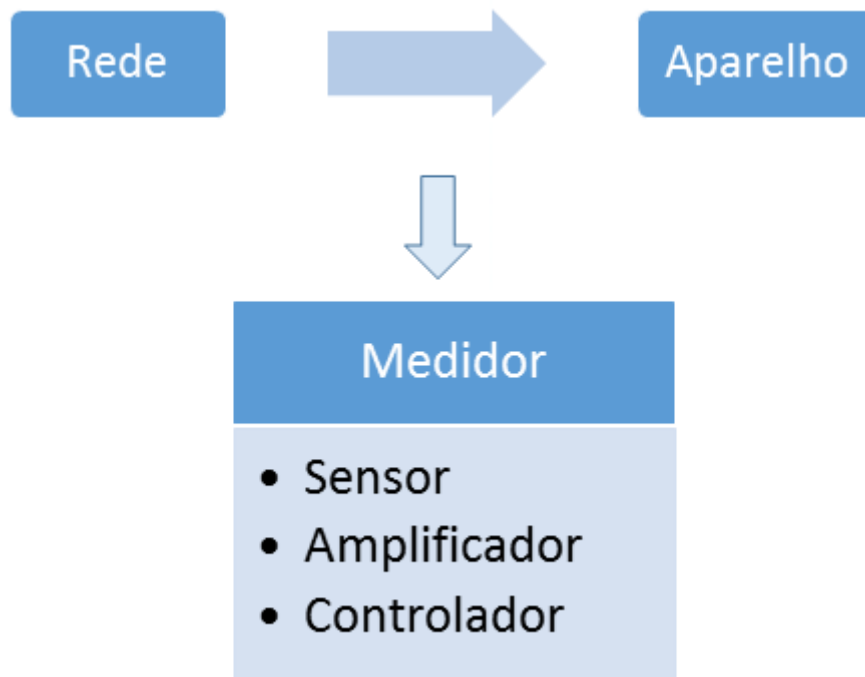


Figura 3 - Modelagem do sistema.
Fonte: elaborado pelo autor.

2.1 Hardware

2.1.1 Sensor de Efeito Hall

O sensor é o primeiro estágio para a construção do medidor. O instrumento escolhido para construção do dispositivo é o ACS 712 da Allegro Microsystems. É uma opção econômica, de fácil implementação e precisa para medir correntes contínuas ou alternadas, tanto para aplicações industriais quanto comerciais. A Figura abaixo mostra o funcionamento típico do sensor.

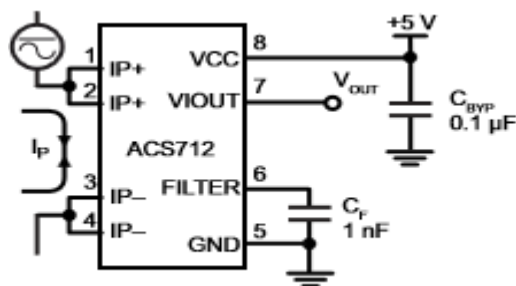


Figura 4 - ACS 712
Fonte: Datasheet ACS712

Os pinos 1 e 2 recebem a corrente contínua ou alternada a ser medida, esta corrente sai pelos pinos 3 e 4. O pino 5 é o terra do sensor, o pino 6 é o filtro que tem como finalidade eliminar o ruído de saída. O pino 7 é a saída em tensão equivalente a corrente da entrada. E finalmente o pino 8 é a alimentação do sensor, correspondente a 5 volts.

O ACS712 possui algumas características de operação:

- Baixo ruído;
- 80 KHz de largura de banda;
- Erro de 1,5%;
- Baixa resistência interna;
- 185 mV/A de sensibilidade;
- Saída proporcional para correntes contínuas e alternadas.

Para medir a corrente esse sensor utiliza um fenômeno físico chamado Efeito Hall.

Efeito Hall ocorre quando se produz uma diferença de potencial em um condutor elétrico quando uma corrente é aplicada sobre ele, juntamente com a presença de um campo magnético. Ocorre um acúmulo de cargas positivas em um lado do condutor e negativas no lado oposto, causando assim uma diferença de potencial, conseqüentemente uma tensão que aumenta e diminui de acordo com a corrente que está passando pelo condutor.

O sensor utilizado neste trabalho tem uma faixa de operação de -5A à +5A, sendo a tensão de saída de 0 A equivalente a 2,5V. As figuras abaixo retiradas do datasheet do sensor mostram a sua faixa de operação e a tensão de saída para 0A.

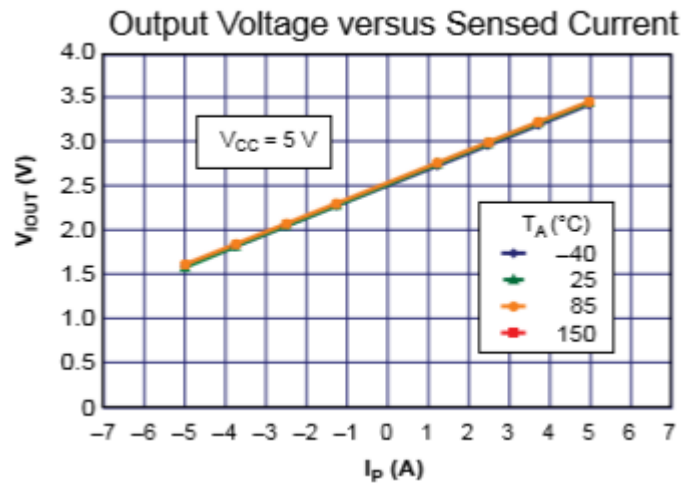


Figura 5 - Faixa de operação ACS 712.
Fonte: Datasheet ACS712.

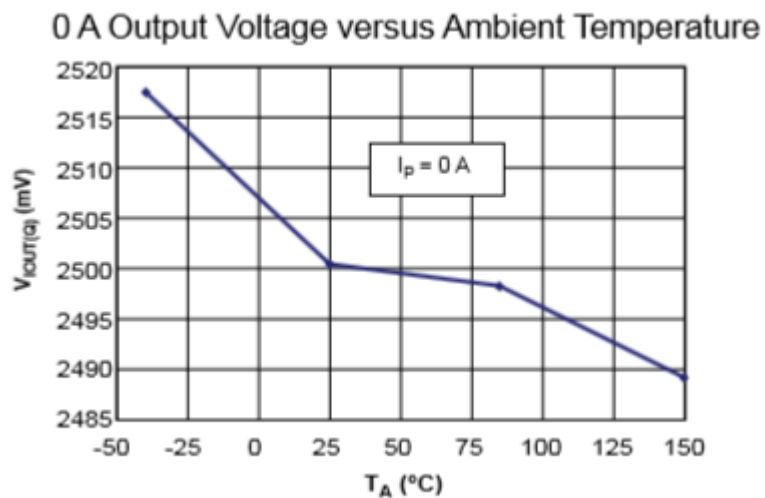


Figura 6 - Saída para 0 a ACS 712.
Fonte: Datasheet ACS712

Um fator que pode fazer com que a medição não seja precisa ao utilizar esse sensor é a temperatura. Os testes realizados pelo fabricante provam que sua sensibilidade varia de acordo com a temperatura do ambiente. Para medições mais precisas, a temperatura pode ser um fator de influência para aumentar a porcentagem de erro.

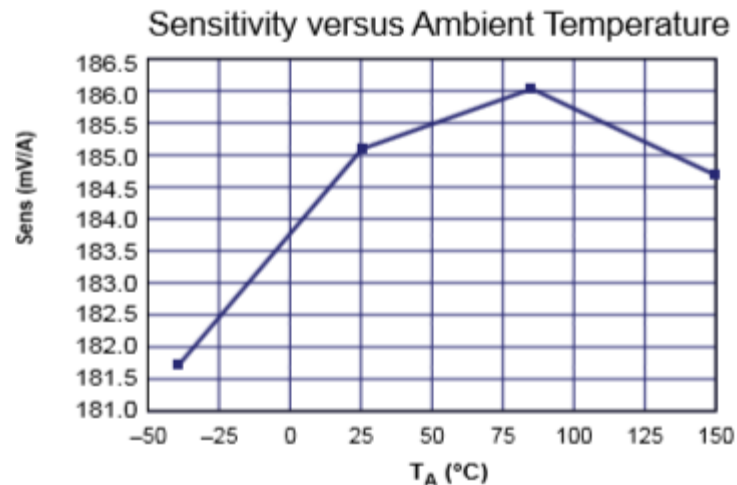


Figura 7 - Sensibilidade de acordo com a temperatura ACS 712.
Fonte: Datasheet ACS712

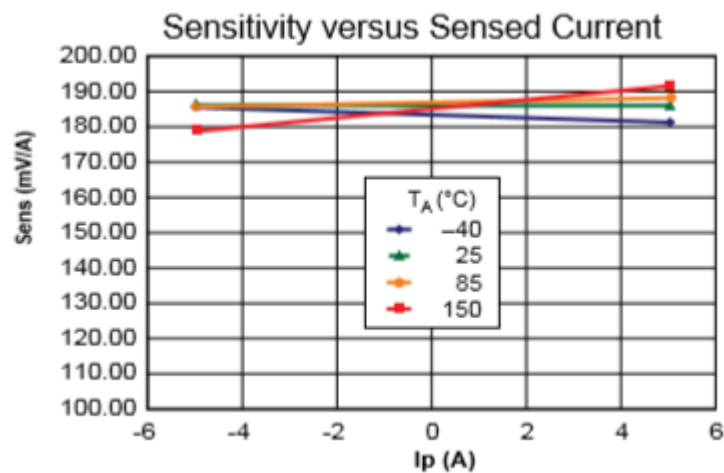


Figura 8 - Sensibilidade de acordo com a corrente ACS 712.
Fonte: Datasheet ACS712

Com todas as informações disponibilizadas pelo datasheet é possível modelar o comportamento do sensor para os cálculos posteriores do medidor.

Sabemos que a sua faixa de operação será de -5A a + 5A, sua resolução é de 185mV/A ou aproximadamente 5mA/mV. E o erro médio da medição é de 1,5%.

2.1.2 Circuito Amplificador

Nesta etapa do medidor, o sinal de saída do sensor irá passar por um circuito e se dividirá em dois, uma será aplicada diretamente na entrada do controlador, a outra será inserida em circuito onde se submeterá a ação de dois estágios.

Segundo Pertence (2003) o amplificador operacional é um amplificador de corrente contínua multiestágio com entrada diferencial cujas características se aproximam de um amplificador ideal. Tem como principais características, resistência de entrada infinita, resistência de saída nula, ganho de tensão infinito, resposta em frequência infinita e sensibilidade a temperatura nula. Além dessas características principais, os amplificadores também apresentam características na sua faixa de operação. É possível delimitar a faixa de operação de acordo com tensões de referência que são inseridas no amplificador, em ambos os amplificadores utilizados, a referência varia de 0V a 5V.

A primeira etapa desse circuito é composta de um seguidor de tensão, ou *buffer*. Este circuito apresenta uma altíssima impedância de entrada e uma baixíssima impedância de saída. Neste caso o ganho do amplificador é 1, na qual apresenta em sua principal característica como um reforçador de corrente e isolador de estágios.

Ainda nessa primeira etapa o amplificador utilizado é o AD620. Este instrumento é denominado amplificador de instrumentação. É um tipo especial de amplificador operacional composto de um arranjo entre três amplificadores operacionais, que possui algumas características particulares como impedância de entrada muito elevada, impedância de saída extremamente baixa, ganho em malha aberta superior em comparação aos amplificadores comuns e grande rejeição de ganho em modo comum.

A principal utilização desse amplificador de instrumentação no primeiro estágio é rejeitar o ganho do circuito no modo comum, o que acarretará na redução do ruído. Apenas o sinal que realmente interessa irá para o segundo estágio, o estágio da amplificação.

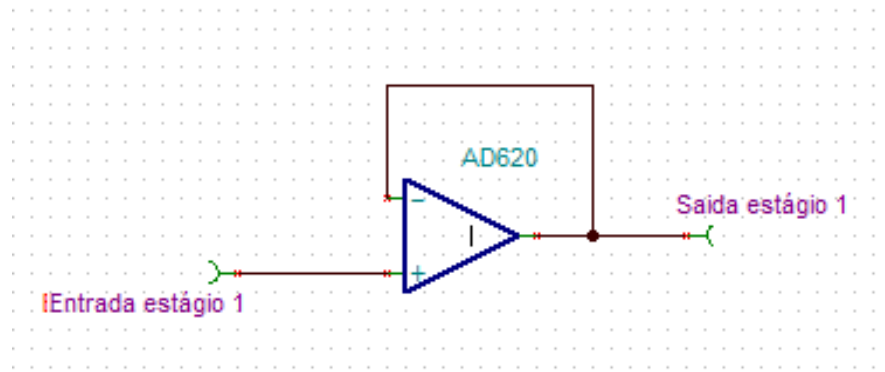


Figura 9 – Buffer.
Fonte: elaborado pelo autor.

No segundo estágio, será utilizado o amplificador operacional LM318. Este amplificador é denominado não-inversor. Nessa fase será atribuído ao sinal de entrada um ganho equivalente à razão dos resistores R1 e R2 do circuito. No projeto do circuito foi utilizado um ganho equivalente a 10, para que a resolução do circuito pudesse ser aumentada, sendo mais sensível às pequenas variações de tensão provocadas por correntes baixas. A principal consequência desse ganho é que a faixa de operação do circuito e sua resolução mudam em comparação à sua característica principal. A faixa de operação que variava entre 0A e 5A agora passa a ser de 0A a 0.5A e sua resolução para ser de 1850 mv/A.

Na segunda etapa ainda é inserida outra característica ao circuito, que é a redução da banda de frequência através de um filtro. Filtro é um circuito capaz de selecionar sinais analógicos de tal maneira que apenas uma faixa continue atuante normalmente. Segundo Pertence (2003) ainda um filtro elétrico é um quadripolo capaz de atenuar determinadas frequências do espectro do sinal de entrada e permitir a passagem das demais. O seu comportamento varia de acordo com a frequência do sinal aplicado sobre ele. Cada combinação dos elementos de um circuito apresenta uma característica de saída diferente.

O filtro usado para o desenvolvimento do dispositivo é o filtro ativo passa baixa, e apresenta o seguinte esquemático.

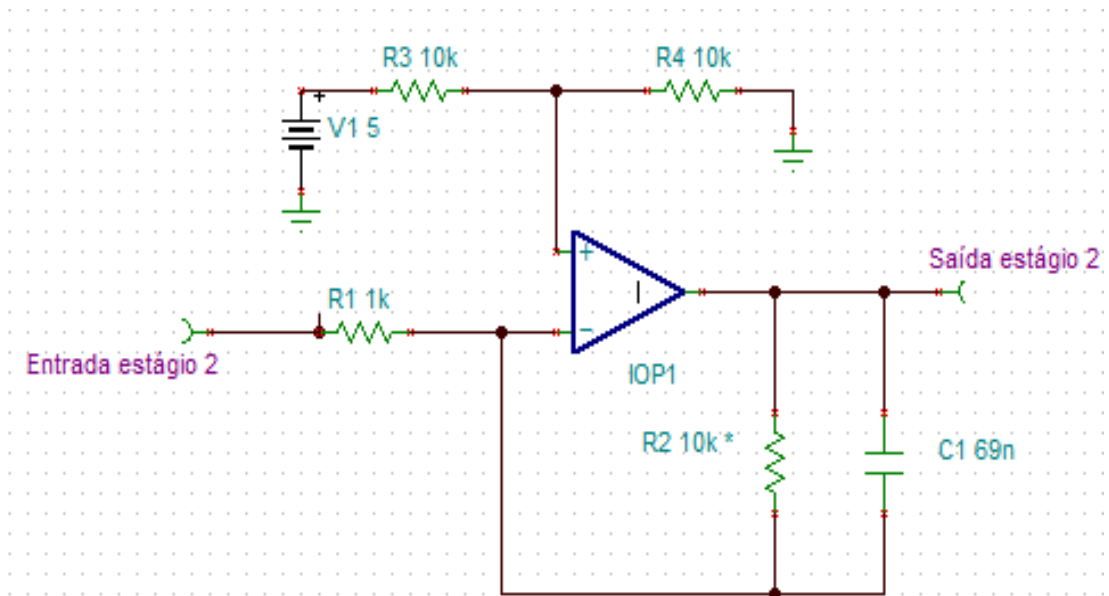


Figura 10 - Amplificador com filtro ativo passa baixa.
Fonte: elaborado pelo autor

A combinação de um filtro ativo com um circuito amplificador dá algumas características específicas para o sistema, como a amplificação dos sinais de entrada, ao mesmo tempo eliminar sinais indesejados que possam ser amplificados.

Em frequências muito baixas o capacitor age como um circuito aberto e o circuito amplificador tem seu funcionamento normal gerando um ganho igual a $-R2/R1$. Em altas frequências o capacitor age como um curto circuito ligando a saída do amplificador diretamente ao terra (NILSSON E RIEDEL, 2009).

O filtro ativo passa baixa possui uma função que frequência de corte que é determinada por:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde f é a frequência de corte, R é a resistência $R1$ do circuito da figura 9, e C é o valor do capacitor $C1$.

O filtro em questão foi projetado para ser um filtro passa baixa, que rejeita frequências maiores que 2340 Hz. Esse valor foi obtido após uma análise das distorções harmônicas. Uma distorção é considerada harmônica quando ela se repete de forma constante a cada ciclo da frequência fundamental. As distorções harmônicas podem acarretar alguns efeitos indesejáveis no sistema como por exemplo, excitação

de correntes ressonantes, aparecimento de vibrações e ruídos, sobreaquecimento e erro de precisão em medições.

Segundo a norma IEC 61000-3-2, são estabelecidos limites para emissão de harmônicos de corrente na rede pública. Aplica-se em aparelhos elétricos e eletrônicos que tenham corrente de entrada de até 16 A conectados à rede pública por uma tensão alternada de 50Hz a 60Hz com tensão entre 220V e 240V. A tabela abaixo define os limites de acordo com a norma

Ordem do Harmônico n	Classe A Máxima corrente [A]	Classe B Máxima corrente[A]	Classe C (>25W) % da fundamental	Classe D (>75W, <600W) [mA/W]
Harmônicas Ímpares				
3	2,30	3,45	30.FP	3,4
5	1,14	1,71	10	1,9
7	0,77	1,155	7	1,0
9	0,40	0,60	5	0,5
11	0,33	0,495	3	0,35
13	0,21	0,315	3	0,296
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \cdot \frac{15}{n}$	$0,225 \cdot \frac{15}{n}$	3	3,85/n
Harmônicos Pares				
2	1,08	1,62	2	
4	0,43	0,645		
6	0,3	0,45		

Tabela 1 - Limite para os Harmônicos de Corrente
Fonte: IEEE explorer

Segundo a norma IEC 61000-3-2, foi observado que até a harmônica de número 39 é considerada, o que explica a faixa de operação do equipamento. Como a rede em questão tem a frequência de 60 Hz, a harmônica de número 39 terá a frequência de 2340Hz.

2.1.4 Arduino

O Arduino é uma plataforma de desenvolvimento eletrônico com um hardware livre. É utilizada para criação de projetos acessíveis e de baixo custo, também é muito flexível para usos didáticos. A escolha do Arduino se dá pelo fato de ser um kit de

desenvolvimento barato, com uma linguagem de programação acessível, além de possuir um conversor analógico-digital incluído. Outro fato decisivo na escolha, é que a placa do sensor ACS 712 foi projetada para Arduino e PIC, facilitando a sua utilização.

A versão utilizada no trabalho é o Arduino Mega 2560, a sua placa é baseada no controlador ATmega2560 com suporte de entrada e saída, uma linguagem de programação padrão na qual tem origem em Wiring, e é essencialmente C/C++.

Algumas características do Arduino Mega 2560:

- Tensão de entrada de 7V a 12 V, pode ser alimentada por USB, e tensão de operação de 5V;
- 54 pinos digitais de entrada e saída;
- 16 pinos analógicos de entrada;
- Clock de 16MHz;

Como citado acima, uma característica determinante para a utilização do Arduino é pelo fato de ter um conversor AD interno de fácil acesso. Esse conversor também possui algumas características de operação:

- 10 bits para conversão analógica digital;
- Mapeia entradas entre 0V a 5V;
- Retorna valores entre 0 e 1023, aproximadamente 4.9mV por unidade;
- Tempo de 100us para fazer uma leitura, limite de 10000 leituras por segundo;

A saída filtrada do amplificador com ganho é inserida no pino A0 do controlador. Consequentemente a tensão que entra no pino é convertida em um valor recíproco a tensão, em um valor digital. A saída natural do sensor é inserida no pino A1 do controlador.

Todas as comparações para definição da faixa de operação será feita via software para melhor se adequar com a necessidade de precisão da medida.

2.1.5 Modelagem

Após passar por todas as etapas do circuito é possível unir todos os componentes e modelar o sistema. A figura abaixo mostra todo o hardware empregado.

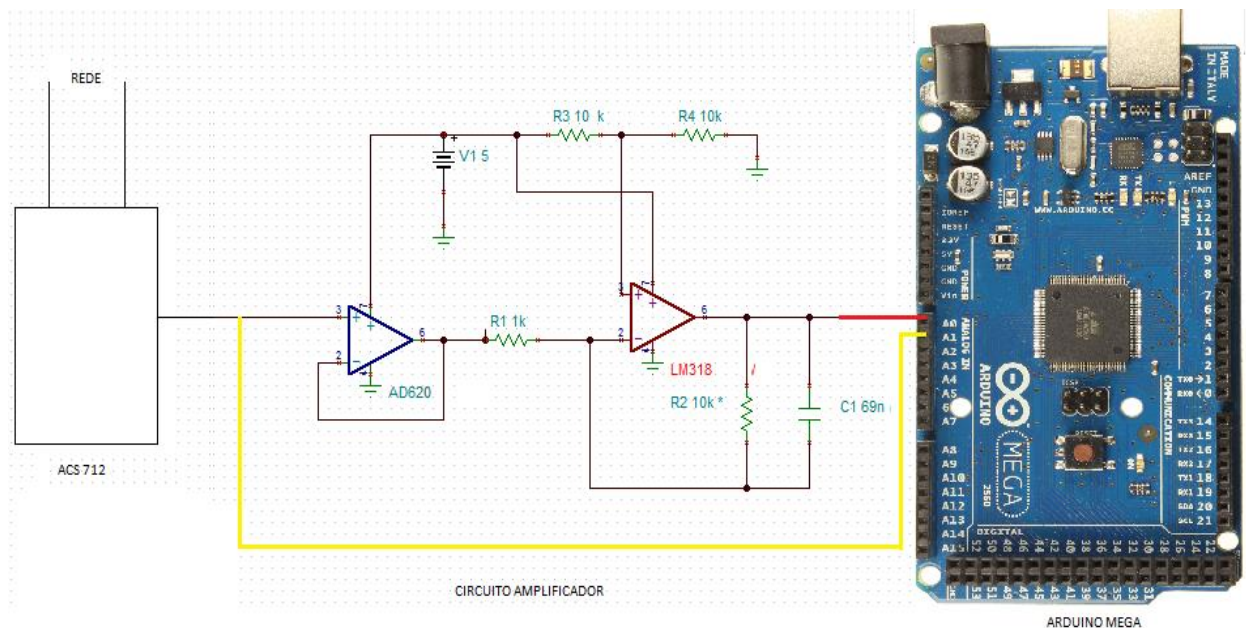


Figura 11 - Modelagem do hardware do medidor.
Fonte: elaborado pelo autor

2.2 Software

O programa desenvolvido para efetuar a medição é programado em linguagem C, como citado anteriormente. O seu princípio de funcionamento está na leitura da entrada de tensão nos pinos A0 e A1 do Arduino, que serão convertidos para um valor analógico que varia entre 0 e 1023, sendo o valor digital zero para 0V e o valor digital 1023 para 5V.

O código é simplificado pois no Arduino existem funções já presentes em sua biblioteca que facilitam a sua utilização, como por exemplo a função `AnalogRead()`¹, que lê e retorna diretamente o valor lido em seu pino.

¹ Mais informações em www.arduino.cc

A sua primeira parte faz uma comparação entre os dois valores de entrada nos pinos A0 e A1, que correspondem a saída natural sem ganho e a saída com ganho do circuito respectivamente. Esses dois canais são utilizados para verificação da corrente que está sendo medida. A entrada com ganho A1 possui uma sensibilidade maior, assim consegue detectar correntes mais baixas.

Após essa análise verifica se o valor que é lido na entrada A1, com ganho 10, é inferior a 3,425V. Se o valor estiver abaixo deste valor significa que a corrente da rede está na faixa entre 0A e 0,5 A. A resolução nessa faixa de operação com ganho é de 1850mv/A, sendo possível fazer medições mais precisas com pouca variação de tensão na entrada.

Quando o valor de A1 exceder 3,425 V, essa entrada será desconsiderada e a medição será realizada de acordo com a saída natural do sistema (A0). O circuito de amplificação entrará em saturação, ou seja, atingirá o seu valor máximo de saída e não aumentará mais. A sua faixa de operação irá variar de 0,5 A até 5A, com uma resolução de 185mV/A. Essa mudança na escolha da faixa de atuação de acordo com a saída se dá pelo fato de que com a saída natural do sistema não é possível de medir correntes muito baixas, o que é possível com o auxílio do circuito com ganho devido a uma maior resolução.

Após essa análise, os valores são subtraídos do zero do sistema, ou seja 2.5V, para se obter uma referência na medida e torná-la mais precisa. Em seguida, os valores são submetidos à seguinte equação:

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}}$$

Onde N é igual a 4800, e os valores de x correspondem aos valores de entrada da leitura analógica.

São analisados 4800 amostras de cada entrada para retornar um valor ao usuário, a escolha desse número se dá de acordo com o Teorema de amostragem de Nyquist. Segundo Monson (2006) o teorema de Nyquist diz que um sinal digital ou analógico pode ser representado ou reconstituído a partir de amostras desse sinal, desde que a quantidade de amostras seja igual ao dobro da maior frequência presente no sinal amostrado, ou seja, como os sinais são filtrados por um filtro passa baixa,

com a frequência de corte de 2400Hz aproximadamente, é possível reconstituir esse mesmo sinal com 4800 amostras, o que segue o teorema de Nyquist.

Finalmente esse valor de corrente é multiplicado pelo valor de tensão da rede, em média 220V, para que seja estimada a potência total do sistema.

3 RESULTADOS

Os testes do medidor foram realizados no laboratório Nupedee da Universidade Federal de Santa Maria. Para os testes foram escolhidas cargas puramente resistivas, (lâmpadas incandescentes) que possuem o fator de potência igual a 1, já que o medidor não detecta atrasos ou adiantamento de fase. Neste caso o medidor não apresentará defasagem na sua forma de onda, logo a potência medida será a potência ativa.

Foram escolhidas lâmpadas com as potências de 25W, 40W e 200W por serem estas disponíveis para utilização no laboratório. As lâmpadas foram submetidas a um Variac, um aparelho que retorna valores entre 0% e 100% da tensão da rede. A medição é ao passo de 10V, variando entre 0V e 220V, como sua resistência é fixa de acordo com a variação de tensão sobre a carga, a sua corrente irá variar conseqüentemente. O valor medido retornado no monitor serial do Arduino é comparado com um Amperímetro ligado em série com a lâmpada. Também foi realizada a medição de lâmpadas de 200W em paralelo. A medição das lâmpadas em paralelo foi feita primeiramente com uma lâmpada ligada ao sistema, logo após, duas lâmpadas ligadas em paralelo e finalmente três lâmpadas em paralelo.

Os resultados das medições das correntes para uma lâmpada de 25W verificam-se no gráfico a seguir:

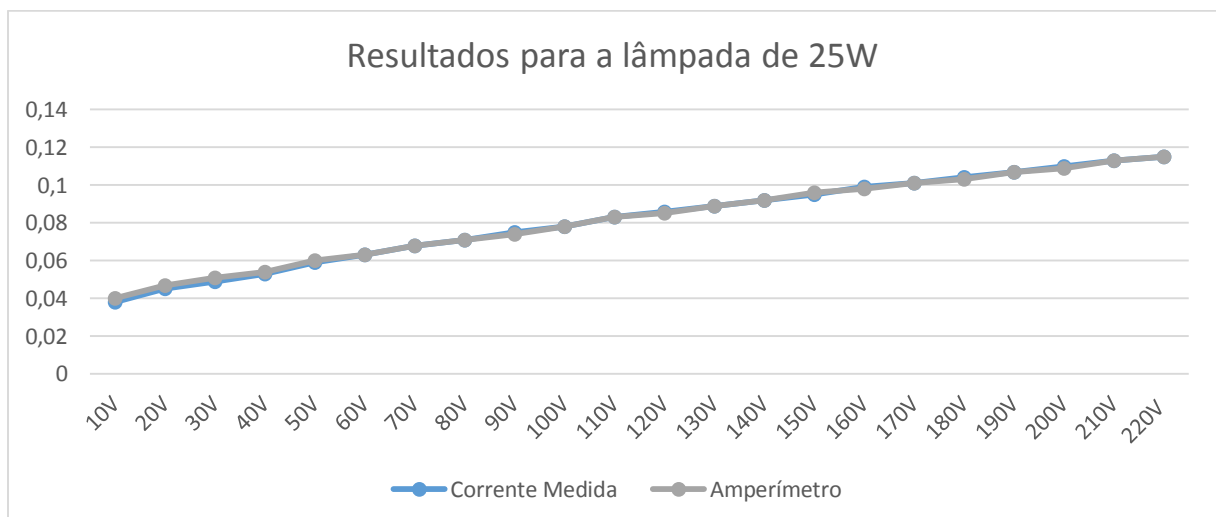


Gráfico 3 - Medições das correntes para uma lâmpada de 25W.
Fonte: elaborado pelo autor

Para uma lâmpada de 40W os resultados das medições das correntes encontram-se no gráfico abaixo:

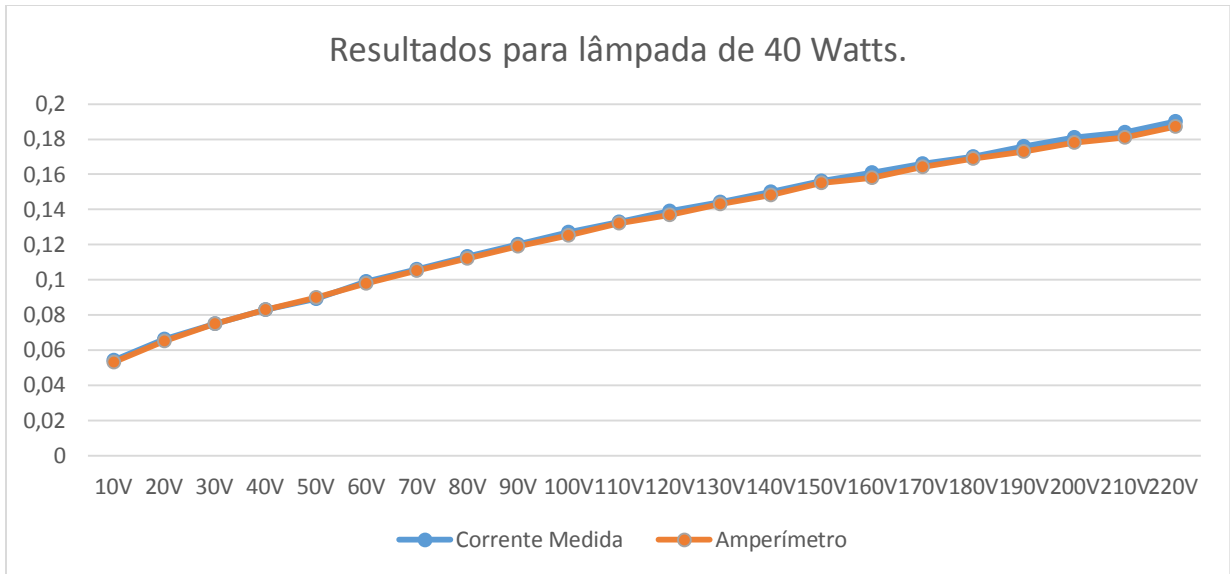


Gráfico 4 - Medições das correntes para uma lâmpada de 40W.
Fonte: elaborado pelo autor

A seguir, as medições dos resultados para uma lâmpada de 200W são demonstrados no gráfico a seguir:

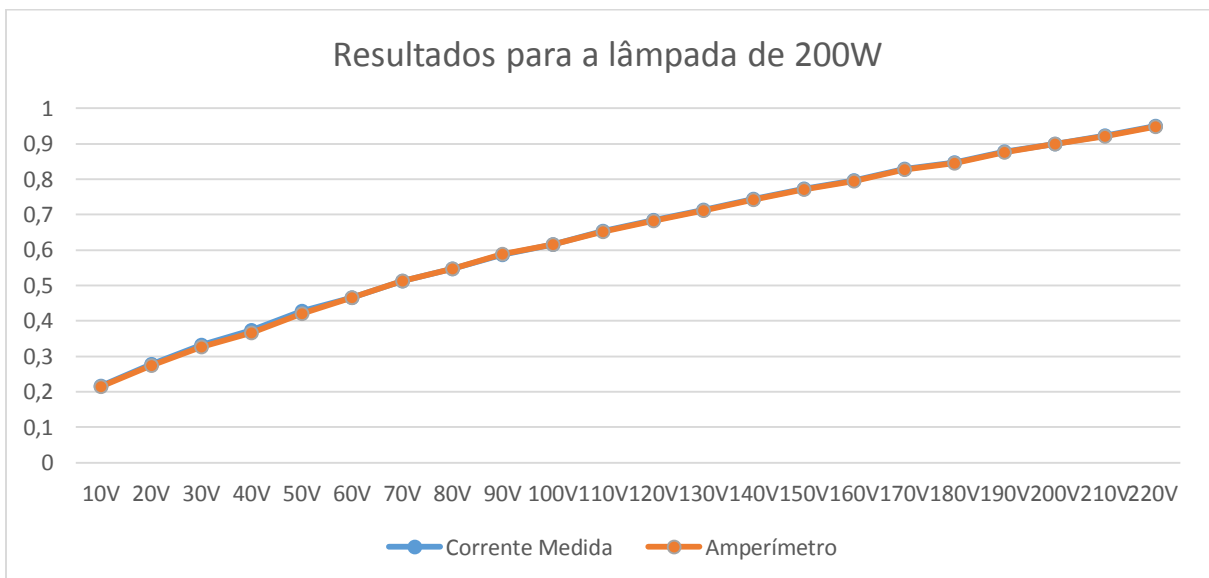


Gráfico 5 - Medições das correntes para uma lâmpada de 200W.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Finalizando, a medição de lâmpadas de 200W em paralelo é demonstrada abaixo:

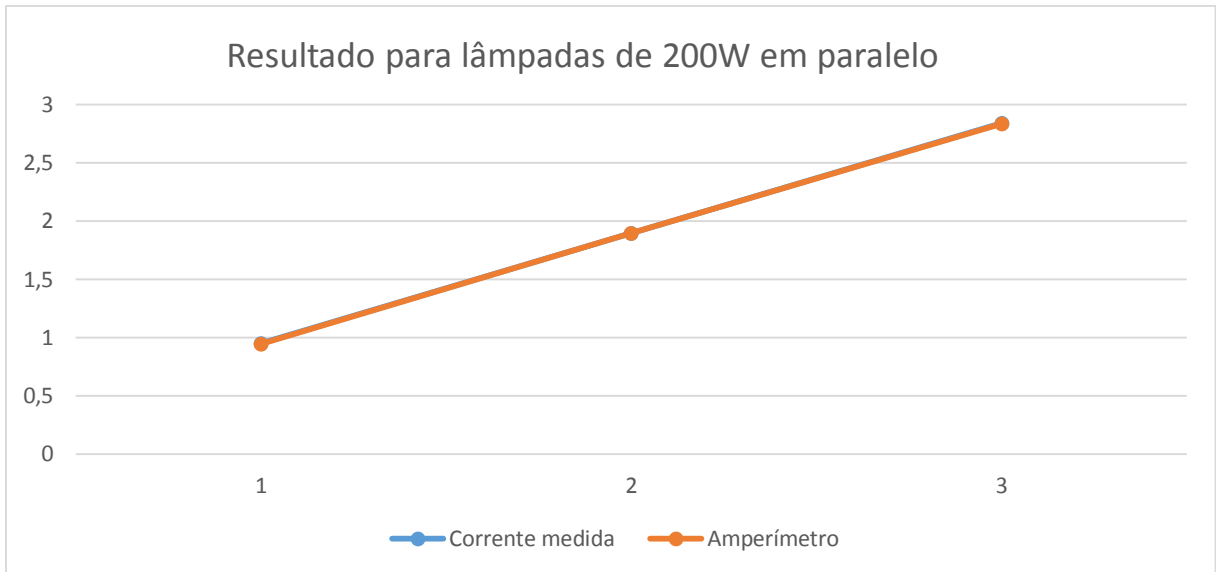


Gráfico 6 - Medições das correntes para lâmpadas de 200W em paralelo.
Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando as medições de corrente realizadas pelo aparelho verifica que elas se assemelham com as medições feitas pelo amperímetro. A variação máxima observada foi de 7mA, que pode ser atribuída ao ruído, pois o medidor encontra-se em um ambiente experimental não ideal (protoboard).

A partir dessa análise de corrente é possível determinar a potência considerando a faixa de tensão aceitável pela ANEEL, de acordo com a resolução número 505 de 2001, que varia entre 209V a 231V.

A seguir será demonstrado o cálculo da potência das cargas que anteriormente tiveram seus valores de corrente medidos, considerando a tensão mínima e máxima estabelecida pela ANEEL e que a medição está próxima da real realizada pelo amperímetro.

Primeiramente será medida a potência para uma lâmpada de 25W, que será representada no gráfico abaixo.

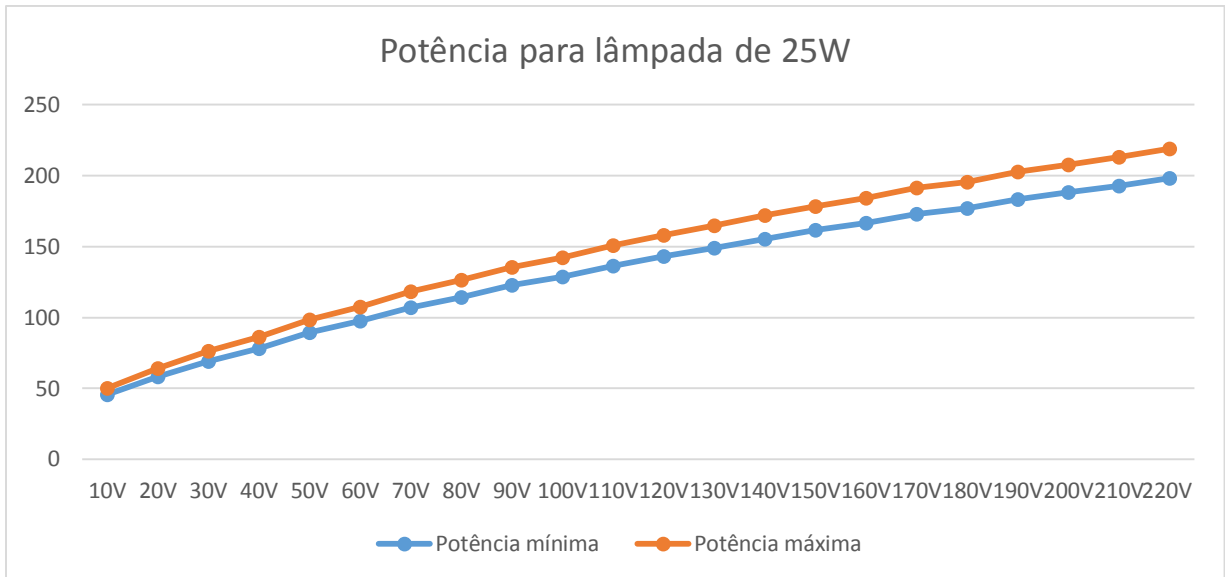


Gráfico 7 - Medições das potências mínima e máxima para lâmpada de 25W.
Fonte: elaborado pelo autor

Logo abaixo as medições das potências mínima e máxima para lâmpada de 40W

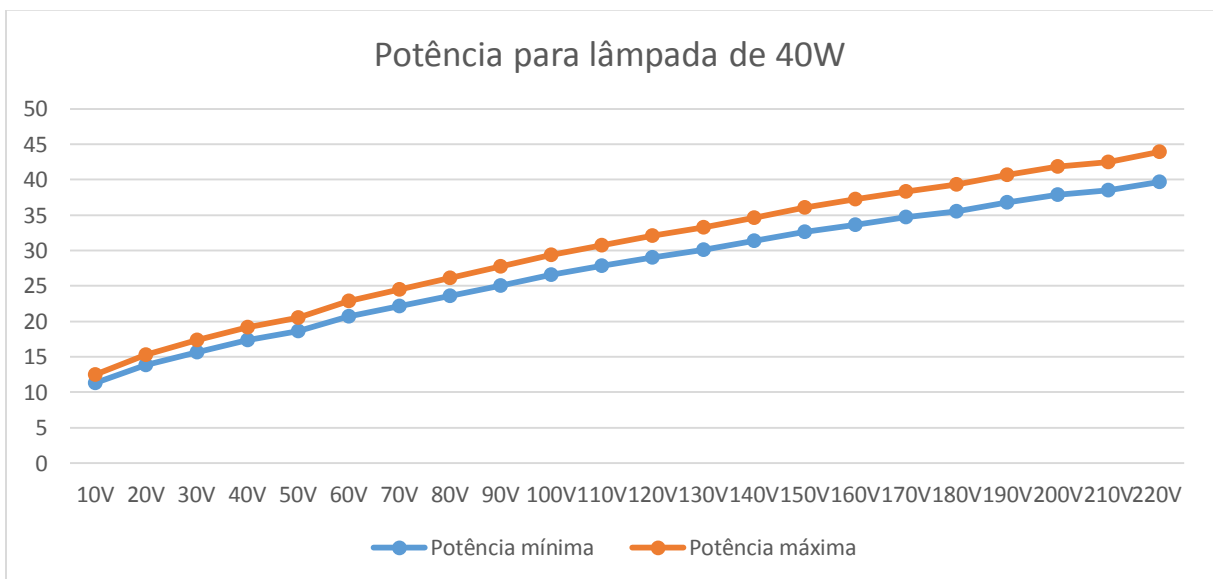


Gráfico 8 - Medições das potências mínima e máxima para lâmpada de 40W.
Fonte: elaborado pelo autor

Segue o gráfico das medições das potências mínima e máxima para lâmpada de 200W.

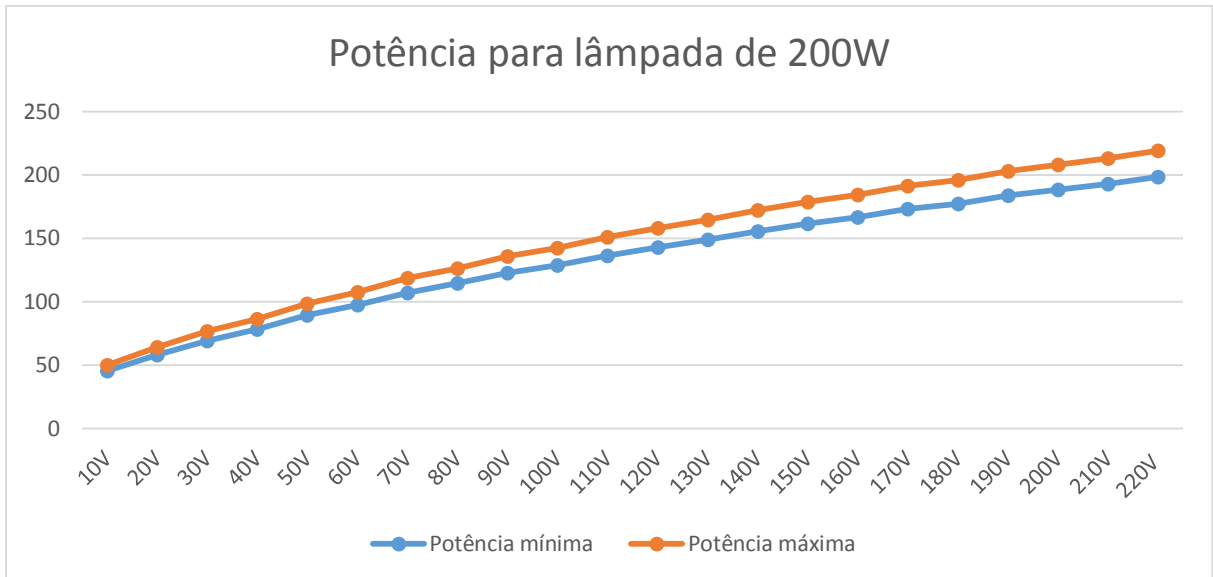


Gráfico 9 - Medições das potências mínima e máxima para lâmpada de 200W.
Fonte: elaborado pelo autor

Abaixo o gráfico com medições das potências mínima e máxima para lâmpada de 200W em paralelo.

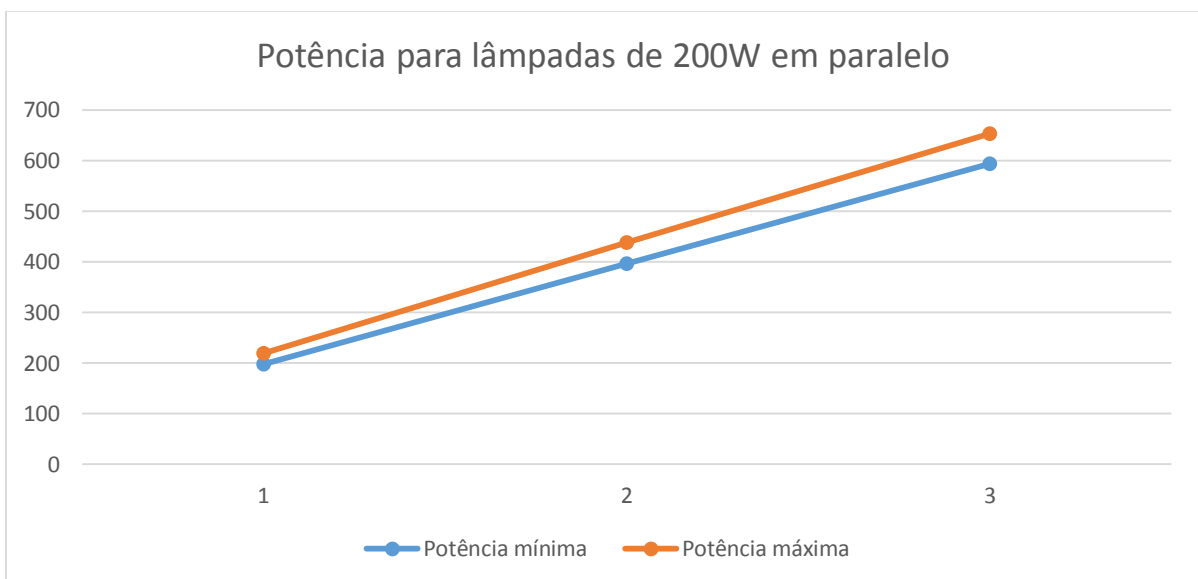


Gráfico 10 - Medições das potências mínima e máxima para lâmpadas de 200W em paralelo
Fonte: elaborado pelo autor

Após essa análise é possível definir as características finais do medidor de potência de acordo com sua faixa de atuação.

Na faixa de atuação entre 0A e 0,5A no Quadro 1 abaixo, apresenta-se o correspondente ao sinal amplificado cujas características são as seguintes:

Faixa de operação	0A (min) – 0,5A (máx)
Resolução	2,5mA
Sensibilidade	560uA/mV
Erro	0,6%

Quadro 1 - Características da faixa de operação de 0A a 0,5A.

Fonte: elaborado pelo autor

Na faixa de atuação entre 0,5A e 5A no Quadro 2 a seguir, apresenta-se o correspondente ao sinal amplificado cujas características são:

Faixa de operação	0,5A(min)- 5A(máx)
Resolução	25mA
Sensibilidade	5,4mA/mV
Erro	1,4%

Quadro 2 - Características da faixa de operação de 0A a 0,5A

Fonte: elaborado pelo autor

4 CONCLUSÕES

Após a análise dos dados foi possível obter uma medição de corrente RMS muito próxima da medida em aparelhos considerando o fato de nenhuma medição ser totalmente correta. Entretanto apenas com o valor de corrente RMS não é possível determinar a potência real de aparelhos domésticos ou industriais, apenas estimar a sua potência aparente, pois o medidor não tem um detector fase e conseqüentemente não consegue determinar o fator de potência das cargas que tenham componentes capacitivas ou indutivas.

Este trabalho abre as portas para o desenvolvimento de um medidor individual de potência ativa, que possa ser utilizado para fins de consultoria energética de aparelhos diversos. A partir deste primeiro passo, estudos futuros poderão ser realizados a fim de produzir o medidor de potência ativa.

Para o desenvolvimento do medidor de potência ativa será necessário primeiramente projetar uma maneira de obter o fator de potência da carga que está sendo mensurada. Logo após deverá ser desenvolvido um sensor de tensão e projetada uma maneira de diminuir ao máximo o ruído do circuito para uma medição mais precisa e adequada para o seu propósito.

Com o medidor de potência ativa completo será possível mapear e gerenciar os equipamentos residenciais e industriais, obter informações sobre o seu consumo quando ativo ou no modo de espera. Também será possível mensurar quanto de energia está sendo utilizada de forma efetiva e qual porcentagem dessa energia está sendo desperdiçada e mapear esses pontos a fim de evitar gastos tanto em fatura quanto em recursos energéticos a fim de criar um sistema mais sustentável a todos.

REFERÊNCIAS

1. Atlas de energia elétrica do Brasil, 2012.
2. Datasheet ACS 712
3. Filho S. M. **Medição de Energia Elétrica**. 2º edição. Editora: Universitária, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1980.
4. HALLIDAY, RESNICK, WALKER. **Fundamentos de Física**. Vol. 3. 8ª ed. Editora: LTC, 2009.
5. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional**, 2013.
6. Monson Hayes. **Processamento Digital de Sinais**. Coleção Shaum. Editora: Bookman, São Paulo, 2006.
7. Nilsson, J. W. e Riedel, S. A. **Circuitos Elétricos**. 8ª edição. Editora Pearson, São Paulo, 2009.

APÊNDICE A – Dados relativos ao gráfico das medições das correntes para lâmpada de 25W

Tensão	Corrente Medida	Amperímetro
10V	0,038	0,04
20V	0,045	0,047
30V	0,049	0,051
40V	0,053	0,054
50V	0,059	0,06
60V	0,063	0,063
70V	0,068	0,068
80V	0,071	0,071
90V	0,075	0,074
100V	0,078	0,078
110V	0,083	0,083
120V	0,086	0,085
130V	0,089	0,089
140V	0,092	0,092
150V	0,095	0,096
160V	0,099	0,098
170V	0,101	0,101
180V	0,104	0,103
190V	0,107	0,107
200V	0,11	0,109
210V	0,113	0,113
220V	0,115	0,115

APÊNDICE B – Dados relativos ao gráfico das medições das correntes para lâmpada de 40W

Tensão	Corrente Medida	Amperímetro
10V	0,054	0,053
20V	0,066	0,065
30V	0,075	0,075
40V	0,083	0,083
50V	0,089	0,09
60V	0,099	0,098
70V	0,106	0,105
80V	0,113	0,112
90V	0,12	0,119
100V	0,127	0,125
110V	0,133	0,132
120V	0,139	0,137
130V	0,144	0,143
140V	0,15	0,148
150V	0,156	0,155
160V	0,161	0,158
170V	0,166	0,164
180V	0,17	0,169
190V	0,176	0,173
200V	0,181	0,178
210V	0,184	0,181
220V	0,19	0,187

APÊNDICE C – Dados relativos ao gráfico das medições das correntes para lâmpada de 200W

Tensão	Corrente Medida	Amperímetro
10V	0,217	0,215
20V	0,278	0,274
30V	0,331	0,327
40V	0,374	0,367
50V	0,427	0,42
60V	0,466	0,466
70V	0,513	0,513
80V	0,547	0,547
90V	0,587	0,588
100V	0,616	0,615
110V	0,653	0,652
120V	0,684	0,682
130V	0,713	0,711
140V	0,744	0,742
150V	0,773	0,77
160V	0,797	0,794
170V	0,828	0,826
180V	0,847	0,845
190V	0,878	0,876
200V	0,9	0,9
210V	0,922	0,921
220V	0,949	0,948

APÊNDICE D – Dados relativos ao gráfico das medições das correntes para lâmpada de 200W em paralelo

Corrente medida	Amperímetro
0,949	0,948
1,897	1,895
2,842	2,84

APÊNDICE E – Dados relativos ao gráfico das medições das potências mínima e máxima para lâmpada de 25W em paralelo

Tensão	Potência mínima	Potência máxima
10V	7,942	8,778
20V	9,405	10,395
30V	10,241	11,319
40V	11,077	12,243
50V	12,331	13,629
60V	13,167	14,553
70V	14,212	15,708
80V	14,839	16,401
90V	15,675	17,325
100V	16,302	18,018
110V	17,374	19,173
120V	17,974	19,866
130V	18,601	20,559
140V	19,228	21,252
150V	19,855	21,945
160V	20,691	22,869
170V	21,109	23,331
180V	21,736	24,024
190V	22,363	24,717
200V	22,99	25,41
210V	23,617	26,103
220V	24.035	26.565

APÊNDICE F – Dados relativos ao gráfico das medições das potências mínima e máxima para lâmpada de 40W

Tensão	Potência mínima	Potência máxima
10V	11,286	12,474
20V	13,794	15,246
30V	15,675	17,325
40V	17,347	19,173
50V	18,601	20,559
60V	20,691	22,896
70V	22,154	24,486
80V	23,617	26,103
90V	25,08	27,72
100V	26,543	29,337
110V	27,797	30,723
120V	29,051	32,109
130V	30,096	33,264
140V	31,35	34,65
150V	32,604	36,036
160V	33,649	37,191
170V	34,694	38,346
180V	35,53	39,27
190V	36,784	40,656
200V	37,829	41,811
210V	38,456	42,504
220V	39,71	43,89

APÊNDICE G – Dados relativos ao gráfico das medições das potências mínima e máxima para uma lâmpada de 200W

Tensão	Potência mínima	Potência máxima
10V	45,353	50,127
20V	58,102	64,218
30V	69,179	76,461
40V	78,188	86,394
50V	89,242	98,637
60V	97,374	107,646
70V	107,217	118,503
80V	114,323	126,357
90V	122,683	135,597
100V	128,744	142,296
110V	136,477	150,843
120V	142,956	158,004
130V	149,017	164,703
140V	155,496	171,846
150V	161,557	178,563
160V	166,573	184,107
170V	173,052	191,268
180V	177,023	195,657
190V	183,502	203
200V	188,1	207,9
210V	192,698	212,982
220V	198,241	219

APÊNDICE H – Dados relativos ao gráfico das medições das potências mínima e máxima para uma lâmpada de 200W em paralelo

Potência mínima	Potência máxima
198	219,219
396,473	438,207
593,978	653,502