

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**Julyan Hideaki Tutihashi**

**COMPENSADOR DE REATIVOS DINÂMICOS PARA ZONA RURAL**

Ilha Solteira

2022

**Julyan Hideaki Tutihashi**

**COMPENSADOR DE REATIVOS DINÂMICOS PARA ZONA RURAL**

Trabalho de Graduação apresentado  
à Faculdade de Engenharia –  
UNESP – Campus de Ilha Solteira,  
para cumprimento de requisito para  
obtenção do Grau de Engenheiro  
Eletricista.

**Prof. Dr. Rubén Augusto  
Romero Lázaro**  
Orientador

Ilha Solteira  
2022

FICHA CATALOGRÁFICA  
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e  
Documentação

T966c Tutihashi, Julyan Hideaki.  
Compensador de reativos dinâmicos para zona rural / Julyan  
Hideaki Tutihashi. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022  
55 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso ( Graduação em Engenharia Elétrica) -  
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira,  
2022

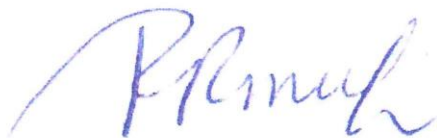
Orientador: Rubén Augusto Romero  
Lázaro Inclui bibliografia

1. Consumo de energia elétrica na zona rural. 2. Fator de  
potência. 3. Qualidade de energia elétrica.

  
Raiane da Silva Santos

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

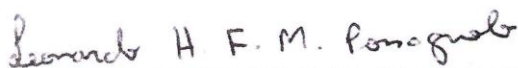
Aos vinte e dois dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e dois, o discente *JULYAN HIDEAKI TUTIHASHI*, matriculado sob o nº 122053184, tendo como banca examinadora o seu orientador, o *Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro*, o *Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo* e o *Doutorando Lucas do Carmo Yamaguti*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Compensador de reativos dinâmico para zona rural**", obtendo a nota 9,4 (nove virgula quatro) e conceito aprovado.



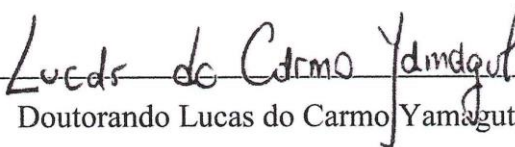
Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro  
- orientador -



Julyan Hideaki Tutihashi  
- discente -



Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo  
Possagnolo  
- Membro da Banca -



Doutorando Lucas do Carmo Yamaguti  
- Membro da Banca -

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus e a minha família por todo o suporte que têm me fornecido durante essa caminhada para a obtenção deste título. Sou abençoado por ter uma família e, especialmente, um pai que poderia ter dado prioridade a uma casa melhor, a uma carteira de motorista ou a um carro, mas que com toda a humildade, esforço e dedicação decidiu investir toda a vida na educação dos dois filhos, priorizando a nossa boa formação como cidadãos. Tenho o maior orgulho de ser o seu filho e sou seu fã incondicional.

No âmbito acadêmico, gostaria de agradecer ao meu Orientador Prof<sup>o</sup> Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro pela oportunidade em realizar um trabalho na área de compensadores dinâmicos de reativos em rede elétrica rural, e por todo o suporte e direcionamento durante o Trabalho de Graduação. Ainda, gostaria de agradecer à Empresa Junior Potencial Consultoria e Projetos Elétricos pelo imenso crescimento pessoal que pude adquirir ao longo dos quatro anos de participação, me ajudando a me tornar uma pessoa melhor e trabalhar a minha timidez.

Sou muito grato aos meus amigos que fiz durante a graduação, em especial, Edson Fernandes Júnior, Gilian Sayuri, Gabriel Giorgete, Jean Flávio, André Gusson Nogueira, Lucas Ferreira, pelos momentos que passamos juntos, que com certeza foram de muito aprendizado, tenho orgulho de tê-los conhecido.

“Tenha sempre como meta  
muita força, muita  
determinação e sempre faça  
tudo com muito amor e muita  
fé em Deus, que um dia você  
chega lá, de alguma maneira  
você chega lá.”

(Ayrton Senna)

## RESUMO

O trabalho apresenta a montagem, testes e análise de viabilidade de um compensador de potência reativa dinâmica para redes elétricas em propriedades rurais. Em propriedades rurais é comum a utilização de equipamentos elétricos com alto consumo de energia elétrica e baixo fator de potência por longos períodos de tempo, sendo o principal a bomba de irrigação. É muito comum essas cargas elétricas se localizarem longe dos padrões de entrega de energia ou serem alimentadas por sistemas fotovoltaicos e a redução da corrente, através da correção do fator de potência, permitiria o uso de condutores com bitolas menores e sistemas fotovoltaicos reduzidos. Os testes foram divididos em três partes sendo a primeira delas com uma carga puramente resistiva, a fim de apresentar a precisão do medidor de energia elétrica do compensador em relação a um medidor comercial. A segunda parte foi um teste com uma bomba de poço submersa, que é uma carga indutiva. A terceira parte foi um teste com uma furadeira, que é uma carga não linear. Nas três partes foram estudadas as melhorias com o compensador tanto pelas medições quanto pela forma de onda da tensão, corrente e potência instantânea. Por fim, foram levantados os custos do projeto, as vantagens e desvantagens de se utilizar esse compensador na prática.

Palavras-chave: Consumo de energia na zona rural, Fator de potência, Qualidade da energia elétrica.

## **ABSTRACT**

This project introduces the assembly, tests and feasibility study of a dynamic reactive power compensator for electrical grid of rural properties. In rural properties is very common the utilization of high-power consumption electrical equipment with low power factor, for long periods of time, in which the most common the irrigation pump. Usually, this type of electrical load is localized far from the power input panel or powered by photovoltaic systems, and a current reduction, by power factor correction, allows the utilization of lower gauge electric conductors and smaller photovoltaic systems. The testes were divided in three parts: the first one was with a pure resistive load to compare the precision of the electricity meter of the compensator with a commercial electricity meter. In the second part, a well pump, which is an inductive load, to study the improvement of the electrical system with the compensation. And in the third part was used a drill, which is a non-linear load. For all three parts was analyzed the measurements and the waveform of voltage, current and instant power. Finally, was calculated the cost of assembling the compensator and the benefits and disadvantages of practical use.

**Keywords:** Energy consumption in rural property, Electrical energy quality, Power factor.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema Integrado Nacional .....	13
Figura 2 - Triângulo das potências .....	15
Figura 3 - Triângulo da potência indutiva e capacitiva.....	17
Figura 4 - Forma de onda das potências em relação a tensão e corrente.....	20
Figura 5 - Arduino Mega 2560.....	21
Figura 6 - Esquema elétrico do compensador de reativos.....	23
Figura 7 - Parte superior do projeto montado na prática. ....	24
Figura 8 - Parte inferior do projeto montado na prática. ....	25
Figura 9 - Como selecionar a porta usb conectado ao arduino. ....	26
Figura 10 - Fluxograma da programação utilizada no projeto.....	27
Figura 11 - Medições do arduino para carga resistiva .....	29
Figura 12 - Medições GM 86 para carga resistiva .....	29
Figura 13 - Ruído no sinal de tensão e corrente.....	31
Figura 14 - Forma de onda de carga resistiva .....	31
Figura 15 - Medições do arduino para carga indutiva sem correção .....	32
Figura 16 - Medições do GM 86 de carga indutiva sem correção.....	32
Figura 17 - Forma de onda da tensão, corrente e potência da carga indutiva sem correção.....	33
Figura 18 - Formas de onda da carga indutiva no momento da correção.....	34
Figura 19 - Medições do arduino da carga indutiva com correção .....	34
Figura 20 - Medições do GM 86 da carga indutiva com correção.....	35
Figura 21 - Forma de onda do momento do desligamento da carga indutiva. ....	36
Figura 22 - Forma de onda do momento de retirada do banco de capacitores.....	37
Figura 23 - Medições do arduino de carga não linear.....	38
Figura 24 - Forma de onda da furadeira em vazio.....	39
Figura 25 - Forma de onda da furadeira perfurando madeira .....	39
Figura 26 - Forma de onda da figura 26 separado em dois gráficos.....	40
Figura 27 - Forma de onda no momento da inserção do banco de capacitores .....	41
Figura 28 - Forma de onda no momento da partida da furadeira e inserção do compensador .....	41
Figura 29 - Forma de onda do momento do desligamento da furadeira .....	42
Figura 30 - Declaração de variáveis .....	50

Figura 31 - Definição da função dos pinos da placa arduino .....	50
Figura 32 - Calibragem dos sensores .....	51
Figura 33 - Formas de onda antes e depois de centralizar no nível zero.....	52
Figura 34 - Aquisição dos dados .....	52
Figura 35 - Cálculos finais das variáveis elétricas .....	53
Figura 36 - Apresentação dos resultados dos calculos ao observador .....	53
Figura 37 - Identificador de desligamento de equipamento elétrico.....	54
Figura 38 - Desligamentodos capacitoeis .....	55
Figura 39 - Energização dos capacitores .....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Percentual de erro entre os valores dos dois equipamentos de medição para carga resistiva.....	30
Tabela 2 - Percentual de erro entre os equipamentos de medição para carga indutiva sem correção .....	32
Tabela 3 - Percentual de erro entre os equipamentos de medição para carga indutiva com correção .....	35
Tabela 4: Melhorias obtidas com a correção do FP .....	35
Tabela 5 - Tabela de custos da montagem do projeto.....	43
Tabela 6 - Sequência de energização dos capacitores conforme demanda.....	56

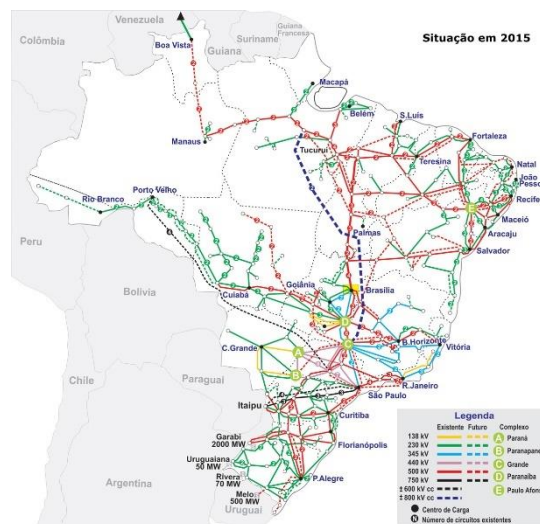
## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1.	Perdas em Linhas de Transmissão .....	13
1.2.	Fator de Potência.....	15
1.3.	Correção do Fator de Potência .....	17
1.4.	Arduino .....	20
1.5.	Objetivo.....	21
<b>2.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.</b>	<b>Materiais .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.</b>	<b>Métodos .....</b>	<b>23</b>
2.2.1.	1º Passo: Montagem da parte superior .....	23
2.2.2.	2º Passo: Montagem da parte inferior .....	24
2.2.3.	3º Passo: Conexão entre os componentes referente a parte eletrônica (5Vdc). .....	25
2.2.4.	4º Passo: conexão entre os componentes da parte de baixa tensão (220Vac). .....	25
2.2.5.	5º Passo: programação do arduino.....	26
2.2.6.	Testes.....	27
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>29</b>
3.1.	Teste com carga resistiva .....	29
3.2.	Teste com carga indutiva .....	32
3.3.	Teste com carga não linear .....	37
3.4.	Custos para a montagem .....	42
<b>4.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>44</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>
	<b>APÊNDICE A – DETALHAMENTO DAS LINHAS DE CÓDIGO .....</b>	<b>50</b>

# 1. INTRODUÇÃO

A popularização da eletricidade, a partir do final do século XIX, abriu uma das principais portas para o mundo tecnológico moderno com incontáveis benefícios para a humanidade. “Podemos afirmar que somos “reféns” da energia elétrica e precisaríamos retroagir muito tempo para encontrar uma civilização que não dependesse dela” (FELAMINGO, 2016). O crescente consumo de energia trouxe consigo vários desafios, entre eles, conectar as fontes geradoras de energia elétrica com os pontos de consumo, ambos estando espalhados geograficamente. Na figura 1 apresenta-se o Sistema Integrado Nacional (SIN).

Figura 1 - Sistema Integrado Nacional



Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2015.

## 1.1. Perdas em Linhas de Transmissão

Naturalmente, existem perdas de energia elétrica em forma de calor ao longo do condutor, devido ao “Efeito Joule”. Tal efeito é minimizado elevando-se a tensão para reduzir a corrente, mantendo-se assim a potência e a energia transmitida relativamente constante, uma vez que a perda é proporcional ao quadrado da corrente através da linha e também depende da resistividade do condutor. Tal medida também reduz a queda de tensão ao longo da linha de transmissão, que

também é proporcional a estas variáveis. “A elevação da tensão de geração reduz a corrente elétrica que circula nas linhas de transmissão que transportam a potência elétrica gerada, reduzindo dessa forma, as perdas elétricas que fazem parte de qualquer sistema de transporte de energia” (MAMEDE, 2021). As equações (1) e (2) apresentam a equação da potência dissipada pelo Efeito Joule e a equação da queda de tensão.

$$P = I^2 * R \quad (W) \quad (1)$$

$$\Delta E = 2R * I * \cos(\varphi) \quad (V) \quad (2)$$

Nas equações acima, P representa potência, I representa a corrente, R a resistência do condutor,  $\Delta E$  representa a queda de tensão e  $\cos(\varphi)$  representa o fator de potência.

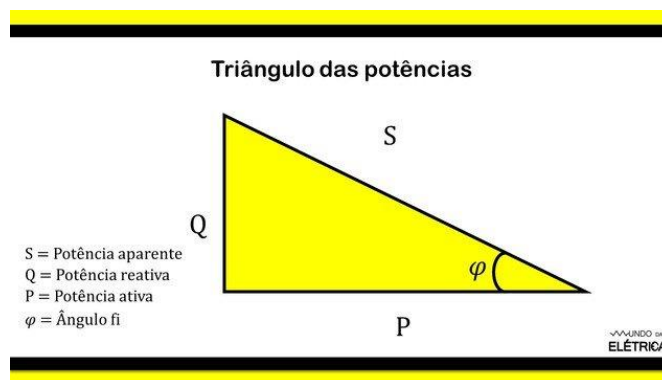
“A Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (SIN) compreende as tensões de 230 kV a 800 kV” (EPE, 2021, p 141). “Casos em que a linha de transmissão supera o comprimento de 1000 quilômetros para rede aérea ou 50 quilômetros para cabos submarinos também é viável transmitir por Corrente Contínua de Alta Tensão (CCAT)” (HINGORANI; GYIUGYI, 1999, p 14).

Outro fator que reduz a capacidade de transmissão de energia é o excesso de potência reativa que reduz o Fator de Potência (FP). Baixo FP resulta em aumento na corrente total que circula nas redes de distribuição de energia elétrica da concessionária e das unidades consumidoras. Isso pode sobrecarregar as subestações e as linhas de transmissão e distribuição, prejudicando os níveis de tensão bem como a estabilidade e as condições de aproveitamento dos sistemas elétricos (REZENDE; SANTILHO; VASCONCELOS; SILVA, 2013, p 1). Essa potência reativa deriva do uso de aparelhos elétricos indutivos, tais como motores e transformadores, que desenvolvem um campo magnético interno necessário para o seu funcionamento. Este campo é formado pela passagem da corrente nos enrolamentos. Quando os equipamentos são alimentados em corrente alternada, a energia armazenada em forma de campo magnético tende a se opor à variação da intensidade da corrente, causando um atraso da corrente em relação à tensão (CRISTO, 2005, p. 26).

## 1.2. Fator de Potência

Devido à necessidade de desenvolver um campo magnético interno, as cargas indutivas necessitam de dois tipos de potência: potência ativa, para a realização do trabalho, e a potência reativa, para o campo magnético. A definição de fator de potência é a razão entre a potência ativa e a potência aparente que indica a eficiência do uso da energia como já descrito acima (ENGELÉTRICA, 2011). A Figura 2 a seguir representa o triângulo das potências, que ilustra a relação entre a potência ativa, a potência reativa e a potência aparente, citados acima.

Figura 2 - Triângulo das potências



Fonte: Mundo da elétrica.

As equações (3) e (4) são referentes ao fator de potência para explicar matematicamente a relação entre as três potências citadas acima.

$$FP = \frac{P}{S} = \cos \varphi \quad (3)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ (VA)} \quad (4)$$

Nas equações acima, FP representa o fator de potência, P representa a potência ativa, Q representa a potência reativa e S representa a potência aparente.

Como descrito anteriormente, o fator de potência indica a eficiência do uso de energia elétrica com o seu valor variando de 1 para máxima eficiência, até a eficiência nula em zero. Nos parágrafos acima foi indicado como o causador do

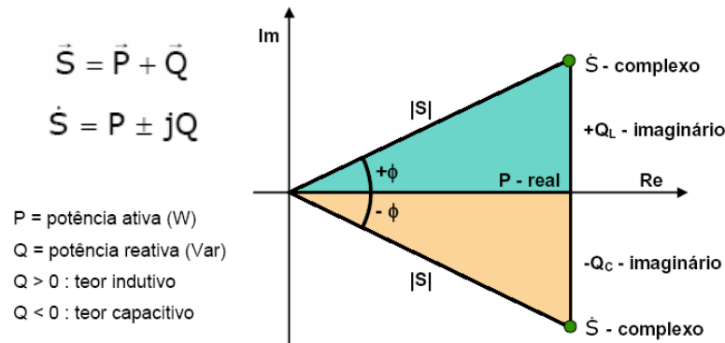
baixa fator de potência as cargas indutivas como motores e transformadores, que são os mais comuns no meio industrial. No entanto, existem também as cargas capacitivas que são utilizadas em computadores, banco de capacitores e lâmpadas fluorescentes. Elas criam campos elétricos por meio dos condensadores existentes nestas cargas (ALUGAGERA, 2020).

Apesar de ambas as cargas serem de tipo reativo, tanto a indutiva como a capacitiva precisam de potência reativa para operar. Entretanto, em termos de fator de potência elas se contrapõem, ou seja, se há excesso de potência reativa provindo de uma carga indutiva no circuito, pode-se compensar essa potência reativa indutiva com uma carga com potência reativa capacitiva para elevar o fator de potência. Isso é possível pois a carga indutiva armazena energia em campo magnético e isso gera defasagem na forma de onda da corrente. Por sua vez, a carga capacitiva armazena energia em campo elétrico e isso gera defasagem na forma de onda da tensão. Quanto ambos os efeitos são sobrepostos um reduz o impacto do outro.

Dessa forma uma carga indutiva pode ser adequadamente complementada por uma carga capacitiva em termos de potência reativa. Dessa forma essa potência não precisa ser gerada e enviada desde o ponto de geração. O resultado de todo esse processo de complementação é um módulo de corrente elétrica menor através da linha, reduzindo assim as perdas da transmissão e estabilizando a tensão. Também deve-se observar que em cargas tradicionais de um sistema elétrico normalmente as cargas indutivas são dominantes. e por esse motivo, a estratégia consiste em instalar banco de capacitores ou dispositivos equivalentes para compensar as cargas indutivas dominantes. A seguir a Figura 3 irá ilustrar o que foi descrito acima.



Figura 3 - Triângulo da potência indutiva e capacitiva.



Fonte: Instituto Federal de Santa Catarina

A equação 5 a seguir explica matematicamente a Figura 3 e a discussão acima.

$$Z = R + j(X_C - X_L) \quad (\Omega) \quad (5)$$

Na equação 5 acima, Z representa a impedância da carga, R representa a componente resistiva, o qual consome potência ativa para realizar trabalho,  $jX_C$  é a componente que representa a carga capacitiva e  $jX_L$  é a componente da carga indutiva, ambos responsáveis da necessidade de potência reativa, como já descrito em parágrafos anteriores. Naturalmente é de se observar que se  $X_C - X_L = 0$ , então restaria apenas  $Z = R$  tornando a impedância puramente resistiva e a potência consumida por essa carga seria somente a ativa, tendo fator de potência igual a 1.

### 1.3. Correção do Fator de Potência

Visto todos estes conceitos acerca de potência elétrica, é natural de se perceber que existe muita vantagem para as companhias de geração, transmissão e distribuição de energia manter o fator de potência sempre próximo de 1. Para este fim existem várias tecnologias para compensar o excesso de potência reativa transmitida pelas linhas de transmissão. Devido ao seu custo benefício, os mais usados na América Latina atualmente são os Compensadores Síncronos Rotativos que através do controle da excitação, mantem o equilíbrio do sistema de energia (WEG, 2016), os Capacitores Série que consiste em instalar capacitores em série com a linha de transmissão (CAMPOS, FERREIRA, MENDES, 2007, p1) e os

Compensadores Estáticos de Reativos (CER, ou do inglês, SVC), que cumprem sua função ligando ou desligando seu banco de capacitores e reatores conforme a necessidade da rede de transmissão (HINGORANI; GYUGYI, 1999).

Existem também bancos de capacitores para corrigir o fator de potência nos pontos de consumo, como nas indústrias. Neste caso o objetivo da correção é manter o fator acima de 0.92 a fim de não pagar o acréscimo na fatura de energia por excesso de energia reativa, como expresso na Resolução 414/2010, da Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel. A correção pode ser feita instalando os capacitores de quatro maneiras diferentes. O primeiro é na entrada do sistema de energia elétrica de alta tensão, o segundo é na entrada do sistema de energia elétrica de baixa tensão, o terceiro é por grupo de cargas e por último é a localizada, instalando o capacitor junto ao equipamento. É de se notar que quanto mais próxima da carga é realizada, então mais benefícios devem ser obtidos para a instalação elétrica da indústria, porém há acréscimo na complexidade e nos custos. É importante também ressaltar que para a correção ser feita somente com capacitores, a potência das cargas não-lineares deve ser menor que 20% da carga total da instalação. Caso supere este valor, devem-se adicionar outras medidas como indutores de proteção anti harmônicas ou filtros (WEG). A figura (6) apresentara a equação para o cálculo da capacitância para a correção.

$$C = \frac{Q}{2 * \pi * f * U^2 * 10^{-9}} \quad (\mu F) \quad (6)$$

Na equação 6 acima, C representa a capacitância, Q representa a potência reativa o qual se deseja reduzir, f representa a frequência nominal da rede elétrica, U representa a tensão eficaz. Naturalmente é muito raro haver capacitores com valores comerciais que somados se igualem exatamente ao valor calculado pela equação acima. Logo, busca-se a configuração mais aproximada. Por fim é importante ressaltar que se o banco de capacitores for instalado na entrada da indústria, é conveniente que seja um banco automático, para que se adeque às variações de demanda, inclusive se desconectando da rede quando a indústria estiver parada. O excesso de potência reativa capacitiva também leva a multa, pois se enquadra na resolução da Aneel descrita acima.

Para se calcular o valor da capacitância segundo a equação (6), é necessário saber o valor da potência reativa, o qual se calcula adaptando a equação (4) da maneira ilustrada a seguir.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (VAr) \quad (7)$$

Para se calcular a potência aparente, representada por S na equação acima, utiliza-se a equação (8) abaixo.

$$S = V_{RMS} * I_{RMS} \quad (VA) \quad (8)$$

Sendo  $V_{RMS}$  e  $I_{RMS}$ , valores eficazes de tensão e corrente respectivamente. A seguir também a equação do cálculo do valor eficaz.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt} \quad (V) \quad (9)$$

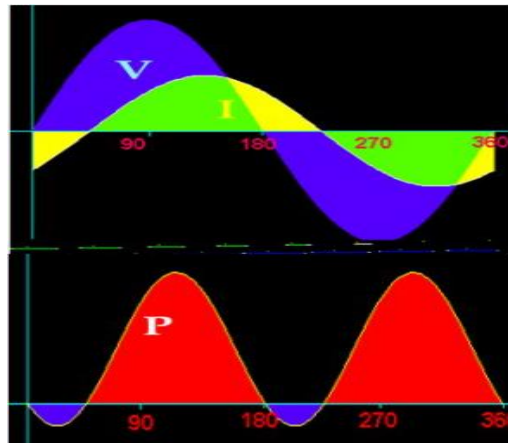
Na equação (9) acima,  $v$  representa a tensão instantânea e  $T$  representa o período fundamental de tensão periódica senoidal. Evidentemente essa mesma equação pode ser aplicada no cálculo de  $I_{RMS}$  (DECKMAN; POMILIO).

Para o cálculo da potência ativa referente à equação (7), utiliza-se a equação apresentada a seguir, que pode ser explicada como a média da potência instantânea.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v * i dt \quad (W) \quad (10)$$

Na equação a seguir,  $v$  e  $i$  são valores instantâneos da tensão e da corrente (RODRIGUES, 2014). A Figura 4 a seguir ilustra o que foi explicado acima.

Figura 4 - Forma de onda das potências em relação à tensão e corrente.



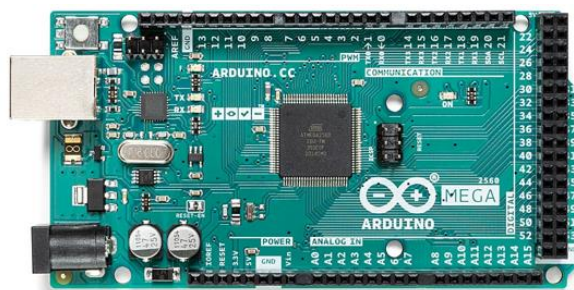
Fonte: Instituto Federal de Santa Catarina

Entre as equações acima não foram citadas as equações que calculam os valores de potência através do ângulo de defasagem entre tensão e corrente porque a frequência de operação da placa Arduino Mega, de 16 MHz (ARDUINO), é muito baixa para se calcular a defasagem entre as formas de onda com precisão aceitável.

#### 1.4. A Plataforma Arduino

Para este projeto foi escolhida a plataforma Arduino devido a sua simplicidade e acessibilidade. A linguagem de programação do Arduino é fácil de usar mesmo para iniciantes e ainda assim é flexível suficiente para projetos mais avançados. Além da facilidade de se conectar módulos para expandir a funcionalidade da placa. A placa Arduino Mega foi selecionada devido ao baixo custo, ter um chip com frequência de operação de 16MHz que é suficiente e memória de 256KB que permite armazenar o programa e os valores medidos e calculados (ARDUINO). O preço de uma placa com frequência superior é bem mais elevado. A seguir, a Figura 5 mostra uma imagem do Arduino Mega 2560.

Figura 5 - Arduino Mega 2560



Fonte: Site do Arduino.

### 1.5. Objetivo

Nos parágrafos acima foram descritos os benefícios dos compensadores instalados em redes de transmissão e dentro de indústrias, que são os mais comuns. Porém, pouco se fala sobre os benefícios de utilizar compensadores de reativos na zona rural, onde muitas vezes há cargas elétricas espalhadas pelo terreno, como por exemplo, bombas de poço. Equipamentos que no geral consomem muita energia e com baixo fator de potência e sendo utilizados por longos períodos rotineiramente. Nestes casos, um compensador reativo poderia reduzir significativamente a corrente elétrica. Isso geraria inúmeras vantagens, como necessidade de condutores com bitolas menores, menos perdas por dissipação de calor, proteções dimensionadas para correntes menores e tensão mais estável. Isso pode fazer a diferença em terrenos grandes, principalmente com a alta nos preços do cobre e dos equipamentos em geral. Essas vantagens são ainda mais significativas quando se leva em consideração o uso de energia gerada localmente, como a energia fotovoltaica, o que vem se popularizando na zona rural como alternativa para reduzir custo de produção ao longo prazo. “Os custos com energia no campo são altos e consomem grande parte do investimento de produção. Muito dessa demanda está atrelado à necessidade de irrigação, relacionada ao bombeamento de água” (JORNAL DA BIOENERGIA, 2020). Nestes casos, além das vantagens citadas acima, ainda se tem a necessidade de inversores de potência menores e menos placas solares, o que gera redução significativa no custo dos equipamentos. A adoção de compensadores na zona rural pode ajudar o produtor a ter mais produtividade e maior margem de lucro em sua produção ao longo prazo. Neste trabalho é abordado esse tópico importante.

## 2. O COMPENSADOR DE REATIVOS DINÂMICO

### 2.1. Materiais

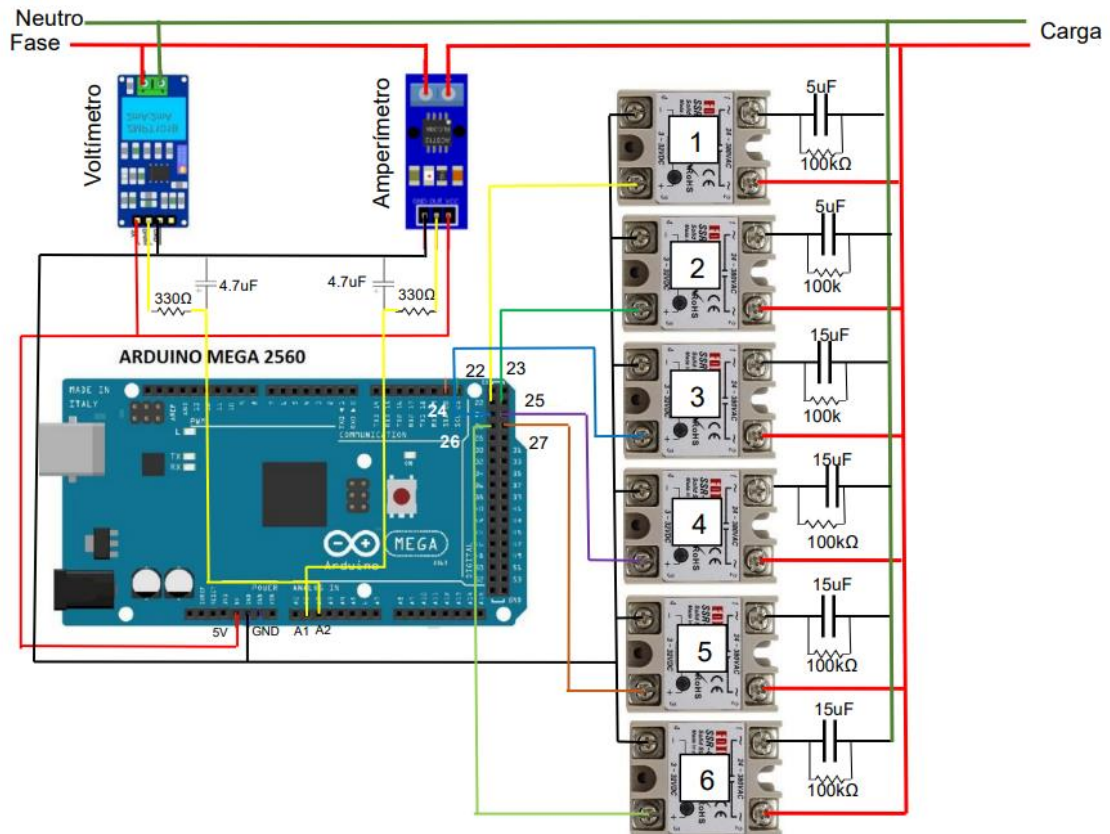
Os materiais listados abaixo serão utilizados na montagem física do compensador.

- Arduino Mega 2560
- Fonte 9V 1A
- Cabo USB am/bm
- Relé de Estado Sólido Fotek SSR-25 da (6 unidades).
- Módulo Sensor de Corrente Acs712 – 20a
- Módulo Sensor de Tensão AC Zmpt101b 250Vac
- Capacitor Eletrolítico WEG CMLW 15 $\mu$ F  $\pm$ 10% 250Vac 50/60Hz (4 unidades)
- Capacitor Eletrolítico WEG CMLW 5 $\mu$ F  $\pm$ 10% 250Vac 50/60Hz (2 unidades)
- Resistor 100k $\Omega$   $\pm$ 5% 2W (6 unidades)
- Resistor 330 $\Omega$   $\pm$ 5% 1/4 W (2 unidades)
- Capacitor Eletrolítico 4.7 $\mu$ F  $\pm$ 5% 16V (2 unidades)
- Protoboard pequeno 400 furos.
- Jumper para eletrônica
- Condutores elétricos com bitola 1.5 mm<sup>2</sup>
- Conectores tipo sindal
- Wattímetro Medidor de Consumo Energia GM86
- Barramento 12 bornes (2 unidades)
- Notebook Dell Inspiron 15R SE 7520
- Bomba submersa Imperial 300 W
- Furadeira Makita 760W
- Cafeteira Britância 550W
- Mini disjuntor bipolar 10A Curva C
- Pequena bancada de tábua de madeira de 30 x 30 x 10cm
- Parafusos para madeira 2.5 mm x 25mm (30 unidades)

## 2.2. Metodologia Adotada

Para a execução deste projeto, foram seguidos os passos, assim como o esquema elétrico, apresentados a seguir na Figura 6.

Figura 6 - Esquema elétrico do compensador de reativos.



Fonte: próprio autor.

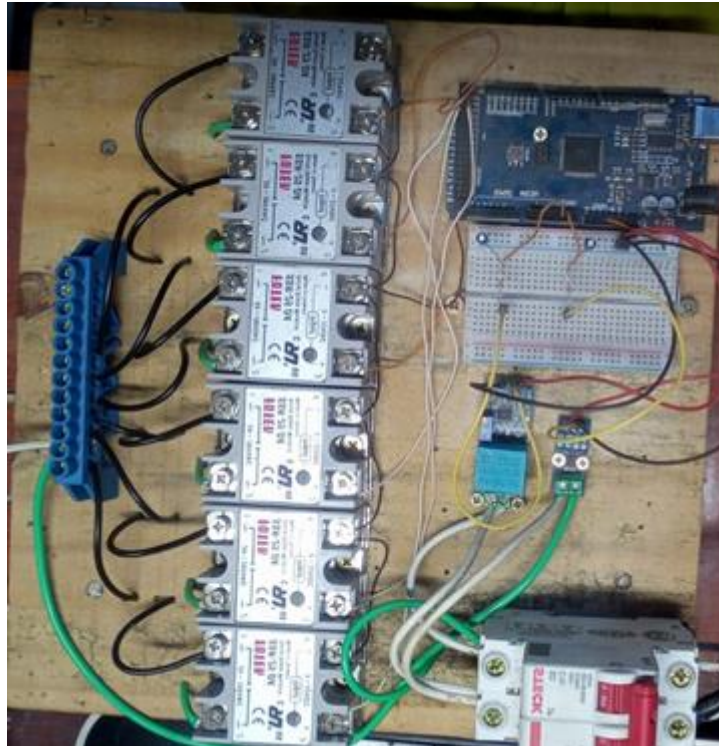
### 2.2.1. 1º Passo: Montagem da parte superior

Fixou-se com parafusos para madeira 2.5mm x 25mm na parte superior da tábua de 30 x 30 x 10cm, os seguintes componentes:

1. Arduino Mega 2560
2. Módulo sensor de tensão ac ZMPT101B
3. Módulo sensor de corrente Acs712 – 30a
4. 6 unidades do relé de estado sólido SSR 25 da
5. 1 protoboard de 400 furos.
6. O barramento azul
7. Mini disjuntor bipolar 10a curva C

Na Figura 7 a seguir, será apresentado o resultado da montagem descrita no 1º passo.

*Figura 7 - Parte superior do projeto montado na prática.*



*Fonte: próprio autor.*

### **2.2.2. 2º Passo: Montagem da parte inferior**

Fixou-se o barramento verde na parte inferior da bancada com parafusos para madeira 2.5mm x 25mm. Também neste passo, fixou-se os 6 capacitores em enfileirados, passando os fios condutores dos capacitores para a parte superior da bancada através de furos com 4mm de diâmetro. Os 2 capacitores de 5uF foram posicionados de maneira a serem conectados ao relé 1 e 2, e os outros 4 capacitores de 15uF foram posicionados de maneira a serem conectados nos relés 3, 4, 5 e 6. A Figura 8 a seguir ilustra este passo.



Figura 8 - Parte inferior do projeto montado na prática.



Fonte: próprio autor

### 2.2.3. 3º Passo: Conexão entre os componentes referente à parte eletrônica (5Vdc).

Primeiramente, conectou-se a parte comum dos 6 relés, do módulo sensor de tensão e do módulo sensor de corrente ao GND do Arduino através de jumpers pretos. Em seguida, conectou-se a fonte de alimentação ( $V_{cc} = 5V$ ) ao módulo sensor de tensão e ao módulo sensor de corrente através de jumpers vermelhos. Após isso, conectou-se a parte referente à comunicação dos módulos de sensor de corrente e de tensão com o arduino. Nesta etapa, adicionamos um filtro passa baixa RC com Resistor =  $330\Omega$  e Capacitor =  $4.7\mu F$ , resultando em um filtro com frequência de corte de 100hz. Apesar de o módulo sensor de corrente e de tensão já terem filtros em sua construção, foi pertinente a adição de mais esta etapa para a melhoria do sinal. Por fim, conectam-se através de jumpers as saídas do arduino responsável por comutar os relés. A sequência de ligação foi: saída 22 ao relé 1, saída 23 ao relé 2, saída 24 ao relé 3, saída 25 ao relé 4, saída 26 ao relé 5 e saída 27 ao relé 6, conforme ilustrado na Figura 6.

### 2.2.4. 4º Passo: Conexão entre os componentes da parte de baixa tensão (220 Vac).

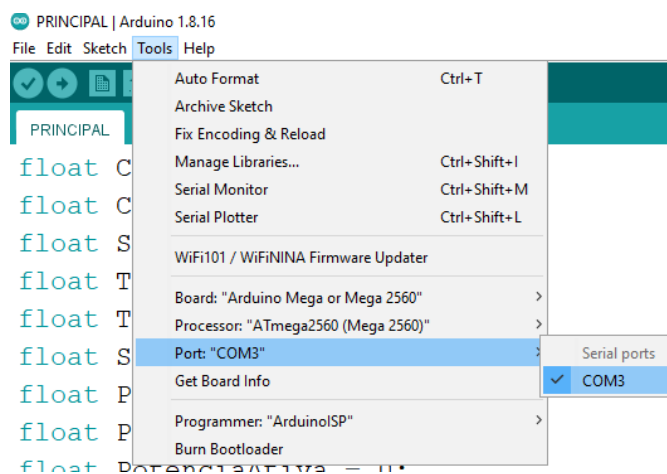
Primeiramente, adotou-se um cabo como fase, (representado em vermelho na Figura 6) e um cabo como neutro (representado em verde na Figura 6). A fase tem seu início em um plug de tomada, possui uma derivação conectada a um borne do módulo sensor de tensão, passa pelo módulo sensor de corrente, tem mais 6 derivações os quais estão conectados cada um a uma entrada dos relés, e segue

para a carga. Já o neutro tem seu início no mesmo plug que a fase, tem uma derivação conectada a outro borne do modulo sensor de tensão, em seguida tem 6 derivações assim como a fase, conectados aos capacitores compensadores em paralelo com resistores de dissipação de carga dos capacitores, e segue para a carga. Os capacitores em paralelo com os resistores por sua vez estão conectados à saída do relé.

### 2.2.5. 5º Passo: Programação do arduino.

Primeiramente foi instalado o programa Arduino 1.8.16 disponível para download gratuitamente no site do próprio fabricante. Após isso, conectou-se o notebook ao arduino através de um cabo USB am/bm e selecionou-se no programa do arduino, a porta USB do notebook que foi escolhido, conforme ilustra a Figura 9 a seguir.

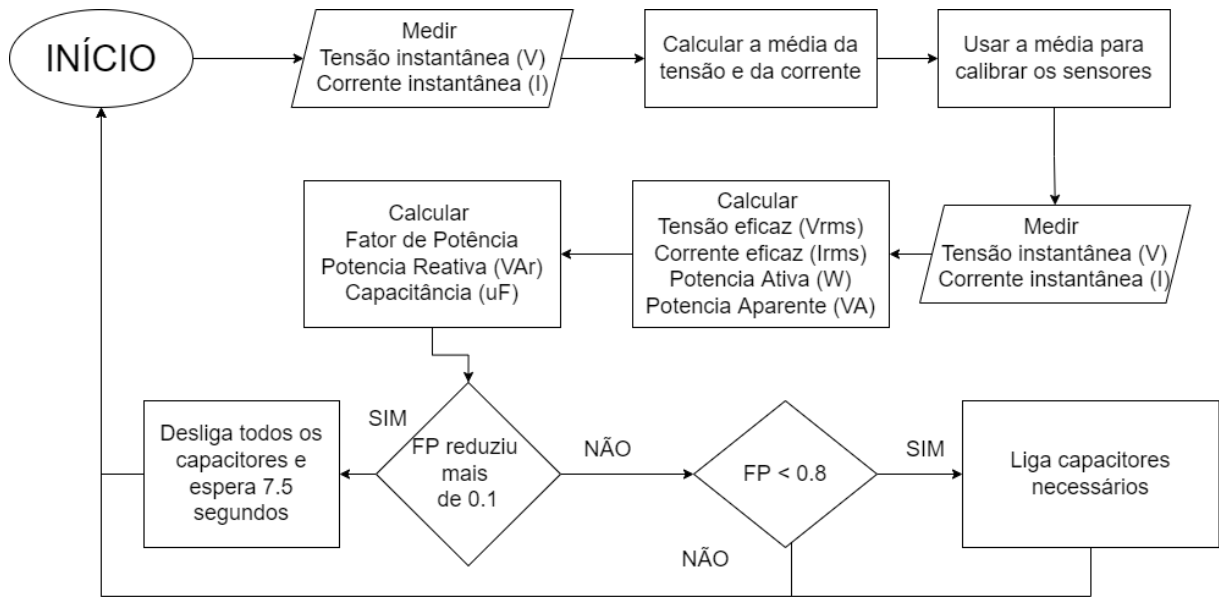
Figura 9 - Como selecionar a porta usb conectado ao arduino.



Fonte: próprio autor.

A seguir, na Figura 10, será apresentado o fluxograma do programa utilizado neste projeto.

Figura 10 - Fluxograma da programação utilizada no projeto.



Fonte: Próprio autor

A explicação detalhada do programa se encontra no Apêndice A.

### 2.2.6. Testes

Com a montagem da estrutura anterior finalizada e a placa do arduino com o programa carregado, realizou-se os testes a seguir.

1. Medir com o arduino as variáveis elétricas tensão eficaz, corrente eficaz, potência ativa e fator de potência da cafeteira Britânia 550W e comparar os valores obtidos com os valores medidos pelo medidor de consumo de energia GM 86.
2. Realizar o mesmo teste anterior de comparar os resultados obtidos com ambos os equipamentos de medição desta vez usando a bomba de água submersa Imperial 300W. Neste caso, serão realizadas as medições com o banco de capacitores não energizado e energizado a fim de analisar as melhorias obtidas. Analisar também a capacidade do compensador de detectar o desligamento da bomba e retirar o banco de capacitores automaticamente.
3. Realizar o teste de compensação com uma furadeira Makita 760W para observar o comportamento do compensador ao lidar com cargas não

lineares observando principalmente as formas de onda da tensão, corrente e potência instantânea.

4. Cálculo do custo de montagem.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta parte do relatório são apresentados os resultados dos testes descritos anteriormente juntamente com seus devidos comentários.

#### 3.1. Teste com carga resistiva

Nesta primeira parte será apresentado o comparativo dos resultados das medições de tensão eficaz, corrente eficaz, potência ativa e fator de potência da cafeteira de 550W realizado pela placa arduino e pelo medidor de energia GM 86. Neste teste não será inserido o compensador pois a carga é puramente resistiva. A seguir, na Figura 11 e na Figura 12, encontram-se as imagens das medições citadas acima.

*Figura 11 - Medições do arduino para carga resistiva*

V=216.3	I=0.00	P=2.1	S=0.0	FP=inf	C=nan
V=216.6	I=0.00	P=2.2	S=0.0	FP=inf	C=nan
V=217.2	I=0.00	P=2.4	S=0.0	FP=inf	C=nan
V=216.4	I=0.00	P=2.2	S=0.0	FP=inf	C=nan
V=213.9	I=1.94	P=327.8	S=415.5	FP=0.79	C=14.81
V=212.6	I=2.32	P=466.0	S=492.9	FP=0.95	C=9.43
V=212.4	I=2.32	P=464.9	S=491.8	FP=0.95	C=9.43
V=212.8	I=2.31	P=465.3	S=492.3	FP=0.95	C=9.42
V=215.9	I=1.03	P=97.8	S=223.1	FP=0.44	C=11.41
V=216.5	I=0.00	P=1.8	S=0.0	FP=inf	C=nan
V=216.3	I=0.00	P=2.2	S=0.0	FP=inf	C=nan
V=216.7	I=0.00	P=2.3	S=0.0	FP=inf	C=nan
V=217.2	I=0.00	P=2.4	S=0.0	FP=inf	C=nan

*Fonte: Próprio autor.*

*Figura 12 - Medições GM 86 para carga resistiva*



*Fonte: Próprio autor*

Através das figuras 11 e 12, podem-se observar três pontos importantes. Primeiro é que apesar de não apresentarem valores idênticos, há proximidade entre os valores medidos. A Tabela 1 a seguir mostra o percentual de erro entre os valores medidos pelo arduino em relação ao medidor GM 86. O valor do arduino será a média dos 3 valores intermediários dentro da caixa destacada em preto na Figura 11, que se refere à parte em que o equipamento esteve energizado. Nesta mesma Figura 11, cada linha de dados representa uma nova medição, realizada em períodos de 1,7 segundos. Outro ponto importante que vale destacar é que as imagens que compõem a Figura 12 são fotografias do visor do medidor GM 86, e houve variação nos valores conforme as fotos foram sendo tiradas, é notável que o produto da tensão 211,13 (V) pela corrente de 2,297 (A) resulta em 484,9656 (W) e não 439,07(W).

*Tabela 1 - Percentual de erro entre os valores dos dois equipamentos de medição para carga resistiva*

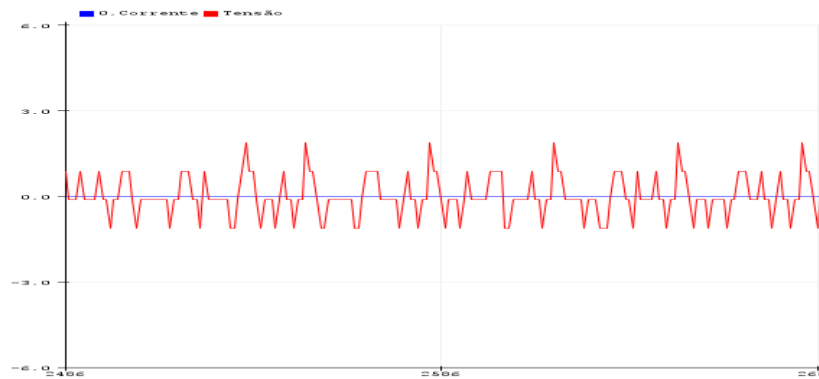
	Medições Arduino	Medições GM 86	% Erro
Tensão	212,6	211,13	0,7%
Corrente	2,3166	2,297	0,85%
P. Ativa	465,4	439,07	6%
F. Potência	0,95	1	5%

*Fonte: Próprio autor.*

Um segundo ponto interessante que pode ser observado na Figura 11 é a queda de tensão de aproximadamente 4 volts enquanto o equipamento esteve energizado. Isso mostra que o arduino tem sensibilidade para perceber esse nível de variação nos valores medidos.

O terceiro ponto a se observar também na Figura 11 é um pequeno valor de potência ativa mesmo quando a corrente é zero. Isso se deve pelo ruído no sinal medido pelos módulos de sensores. A Figura 13 a seguir ilustra esta questão dos ruídos nos sinais.

Figura 13 - Ruído no sinal de tensão e corrente

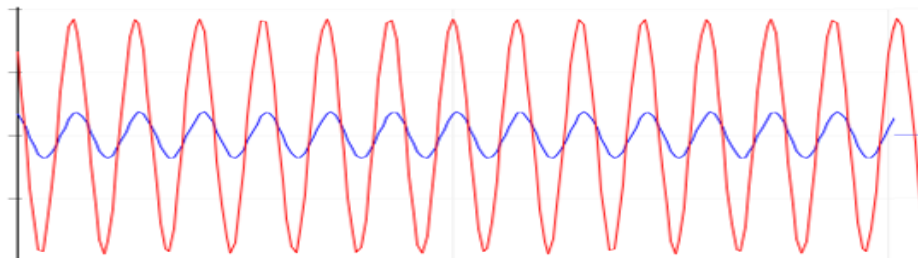


Fonte: Próprio autor

É possível perceber que há ruído na tensão na faixa entre -1V e 2V aproximadamente, mesmo usando o filtro citado na introdução. Sem o filtro o ruído é ainda maior. O valor de corrente aparece estável nesta imagem, mas também há ruído em seu sinal.

A seguir, será apresentada na Figura 14 a forma de onda da tensão e corrente do equipamento energizado.

Figura 14 - Forma de onda de carga resistiva



Fonte: Próprio autor.

É possível observar que a forma de onda da tensão, em vermelho, está quase em fase com a forma de onda da corrente, em azul. Este resultado está condizente com o esperado uma vez que uma cafeteira é uma carga resistiva e seu fator de potência é bem próximo de 1.

Evidentemente ambas as formas de onda não estão totalmente em fase primeiro porque a energia da rede elétrica não é perfeita e também porque o arduino mede um sinal de cada vez, e há um pequeno atraso entre cada aquisição. Isso também explica porque as formas de onda não são muito arredondadas.

### 3.2. Teste com carga indutiva

Nesta segunda parte será apresentado o mesmo comparativo entre ambos os equipamentos de medição como na primeira parte, porém desta vez medindo as variáveis elétricas de uma bomba de poço submersa de 300W. Esta carga possui um fator de potência baixo e foi aplicado o banco de capacitores para sua correção. Para efeito de comparação, serão apresentados quatro figuras, duas sem o banco de capacitores e 2 com o banco de capacitores. A Figura 15 e a Figura 16 a seguir ilustram as medições realizadas por ambos os equipamentos sem a inserção do banco de capacitores.

Figura 15 - Medições do arduino para carga indutiva sem correção.

V=209.6	I=6.23	P=383.4	Q=1248.54	S=1306.1	FP=0.29	C=75.39
V=209.8	I=6.23	P=382.4	Q=1250.04	S=1307.2	FP=0.29	C=75.32
V=210.1	I=6.23	P=384.4	Q=1251.25	S=1308.9	FP=0.29	C=75.21
V=209.9	I=6.24	P=383.7	Q=1252.16	S=1309.6	FP=0.29	C=75.38
V=210.0	I=6.23	P=386.7	Q=1250.62	S=1309.0	FP=0.30	C=75.21

Fonte: Próprio autor.

Figura 16 - Medições do GM 86 de carga indutiva sem correção.



Fonte: Próprio autor.

A seguir são apresentados, na Tabela 2, os valores de erro entre ambos os equipamentos de medição.

Tabela 2 - Percentuais de erro entre os equipamentos de medição para carga indutiva sem correção

	Medições Arduino	Medições GM 86	% Erro
Tensão	209,88	209,50	0,18%
Corrente	6,230	6,215	0,24%
P. Ativa	384,12	413,26	7%
F. Potência	0,290	0,317	8,51%

Fonte: Próprio autor.

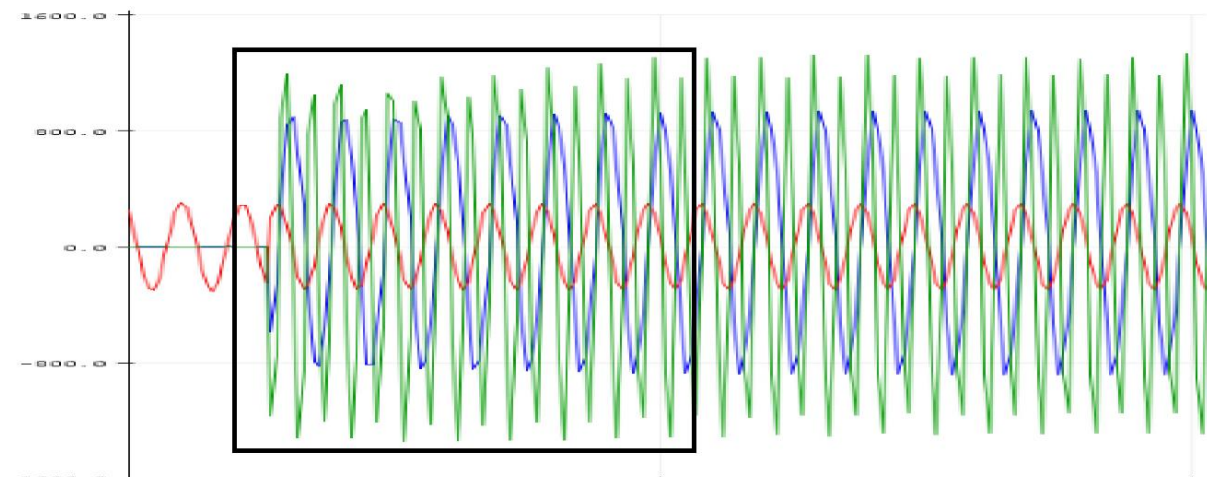


Pode ser observado através destes dados acima que para os valores de tensão e corrente, o percentual de erro é pequeno, abaixo de 1%, porem para os valores de potência ativa e fator de potência há um aumento significativo no percentual de erro. Isso se deve porque os valores das potências dependem da tensão e da corrente, e o fator de potencia depende dos valores das potências, logo ocorre a propagação do erro a cada cálculo realizado.

Pode ser observado tambem que pela utima coluna da figura 15 que a capacitancia necessária para a compensação será de 75uF, o que exigirá que todos os capacitores do banco, totalizando 70uF seja utilizado.

A seguir será apresentada, na Figura 17, a forma de onda da tensão, corrente e da potência instantânea.

*Figura 17 - Forma de onda da tensão, corrente e potência da carga indutiva sem correção.*



*Fonte: Próprio autor.*

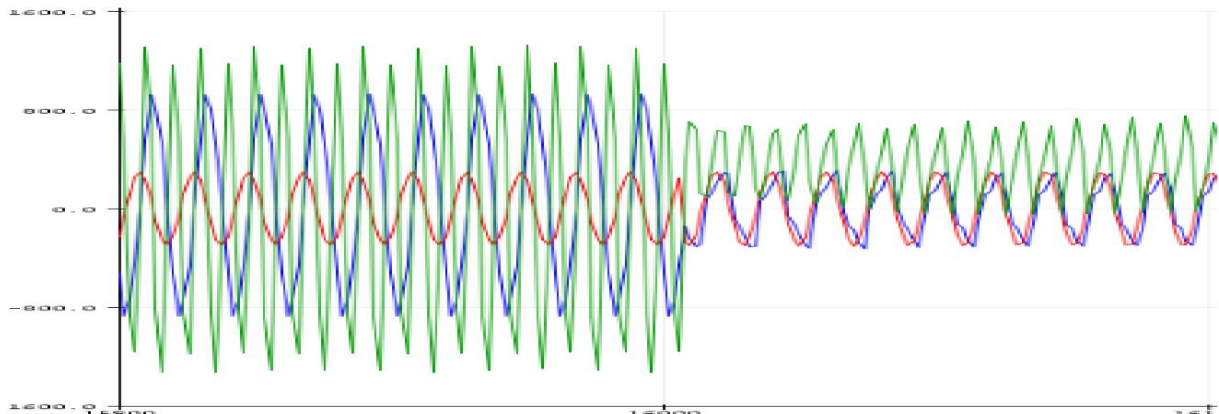
Na Figura 17 acima, a forma de onda em vermelho representa a tensão, a onda em azul representa a corrente e a onda em verde representa a potência instantânea. Foi necessário multiplicar a corrente por 100 para torna-la visível nesta imagem. Pode ser observado, na Figura 17 acima, que a forma de onda da tensão e da corrente se encontra bastante defassada e a média da potência instantânea está próxima de zero. Isso vai de encontro com o fator de potência, próximo de 0,3, apresentado na Figura 15 e na Figura 16.

Outro ponto interessante a se observar na forma de onda acima é que durante a partida da carga, destacado pelo quadrado preto, ocorre o adiantamento

da tensão, mas não se observa uma corrente de partida elevado e seu período transitório é suave, o que é positivo para a estabilidade da rede de energia.

A seguir será apresentada, na Figura 18, as formas de onda quando o banco de capacitores é inserido no circuito da bomba.

Figura 18 - Formas de onda da carga indutiva no momento da correção



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 18 acima, pode-se observar que antes da entrada do banco de capacitores no circuito, há a defasagem entre a corrente e a tensão como já descrito anteriormente, e após a entrada do banco de capacitores, essa defasagem foi reduzida significativamente. O valor pico a pico da potência instantânea também foi reduzido significativamente e sua forma de onda passou a estar somente na parte positiva do gráfico. A Figura 19 e a Figura 20 a seguir estão compatíveis com o que foi constatado na Figura 18.

Figura 19 - Medições do arduino da carga indutiva com correção

V=215.3	I=0.00	P=0.0	S=0.0	FP=nan	C=0.00
V=215.3	I=0.00	P=0.0	S=0.0	FP=nan	C=0.00
V=210.8	I=5.94	P=334.7	S=1251.9	FP=0.27	C=72.03
V=212.8	I=2.11	P=365.9	S=449.3	FP=0.81	C=15.27
V=212.9	I=2.13	P=370.1	S=454.3	FP=0.81	C=15.42
V=212.9	I=2.11	P=367.4	S=450.2	FP=0.82	C=15.23
V=212.7	I=2.11	P=366.2	S=448.9	FP=0.82	C=15.22
V=216.8	I=5.71	P=660.4	S=1238.9	FP=0.53	C=59.15
V=215.7	I=0.00	P=0.0	S=0.0	FP=nan	C=0.00
V=215.7	I=0.00	P=0.0	S=0.0	FP=nan	C=0.00

Fonte: Próprio autor.

Figura 20 - Medições do GM 86 da carga indutiva com correção



Fonte: Próprio autor

A seguir será apresentado, na Tabela 3, os valores de erro entre ambos os equipamentos de medição.

Tabela 3 - Percentual de erro entre os equipamentos de medição para carga indutiva com correção

	Medições Arduino	Medições GM 86	% Erro
Tensão	212,9	211,83	0,5%
Corrente	2,115	2,26	6,41%
P. Ativa	367,4	430,06	14,55%
F. Potência	0,815	0,896	9,04%

Fonte: Próprio autor.

Observando os valores obtidos antes e depois da correção do fator de potência, pode-se observar que houve uma redução de 63,63% da corrente levando em conta os valores medidos pelo medidor GM 86 ou 66,43% levando em conta os valores medidos pelo arduino. Observou-se também que a queda de tensão foi atenuada, tendo uma queda de aproximadamente 6V sem a correção e de 3V com a correção. A Tabela 4 mostrada adiante, expressa as melhorias obtidas em numeros.

Tabela 4: Melhorias obtidas com a correção do FP

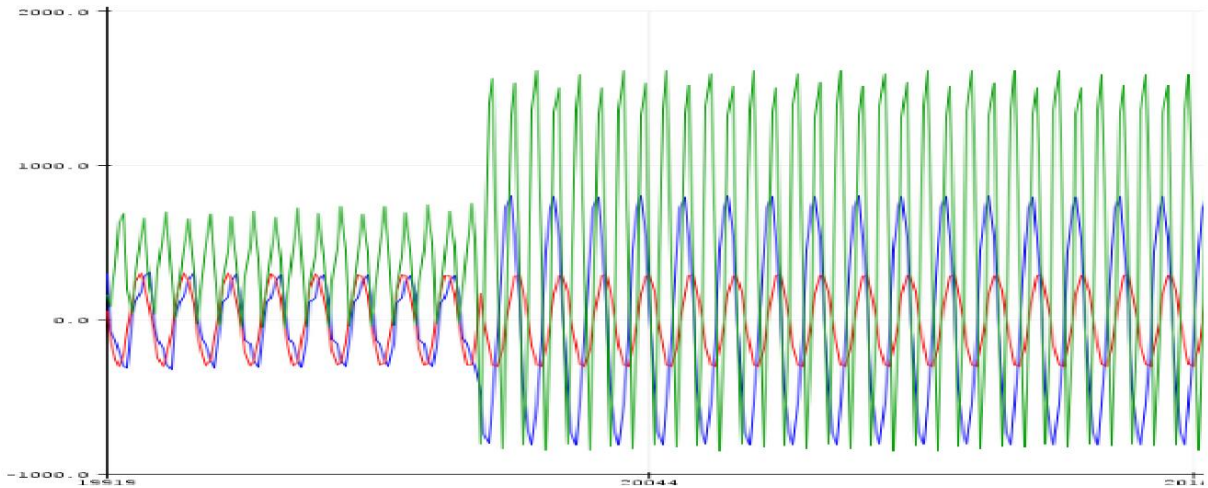
	Tensão	Corrente	P. Ativa	FP
S/ correção	209,50	6,215	413,26	0,317
C/ correção	211,83	2,26	430,06	0,896
$\Delta\%$	1,11%	63,63%	4,06%	182,65%

Fonte: Próprio autor.

Outro ponto importante a se observar é que para essa compensação todos os capacitores do banco, somando 70 uF, foram inseridos no circuito, no entanto, pelos cálculos entrou no circuito apenas 56.87 uF. Isso se deve a dois motivos: primeiro pelo percentual de erro de 10% dos capacitores, segundo pela imprecisão nas medições que se refletem nos cálculos.

Tão importante quanto a capacidade do compensador de inserir o banco de capacitores quando demandado, é ter a capacidade de retirar o banco de capacitores do circuito quando a carga for desligada e não houver mais a necessidade de compensação. A Figura 21 a seguir ilustra o momento em que a bomba de poço é desligada do circuito.

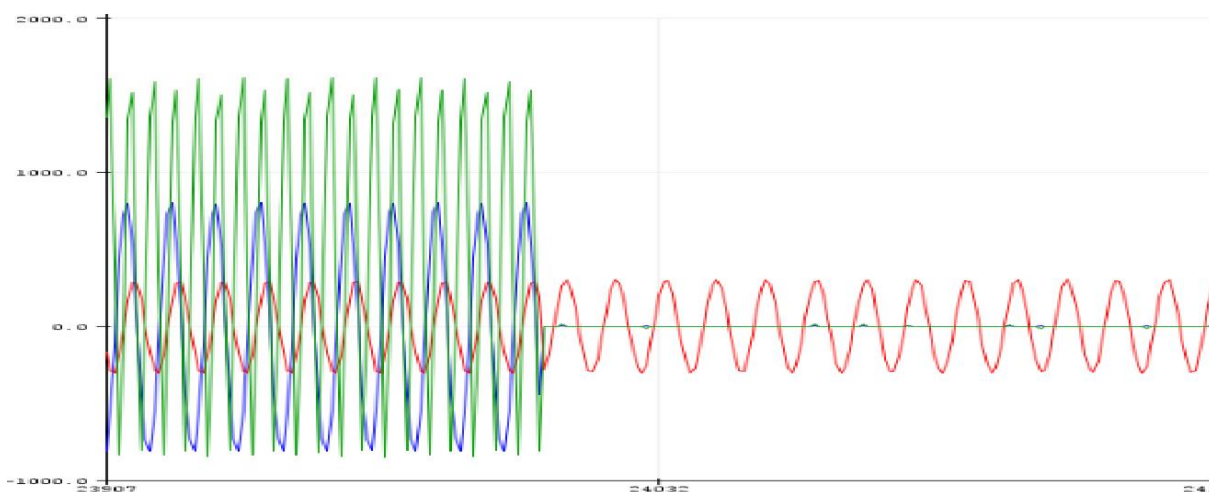
*Figura 21 - Forma de onda do momento do desligamento da carga indutiva.*



*Fonte: Próprio autor.*

Através da Figura 21, é possível observar que quando a carga está sendo compensada pelo banco de capacitores e é desligado do circuito, o fator de potência torna a ficar baixo novamente, porém desta vez vem devido a potência reativa capacitiva. Pode-se perceber que desta vez a tensão está atrasada em relação à corrente. Isso faz com que a corrente e a potência instantânea voltem a subir. Particularmente a saída de cargas do circuito é mais problemática do que a inserção, pois o arduino está programado para inserir mais capacitores quando o fator de potência estiver abaixo de 0,8 e quando a carga sai do circuito, o fator de potência diminui e o compensador irá inserir mais capacitores no circuito, desequilibrando ainda mais a rede elétrica. Para evitar isso, foi necessário programar o arduino para desligar o banco de capacitores do circuito sempre que o fator de potência decaísse mais que 0,1 em relação a medição anterior para poder recalculá-la nova demanda de capacitores. (Mais detalhes das linhas de programação se encontram no Apêndice A). A Figura 22 a seguir ilustra a forma de onda do momento de saída do banco de capacitores do circuito.

Figura 22 - Forma de onda do momento de retirada do banco de capacitores



Fonte: Próprio autor.

Pelas informações apresentadas acima, é possível perceber que o banco de capacitores proporciona grandes vantagens em relação com a redução de corrente nominal e menor queda de tensão da rede. Assim, permite que haja maior estabilidade da energia na rede durante o regime permanente de operação da carga. No entanto, por demorar um ciclo de medições para inserir o banco de capacitores, não atua sobre corrente de partida, e ao retirar os capacitores do circuito, são necessários aproximadamente 8 segundos para descarregar os capacitores e recalculer a nova demanda de potência reativa. Se houver outra carga ligada ao circuito, essa carga ficará sem a compensação ao longo destes 8 segundos.

### 3.3. Teste com carga não linear

Nesta terceira parte, será testado o compensador dinâmico com uma carga não linear. Neste caso será utilizada uma furadeira makita de 760W. A Figura 23 ilustra as medições durante a perfuração de madeira com e sem o banco de capacitores.

*Figura 23 - Medições do arduino de carga não linear*

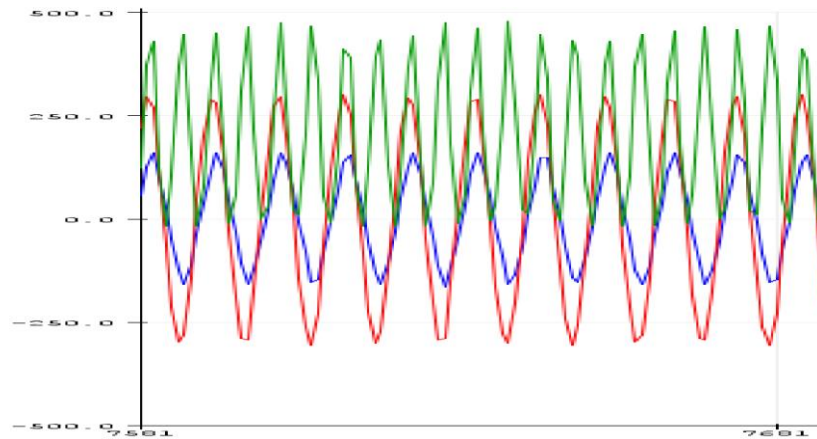
sem compensação					
V=229.6	I=0.00	P=0.0	S=0.0	FP=nan	C=0.00
V=229.5	I=0.00	P=0.0	S=0.0	FP=nan	C=0.00
V=227.3	I=1.45	P=289.7	S=330.3	FP=0.88	C=8.15
V=227.1	I=1.35	P=277.3	S=305.9	FP=0.91	C=6.65
V=227.0	I=1.41	P=289.1	S=319.7	FP=0.90	C=7.03
V=226.7	I=1.66	P=336.9	S=376.3	FP=0.90	C=8.65
V=228.2	I=2.03	P=84.7	S=464.2	FP=0.18	C=23.24
V=229.8	I=0.00	P=0.0	S=0.0	FP=nan	C=0.00
V=229.7	I=0.00	P=0.0	S=0.0	FP=nan	C=0.00
com compensação					
V=229.7	I=0.00	P=0.0	S=0.0	FP=nan	C=0.00
V=229.8	I=0.00	P=0.0	S=0.0	FP=nan	C=0.00
V=228.6	I=2.20	P=187.8	S=501.9	FP=0.37	C=23.63
V=228.2	I=2.11	P=431.7	S=482.4	FP=0.89	C=10.96
V=228.3	I=1.66	P=375.5	S=378.8	FP=0.99	C=2.53
V=227.8	I=1.90	P=429.5	S=432.7	FP=0.99	C=2.69
V=228.0	I=1.83	P=415.3	S=418.0	FP=0.99	C=2.40
V=229.5	I=0.87	P=106.0	S=200.5	FP=0.53	C=8.57
V=227.6	I=0.00	P=0.0	S=0.0	FP=nan	C=0.00
V=227.9	I=0.00	P=0.0	S=0.0	FP=nan	C=0.00

*Fonte: Próprio autor*

Pelos valores apresentados na Figura 23 acima, é difícil comparar os valores de tensão e de corrente, visto que para cada medição é referente a uma perfuração diferente, e a furadeira não se comportou da mesma maneira, no entanto, é possível perceber que foram inseridos no circuito 2 capacitores de 5uF totalizando 10uF, e com isso os valores de potência ativa e da potência aparente estão muito mais próximos. Isso indica um melhor uso da energia.

A análise dos valores da Figura 23 é importante, no entanto apenas confirma o que já havia sido visto no segundo teste. A parte interessante dos testes com cargas não lineares se encontra nas formas de onda. Na Figura 24 a seguir será apresentada a forma de onda da tensão e da corrente da furadeira girando em vazio.

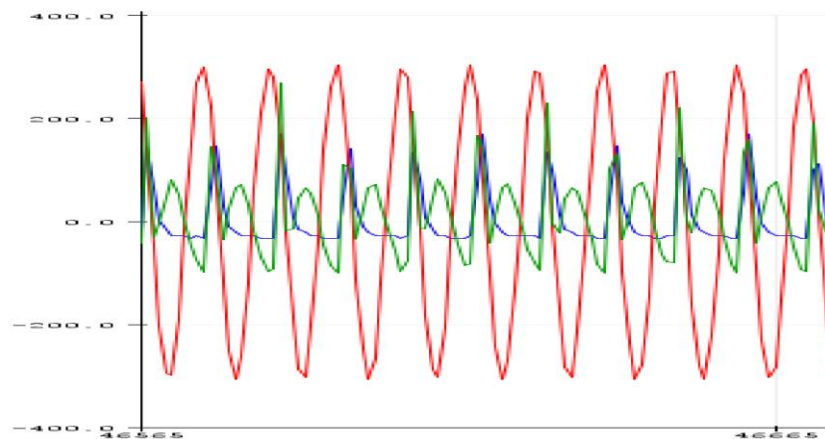
Figura 24 - Forma de onda da furadeira em vazio.



Fonte: Próprio autor.

Pela Figura 24 não é possível observar nada de atípico. É muito similar à forma de onda de uma carga resistiva com fator de potência próximo de 1. Tensão e corrente em fase e a forma de onda da potência instantânea sempre positiva. No entanto, a rede de energia estar estável quando a furadeira funciona em vazio não tem valor prático, uma vez que as furadeiras não foram fabricadas para esse fim. A seguir será apresentada a forma de onda da corrente, tensão e potência instantânea da furadeira fazendo um furo em um caibro de cambará, uma madeira dura.

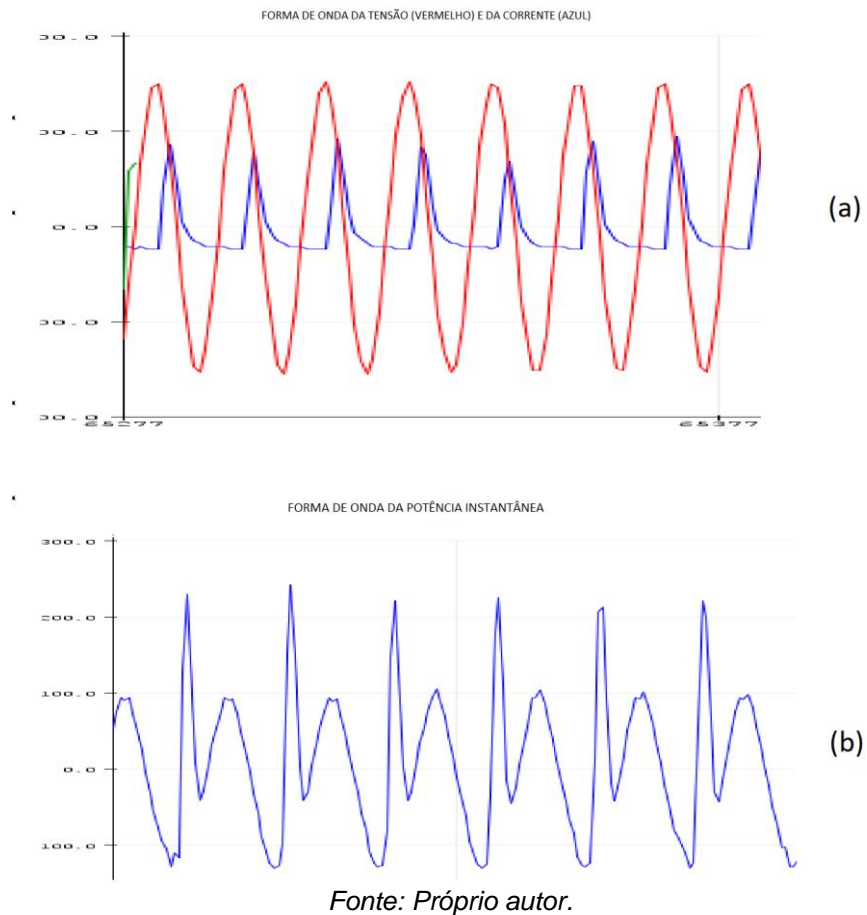
Figura 25 - Forma de onda da furadeira perfurando madeira.



Fonte: Próprio autor.

Como esta imagem é apenas para ilustrar a distorção gerada na forma de onda da corrente e da potência, então adiante será separada em dois gráficos, separando a forma de onda da potência.

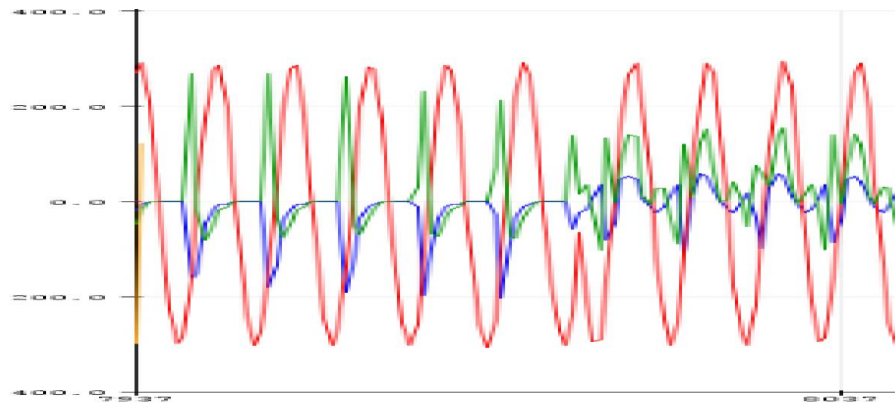
Figura 26 - Forma de onda da Figura 26 separada em dois gráficos.



Pela Figura 26 é possível ter uma visão melhor do comportamento das formas de onda para esse perfil de carga. Na parte (a) se encontra as formas de onda da tensão, em vermelho, e a da corrente, em azul. É notável que a forma de onda da tensão se mantém uma senoide normal, já a forma de onda da corrente não só não está em fase com a tensão, como também não está simétrica em relação ao nível zero. Na parte (b) da figura se encontra a forma de onda da potência instantânea no qual se percebe a sobreposição de duas formas de onda com amplitudes diferentes. Nas Figuras 27, 28 e 29 serão apresentadas as formas de onda referentes ao funcionamento da furadeira com tentativas de compensação.



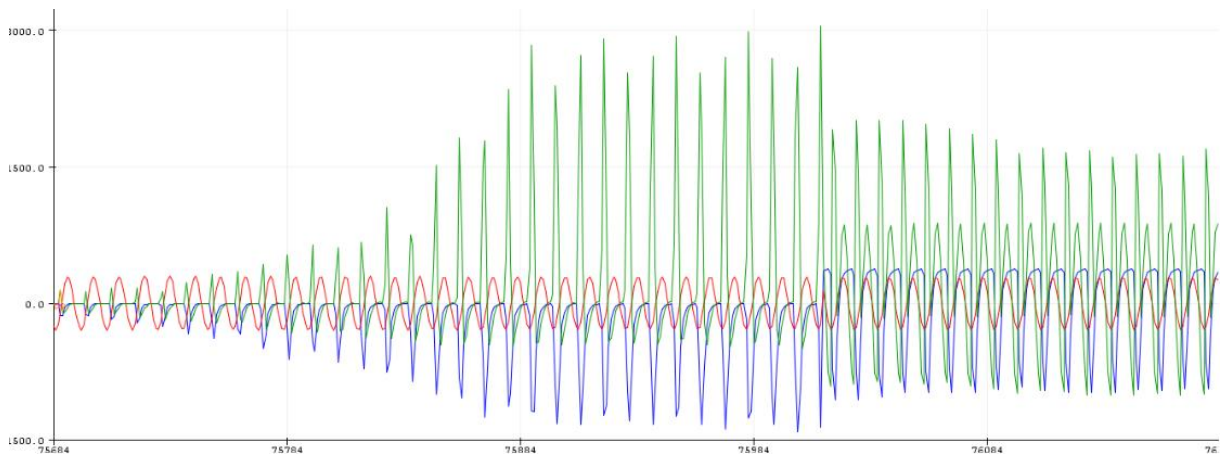
Figura 27 - Forma de onda no momento da inserção do banco de capacitores.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 27 é possível verificar que a inserção do compensador no circuito suavizou os picos de corrente e de potência, mas aumentou a distorção da forma de onda das mesmas. A próxima figura apresenta desde a partida da furadeira até a inserção do compensador.

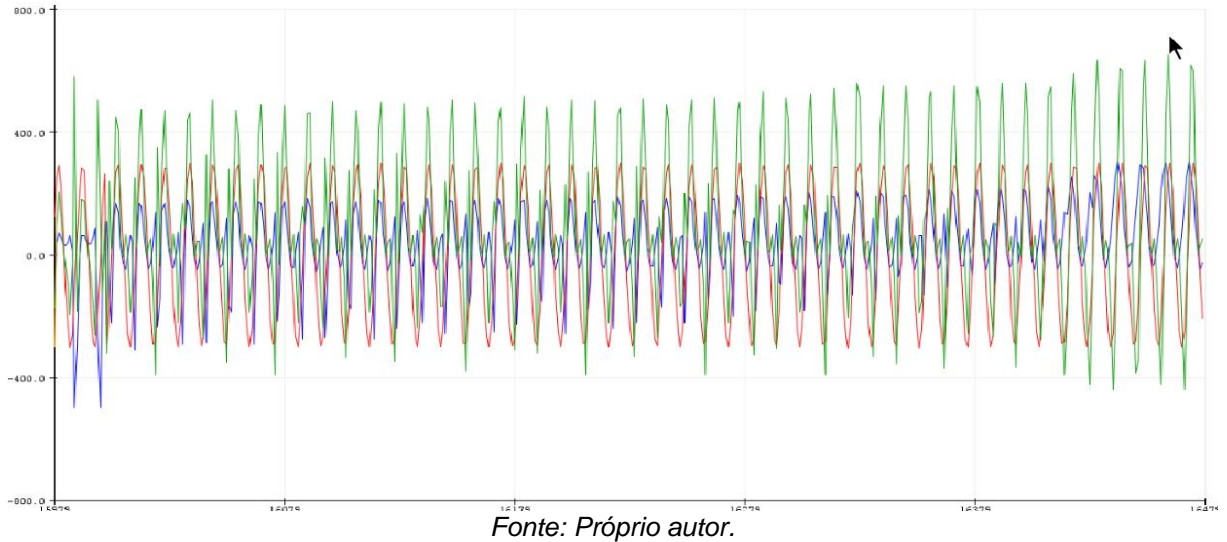
Figura 28 - Forma de onda no momento da partida da furadeira e inserção do compensador.



Fonte: Próprio autor.

Na imagem acima também pode se perceber que o compensador reduziu os picos de corrente e conseqüentemente os picos de potência, mas a forma de onda continua distorcida. E por fim, a próxima imagem ilustra o momento do desligamento da carga.

Figura 29 - Forma de onda do momento do desligamento da furadeira.



Esta Figura 29, mostrada acima, é interessante porque permite observar que conforme a carga não linear vai reduzindo sua influência no circuito, a forma de onda da corrente volta a sua forma senoidal e sua amplitude vai aumentando. Isso ocorre devido ao excesso de potência reativa capacitiva dos capacitores que não são retirados do circuito junto com a carga. Como citado na segunda parte do experimento, com a bomba de poço, é extremamente importante que o compensador de reativos tenha a capacidade de identificar o desligamento da carga e retirar os capacitores.

### 3.4. Custos para a Montagem Experimental

Por fim, será realizado o cálculo do custo de montagem do projeto levando em consideração somente as peças fundamentais para o funcionamento. A Tabela 4 a seguir apresentará um inventário das peças e seus custos, com preços obtidos pelo mercado livre.

*Tabela 5 - Tabela de custos da montagem do projeto*

NOME	QUANTIDADE	CUSTO (R\$)
Arduino Mega	1	105,90
Relé SSR 25 da	6	207,25
Zmpt101b	1	25,99
Acs712 20a	1	18,00
Capacitor 15uf	4	72,00
Capacitor 5uf	2	34,00
<b>TOTAL</b>	<b>15</b>	<b>463,14</b>

*Fonte: Próprio autor*

## 4. CONCLUSÃO

Este projeto teve como objetivo construir um compensador de reativos dinâmico para uso em zona rural. Visava principalmente reduzir custos com condutores elétricos e, no caso do uso de energia fotovoltaica, reduzir o número de placas solares e utilizar inversores com menor potência, uma vez que esses equipamentos tem alto custo e são limitados pela sua potência aparente.

Foram feitos 3 tipos de testes, o primeiro foi com uma cafeteira, que é uma carga resistiva, para testar a precisão do medidor de energia do arduino comparado ao medidor GM 86. O segundo foi um teste com uma bomba de poço submersa, que é uma carga indutiva, para avaliar novamente a precisão das medições do arduino e também conferir as vantagens do compensador de reativos aplicado a essa carga. E por fim, o terceiro teste consistiu em testar o compensador de reativos em uma furadeira, o qual é uma carga não linear.

O primeiro teste apresentou resultados satisfatórios em relação com a tensão elétrica e a corrente elétrica, os quais apresentaram erros percentuais de 0,7% e 0,85% respectivamente. Já em relação com a potência ativa e o fator de potência, o percentual de erro foi bem maior ficando em 6% e 5% respectivamente. O acréscimo no percentual de erro na medição da potência e do fator de potência se deve à dependência que esse valor tem da tensão e da corrente, os quais também apresentam variações. Outro ponto é a imprecisão na forma de obter os dados, uma vez que os valores variavam conforme as fotos do medidor de energia GM86 foram sendo tiradas. Sem contar também o erro do próprio medidor GM86.

No segundo teste, em relação com a precisão das medições do arduino os resultados são semelhantes ao do primeiro teste. O interessante foi poder observar as melhorias na rede de energia devido ao compensador, proporcionando uma redução de 63,63% na corrente e uma queda de tensão de apenas 3V frente a 6V de queda sem o compensador. No entanto, o compensador necessita de um tempo para realizar as medições e os cálculos para só então inserir o banco de capacitores no circuito, logo não atenua picos de corrente de partida das cargas, e também tem

um processo lento de retirada dos capacitores do circuito após o desligamento da carga. O compensador, ao detectar a redução de carga, precisa retirar todos os capacitores do circuito e esperar 7,5 segundos para serem descarregados. E só então é realizado um novo cálculo de demanda de potência reativa para a inserção do banco de capacitores no circuito novamente. Se neste período outra carga estiver ligada ao circuito, esta estará sem compensação por pelo menos 10 segundos.

No terceiro teste foi confirmado o que havia sido visto no manual da WEG, que diz que se as cargas não lineares representarem mais de 20% da carga total, somente o banco de capacitores não é o suficiente. Avaliaram-se as formas de onda de uma furadeira em funcionamento onde foi possível perceber que os capacitores até servem para atenuar um pouco os picos de corrente e de potência instantânea, mas a forma de onda continua bastante distorcida.

Por fim, levantaram-se os custos para a montagem do projeto, chegando a um valor de R\$ 463,14, e se concluiu que não é economicamente viável. Primeiro porque todas as cargas a serem compensadas teriam que estar agrupadas próximas umas das outras, e todas elas teriam que estar muito longe da entrada de energia ou do inversor de potência do sistema fotovoltaico. Outro ponto é a demora do compensador em se adaptar as novas demandas de potência reativa, o que inviabiliza o seu uso com inversores de potência de sistemas fotovoltaicos, que teriam que ser dimensionados para a potência aparente nominal da soma dos equipamentos a serem utilizados em simultâneo por segurança, e não haveria redução de custo. No mais, foi avaliado que é mais viável instalar capacitores individuais para cargas com baixo fator de potência, os quais entrariam e sairiam do circuito juntamente com a própria carga tornando a operação do conjunto mais adequada.

## REFERÊNCIAS

Site do Arduino. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/software>. Acesso em: 5 set. 2021.

MAMEDE FILHO; João. **Subestações de potência: tudo o que você precisa saber**. GEN Exatas, 2021. Disponível em: <https://genexatas.com.br/subestacoes-de-potencia-tudo-o-que-voce-precisa-saber/>. Acesso em: 20 de nov. de 2021.

HINGORANI, Narain, GYUGIY, Laszio. **Understanding Facts: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems** IEEE Press, 1999, p. 14.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro. 2004.

**Energia solar na área rural é opção de economia**. Canal Jornal da Bioenergia 2020. Disponível em: <https://www.canalbioenergia.com.br/cresce-uso-de-energia-solar-na-area-rural/> . Acesso em 30 de nov. de 2021.

FELAMINGO, J. C. **ENERGIA ELÉTRICA DE CADA DIA NOS DAI HOJE**. O Setor Elétrico, 2016. Disponível em: <https://osetoreletrico.com.br/energia-eletrica-de-cada-dia-nos-dai-hoje/> Acesso em 15 de nov. de 2021.

REZENDE H. O. Paulo; SANTILHO P. Fabrício; VASCONCELOS E. Lucas; SILVA V. Thiago. **COMPENSAÇÃO DE REATIVOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO COMPENSADORES ESTÁTICOS FIXOS**. Uberlândia, p. 1, 2013. Disponível em: [https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/doc/artigos/artigos2013/ceel2013\\_065.pdf](https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/doc/artigos/artigos2013/ceel2013_065.pdf) Acesso em 10 de nov. de 2021.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2015. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/transmissao5>. Acesso em: 10 de nov. de 2021.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE), **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 (PDE)**. Brasília, 2021, p. 141. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/transmissao5>. Acesso em: 15 de nov. de 2021.

CRISTO, Eliane da Silva. **Previsão de Potência Reativa. 2005**, p. 26. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2005.

**MANUAL de correção do fator de potência**. Engelétrica, 2018. Disponível em: <http://www.engeletrica.com.br/novo-site/fatordepotencia-manual-fatordepotencia.html> Acesso em: 16 de nov. de 2021.

Mundo da Elétrica. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/formulas-de-potencia-quais-sao/> Acesso em 16 de nov. de 2021.

**O QUE É carga resistiva, indutiva e capacitiva?** Alugagera, 2020. Disponível em: <https://alugagera.com.br/noticias/carga-resistiva-indutiva-capacitiva> . Acesso em 18 de nov. de 2021.

PETRY, Clóvis. **Aula 11 – Circuitos 2 – Engenharia**. Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). Disponível em: [https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA\\_11\\_-\\_Circuitos\\_2\\_-\\_Engenharia](https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_11_-_Circuitos_2_-_Engenharia). Acesso em 18 de nov. de 2021.

**COMPENSADORES Síncronos Rotativos**. WEG, Jaraguá do Sul – SC, maio de 2016. Página 2. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h75/hde/WEG-compensadores-sincronos-rotativos-50041259-catalogo-portugues.pdf> Acesso em: 19 de nov. de 2021.

CAMPOS, R. C.; FERREIRA, C.; MENDER. P. P. C. **Aplicação de capacitores série protegido por tiristores em sistema de potência**. Rio de Janeiro: Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, 2007. Disponível em: <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/03/APLICAC%CC%A7A%CC%83O-DE-CAPACITORES-SE%CC%81RIE-PROTEGIDOS-POR-TIRISTORES-EM-SISTEMAS-DE-POTE%CC%82NCIA.pdf> Acesso em: 19 de nov. de 2021.

**MANUAL para Correção do Fator de Potência**. WEG, Jaraguá do Sul, 2009. Páginas 10 e 12. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hea/h8b/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-958-manual-portugues-br.pdf>. Acesso em 20 de nov. de 2021.

DECKMAN S. M; POMILIO J. A. **Condicionamento de energia elétrica e dispositivos FACTS**. LCEE-DSCE-FEEC-UNICAMP. Disponível em: <https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it741/cap6.pdf>. Acesso em: 20 de nov. de 2021.

RODRIGUES, R. Luan. **Estudo e implementação para cálculo de fator de potência de acordo com a recomendação IEEE 1459-2010**. Ponta Grossa – PR: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2014. Disponível em: [https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16917/1/PG\\_DAELE\\_2014\\_1\\_06.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16917/1/PG_DAELE_2014_1_06.pdf). Acesso em 20 de nov. de 2021.

MERCADO LIVRE. **Arduino Mega 2560 – Atmega 2560 – 5vdc – 1und**. Pesquisa de preço. Disponível em: [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1973526954-arduino-mega-2560-atmega-2560-5vdc-1unid-JM?matt\\_tool=40343894&matt\\_word=&matt\\_source=google&matt\\_campaign\\_id=14303413655&matt\\_ad\\_group\\_id=125984293117&matt\\_match\\_type=&matt\\_network=g&matt\\_device=c&matt\\_creative=539354956680&matt\\_keyword=&matt\\_ad\\_position=&matt\\_ad\\_type=pla&matt\\_merchant\\_id=437138972&matt\\_product\\_id=MLB1973526954&matt\\_product\\_partition\\_id=1404886571418&matt\\_target\\_id=aud-1267094690568:pla-1404886571418&gclid=CjwKCAiAlfqOBhAeEiwAYi43F0Ywd805m6eVantiW7osVVgQICuoTtsGoO2mfwUnqk0hCJZ6RwpFWWhoC-aQQAvD\\_BwE](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1973526954-arduino-mega-2560-atmega-2560-5vdc-1unid-JM?matt_tool=40343894&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14303413655&matt_ad_group_id=125984293117&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=539354956680&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=437138972&matt_product_id=MLB1973526954&matt_product_partition_id=1404886571418&matt_target_id=aud-1267094690568:pla-1404886571418&gclid=CjwKCAiAlfqOBhAeEiwAYi43F0Ywd805m6eVantiW7osVVgQICuoTtsGoO2mfwUnqk0hCJZ6RwpFWWhoC-aQQAvD_BwE) Acesso em: 10 de dez. de 2021.

MERCADO LIVRE. **4x Relé Estado Sólido 25a Ssr-25da Entrada Dc Carga Ac**. Pesquisa de preço. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1786119680-4x-rele-estado-solido-25a-ssr-25da-entrada-dc-carga-ac-cnf-JM> Acesso em: 10 de dez de 2021.

MERCADO LIVRE. **Sensor corrente arduino 20a Acs712**. Pesquisa de preço. Disponível em: [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1977484511-sensor-corrente-arduino-20a-ac712-JM#position=3&search\\_layout=stack&type=item&tracking\\_id=a5062cd5-fd6a-40a0-a146-b05d8355908f](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1977484511-sensor-corrente-arduino-20a-ac712-JM#position=3&search_layout=stack&type=item&tracking_id=a5062cd5-fd6a-40a0-a146-b05d8355908f) Acesso em: 10 de dez. 2021.

MERCADO LIVRE. **Sensor de Tensão Zmpt101b, 0 a 250V Para Arduino**. Pesquisa de prelo Disponível em: [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1761197143-sensor-de-tenso-zmpt101b-0-a-250-v-para-arduino-JM#position=1&search\\_layout=grid&type=item&tracking\\_id=4b886899-2562-46cc-b774-cff94804431f](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1761197143-sensor-de-tenso-zmpt101b-0-a-250-v-para-arduino-JM#position=1&search_layout=grid&type=item&tracking_id=4b886899-2562-46cc-b774-cff94804431f). Acesso em 10 de dez. de 2021.

MERCADO LIVRE. **5 Capacitor permanente 15uf 250v weg**. Pesquisa de preço. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1939468580-5-capacitor-permanente-15uf-250v-weg-JM> Acesso em: 10 de dez. de 2021.

MERCADO LIVRE. **Capacitor permanente 5uf 250v weg**. Pesquisa de preço. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1109867532-capacitor-permanente-5uf-250v-weg-JM>. Acesso em: 10 de dez. de 2021.

REIS Fábio. **Constante de tempo RC em capacitores** – Curso de eletrônica. 2019. Disponível em: <http://www.bosontreinamentos.com.br/eletronica/constante-de-tempo-rc-em-capacitores-curso-de-eletronica/> . Acesso em 10 de dez. de 2021.



**Esquemático Arduino Mega 2560.** Disponível em:

<https://datasheet.octopart.com/ARDUINO-MEGA-2560-REV3-Arduino-datasheet-17557043.pdf> Acesso em: 10 de nov. de 2021.

**Datasheet Fotek SSR Series Solid State Relay.** Disponível em:

<https://datasheetspdf.com/pdf-file/789331/Fotek/SSR-25DA/1> Acesso em: 10 de nov. de 2021.

**Datasheet Acs 712 Current Sensor.** Disponível em:

[http://www.energiazero.org/arduino\\_sensori/acs712%2030a%20range%20current%20sensor.pdf](http://www.energiazero.org/arduino_sensori/acs712%2030a%20range%20current%20sensor.pdf). Acesso em: 10 de nov. de 2021.

**Datasheet ZMPT101B Current Type Voltage Transformer.** Disponível em:

<http://5nr0rwxhmqjijk.leadongcdn.com/attachment/kjilKBmoioSRqIkqjoipSR7ww7fgzb73m/ZMPT101B-specification.pdf>. Acesso em 10 de nov. de 2021.

## APÊNDICE A – DETALHAMENTO DAS LINHAS DE CÓDIGO

Neste apêndice será apresentado trechos da programação com explicações, seguindo a sequência do código original.

O programa se inicia pela declaração das variáveis conforme ilustrado abaixo.

*Figura 30 - Declaração de variáveis*

```
float Corrente;
float CorrenteMedio;
float SomaCorrente;
float Tensao;
float TensaoMedio;
float SomaTensao;
float P;
float PotenciaInstantanea;
float PotenciaAparente;
float PotenciaAtiva;
float PotenciaAtivaAnterior;
float FatorDePotencia;
float FatorDePotenciaAnterior;
float PotenciaReativa;
float Capacitancia;
int Contador;
```

*Fonte: Próprio autor*

A linguagem utilizada no arduino exige que as variáveis sejam declaradas logo no início, definindo a sua finalidade. Neste caso, temos apenas dois tipos, o “float” números decimais, e o “int” para números inteiros.

Na segunda parte, definem-se os parâmetros de comunicação entre a placa do arduino e o computador, conforme ilustrado a seguir.

*Figura 31 - Definição da função dos pinos da placa arduino*

```
void setup()
{
  pinMode (22, OUTPUT) ;
  pinMode (23, OUTPUT) ;
  pinMode (24, OUTPUT) ;
  pinMode (25, OUTPUT) ;
  pinMode (26, OUTPUT) ;
  pinMode (27, OUTPUT) ;
  pinMode (A1, INPUT) ;
  pinMode (A2, INPUT) ;
  Serial.begin (2000000) ;
}
```

*Fonte: Próprio autor*

O “void setup()” é uma parte do código só se passa uma vez após ligar a placa arduino. É a parte usada para definir parâmetros imutáveis no programa. Neste caso, adotamos as saídas digitais de 22 até 27 para controle dos relés de estado sólido, a entrada A1 para receber o sinal de corrente e a entrada A2 para receber o sinal de tensão. O “Serial.begin()” define a velocidade de comunicação serial entre a placa arduino e o computador ao qual estiver conectado.

Na terceira parte realiza-se a calibragem dos sensores de tensão e corrente conforme ilustrado a seguir.

*Figura 32 - Calibragem dos sensores*

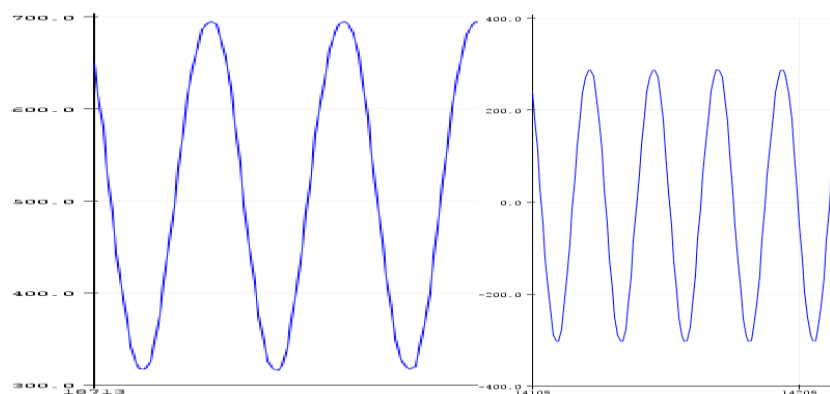
```
for(Contador = 0;Contador <= 2000;Contador++)
{
    Corrente = Corrente + analogRead(A1);
    Tensao    = Tensao    + analogRead(A2);
}
CorrenteMedio = Corrente/Contador;
TensaoMedio   = Tensao/Contador ;
```

*Fonte: Próprio autor*

Neste trecho, inicia-se o “void loop()” que é a parte do código que permanecerá funcionando em ciclos até que a placa arduino seja desligada. O resto do código que será abordado neste apêndice está incluso no “void loop()”.

O processo de calibragem do sensor de tensão e corrente é feito através da média simples de 2000 medições de ambas as variáveis. Este processo busca definir um nível de referência intermediário onde a onda senoidal da tensão e da corrente é igual a zero. Isso é necessário porque os sinais recebidos pela placa arduino se encontram em uma faixa de 0 a 1023. A Figura 34 a seguir ilustra o descrito acima.

Figura 33 - Formas de onda antes e depois de centralizar no nível zero



Fonte: Próprio autor

No quarto trecho realiza-se a aquisição dos dados conforme ilustra a imagem a seguir.

Figura 34 - Aquisição dos dados

```
for(Contador = 0;Contador <= 4000; Contador++)
{
    Corrente = (analogRead(A1)-CorrenteMedio)*0.058;
    Tensao = (analogRead(A2)-TensaoMedio)*4.04;
    SomaCorrente = SomaCorrente + pow(Corrente,2);
    SomaTensao = SomaTensao + pow(Tensao,2);
    PotenciaInstantanea = Corrente * Tensao;
    if(PotenciaInstantanea > 0)
    {
        P = P + (PotenciaInstantanea);
    }
}
PotenciaAtiva = P/Contador;
PotenciaAtivaAnterior = PotenciaAtiva;
Tensao = sqrt(SomaTensao/Contador);
Corrente = sqrt(SomaCorrente/Contador);
```

Fonte: Próprio autor

Neste trecho realiza-se novamente a leitura dos valores dos sensores de tensão e corrente e subtrai-se esse valor pela média calculada na etapa anterior para ajustar a forma de onda ao nível zero. Também, multiplica-se por um fator de ajuste obtido mediante comparação com o medidor de energia descrito na lista de materiais. Realiza-se a somatória de 4000 medições dos valores citados anteriormente para o cálculo dos valores de tensão e corrente eficazes. Essas 4000 medições duram aproximadamente 1210 milisegundos e equivalem a 72,6 ciclos das formas de onda da energia da rede de 60 Hz. Ainda neste trecho, calcula-se também a potência ativa pela média da componente positiva da potência instantânea.

Na quinta parte finaliza-se o processo de cálculo das variáveis elétricas iniciado na parte anterior, conforme ilustrado abaixo.

*Figura 35 - Cálculos finais das variáveis elétricas*

```

PotenciaAparente = Tensao * Corrente;
FatorDePotencia = PotenciaAtiva/PotenciaAparente;
FatorDePotenciaAnterior = FatorDePotencia;
PotenciaReativa = sqrt(pow(PotenciaAparente,2) - pow(PotenciaAtiva,2));
Capacitancia = PotenciaReativa/(120*3.141592654*pow(Tensao,2))*1000000;
P=0;
SomaCorrente = 0 ;
SomaTensao = 0 ;

```

*Fonte: Próprio autor*

Esta é a última etapa dos cálculos. Primeiramente, calcula-se a potência aparente pelo produto da tensão e corrente eficazes calculados no trecho anterior. Com este valor em mãos, calcula-se o fator de potência, potência reativa e capacitância. Por fim iguala-se a zero os valores das variáveis para serem reutilizadas novamente no próximo ciclo de cálculos. Isso é fundamental para não acumular os valores dos cálculos anteriores e gerar erros.

O sexto trecho do programa é simplesmente para mostrar os valores das variáveis elétricas para o observador conforme ilustrado a seguir.

*Figura 36 - Apresentação dos resultados dos cálculos ao observador*

```

Serial.print("V=");
Serial.print(Tensao,1);
Serial.print(" ");
Serial.print("I=");
Serial.print(Corrente,2);
Serial.print(" ");
Serial.print("P=");
Serial.print(PotenciaAtiva,1);
Serial.print(" ");
Serial.print("S=");
Serial.print(PotenciaAparente,1);
Serial.print(" ");
Serial.print("FP=");
Serial.print(FatorDePotencia,2);
Serial.print(" ");
Serial.print("C=");
Serial.println(Capacitancia);

```

*Fonte: Próprio autor*

Esta etapa apenas mostra no “serial monitor” os valores de tensão eficaz, corrente eficaz, potência ativa, potência aparente, fator de potência e capacitância calculado anteriormente.

O último trecho é responsável pelo controle dos relés de estado sólido que inserem os capacitores no circuito. Não será mostrado todo o código de programação responsável pelo controle dos relés de estado sólido por ser extenso e não agregar em nada no detalhamento do projeto.

A Figura 37 a seguir ilustra a parte do programa responsável por identificar se houve desligamento de algum equipamento elétrico. Isso é extremamente importante uma vez que se uma carga elétrica que consome potência reativa é desligada do circuito, passa a haver um excesso de potência reativa capacitiva no circuito, o que reduz o fator de potência. No entanto o medidor não identifica se o fator de potência diminuiu devido à potência reativa capacitiva ou indutiva e o arduino está programado para aumentar capacitores no circuito para elevar o fator de potência, logo vai piorar cada vez mais a situação. Sendo assim, o trecho do programa ilustrado na Figura 38, ao identificar o desligamento de equipamentos consumidores de potência reativa indutiva, desliga todos os capacitores, espera um tempo de 7,5 segundos e reinicia os cálculos para se adequar ao novo padrão de carga. Esse tempo de 7,5 segundo foi calculado segundo a equação a seguir.

$$\tau = R * C \quad (11)$$

Nesta equação,  $\tau$  representa a constante de tempo, sendo que são necessários 5 constantes de tempo para o capacitor estar carregado ou descarregado (REIS 2019). Como neste caso  $R = 100 \text{ k}\Omega$  e  $C = 15\mu\text{f}$ , logo  $\tau = 1,5\text{s}$  e 5 constantes de tempo resultam em 7,5 segundos para os capacitores estarem descarregados.

*Figura 37 - Identificador de desligamento de equipamento elétrico*

```
if(FatorDePotenciaAnterior - FatorDePotencia > 0.1)
{
    digitalWrite(22,LOW); //5UF
    digitalWrite(23,LOW); //5UF
    digitalWrite(24,LOW); //15UF
    digitalWrite(25,LOW); //15UF
    digitalWrite(26,LOW); //15UF
    digitalWrite(27,LOW ); //15UF
    delay(7500);
    funreset();
}
```

*Fonte: Próprio autor*

A seguir, na Figura 39, a parte responsável por manter os capacitores desligados quando não há demanda de potência reativa capacitiva. Realiza-se essa operação quando a corrente estiver abaixo de 500 mA.

*Figura 38 - Desligamento dos capacitores*

```

if(Corrente < 0.5)
{
    digitalWrite(22,LOW); //5UF
    digitalWrite(23,LOW); //5UF
    digitalWrite(24,LOW); //15UF
    digitalWrite(25,LOW); //15UF
    digitalWrite(26,LOW); //15UF
    digitalWrite(27,LOW ); //15UF
}

```

*Fonte: Próprio autor*

Por fim a parte que ativa os capacitores conforme a demanda calculada nas etapas anteriores.

*Figura 39 - Energização dos capacitores*

```

if(FatorDePotencia < 0.8)
{
    if(Capacitancia > 70)
    {
        digitalWrite(22,HIGH); //5UF
        digitalWrite(23,HIGH); //5UF
        digitalWrite(24,HIGH); //15UF
        digitalWrite(25,HIGH); //15UF
        digitalWrite(26,HIGH); //15UF
        digitalWrite(27,HIGH); //15UF
        funreset();
    }
}

```

*Fonte: Próprio autor*

A seguir será apresentada uma tabela com a sequência no qual os capacitores são energizados conforme cada nível de demanda, seguindo o exemplo da Figura 17.

Tabela 6 - Sequência de energização dos capacitores conforme demanda

Faixa de capacitância (uF)	Capacitores inseridos	Capacitância obtida (uF)
0 a 5	0	0
5 a 10	1 x 5uf	5
10 a 15	2 x 5uf	10
15 a 20	1 x 15uf	15
20 a 25	1 x 5uf + 1 x 15uf	20
25 a 30	2 x 5uf + 1 x 15uf	25
30 a 35	2 x 15uf	30
35 a 40	1 x 5uf + 2 x 15uf	35
40 a 45	2 x 5uf + 2 x 15uf	40
45 a 50	3 x 15uf	45
50 a 55	1 x 5uf + 3 x 15uf	50
55 a 60	2 x 5uf + 3 x 15uf	55
60 a 65	4 x 15uf	60'
65 a 70	1 x 5uf + 4 x 15uf	65
>70	2 x 5uf + 4 x 15uf	70

Fonte: Próprio autor

A capacitância inserida no circuito é sempre menor que o valor calculado para evitar excesso de potência reativa capacitiva.