

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
UNIDADE DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E TECNOLOGIA EM SISTEMAS
PRODUTIVOS

MICHEL CHAGURY

PROTÓTIPO PARA CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA EM BAIXA TENSÃO
USANDO ARDUÍNO

São Paulo

Março / 2017

MICHEL CHAGURY

PROTÓTIPO PARA CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA EM BAIXA TENSÃO
USANDO ARDUÍNO

Dissertação apresentada como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, no Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos, sob a orientação do Prof. Dr. Humber Furlan.

São Paulo
Março / 2017

FICHA ELABORADA PELA BIBLIOTECA NELSON ALVES VIANA
FATEC-SP / CEETEPS

C433p Chagury, Michel
Protótipo para correção de fator de potência em baixa tensão
usando arduino / Michel Chagury. – São Paulo : CEETEPS, 2017.
101 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Humber Furlan
Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em
Sistemas Produtivos) – Centro Estadual de Educação Tecnológica
Paula Souza, 2017.

1. Fator de potência. 2. Arduino. 3. Microcontrolador AVR. 4.
Banco de capacitores. 5. Baixa tensão. I. Furlan, Humber. II. Centro
Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. III. Título.

MICHEL CHAGURY

PROTÓTIPO PARA CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA EM BAIXA TENSÃO
USANDO ARDUÍNO

Prof. Dr. Humber Furlan

Profª. Dra. Mariana Amorim Fraga

Prof. Dr. Luiz Antônio Rasia

Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi

São Paulo, 17 de março de 2017.

À Fatec-SP, colegas, professores e auxiliares docentes cujo incentivo e colaboração tornaram possível este trabalho. Ao Instituto Federal de São Paulo – Campus de São José dos Campos pela colaboração e permissão do uso de seu laboratório.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Humber

À Claudia Regina Valente

Tomo emprestadas as palavras de Nazareno Vieira de Souza (Augusto Branco):
“Acreditaste em mim mais do que eu mesmo, e agora a minha vitória eu dedico a você.”

“Nas paixões a razão nos desampara”

Manuel Maria Barbosa du Bocage

RESUMO

CHAGURY, M. **Protótipo para controle de fator de potência em baixa tensão usando Arduino**. 66 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia de Sistemas Produtivos). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2016.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar um protótipo para o controle do fator de potência em instalações elétricas monofásicas de 60 Hz, 220 V de até 100 A. A pesquisa consiste em desenvolver um protótipo utilizando a plataforma Arduino que é equipada com microcontrolador AVR, para comutar bancos de capacitores conectando ou desconectando capacitores à rede conforme sejam necessários.

O trabalho baseia-se na montagem de um protótipo para ser acoplado à linha elétrica, com cargas em funcionamento, que seja capaz de monitorar a tensão e a corrente elétrica, determinar se há energia reativa na linha e sua natureza e então comandar relés que acionam o banco de capacitores para corrigir o fator de potência.

O protótipo destina-se a conectar ou desconectar capacitores em paralelo à carga, de modo que a energia reativa indutiva e a reativa capacitiva fiquem balanceadas e transite entre a carga e os capacitores para não serem devolvidas à linha de transmissão.

O protótipo não participa diretamente do circuito RLC, circuito composto por elementos resistivos, indutivos e capacitivos, sua função é a de monitorar a rede e acionar os capacitores acoplando-os em paralelo à linha. Os capacitores, quando acoplados fazem parte do circuito RLC.

Para atingir estes objetivos definiram-se os parâmetros elétricos das instalações elétricas nas quais o protótipo poderá ser empregado. Projetou-se o seu circuito elétrico analógico, que tem por função tratar o sinal elétrico antes da sua conversão para sinais digitais.

O protótipo foi montado com peças disponíveis e de fácil aquisição no mercado. Alguns dos componentes, como os circuitos que fazem a interface com os relés são elementos da plataforma Arduino. O circuito analógico, foi construído pelo autor.

O software de controle foi desenvolvido e instalado no protótipo e para comprovação

da sua funcionalidade e resposta foram feitos ensaios em laboratório com diversas cargas capacitivas e indutivas. Os valores apurados com instrumentos foram comparados com os valores apresentados pelo protótipo. Também foi observado como o protótipo reagiu, em relação à comutação de relés, quando submetido a cada uma das cargas.

Observou-se que o protótipo é sensível a cargas capacitivas superiores a 1 microfarad e não comuta relés quando submetidos a valores inferiores e este. O protótipo é sensível a cargas reativas superiores a 22 VAr.

O tempo de resposta do protótipo para efetuar as leituras e comandar cada um dos capacitores é de aproximadamente um segundo.

Palavras-chave: Fator de Potência, Arduino, Microcontrolador AVR, Banco de Capacitores, baixa tensão.

ABSTRACT

CHAGURY, M. **Protótipo para controle de fator de potência em baixa tensão usando Arduino.** 66 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia de Sistemas Produtivos). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2016.

The present work aims to present a prototype for the control of the power factor in single-phase electrical installations of 60 Hz, 220 V up to 100 A. The research consists of developing a prototype using the Arduino platform that is equipped with AVR microcontroller, in order to switch banks of capacitors by connecting or disconnecting capacitors to the electrical network as needed.

The job is based on the assembly of a prototype intended to be connected to the electric network, with loads in operation, that would be able to monitor the voltage and electric current, determine if there is reactive energy in the line and its nature and then command relays that drive the bank of capacitors to correct the power factor.

The prototype is designed to connect or disconnect capacitors in parallel to the load so that the inductive and capacitive reactive energy are balanced and transposed between the load and the capacitors bank so as not to be returned to the transmission line.

The prototype does not participate directly in the RLC circuit, a circuit composed of resistive, inductive and capacitive elements, its function is to monitor the network and to activate the capacitors by coupling them parallel to the line. The capacitors, when coupled, are part of the RLC circuit.

In order to achieve these goals, the electrical parameters of the electrical installations in which the prototype can be employed were defined. Its analogical electric circuit, whose function is to treat the electrical signal before been converted to digital signals was designed.

The prototype was assembled with available and easy to acquire parts in the market. Some of the components, such as the circuits that interface with the relays, are elements of the Arduino platform. Some others, such as the analogical circuit were built by the author.

The control software was developed and installed in the prototype and to prove its functionality and response, laboratory tests were carried out with several capacitive and inductive loads. The values obtained with instruments were compared with the values presented by the prototype. It was also observed how the prototype reacted, regarding to the relay switching, when submitted to each of the loads.

It was observed that the prototype is sensitive to capacitive loads greater than 1 microfarad and does not switch relays when submitted to lower values than that. The prototype is sensitive to reactive loads greater than 22 VAR.

The response time of the prototype to take the readings and command each of the capacitors is approximately one second.

Keywords: Power Factor, Arduino, AVR Microcontroller, Capacitor Bank, Low voltage

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 : Relações entre tensão e corrente nos elementos simples	29
Quadro 2: Sensoriamento de Tensão – Tensões em volts (valores de pico)	57
Quadro 3: Sensoriamento de Corrente (valores de pico)	57
Quadro 4: Testes com Ventilador em velocidade 1 (mais lenta)	80
Quadro 5: Testes com Ventilador em velocidade 2 (intermediária).....	81
Quadro 6: Testes com Ventilador em velocidade 3 (mais rápida)	81
Quadro 7: Testes com Lâmpada de 100 W, 220 V	82
Quadro 8: Testes com conjunto de Lâmpadas - 300 W, 220 V	82
Quadro 9: Testes com resistor - 400 W, 220 V	83
Quadro 10: Teste com Condicionador de Ar operando operando no momento 1	83
Quadro 11: Teste com Condicionador de Ar operando operando no momento 2	84
Quadro 12: Teste com Condicionador de Ar operando operando no momento 3	84
Quadro 13: Teste com compressor de Ar do Laboratório de Eletrônica da Fatec-SP	85
Quadro 14: Teste de medição realizado na fase 1 do quadro de distribuição elétrica	85
Quadro 15: Teste de medição realizado na fase 3 do quadro de distribuição elétrica	86
Quadro 16: Teste com motor trifásico de 1 cv	86
Quadro 17: Teste com motor monofásico de 1/4 cv	87
Quadro 18: Teste com motores monofásicos de 1/4 cv com capacitor de 40 uF	87
Quadro 19: Teste com dois motores iguais monofásicos de 1/4 cv	88
Quadro 20: Teste com dois motores de 1/4 cv mais capacitores de 40 uF e 5 uF	88
Quadro 21: Teste com o motor de 1/4 cv ligado ao transformador	89
Quadro 22: Erro inferior a 1%	90
Quadro 23: Tendência de diminuição do erro com aumento da corrente	90
Quadro 24: Erros mais significativos	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fotografia de um Banco de Capacitores	19
Figura 2: Transporte de Energia	26
Figura 3: Gráfico da Corrente Alternada	28
Figura 4: Gráfico da Potência	32
Figura 5: Representação gráfica da corrente atrasada 30° em relação à tensão	33
Figura 6: Triângulo de Potência.....	35
Figura 7: Representação da defasagem entre corrente e tensão.....	36
Figura 8: Ilustração representando a energia reativa	37
Figura 9: Correção do Fator de Potência	38
Figura 10: Representação de um Circuito RLC.....	38
Figura 11: Cargas reativas indutivas e capacitivas	39
Figura 12: Correção do Fator de Potência	40
Figura 13: Calibração de Fase	44
Figura 14: Arduíno modelo UNO	45
Figura 15: Outros modelos de Arduíno	46
Figura 16: Alguns modelos de placas para conexão.....	47
Figura 17: Fotografia do Arduíno utilizado.....	53
Figura 18: Fotografia do transformador (sensor de tensão) utilizado.....	54
Figura 19: Fotografia do circuito analógico	55
Figura 20: Fotografia do sensor de corrente	56
Figura 21: Acoplador Óptico	58
Figura 22: Etapas do Bloco de Aquisição de dados.....	58
Figura 23: Fotografia do Display	59
Figura 24: Fotografia dos conjuntos de relés.....	60
Figura 25: Fotografia do Protótipo	60
Figura 26: Fotografia do Circuito Analógico e Display	61
Figura 27: Fotografia do Arranjo Experimental sem a fonte de alimentação.....	61
Figura 28: Fotografia do Arranjo em desenvolvimento.....	62
Figura 29: Fotografia do Arduíno utilizado	62
Figura 30: Sinal do Sensor de Zero	69
Figura 31: Áreas ‘a’ e ‘b’ situadas entre a curva da corrente e o zero.....	71

Figura 32: Comparação entre as areas ‘a’ e ‘b’	72
Figura 33: Fluxograma – parte 1.....	63
Figura 34: Fluxograma – parte 2.....	64
Figura 35: Fluxograma - parte 3	65
Figura 36: Fluxograma - parte 4	66
Figura 37: Relação de impedâncias	100
Figura 38: Circuito Analógico	101

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Capacitância - [μF] (microfarad)
f	Frequência – [Hz] (hertz)
I	Corrente máxima ou corrente de pico - [A] (ampere)
i(t)	Corrente instantânea - [A]
I _{ef}	Corrente eficaz – [A]
L	indutância - [H] (Henri)
P _m	Potência máxima ou potência de pico
P	Potência Ativa – [VA] (volt ampere)
P(t)	Potência Instantânea – [W] (watt)
P _{diss}	Potência Dissipada
q	Carga elétrica - [C] (Coulomb)
Q	Potência Reativa sem correção - [VAr] (volt ampere reativo)
Q'	Potência Reativa Desejada - [VAr]
Q _C	Energia Reativa Capacitiva- [VAr]
Q _L	Energia Reativa Indutiva- [VAr]
R	Resistência - [Ω] (ohm)
S	Potência Aparente – [W] (watt)
V	Tensão máxima ou tensão de pico [V] (volts)
v(t)	Tensão instantânea [V]
V _{ef}	Tensão eficaz [V]
X _c	Reatância Capacitiva - [Ω]
X _L	Reatância Indutiva - [Ω]
Δw	Variação de energia / trabalho – [J] (joules)
ϕ	ângulo de fase – [rad] (radianos)
ϕ_1	Fator de Potência sem correção [rad]
ϕ_2	Fator de Potência desejado [rad]
ω	Velocidade Angular – [rad/s](radianos por segundo)

SUMÁRIO

Questão de pesquisa.....	23
Objetivo.....	23
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
1.1 Energia Elétrica e Corrente Alternada.....	26
1.1.1 <i>Relação tensão e corrente nos elementos simples de circuito elétrico:</i>	28
1.2 Relação entre Potência Aparente, Potência Ativa e Potência Reativa.....	31
1.3 Fator de potência e sua correção	36
1.4 Algoritmos de implementação da equações.....	42
1.5 Plataforma Arduino.....	44
1.6 Como o Arduino lê tensões.....	47
2 METODOLOGIA	50
2.1 Procedimento Experimental	51
2.1.1 <i>Montagem do protótipo</i>	51
2.2 Software de Controle	62
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
3.1 Procedimentos experimentais com diferentes métodos de detecção I - Simulação.....	75
3.2 Procedimentos experimentais com diferentes métodos de detecção II – Sinal do produto ($v \times i$).....	76
3.3 Procedimentos experimentais com diferentes métodos de detecção III – Defasagem entre picos	77
3.4 Procedimentos experimentais com diferentes métodos de detecção IV - <i>Zerocrossing</i>	78
CONCLUSÃO	90
TRABALHOS FUTUROS	94
REFERÊNCIAS.....	95

APÊNDICE A.....97

APÊNDICE B.....101

INTRODUÇÃO

Em julho de 2001 o Brasil sofreu a denominada “crise do apagão”, um *blackout* energético que afetou seriamente o fornecimento de energia elétrica em razão de falhas nas linhas de transmissão por carência de manutenção. Em 10 de novembro de 2009 ocorreu o “mega-apagão”, provocado por problemas nas linhas de transmissão de Itaipu, atingindo 70 milhões de habitantes de 18 estados. Em 2010, ocorreram 91 casos de interrupções, que representaram mais de 100 megawatts. Em fevereiro de 2011, 33 milhões de habitantes de 8 estados ficaram sem energia por um período de aproximadamente 4 horas (Instituto Socioambiental, 2012).

Em razão das grandes dimensões geográficas e de seu potencial hídrico a matriz energética brasileira tem como principal fonte de produção de energia a energia hidrelétrica (REIS, 2011), assim, a geração de energia acontece em locais muito distantes dos pontos de consumo e necessita ser transportada.

Atualmente o Brasil tem sérias restrições em relação à capacidade instalada em seu sistema de geração, transporte e distribuição de energia elétrica, o que ocasiona o atendimento sem folga à sua demanda (Instituto Socioambiental, 2012).

Nosso sistema elétrico já opera perto do limite e pode vir a faltar energia elétrica (Rosa, 2014). Com a tendência de saturação do nosso sistema de geração e distribuição de energia é importante que se promova o melhor aproveitamento possível das instalações já existentes.

Um baixo fator de potência indica um mau aproveitamento da energia de uma instalação o que significa desperdício de energia e, conseqüentemente, mau aproveitamento do sistema de distribuição e dos equipamentos, além disso um baixo fator de potência provoca maior aquecimento da rede e também queda de tensão.

O fator de potência das cargas afetam a eficiência e os custos da energia, tanto para os fornecedores de energia elétrica quanto para os consumidores (OSAFEHINTI, 2013). O controle da potência reativa é muito importante para manter a qualidade do fornecimento de energia (BISANOVIC, 2014).

Em grande escala, o baixo fator de potência tem repercussão econômica porque causa sobrecarga desnecessária na rede de distribuição de energia, motivo pelo qual as concessionárias, com base em normas técnicas, adotam como parâmetro que este fator seja maior que 0,92, sendo a condição ideal que ele esteja o mais próximo possível de 1.

A correção do fator de potência traz o fator de potência de um circuito de alimentação CA para mais próximo de 1, fornecendo potência reativa de sinal oposto, adicionando capacitores que atuam para cancelar os efeitos indutivos da carga. O efeito indutivo das cargas do motor podem ser compensadas por capacitores conectados localmente (OSAFEHINTI, 2013).

Equipamentos elétricos que usam bobinas, tais como, transformadores, motores elétricos, fornos a arco, fornos de micro-ondas e reatores de luminárias fluorescentes são responsáveis pela geração da energia reativa indutiva, a qual não é consumida, não realiza trabalho, mas transita pelos cabos de transmissão.

Motores de indução, máquinas de solda, fornos de arco, reatores de lâmpadas fluorescentes, controles eletrônicos e computadores também geram energia reativa (TIWARI, 2014). A energia reativa é devolvida pela carga ao gerador ocasionando a geração de uma corrente elétrica que no sistema de distribuição é desnecessária e indesejada.

A energia reativa é inconveniente, para o sistema, porque a troca de potência com a fonte geradora de energia aumenta a corrente nos cabos de transmissão, utilizando desnecessariamente parte de sua limitada capacidade de transporte, sendo responsável por uma sobrecarga no sistema que precisa ser superdimensionado para transportá-la, se uma medida de redução não for adotada junto aos pontos consumidores.

Para redução da quantidade de energia reativa devolvida à rede distribuidora, as concessionárias passaram a impor aos consumidores comerciais e industriais a observação de um fator de potência superior a 0,92 (ou 92%) (ELETROPAULO, 2015). O fator de potência é um índice que mostra o grau de eficiência de um determinado sistema elétrico de acordo com a Resolução 414 de 09 de setembro de 2010 da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.

Se o fator de potência não for corrigido o consumidor exigirá uma demanda mais elevada de eletricidade, se for um estabelecimento industrial, sofrerá uma penalidade pelo baixo fator de potência. O padrão é utilizar bancos de capacitores em pontos apropriados do sistema elétrico para compensar a natureza indutiva da carga. Além do aumento dos custos

operacionais, a potência reativa pode exigir o uso de fiação mais espessa, interruptores, disjuntores e transformadores com maior capacidade de corrente. (TIWARI, 2014).

A necessidade de correção do fator de potência é um problema comum. A maioria das indústrias apresenta carga altamente indutiva por natureza. Nos primeiros equipamentos o controle era feito mediante ajustes manuais. O controlador inteligente é útil para fornecer a correção do fator de potência automaticamente e envolve o uso de microcontrolador. Muito raramente indústrias têm cargas capacitivas tais como motores síncronos. (TIWARI, 2014).

Em vez de usar capacitores, é possível usar um motor síncrono em vazio. A potência reativa do motor síncrono é uma função de sua excitação de campo, como um condensador síncrono. Sua vantagem principal neste caso é que a quantidade de correção pode ser ajustada como se fosse um capacitor variável (OSAFEHINTI, 2013). Considera-se o custo desta solução mais elevado.

O fator de potência é a relação entre a potência ativa, que é dissipada e realiza trabalho e a potência aparente que é a potência total fornecida. O que torna a potência ativa menor que a potência total fornecida é justamente a energia reativa. Em outras palavras, quanto maior a geração de energia reativa, menor o fator de potência (CREDER, 2008). Isto ocorre uma vez que a potência aparente corresponde à soma dos fasores da potência reativa com a potência ativa.

É possível corrigir o problema mediante aplicação de capacitores como os do banco de capacitores ilustrado na Figura 1, mas a sua utilização tem de ser equilibrada e a capacitância acoplada para este fim deve manter correspondência com a quantidade de energia indutiva existente, sob pena de ser insuficiente ou ao contrário, se excessiva e gerar a indesejada energia indutiva capacitiva que sobrecarrega o sistema elétrico do mesmo modo. Daí o interesse em se monitorar a quantidade de energia reativa de modo automático e adequar a ativação seletiva de capacitores na proporção em que sejam necessários, desacoplando-os quando já não mais o sejam.

Isto pode ser feito pela manipulação de um banco de capacitores controlado por software, que gerencia o acionamento escalonado dos referidos capacitores. Dessa maneira, proporciona-se um aumento da eficiência energética, a melhora da eficácia da rede de distribuição e da qualidade da energia distribuída, o que atende à atual exigência de melhor sustentabilidade ambiental e econômica.

O banco de capacitores fixo, de capacitância fixa não apresenta variação dinâmica e não se ajusta automaticamente com a variação da quantidade de energia reativa. Para as instalações que apresentam variação da energia reativa é conveniente a monitoração inteligente do sistema mediante sensoriamento e readequação constante para manter o fator de potência mais próximo de um.

Nos bancos de capacitores fixos, faz-se o seu dimensionamento previamente. Bisanovic et al, 2014, fazem referência a artigos que apresentam diferentes métodos para apuração do valor mais adequado para este dimensionamento, inclusive métodos heurísticos. A tecnologia para a correção de um baixo fator de potência já existe e este trabalho visa empregar uma das técnicas existentes, melhorando sua eficiência por meio de automatização propiciada por um circuito que utiliza um microcontrolador de baixo custo, e de simples manuseio que opera com um banco de capacitores.

A capacitância fixa não se adapta à variação de energia reativa que acompanha as elevações e decréscimos que ocorrem em uma instalação, carga ou grupo de cargas, o que significa que, em parte do tempo, a energia reativa sofrerá correção insuficiente ou correção excessiva. Em geral este procedimento elimina boa parte da troca da energia reativa, de modo suficiente para eliminar a cobrança da taxa pelo excesso de energia reativa na fatura mensal de alguns consumidores, porém o resultado do uso do banco microprocessado é mais eficiente, já que opera pela real necessidade a cada instante, o microcontrolador faz ajuste conforme necessário para a compensação do fator de potência (TIWARI, 2014).

Figura 1: Fotografia de um Banco de Capacitores



Fonte:

http://www.solucoesindustriais.com.br/images/produtos/imagens_10057/p_instalacao-de-banco-de-capacitores-18.jpg - Disponível em 13 mar 2017.

Este projeto consiste em mostrar a viabilidade do uso da plataforma Arduino para tal finalidade mediante projeto e montagem de um arranjo experimental de bancada e do desenvolvimento do respectivo software de controle para seu funcionamento.

O arranjo experimental, usa a técnica de correção de fator de potência mediante manobra de elementos capacitivos, ou seja, controla um banco de capacitores que anulam os efeitos da energia reativa indutiva. Por se tratar de um protótipo experimental de bancada, será desenvolvido para cargas monofásicas, mas uma vez desenvolvido, poderá ser adaptado para cargas trifásicas, em sistemas balanceados.

Verificando-se que os limites elétricos da instalação a ser corrigida não ultrapassam a capacidade do protótipo, este pode ser instalado sem a necessidade do trabalho de avaliação e cálculo para dimensionamento como ocorre com os bancos de capacitores fixos, cujo valor de maior eficiência deve ser apurado. A eliminação desta etapa de avaliação é uma das contribuições que este protótipo pode trazer, sendo que a fabricação do banco fixo é individual e o equipamento é específico para cada caso, assim, no caso do banco microprocessado o protótipo, dentro dos limites de sua capacidade, tem atuação variável e se adequa automaticamente à necessidade de correção, ou seja, adapta-se às cargas dentro dos limites de sua capacidade. Já que o protótipo é capaz de acionar até oito capacitores, o único cálculo necessário é apurar o valor da máxima energia reativa que a instalação atingirá e dividir o valor encontrado por oito para determinar o valor de cada capacitor instalado.

O microcontrolador de 8 bits AVR ATmega328P, da fabricante ATmega utilizado na plataforma Arduino é capaz de exercer a tarefa de controle e correção de fator de potência com um custo baixo, permitindo que instalações de menor porte possam utilizar esta tecnologia para aumento de sua eficiência energética.

Esta solução microprocessada utiliza componentes simples, comuns, de fácil aquisição o que facilita sua utilização por pequenos consumidores. Em relação aos bancos fixos, esta solução apresenta a vantagem de que um equipamento inteligente não precisa ser substituído ou readequado sempre que o consumidor, dentro dos limites de capacidade elétrica do protótipo, aumentar ou diminuir a sua capacidade instalada permitindo-lhe maior flexibilidade.

A plataforma Arduino é extremamente flexível e permite uma grande variedade de adequações possíveis, por exemplo, é possível a colocação de sensores de temperatura para monitorar os capacitores, é possível a colocação de uma placa de comunicação com *Wi-fi* que

permite a comunicação de dados sem fios, a mesma possibilidade existe para a comunicação via *Bluetooth* e também para a transmitir dados on-line pela Internet ou por telefonia celular. É possível também a implementação de rotinas de emergência, a colocação de uma placa de relógio de tempo real com bateria que possibilita a programação para seguir um calendário de operações, também é possível a comunicação com outros equipamentos, o registro de dados em memórias auxiliares, a implementação de rotinas para cálculo de consumo de energia e incontáveis outras possibilidades, tudo disponível em plataforma aberta. Em muitos casos os fabricantes das respectivas placas fornecem juntamente com elas as respectivas bibliotecas de controle facilitando muito a programação.

O uso do software denominado “*Publish or Perish*” em novembro de 2016 revelou que os estudos científicos acerca da utilização de banco de capacitores para correção de fator de potência em linhas de alta potência é assunto já exaustivamente explorado pela ciência e que o mesmo não ocorre nos casos de baixa potência, sendo raros os trabalhos que enfocam o uso de bancos de capacitores para a correção de fator de potência em baixa tensão.

Esse *software* faz busca em toda a base de dados do Google Acadêmico que contempla diversos índices. Para a pesquisa foram utilizadas as seguintes palavras chave: ‘Power Factor’, ‘Arduíno’, ‘AVR Microcontroller’, ‘Capacitor Bank’, ‘Fator de Potência’, ‘Arduíno’, ‘Microcontrolador AVR’ e ‘Banco de Capacitores’.

Um dos últimos artigos sobre correção de fator de potência foi publicado em 2013. O mencionado artigo traz como inovação somente o uso de semicondutores, em vez de relés, para a comutação dos capacitores (BISANOVIC, 2014) a novidade decorre do surgimento dos tiristores na eletrônica de potência e de sua aplicação para o controle do fator de potência. Isto revela que não tem surgido novidades a respeito do tema.

Uma busca realizada em 10 de janeiro de 2017 nas seguintes bases Scopus (Elsevier), Science Citation Index Expanded (Web of Science), Technology Research Database, Science Direct Journal (Elsevier), Engineering Research Database, IEEE Journals & Magazines, Scitech Connect, ProQuest Advanced Technologies & Aerospace Collection, Advanced Technologies Database with Aerospace, Electronics of Communications Abstracts, One File, Elsevier (CrossRef) Mechanical & Transportation Engineering Abstracts, ANTE: Abstracts in New Technology & Engineering, Solid State and Superconductivity Abstracts, IOPsciences(Institute of Physics, SpringerLink e Springer (CrossRef) revelou que as publicações mais recentes relacionados à correção do fator de potência são de 2014. Para a busca foram utilizadas as palavras chave “Power Factor Correction” e “Capacitor Bank”.

As buscas realizadas não apontam nenhum artigo científico ou estudo utilizando o controlador Arduino com a finalidade de promover a correção de fator de potência, possivelmente porque os grandes fabricantes não têm interesse em patrocinar pesquisas que utilizem elementos de plataforma e código abertos.

Questão de pesquisa

Como pode ser desenvolvido um protótipo de um controlador de fator de potência utilizando a plataforma aberta Arduino, com microcontrolador AVR, para comandar bancos de capacitores e corrigir o fator de potência em instalações elétricas monofásicas de 60 Hz, 220 V de até 100 A?

Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver um protótipo de um controlador de fator de potência de baixa tensão utilizando a plataforma Arduino para comandar bancos de capacitores e corrigir o fator de potência em instalações elétricas de 60 Hz, 220 V de até 100 A, monofásicas.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a compreensão dos fenômenos envolvidos com o fator de potência é necessário o entendimento a respeito da teoria da eletricidade e dos conceitos que a envolvem, tais como tensão, corrente, potência e outros elementos de circuitos.

A tensão e a corrente são as duas principais grandezas elétricas das quais decorrem as demais. Ao redor de uma carga elétrica sempre há um campo elétrico cuja intensidade diminui à medida em que se distancia da carga.

Considerando esta carga pontual, todos os pontos dela equidistantes descrevem uma esfera, cujo raio é a distância da carga, nessa esfera o potencial dos pontos é exatamente o mesmo dado que são equidistantes da carga. Quanto maior este raio, menor é a intensidade do campo. A intensidade do campo elétrico diminui proporcionalmente ao quadrado da distância.

Assim a intensidade (E) do campo elétrico depende do valor da carga (Q) e da distância (d) dada por (MARKUS, 2011)(HALLIDAY, 2010),

$$E = K \cdot \frac{|Q|}{d^2} \text{ [N/C]} \quad (1)$$

Uma outra carga colocada neste campo elétrico fica sujeita a uma força que faz com que ela se movimente. Em cada ponto do campo elétrico existe um potencial para a realização de trabalho. Este potencial depende da intensidade do campo. Pontos situados a distâncias diferentes apresentam potenciais elétricos diferentes (HALLIDAY, 2010).

A diferença de potencial entre dois pontos é medida em volts e é chamada de tensão elétrica (MARKUS / 2011). Assim, a tensão de um volt corresponde ao trabalho necessário para mover uma carga de um coulomb entre dois pontos nos quais a tensão está sendo medida de acordo com a equação (2).

$$1\text{ V} = \frac{1\text{ J}}{\text{C}} \quad (2)$$

A diferença de potencial promove o deslocamento ordenado de cargas elétricas em um condutor, esse deslocamento é denominado corrente elétrica que tem como unidade o ampere. Um ampere igual a um coulomb por segundo, ou seja, corresponde à quantidade de cargas em coulomb que atravessam a seção transversal de um condutor durante um intervalo de tempo em segundos, dados pela equação (HALLIDAY, 2010),

$$i = \frac{dq}{dt} [\text{A}] \quad (3)$$

Em um circuito elétrico a variação da energia (Δw) é função da tensão aplicada ao elemento dada pela carga que o atravessa de acordo com a equação (HALLIDAY, 2010),

$$\Delta w = v \cdot \Delta q [\text{J}] \quad (4)$$

O conceito associado à quantidade de energia que se libera ou se transforma em determinado intervalo de tempo (Δt) ou mesmo o trabalho realizado (τ) é a potência elétrica (P). Em um circuito elétrico, a potência é a quantidade de cargas elétricas (q) que uma fonte, aplicando uma determinada tensão (V), pode fornecer a um circuito em um intervalo de tempo, dada pela equação (5) de acordo com (CREDER, 2008)(EDMINISTER,1991) (HALLIDAY, 2010),

$$P = \frac{dw}{dt} = v \cdot \frac{dq}{dt} [\text{J/s}] \quad (5)$$

onde

$$i = \frac{dq}{dt}$$

logo,

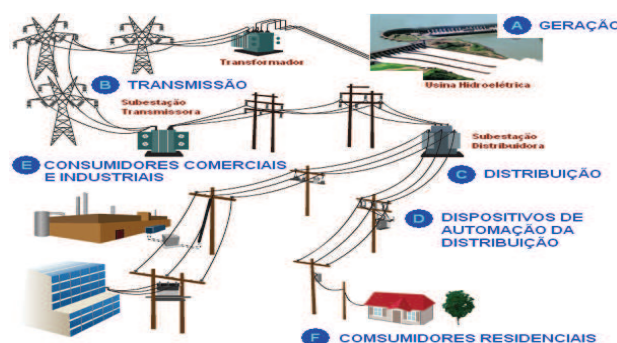
$$P = vi \left[\frac{j}{s} \right] = [W] \quad (6)$$

Neste trabalho, as variáveis são frequência, tempo, tensão e corrente, sendo a tensão e o tempo as variáveis independentes e a corrente e demais variáveis que delas derivam as variáveis dependentes. Para os circuitos são parâmetros a resistência, capacitância dos capacitores e indutância das bobinas e também as variáveis dependentes das respectivas reatâncias, indutiva e capacitiva e a combinação entre elas que compõem as impedâncias.

1.1 Energia Elétrica e Corrente Alternada

No Brasil e na maior parte do mundo, a energia elétrica é transmitida e distribuída em forma de corrente alternadas, os consumidores são alimentados com esse tipo de corrente. A corrente alternada entregue no Brasil corresponde a uma tensão alternada que varia no tempo descrevendo uma variação senoidal com frequência de 60 Hz que corresponde à frequência dos geradores (CREDER, 2008).

Figura 2: Transporte de Energia



Fonte: <http://www.treinamentonr10.com/wp-content/uploads/2012/06/SEP-estrutura.png>

Um dos motivos de se operar com a Corrente Alternada (CA) é a facilidade com que se pode elevar o nível de tensão, o que reduz a perda de energia nas linhas de transmissão, em virtude da resistência dos cabos, a qual ainda que pequena, dissipa energia por efeito Joule de modo proporcional ao quadrado da corrente de acordo com a equação (TIWARI, 2014) (HALLIDAY, 2010) (MARKUS, 2011) (ALBUQUERQUE, 2007),

$$P_{diss} = R \cdot I^2 \text{ [W]} \quad (7)$$

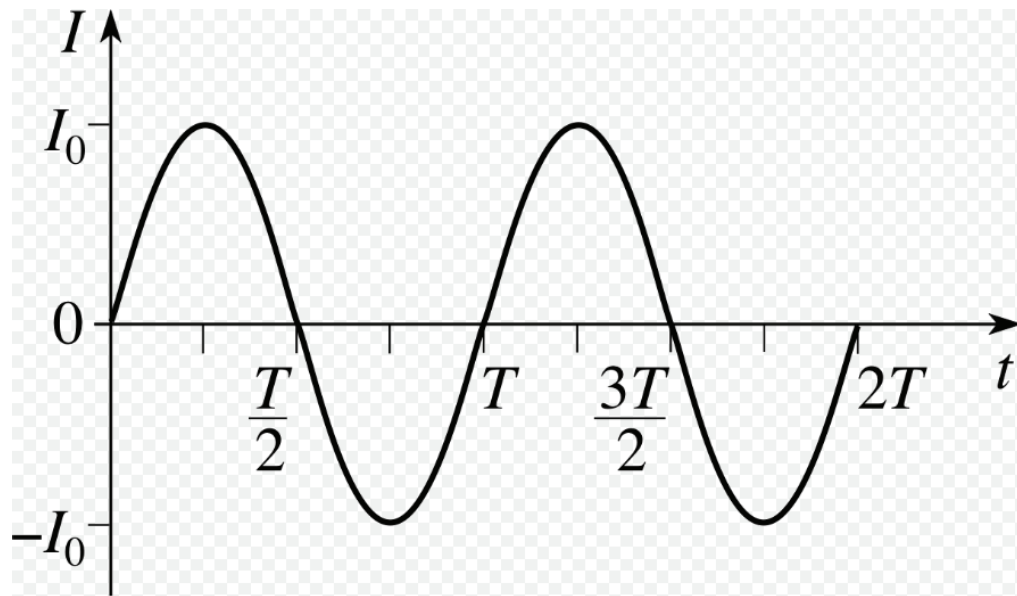
Assim para a mesma potência transmitida podemos elevar a tensão e baixar a corrente, reduzindo as perdas. Este é o motivo pelo qual se transmite energia em alta tensão.

Desse modo, tendo em vista que o fornecimento de energia elétrica é realizado em corrente alternada, com frequência de 60 Hz, o banco de capacitores deverá operar em conformidade com este sistema.

A principal característica da corrente alternada, como mostra a Figura 3, é que ela, diferentemente da corrente contínua, muda de sentido e é gerada por um dispositivo elétrico giratório que faz com que espiras de fio metálico cortem linhas de campo magnético produzidas por um ímã que pode ser fixo, permanente ou um eletroímã. Quando as espiras cortam as linhas de campo em 90 graus a tensão é máxima e quando estas mesmas espiras, ao girar um ângulo 90 graus, movem-se em paralelo às linhas de campo, a tensão é zero.

Novamente, ao continuar a rotação, as espiras, ao girar mais noventa graus, cortam novamente as linhas de campo em 90 graus, mas desta vez em sentido contrário, fazendo com que a tensão aplicada assumo o valor mínimo que corresponde ao valor máximo mas com o sentido oposto, ou seja, com a tensão invertida. Assim, a tensão nestas condições varia descrevendo no tempo uma onda senoidal que apresenta valores máximos positivos, mínimos que são negativos (inverte-se o sentido da corrente) e nulos, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3: Gráfico da Corrente Alternada



Os pontos ' I_0 ' e ' $-I_0$ ' indicam os picos e o ponto 'O' o zero, ' I ' indica a intensidade da corrente, ' T ' indica o período e ' t ' indica o tempo.

Fonte: Google Imagens - Disponível em 16 set 2016.

A frequência com que o gerador gira determina a frequência e, consequentemente, o período da alternância da tensão.

1.1.1 Relação tensão e corrente nos elementos simples de circuito elétrico:

A f.e.m – força eletromotriz, $v(t)$, gerada é senoidal e é descrita em função do tempo ou do ângulo de rotação do gerador dada pela equação (8) (MARKUS, 2011) (ALBUQUERQUE, 2007):

$$v(t) = V \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) [V] \quad (8)$$

Sendo (ALBUQUERQUE, 2007)

$$\omega = 2\pi f \text{ [rad/s]} \quad (9)$$

As relações entre os elementos de circuitos podem ser estabelecidas conforme mostra o quadro 1:

Quadro 1: Relações entre tensão e corrente nos Elementos Simples

Elemento	Tensão nos terminais	Corrente
Resistência - R	$v(t) = R i(t)$	$i(t) = v(t) / R$
Indutância - L	$v(t) = L \frac{di}{dt}$	$i(t) = \frac{1}{L} \int v dt$
Capacitância - C	$v(t) = \frac{1}{C} \int i dt$	$I(t) = C \frac{dv}{dt}$

Fonte: (Edminister, 1991)

Em circuitos resistivos, a corrente elétrica é decorrente da aplicação da tensão em uma carga de acordo com a equação (10) (MARKUS, 2011) (ALBUQUERQUE, 2007):

$$i(t) = I \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) \text{ [A]} \quad (10)$$

Nestes circuitos, aplicando-se a tensão $v(t) = V \text{ sen}(\omega t + \varphi)$ a uma carga resistiva, não haverá defasagem entre a tensão e a corrente que assumirá o valor de $i(t) = I \text{ sen}(\omega t + \varphi) = v(t)/R$.

Quando houver uma indutância L [H] associada ao circuito, a tensão será representada pela equação,1

$$V \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) = L \frac{di}{dt} \text{ [V]} \quad (11)$$

A corrente $i(t)$ será obtida pela solução da equação (12),

$$i(t) = \frac{1}{L} \int V \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) dt = I \cdot \text{sen}(\omega t - \frac{\pi}{2}) \text{ [A]} \quad (12)$$

Onde (ALBUQUERQUE, 2007)

$$\omega L = X_L \text{ } [\Omega] \text{ (ohm)} \quad (13)$$

Que é denominada reatância indutiva. Desse modo a corrente elétrica máxima pode ser representada pela equação,

$$I = \frac{V}{2\pi f L} \text{ [A]} \quad (14)$$

Dependente da frequência f .

Em um capacitor, aplicando-se a tensão $v(t) = V \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi)$ obtém-se (ALBUQUERQUE, 2007),

$$V \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) = \frac{q}{C} \text{ [V]} \quad (15)$$

esta corrente máxima é dada pela equação (16) que revela que a corrente se adianta em 90° em relação à tensão e depende da frequência:

$$I = \omega C \cdot V \cdot \cos(\omega t + \varphi) = \omega C \cdot V \cdot \text{sen}(\omega t + \frac{\pi}{2}) \text{ [A]} \quad (16)$$

Nos circuitos capacitivos, $1/\omega C$ é a impedância capacitiva e é representada por $X_c \text{ } [\Omega]$ conforme sugere ALBUQUERQUE, 2007.

1.2 Relação entre Potência Aparente, Potência Ativa e Potência Reativa

A potência dissipada por um resistor em um circuito elétrico é equivalente à potência média P . Em um resistor as tensões e as correntes eficazes (ou rms – “root mean square”) valem respectivamente (ALBUQUERQUE, 2007):

$$V_{\text{ef}} = \frac{V}{\sqrt{2}} [V] \text{ e } I_{\text{ef}} = \frac{I}{\sqrt{2}} [A], \quad (17)$$

Onde (ALBUQUERQUE, 2007)

$$I_{\text{ef}} = \frac{V_{\text{ef}}}{R} [A] \quad (18)$$

assim, a potência média S é conhecida como potência aparente dada pela equação(19) (ALBUQUERQUE, 2007).

$$S = V_{\text{ef}} \cdot I_{\text{ef}} = \frac{V}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I}{\sqrt{2}} = \frac{V \cdot I}{2} [W] \quad (19)$$

A potência Instantânea $P(t)$ é o produto dos valores instantâneos da tensão $v(t)$ pela correntes $i(t)$, ou seja $P(t) = v(t) \cdot i(t)$ como descrito na equação (6), assim,

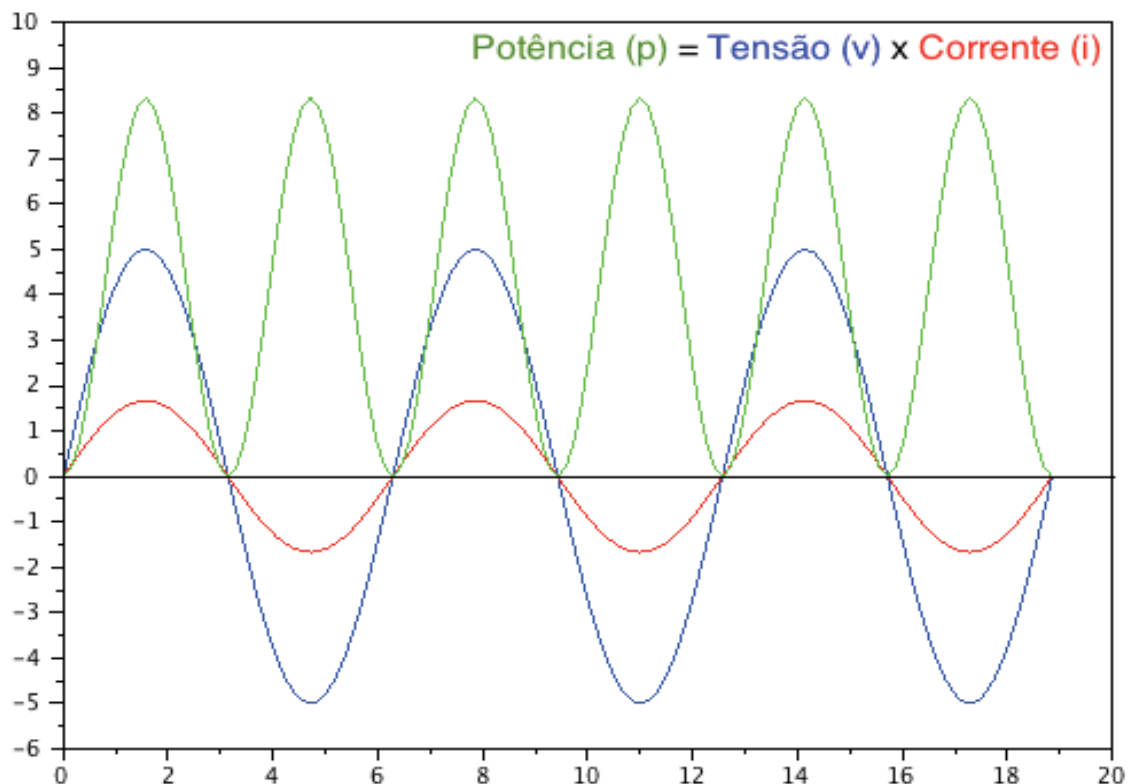
$$P(t) = V \cos(\omega t + \varphi) \cdot I \cos(\omega t) [W] \quad (20)$$

Substituindo os valores máximos pelos valores eficazes e simplificando o resultado obtém-se (MARKUS, 2011):

$$P(t) = V_{\text{ef}} \cdot I_{\text{ef}} \cdot \cos(\varphi) + V \cdot \cos(2\omega t + \varphi) [W] \quad (21)$$

Nesta equação o primeiro termo é uma constante, independe do tempo o segundo termo varia com o tempo com o dobro da frequência de ω . A Figura 4, mostra que toda a área referente à potência é situada acima dos eixos das abscissas, entre a curva senoidal e o eixo. Nesta figura os valores das escalas são meramente ilustrativos.

Figura 4: Gráfico da Potência



Fonte: Produzido pelo próprio autor com Scilab

A potência ativa P é relativa à parte da energia que pode ser consumida pela carga para a realização de trabalho ou mesmo dissipada na forma de calor cujo valor médio é (ALBUQUERQUE, 2007):

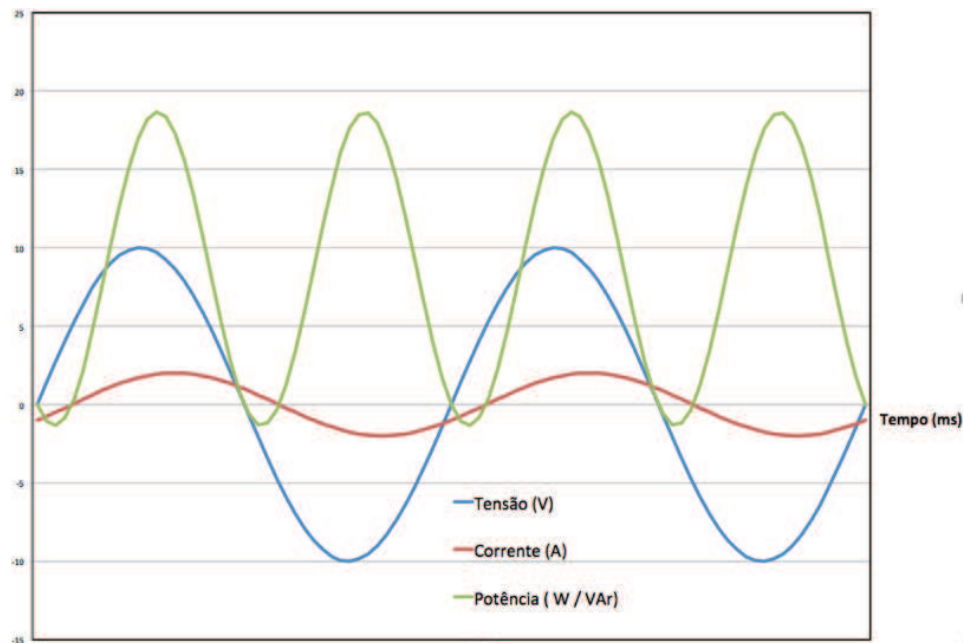
$$P(t) = V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\varphi) [W] \quad (22)$$

Para sistemas indutivos, a corrente é adiantada em relação à tensão, assim a potência resultante é dada pela equação (23),

$$P(t) = V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos\left(2\omega t - \frac{\pi}{2}\right) [\text{var}] \quad (23)$$

Esta equação (23) indica que a potência dissipada é nula, pois a potência média (graficamente representada pela soma das áreas) é zero. Entretanto, o valor instantâneo não é zero, o que indica que essa potência não é consumida, de acordo com o princípio da conservação da energia ela é devolvida ao gerador e é denominada potência reativa (TIWARI, 2014). A Figura 5 é uma representação gráfica de um circuito com carga indutiva no qual a corrente sofre atraso em relação à tensão.

Figura 5: Representação gráfica da corrente atrasada 30° em relação à tensão



Fonte: Produzido pelo próprio autor com Excel

Essa potência reativa indutiva, representada por Q pode ser calculada segundo a seguinte equação (24) (ALBUQUERQUE, 2007) :

$$Q_l = X_l \cdot I_{ef}^2 [\text{var}] \quad (24)$$

Onde (ALBUQUERQUE, 2007),

$$X_l = 2\pi f l \text{ } [\Omega] \quad (25)$$

No caso de circuitos puramente capacitivos, ocorre o inverso, a tensão sofre um atraso de 90° em relação à corrente de acordo com a equação (26),

$$P(t) = V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos\left(2\omega t + \frac{\pi}{2}\right) [\text{var}] \quad (26)$$

De modo que a potência reativa indutiva pode ser expressada pela equação

$$Q_c = X_c \cdot I_{ef}^2 \quad (27)$$

Onde X_c é a reatância indutiva, dada por (ALBUQUERQUE, 2007),

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \text{ } [\Omega] \quad (28)$$

A energia reativa oscila entre a carga e a fonte de tensão. Embora ela não realize trabalho é responsável pela geração do campo magnético nas bobinas e enrolamentos de motores, transformadores e demais dispositivos que precisam de um campo magnético para operar (TIWARI, 2014). A Potência Reativa (Q) corresponde à devolução de energia ao gerador, sendo utilizada pela impedância para armazenar energia na forma de campo magnético. Esta energia oscila entre a fonte de tensão e a carga e não realiza trabalho, sua unidade é o [var] volt ampere reativo.

A potência aparente (S) pode ser calculada pelas equações equivalentes à soma vetorial da potência ativa com a potência reativa, dada por,

$$Q = V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \sin(\varphi) [VA] \quad (29)$$

$$Q_c = (X_l - X_c.)I_{ef}^2 \text{ [VA]} \quad (30)$$

$$Q = \sqrt{(V.I)^2 - P^2} \text{ [var]} \quad (31)$$

As potências se relacionam entre si, pela equação (32) (ALBUQUERQUE, 2007).

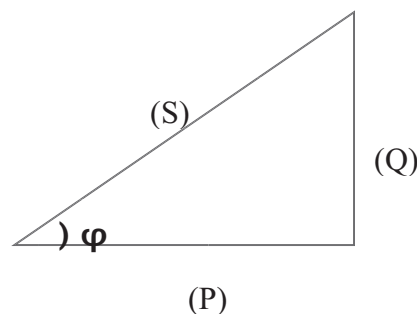
$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (32)$$

Onde se aplica o triângulo de potência, mostrado na Figura 6, para os cálculos.

A Potência Aparente (S) é calculada a partir da multiplicação do valor da corrente eficaz pelo valor da tensão eficaz existentes no sistema. A corrente é medida por um amperímetro ligado em série com o sistema e a tensão é medida por um voltímetro ligado em paralelo.

As potências somente apresentam o mesmo valor no caso de não existir a energia reativa. Caso haja energia reativa ela é equivalente à diferença entre a S e a P em números complexos. Para facilitar a visualização dos conceitos de potência, usa-se o triângulo de potências, em que existem três vetores cada um correspondente a um dos lados do triângulo, sendo a Potência Aparente (S) correspondente à hipotenusa, a potência ativa (P) correspondente à base e a potência reativa (Q) correspondente ao vetor vertical que encontra a extremidade dos outros dois.

Figura 6: Triângulo de Potência



S - Potência Aparente [W], P - potência Ativa [VA], Q - Potência Reativa [VAr]

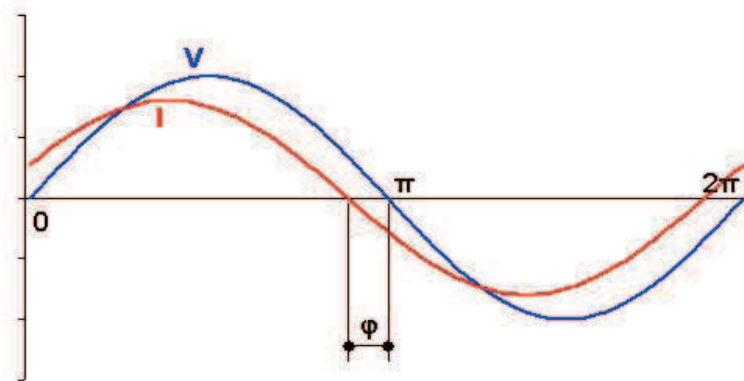
Fonte: Desenho produzido pelo próprio autor com Word

A presença de potência reativa (Q) faz com que a potência ativa (P) seja menor do que a potência aparente (S) fazendo com que o fator de potência seja menor que 1. A potência reativa aumenta a corrente que flui entre o gerador e a carga (TIWARI, 2014).

1.3 Fator de potência e sua correção

Cargas indutivas e resistivas são as comumente encontradas na maioria das instalações elétricas. As cargas indutivas são constituídas de bobinas ou enrolamentos utilizados em motores e transformadores. Em razão de sua impedância indutiva e provocam um atraso da corrente em relação à tensão, gerando um ângulo de defasagem (ϕ) (CREDER, 2008), mostrados na Figura 7

Figura 7: Representação da defasagem entre corrente e tensão



Defasagem em um sistema capacitivo corrente adiantada. 'V', em azul, indica a tensão e 'I', em vermelho, indica a corrente.

Fonte:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/66/FP_Capacitivo.jpg/256px-FP_Capacitivo.jpg - Disponível em 13 mar 2017.

As bobinas e enrolamentos elétricos criam um campo magnético capaz de armazenar energia momentaneamente de acordo com a Lei de Faraday. Como o ciclo de corrente

alternada gera uma f.e.m, ora fornece uma tensão positiva e ora a inverte passando por zero e fornece uma tensão negativa.

Os indutores se carregam e se descarregam trocando energia com o gerador, como ilustra didaticamente a Figura 8. Esta energia trocada é a energia reativa que gera uma corrente na linha e que não realiza trabalho.

Esta energia reativa, que não é passível de ser aproveitada nem consumida, se soma à corrente que realiza trabalho e então circula pelos condutores aumentando a corrente total. Como os condutores tem capacidade limitada, o trânsito desta corrente reativa utiliza, no condutor parte de sua capacidade que é limitada e que poderia estar sendo utilizada pela corrente ativa, daí o interesse em eliminar sua circulação pelos cabos de distribuição de energia. A razão entre essa energia reativa e a energia ativa constitui o fator de potência.

Figura 8: Ilustração representando a energia reativa



Fonte: <http://servicos.cosern.com.br/residencial-rural/PublishingImages/energia-reativa-01.jpg>

- Disponível em 13 mar 2017.

O fator de potência é definido como (P/S) , relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S), significa que o fator de potência sempre será um número menor ou no máximo igual a 1, já que a potência aparente (S) é sempre no mínimo igual ou maior que a

potência ativa (P). Quanto maior, ou seja, quanto mais próximo de 1 for o fator de potência, maior a eficácia da instalação. Se este fator estiver muito abaixo de 1, devemos corrigi-lo.

A correção do fator de potência em instalações elétricas se faz mediante eliminação da energia reativa da linha de transmissão. Isso é possível mediante o acoplamento de capacitores em paralelo à carga, o que confina a energia reativa entre a carga e o capacitor, impedindo que ela seja devolvida ao gerador, como ilustra didaticamente a Figura 9.

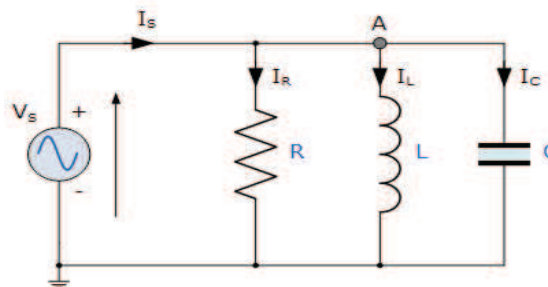
Figura 9: Correção do Fator de Potência



Fonte: http://www.reactlux.com/images/energia_reactiva_02.png - Disponível em 13 mar 2017.

Na quase totalidade dos estabelecimentos consumidores a energia reativa é oriunda de motores, reatores e transformadores, ou seja ela é indutiva. Para eliminá-la é necessário compensar esta carga indutiva com uma carga capacitiva equivalente, assim, em vez de trocar energia reativa com o gerador, a carga a troca com o capacitor. O Acoplamento de capacitores em paralelo à carga indutiva completa um circuito RLC paralelo, como na Figura 10, composto pela rede fornecedora, pelos capacitores e pelas cargas que são indutivas e ao mesmo tempo apresentam resistência.

Figura 10: Representação de um Circuito RLC

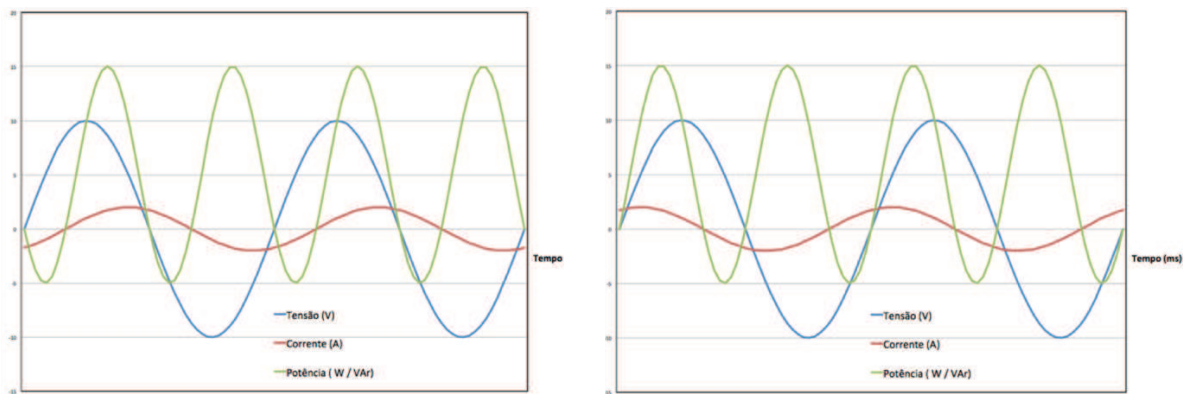


Fonte: [https://2.bp.blogspot.com/-](https://2.bp.blogspot.com/-J34IHhEKAMA/V12dWg8SIQI/AAAAAABCCE/Fs0IBksNq00R9AGsBqbJdW300CnMC_kUQCLcB/s1600/Paralelo%2BCircuito%2BRLC.jpg)

[J34IHhEKAMA/V12dWg8SIQI/AAAAAABCCE/Fs0IBksNq00R9AGsBqbJdW300CnMC_kUQCLcB/s1600/Paralelo%2BCircuito%2BRLC.jpg](https://2.bp.blogspot.com/-J34IHhEKAMA/V12dWg8SIQI/AAAAAABCCE/Fs0IBksNq00R9AGsBqbJdW300CnMC_kUQCLcB/s1600/Paralelo%2BCircuito%2BRLC.jpg) - Disponível em 13 mar 2017.

A carga capacitiva utilizada para a correção do fator de potência deve apresentar tanto quanto possível o mesmo valor da carga indutiva, pois a correção excessiva é responsável pela carga reativa capacitiva. A figura 11 mostra duas situações em que existem defasagem entre corrente e tensão, na Figura 11-a, à esquerda, a corrente está atrasada em relação à tensão, situação em que temos carga indutiva. No gráfico da direita, Figura 11-b, ocorre o inverso, a tensão está adiantada em relação à corrente e temos carga capacitiva. Em ambos os casos existe energia reativa, pode-se verificar isto no gráfico porque a linha da potência cruza o zero e apresenta valores negativos.

Figura 11: Cargas reativas indutivas e capacitivas



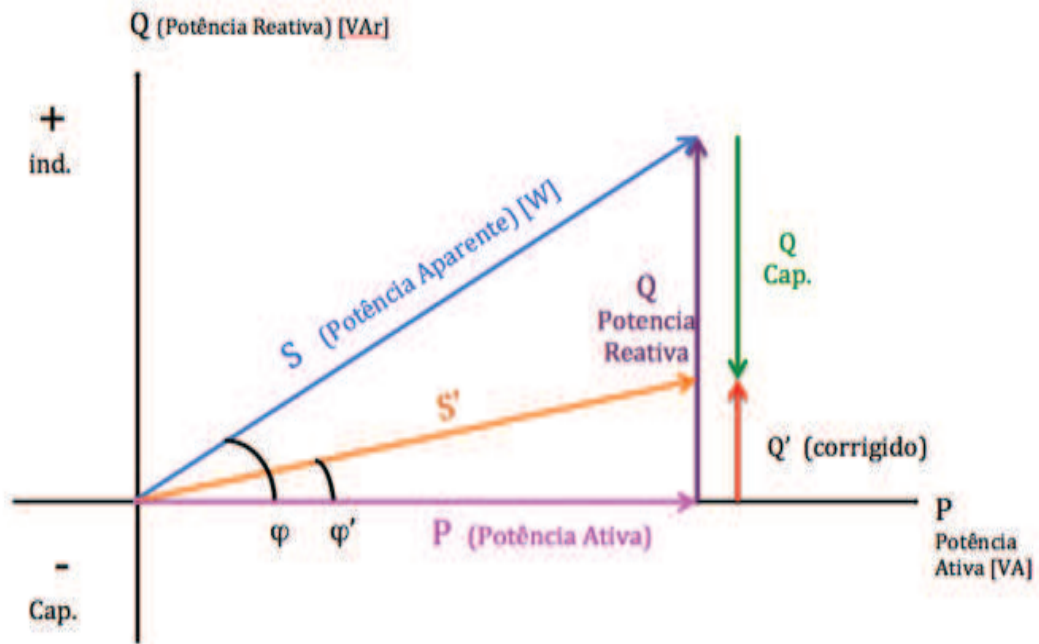
a) Cargas indutivas

b) Cargas capacitivas

Fonte: Produzido pelo próprio autor no Excel

Caso a carga capacitiva aplicada seja menor que a indutiva, a diferença de carga indutiva permanecerá na linha, isto é ilustrado vetorialmente na Figura 12.

Figura 12: Correção do Fator de Potência



Fonte: Desenho produzido pelo próprio autor com Word

O Fator de potência após correção deve ser superior a 92%, ou seja, $\cos(\varphi) > 0,92$, de modo que o ângulo φ deve ser de $23,07^\circ$ ou menor, para que $\varphi = 23,07^\circ \Rightarrow \tan(\varphi) = 0,426$

Para o cálculo das potências em cada fase deve se considerar que:

- A Potência Aparente (S) é calculada em função das variáveis I_{ef} e V_{ef} ;
- A Potência Ativa (P) é calculada em função das variáveis $I(t)$ e $V(t)$;
- A Potência Reativa (Q) é calculada em razão das variáveis P e S e é uma variável dependente.

Desse modo, passa-se a se explicitar a modelagem matemática utilizada nos algoritmos para os respectivos cálculos, segundo os modelos apresentados por (CREDER, 2008) (MARKUS, 2011), (ALBUQUERQUE, 2007) e (AUGUSTO, 2010), onde:

São as seguintes as fórmulas matemáticas empregadas nos cálculos (CREDER, 2008) (MARKUS, 2011) (ALBUQUERQUE, 2007):

A Potência Reativa é dada por

$$Q = \sqrt{(V \cdot I)^2 - P^2} \text{ [var]} \quad (33)$$

de modo que o Fator de Potência - φ_1 seja (ALBUQUERQUE, 2007),

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{Q}{P} \quad (34)$$

$$\varphi_1 = \arctg\left(\frac{Q}{P}\right) \quad (35)$$

a Velocidade Angular é dada por,

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \times 3,1416 \times 60 = 376,99 \text{ [rad/s]} \quad (36)$$

e a Capacitância necessária fica definida por,

$$C = \frac{Q-Q'}{\omega \cdot V^2} \text{ [F]} \quad (37)$$

$$C = \frac{Q-Q'}{376,99 \cdot V^2} \text{ [F]} \quad (38)$$

Ou, ainda (MARKUS, 2011) (ALBUQUERQUE, 2007),

$$C = \frac{P}{\omega \cdot V^2} \cdot [\operatorname{tg}(\varphi_1) - \operatorname{tg}(\varphi_2)] \text{ [F]} \quad (39)$$

$$C = \frac{P}{376,99 \cdot V^2} \cdot [\operatorname{tg}(\varphi_1) - 0,426] \text{ [F]} \quad (40)$$

As equações mencionadas servem para apurar valores para a correção do fator de potência, mas a correção do fator de potência pelo protótipo desenvolvido neste trabalho

segue um método que não necessita do cálculo da quantidade de energia reativa existente no sistema elétrico. Ele capta os valores, faz os cálculos e utiliza os resultados para exibição no display, mas não os utiliza para comutar capacitores. Para a correção do fator de potência o protótipo verifica reiteradamente se a rede elétrica está resistiva, capacitiva ou indutiva e liga ou desliga um capacitor a cada vez, fazendo então nova reavaliação.

A avaliação da natureza da energia reativa existente na rede é feita como descrito a seguir no capítulo 2.1 – Procedimento Experimental deste trabalho.

As características do protótipo fazem com que ele seja funcional dentro dos seguintes limites elétricos:

- Fornecimento monofásico;
- Cargas monofásicas;
- Tensão de 110 ou 220 V;
- Frequência 60 Hz;
- Corrente: de 5 A até 100 A;
- Potência total máxima da instalação 22.000 W ou 22 kW (220 V X 100 A).

1.4 Algoritmos de implementação da equações

Na rede elétrica a tensão e a corrente, apesar de teoricamente serem consideradas senoidais, podem em função de ruídos, da própria carga e de outros fatores não se apresentar perfeitamente senoidais, chegando algumas vezes a sofrer grande modificação.

Para que se possa apurar os valores eficazes dessas grandezas a eletrônica digital adota uma metodologia de cálculo que apura os valores denominados “rms” que levam a valores confiáveis.

Para apurar o valor eficaz (rms) da tensão o algoritmo toma varias medições de tensão em intervalos de tempo regulares e as utiliza como amostras. Estas amostras são tomadas ao longo de mais de um período senoidal para minimizar os erros.

O cálculo efetuado com as amostras é o descrito pela equação (41) (EDMINISTER, 1991), sendo V_i o valor de cada amostra tomada pela leitura do conversor AD do microcontrolador:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n-1} (V_i)^2}{n}} \quad (41)$$

Para o cálculo da corrente eficaz (rms) escolhe-se o cálculo dado pela equação (42), com a diferença que se opera com valores de amostras da corrente.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n-1} (I_i)^2}{n}} \quad (42)$$

O produto $V_{rms} \times I_{rms}$ resulta no valor da Potência Aparente. Para o cálculo da potência ativa considera-se a equação (43) dada por:

$$P = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} V_i \times I_i}{n} \quad (43)$$

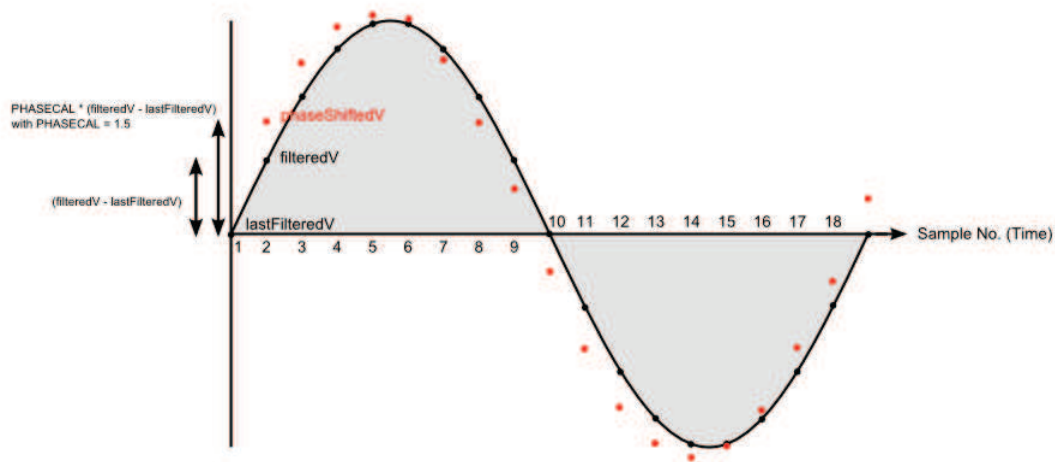
As amostras são tomadas em sequencia, primeiro toma-se a amostra de tensão e em seguida a amostra da corrente. Entre estas medidas ocorre um pequeno atraso porque o microcontrolador não faz leituras simultâneas. Este atraso da medição das correntes faz com que as curvas descritas pelas amostras estejam levemente defasadas. Para corrigir a defasagem o *software* elaborado utiliza o seguinte algoritmo (OpenEnergyMonitor):

$$\text{phaseShiftedV} = \text{lastFilteredV} + \text{PHASECAL} * (\text{filteredV} - \text{lastFilteredV})$$

PHASECAL é a variável em que se coloca o valor de calibração de fase. A atribuição do valor 1 a esta variável faz com que não haja mudança no valor da variável *filteredV* que é a variável que contém o valor da amostra já filtrado, ou seja, com o valor da tensão de *bias* descontado.

Os pontos vermelhos mostrados na Figura 13 representam amostras já corrigidas com seus valores alterados que emulam o deslocamento da senóide levemente para a esquerda o que indica a utilização de um valor entre 1 e 2 para a calibração.

Figura 13: Calibração de Fase



Os pontos pretos indicam os valores medidos, os pontos vermelhos os valores corrigidos pela calibração

Fonte: Internet – OpenEnergyMonitor

A atribuição do valor 0 a esta variável equivale a mover a onda para a direita por um período inteiro, enquanto o valor 2 move a onda aproximadamente um período para a esquerda. Os demais valores são calculados mediante aplicação das outras equações já apresentadas nesta fundamentação teórica.

1.5 Plataforma Arduino

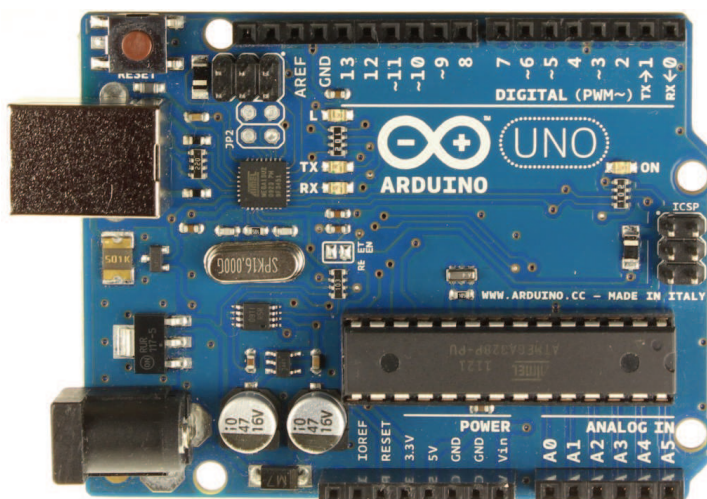
O que se chama Arduino é uma plataforma de código aberto de hardware livre, projetada em seus modelos mais fundamentais com um microcontrolador Atmel AVR de 8

bits equipado com gravador na placa (Arduíno, 2015). Este possui uma *interface* de desenvolvimento que é um *software* desenvolvido pelos criadores da plataforma para facilitar a programação do Microcontrolador, bem como *drivers*, *shields*, sensores, displays e diversos outros dispositivos. Possui uma vasta coleção de bibliotecas de código de diversos fabricantes e desenvolvedores e o material didático básico também desenvolvido pelos criadores da plataforma.

É comum chamar-se de Arduíno as placas de circuito da plataforma. Embora a plataforma seja de código aberto, o nome “Arduíno” é patenteado e só pode ser utilizado pelos desenvolvedores originais, motivo que leva os fabricantes das placas compatíveis a escolherem nomes diferentes do original. Um dos modelos da placa é mostrado na

Figura 14.

Figura 14: Arduíno modelo UNO



Fonte: Internet <<http://comphaus.com.br/home/?wpsc-product=Arduíno-uno-r3> > Disponível em 13 set. 2016

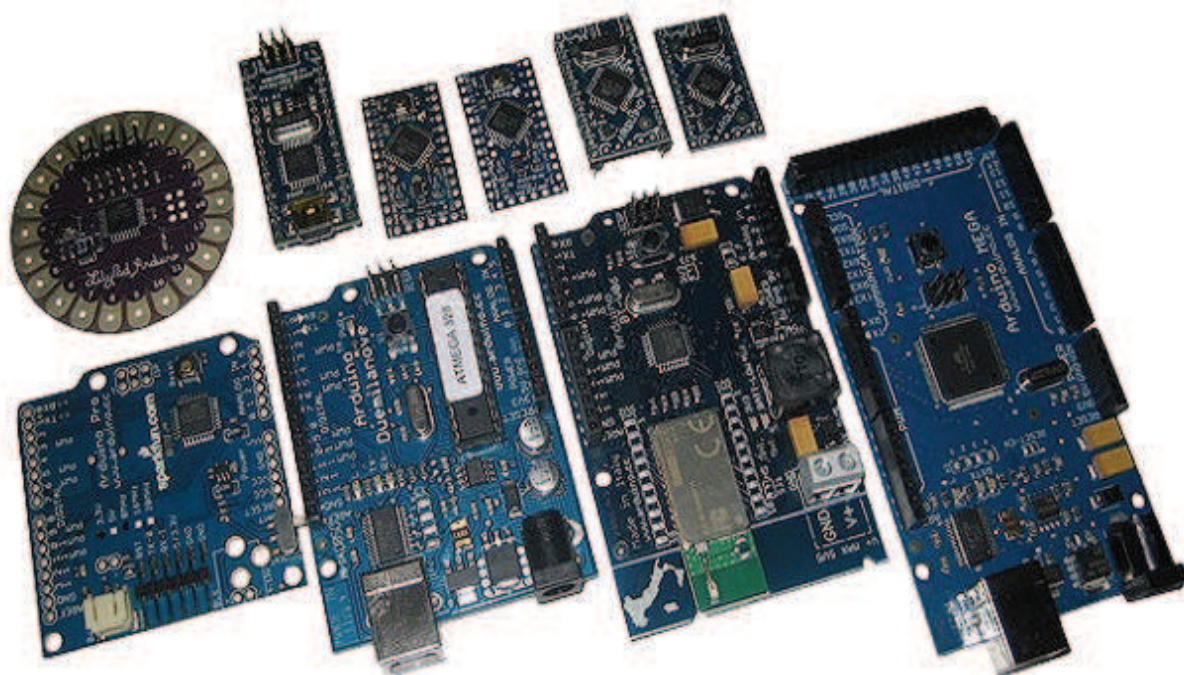
O Arduíno pode ser programado em linguagem de programação que na essência é C/C++.

Trata-se de uma plataforma de fácil aquisição. Uma consulta ao site de vendas MercadoLivre, em 28/09/2016 revela que uma placa semelhante à utilizada neste trabalho pode ser adquirida por R\$ 25,80, acrescentando-se o custo do frete.

Essa plataforma apresenta um dispositivo de programação rápida e eficiente, pois, a placa já vem com o gravador que pode ser conectado diretamente a qualquer computador que utilize sistemas operacionais Windows, Linux ou OS X, por meio de uma porta USB. O software gratuito de programação pode ser baixado do site dos desenvolvedores da plataforma: <http://www.Arduino.cc>.

Dada à sua padronização, há no mercado inúmeros circuitos eletrônicos bem como sensores, relés e uma infinidade de outros dispositivos desenvolvidos por inúmeros fabricantes que permitem conexão direta com o Arduino e seus diversos modelos conforme ilustram a Figura 15 e a Figura 16.

Figura 15: Outros modelos de Arduino

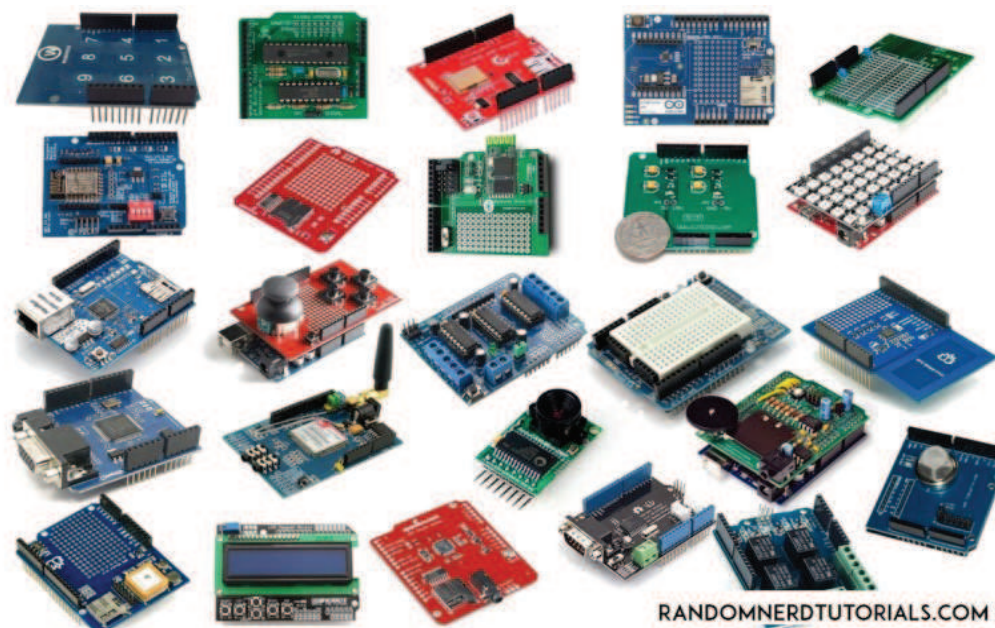


Fonte: Internet <<http://facacomArduino.info/as-principais-diferencas-entre-Arduinos.html>>

Disponível em 13 set. 2016.

A Figura 16 mostra circuitos desenvolvidos por diversos fabricantes destinados a serem conectados diretamente na placa Arduino Uno sem que precisem de nenhuma adaptação.

Figura 16: Alguns modelos de placas para conexão



Fonte: Internet <<http://www.electronics-lab.com/25-useful-Arduino-shields-that-you-might-need-to-get/>> disponível em 13 set. 2016.

Estes dispositivos mantêm compatibilidade elétrica e lógica com os controladores da plataforma e, quando necessário, os fabricantes disponibilizam os respectivos softwares, *drivers*, facilitando seu emprego e atribuindo-lhe enorme flexibilidade. Um típico Arduino é composto, pelo menos, por um microcontrolador, com “bootloader” e memória “flash” embutida, portas de entrada e saída digitais e analógicas, uma interface serial e uma porta USB.

1.6 Como o Arduino lê tensões

O Arduino, devidamente programado é capaz de apurar o valor da tensão, da corrente, das potências elétricas envolvidas e do fator de potência. Também é capaz de comandar, por meio de relés, as comutações necessárias para corrigir o fator de potência da instalação elétrica.

O método utilizado pelo microcontrolador para chegar ao valor digital a partir do valor obtido nos pinos de leitura utiliza como principal elemento um conversor digital-analógico. O

medidor de tensão interno apresenta filtros, *prescalers* e outros elementos de proteção como *whatch-dog*, mas o núcleo do medidor funciona do seguinte modo.

O medidor apresenta um oscilador astável, um cristal de relógio ou um pulsador conhecido como *clock* que opera em uma determinada frequência, uma porta lógica digital AND, um contador digital incremental, um conversor digital analógico e um amplificador operacional montado na forma de comparador de tensões.

No caso do AVR a frequência do *clock* do conversor é de 128 kHz mas este valor pode ser aumentado mediante a reprogramação do *prescaler*, com prejuízo da resolução, ou seja, aumento dos valores dos incrementos.

A tensão a ser medida é aplicada entre a porta “+”, não inversora do Amplificador Operacional e o terra do circuito. A medição começa com a aplicação de um pulso de *reset* no contador binário para que retorne a zero. O contador binário inicia a contagem. Já se sabe que o valor de cada incremento binário corresponde à resolução conversor digital-analógico e consequentemente do medidor, no caso do AVR 0,0048 V a cada unidade do contador. O contador começa a contagem e a cada incremento coloca no conversor digital-analógico o valor correspondente, assim o conversor analógico coloca em sua porta de saída o valor correspondente à contagem atual e a vai incrementando a tensão de saída de 0,0048 V a cada contagem aumentando-a em pequenos degraus. A porta de saída deste conversor digital está ligada na porta inversora do amplificador operacional que compara então a tensão a ser medida com a tensão do conversor DA. Quando o valor do conversor DA iguala ou supera o valor da tensão medida, a saída do amplificador operacional vai para nível lógico baixo.

Como a saída do Amplificador operacional está ligada na porta AND, juntamente com o pulso de clock, o sinal de clock que antes passava pela porta AND deixa de passar porque uma de suas portas é negativa. Interrompe-se portanto a contagem e o valor então lido no contador corresponde à tensão medida.

Este processo demora um tempo, no caso do AVR, 0,0001 s, porém após terminada a leitura o microcontrolador precisa de igual tempo para descarga de um capacitor que tem ligado em série com o conversor, assim o tempo de leitura é de 0,0002 s ou 1/5000 s. Ocorre que AVR possui somente um conversor analógico para medição da tensão em suas portas analógicas. Como utilizamos duas portas analógicas, uma para o sensor de tensão e outra para o sensor de corrente, a maior velocidade de medição do AVR não supera 1/2500 s.

A velocidade de leitura do AVR, no entanto sofre muita redução porque o processador além de proceder à medição tem que armazenar os valores em variáveis e obedecer a outros comandos do ciclo dentro do qual estão os comandos associados à medição. Na prática, se constatou que com a configuração original padrão logra-se obter 32 pares (tensão e corrente) de medidas por segundo, o que é suficiente para o funcionamento do protótipo mas implica na restrição dos algoritmos que podem ser utilizados para a correção do fator de potência.

2 METODOLOGIA

Este trabalho tem como base o método experimental quantitativo, fundamentado na teoria básica da eletricidade, nos conceitos de tensão elétrica, corrente elétrica e na teoria dos circuitos elétricos.

Foram feitas pesquisas bibliográficas de trabalhos mais recentes sob uma área já bastante consolidada, pesquisas e técnicas para correções de fator de potência em rede de distribuição de energia elétrica e aplicações destinadas a serem instaladas para cargas pontuais de baixa tensão. Após foram definidos os parâmetros elétricos do projeto.

Pesquisou-se sobre sensores de corrente e de tensão que poderiam ser utilizados no projeto. Com o conhecimento adquirido foi projetado um circuito analógico já levando em consideração os sensores escolhidos e o Arduino. Os componentes foram adquiridos no mercado e se procedeu à montagem do protótipo.

Para o desenvolvimento do protótipo aplicou-se conceitos de eletrônica analógica e de eletrônica digital, sobretudo conceitos de processamento de sinais, quantização, discretização, filtragem e conversão de sinais analógico-digitais e foram aplicados conhecimentos de programação em linguagem C/C++ para desenvolvimento do software de controle.

A aplicação dos modelos matemáticos destas teorias possibilitou projetar um circuito analógico para reduzir e tratar a tensão de rede para torná-la compatível com as condições de operação do Arduino e desse modo servir de interface entre o Arduino e a rede elétrica.

A partir dos modelos matemáticos se criou algoritmos para fazer a leitura dos sinais analógicos, convertê-los para valores digitalizados, filtrá-los e com estes valores calcular a potência reativa, o fator de potência e demais grandezas envolvidas.

Devido às características dos bancos de capacitores, o controle acontece em passos discretos, acrescentando capacitores à linha ou removendo capacitores da linha como resultado da ação de controle (BISANOVIC, 2014).

Foram enfrentadas algumas dificuldades no desenvolvimento do algoritmo no tocante à detecção da orientação vetorial da potência reativa. Foram implementados diferentes algoritmos que operam de modos diversos e que não apresentaram bons resultados porque o Arduino não se comportou da maneira esperada em razão de limitações da capacidade de leitura no tocante à exatidão e à velocidade de aquisição de dados.

Desenvolveu-se então a metodologia que foi utilizada com bons resultados.

2.1 Procedimento Experimental

2.1.1 Montagem do protótipo

Um protótipo foi montado com um circuito analógico manufaturado pelo autor, conectado a uma placa Arduino conectada pelas suas portas digitais a 8 relés com circuitos próprios de acoplamento óptico e de potência, e alimentada por uma fonte de alimentação. Foram utilizados os seguintes materiais para na confecção do protótipo:

- 1 Sensor de corrente 100 A – modelo SCT 013;
- 2 módulos de relés de 4 canais – Shield para Arduino UNO;
- 1 display OLED I2C - SeeedStudio;
- 1 fonte alimentação chaveada 9 V x 2 A;
- Protoshield, para Arduino Uno, para montagem dos circuitos;

Para o sensor de corrente foram utilizados os seguintes materiais:

- 1 resistor de 33 ohm x 1/8 w;
- 2 resistores de 10 K x 1/8 w;
- 1 capacitor de 10uF x 25 v;
- 1 amplificador operacional LM-741 para circuito de *voltage bias*;

Para o sensor de tensão foram utilizados os seguintes materiais:

- 1 transformador de 127/220 V para 4,5 V + 4,5 V x 200 mA para medições;
- 1 resistor de 100K x 1/8 w;
- 1 resistor de 10K x 1/8 w;
- 2 resistores de 470K x 1/8 w;

- 1 capacitor de 10 uF x 25 v;
- 1 capacitor de 100 nF x 25 v para desacoplamento;

Os seguinte materiais diversos foram também utilizados:

- kit conectores empilháveis para *ProtoShield* Arduino;
- fios flexíveis para conexões entre módulos;
- 1 conector KK de 2 vias para interligação com transformador;
- 1 alojamento KK de 2 vias para interligação com transformador;
- 1 conector KK de 3 vias para interligação com sensor de corrente;
- 1 alojamento KK de 3 vias para interligação com sensor de corrente;
- 1 alojamento para a conexão do cabo do Display;
- 2 conectores KK de 6 vias para interligação com as placas dos reles;
- 11 terminais metálicos para conectores KK;
- Rabicho com plugue para conexão AC;
- 1 extensão composta de par de fios separados de 1 m com um plug em uma extremidade e uma tomada na outra;
- 18 conjuntos de parafusos, porcas e distanciadores para a fixação das placas em uma base de material isolante;
- 1 base de material isolante para fixação das placas de circuito e transformador;

Adquiriu-se um Arduino modelo UNO ilustrado na Figura 17, que é a peça principal à qual as demais são conectadas.

Figura 17: Fotografia do Arduino utilizado



Fonte: Fotografia produzida pelo próprio Autor

Para que o Arduino possa fazer a leitura da tensão e da corrente é necessária a implementação de um circuito analógico que trate o sinal da rede. A metodologia analógica de tratamento do sinal escolhida inclui a mesma metodologia utilizada pelo Open Energy Monitor. Este é um projeto de código aberto para monitoramento de consumo de energia elétrica. Neste circuito foram incluídos, para este trabalho, outros elementos necessários para a correção do fator de potência.

Inicialmente foi necessário reduzir a tensão de 220 V, que tem como valor de pico próximo de 311,13 V, para um valor menor calculado a seguir. Para esta redução inicial foi utilizado um transformador, Figura 18, que reduz a tensão coletada na rede para 9 V rms, o que resulta em uma tensão de pico de 12,73 V ou 25,45 V pico a pico.

Esta tensão é submetida a um capacitor de desacoplamento de 100 nF para filtrar o sinal, eliminando assim ruídos de alta frequência e então a tensão é entregue ao divisor de tensão que a reduz à razão de $10/(10+110)$ resultando em uma tensão de 1,15 V ou 2,31 V pico a pico.

O Arduino UNO é projetado com entradas de 0 V até 5 V positivos em suas portas analógicas, em razão desta especificidade aplica-se então uma tensão de bias de +2,5 V que se soma à tensão de saída do divisor de tensão e provoca o deslocamento da senóide para cima eliminando os valores negativos.

Aplicando a tensão de bias de 2,5 V a tensão do pico positivo atinge $2,5\text{ V} + 1,15\text{ V} = 3,65\text{ V}$ e a do pico negativo $2,5\text{ V} - 1,15\text{ V} = 1,35\text{ V}$.

Desse modo a tensão de entrada na porta de leitura do Arduino oscila entre 1,35 V e 3,65 V, então estes valores permitem uma margem de segurança para o caso da tensão na rede subir além de 220V.

A tensão de bias é obtida com a utilização de um divisor de tensão composto por dois resistores iguais, ele utiliza a tensão de referência do Arduino, estabilizada por um regulador de tensão de 5 V. Há também um capacitor de 10 uF para filtrar possíveis ruídos e oscilações.

Figura 18: Fotografia do transformador (sensor de tensão) utilizado

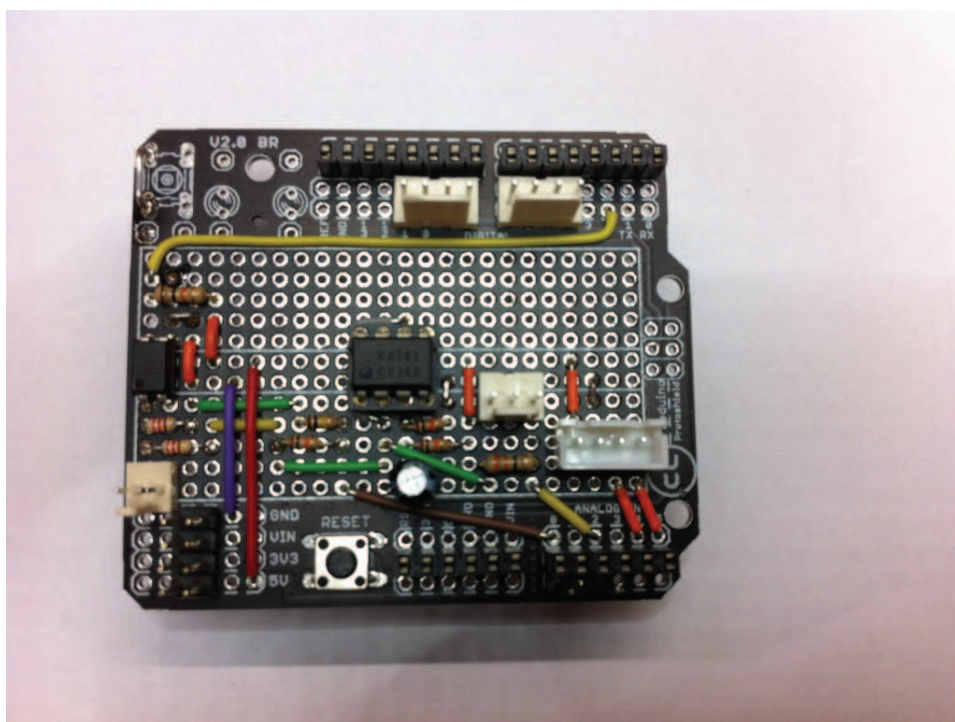


Fonte: Fotografia produzida pelo próprio Autor

É importante que as medidas feitas não interfiram nas grandezas que estão sendo medidas. Uma baixa resistência/impedância de um medidor dissipa potência e provoca uma queda de tensão. Um Amplificador Operacional foi instalado com a finalidade de aumentar a impedância do circuito. Teoricamente os Amplificadores Operacionais possuem impedância infinita (ROBREDO, 2001).

A Figura 19 mostra o circuito analógico montado em uma *protoshield*. A *protoshield* é uma placa de circuito impresso com orifícios para a soldagem de componentes. Os orifícios são pré-conectados em cada uma das linhas como em uma *protoboard* e prevê furação para soldagem de pinos nas posições exatas para encaixe sobre o Arduino. Esta *protoshield* já traz um botão de *reset* do Arduino. Os demais componentes, pinos e alojamentos para a conexão de cabos foram soldados durante a elaboração do trabalho.

Figura 19: Fotografia do circuito analógico



Fonte: Fotografia produzida pelo próprio Autor

O circuito analógico capta a corrente da rede por meio de um sensor não invasivo SCT013-000 com capacidade de leitura de até 100 A, mostrado na Figura 20.

Figura 20: Fotografia do sensor de corrente



Fonte: Fotografia obtida no site do fabricante

Trata-se de um transformador de corrente (TC) . O Sensor é colocado no cabo da rede elétrica submetida à medição. A passagem de corrente no cabo cria um campo magnético que induz na bobina do TC uma corrente. O cabo da rede funciona como um enrolamento primário de um transformador e a bobina do sensor como o secundário. Não há contato elétrico entre o sensor e a rede. O campo elétrico, que envolve cada um dos cabos da rede, varia proporcionalmente à corrente. O sensor apresenta um núcleo de ferrite que faz o acoplamento eletromagnético entre a bobina do TC e o cabo.

A corrente alternada no primário gera uma corrente no secundário, que é ligado em série a um resistor denominado *burden* ou resistor de carga. A corrente gerada no secundário ao atravessar o resistor de carga gera uma tensão elétrica. Esta tensão elétrica oscila entre valores negativos e positivos. Aplica-se a mesma tensão de bias de 2,5 volts aplicada ao sensor de tensão para que os valores sejam somente positivos.

Neste caso não é necessária a utilização de um divisor de tensão porque o resistor de carga já é calculado para gerar um nível de tensão adequado para ser entregue na porta de leitura do Arduino.

A operação do sensor, segundo o *datasheet* do fabricante, apresenta uma não linearidade de $\pm 3\%$, que neste caso é considerado praticamente linear. Quando submetido à tensão máxima de 100 A o sensor gera no secundário uma corrente de 50mA rms, 0,05 A rms que gera uma tensão de pico de 0,07 A ou 14,14 A pico a pico, que aplicada no resistor de carga de 33Ω gera uma tensão de 4.6669V pico a pico.

A metade desta tensão 2,33 V somada aos +2,5 V de bias gera uma tensão de pico máxima de 4,83 V. No pico mínimo temos +2,5 V -2,33 V ou seja 0,17 V. A tensão entregue na porta analógica do Arduíno para leitura varia então de + 0,17 V até 4,83 V. O quadro 2 apresenta os valores teóricos extremos e centrais que devem ser encontrados no secundário do transformador (sensor de tensão), no divisor de tensão antes da aplicação da tensão de bias, no pino de entrada do arduíno e por fim o valor digital após a leitura para uma tensão de rede de 220V.

Quadro 2: Sensoriamento de Tensão - Tensões em volts (valores de pico)

Na rede (V)	Transformador (V)	Divisor (V)	No pino (V)	Valor Digital
			5,00	1023
311,13	12,73	2,31	4,81	981
0	0	0	2,5	512
-311,13	-12,73	-2,31	0,19	39
			0	0

Fonte: O autor

O quadro 3 apresenta os valores teóricos extremos e centrais de corrente para 100 A na rede, o valor de pico no secundário do sensor, o valor de tensão no resistor de carga, no pino de leitura e o valor digital após a leitura.

Quadro 3: Sensoriamento de Corrente (valores de pico)

Na rede	No secundário	No <i>burden</i> (V)	No pino (V)	Digital
			5,00	1023
100 A	70,7 mA	2,33	4,83	981
0 A	0	0	2,5	512
-100 A	-70,7 mA	-2,33	0,17	39
			0	0

Fonte: O autor

O circuito analógico dispõe ainda de um Optoacoplador, ver Figura 21, que funciona como um sensor de zero volt, denominado zerocross. É um acoplador óptico ligado, por meio de resistores de polarização diretamente ao sensor de tensão. Este elemento é ligado a uma porta digital do Arduíno e indica ao microcontrolador quando a senóide da rede muda de sinal ao passar por zero volt.

Quando a tensão da rede assume valores positivos, no semiciclo positivo da senóide, o sensor de zero fica em nível baixo, ou seja o sinal no pino do Arduíno é zero. Quando a tensão assume valores negativos o sensor de zero comuta para nível alto e o sinal no pino do Arduíno fica em 1. Este sensor é ligado ao transformador e não está submetido à tensão de bias.

Figura 21: Acoplador Óptico

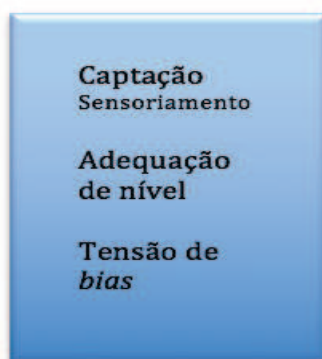


Fonte: Folha de Dados do Fabricante – Sharp Corporation

A Figura 22 mostra de modo resumido as etapas do circuito analógico que constitui o bloco de aquisição de dados.

Figura 22: Etapas do Bloco de Aquisição de dados

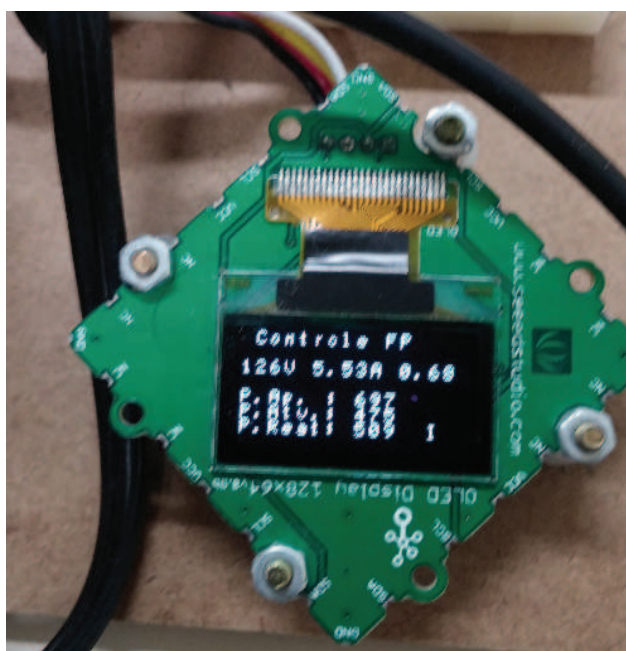
**Bloco de Aquisição
(analógico)**



Fonte: – imagem produzida pelo próprio autor com Word

O Arduíno recebe os dados, os processa e a partir dos resultados apresenta valores no display e comanda o banco de capacitores. A função do display, ver Figura 23, é apresentar o valor da tensão, da corrente, das potências ativa, reativa e aparente e também do fator de potência. Ele permite uma rápida verificação da condição de operação do protótipo, mas não é necessário para o seu funcionamento.

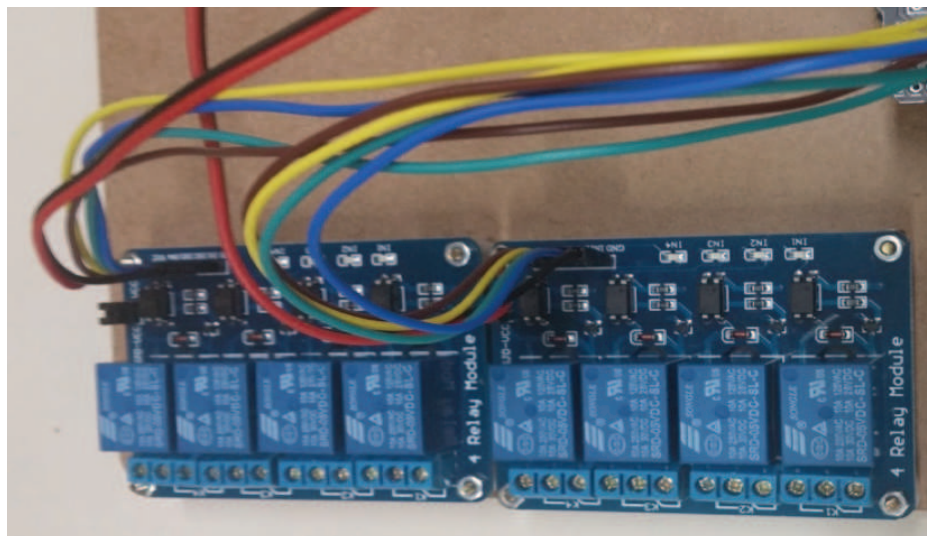
Figura 23: Fotografia do Display



Fonte: Fotografia produzida pelo próprio autor

O protótipo, possui um conjunto de 8 relés para controle do banco de capacitores, os relés destinam-se a acionar os contadores do banco. O Arduíno não suporta corrente maior que 40 mA, corrente que é insuficiente para acionar contadores. Os relés utilizados, ver figura Figura 24, vêm montados em placas de circuito impresso que possuem também transístores para amplificar a corrente fornecida pelas portas de controle do Arduíno a um nível suficiente para a comutação dos relés. As placas possuem também optoacopladores destinados a promover o desacoplamento elétrico do sistema lógico, desacoplando às portas lógicas do microcontrolador dos demais componentes das placas de relés que estão conectados a um sistema de potência que os alimenta. As placas possuem indicadores luminosos do acionamento de cada um dos relés.

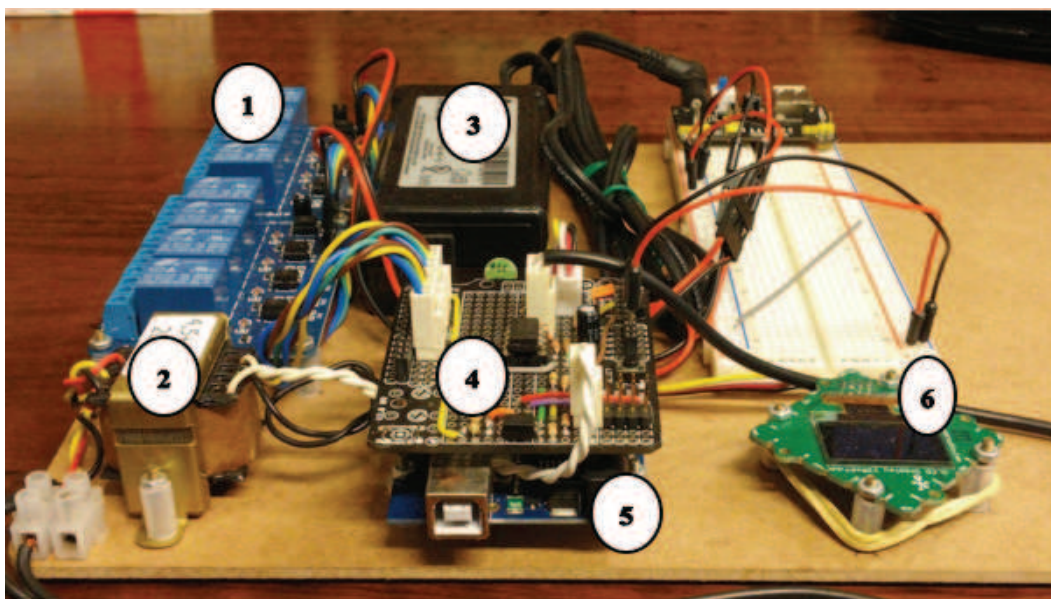
Figura 24: Fotografia dos conjuntos de relés



Fonte: Fotografia produzida pelo próprio autor

A Figura 25, a Figura 27 e a Figura 28 são fotografias do protótipo montado, o circuito analógico Figura 26 é montado na placa *protoshield* que está encaixada sobre o Arduino. O encaixe é feito pelos próprios pinos de conexão elétrica entre as placas. Os demais componentes são conectados por cabos com conectores nas extremidades. A peça de cor preta na Figura 25 é a fonte de alimentação. A *protoboard* ao lado foi utilizada na fase de desenvolvimento.

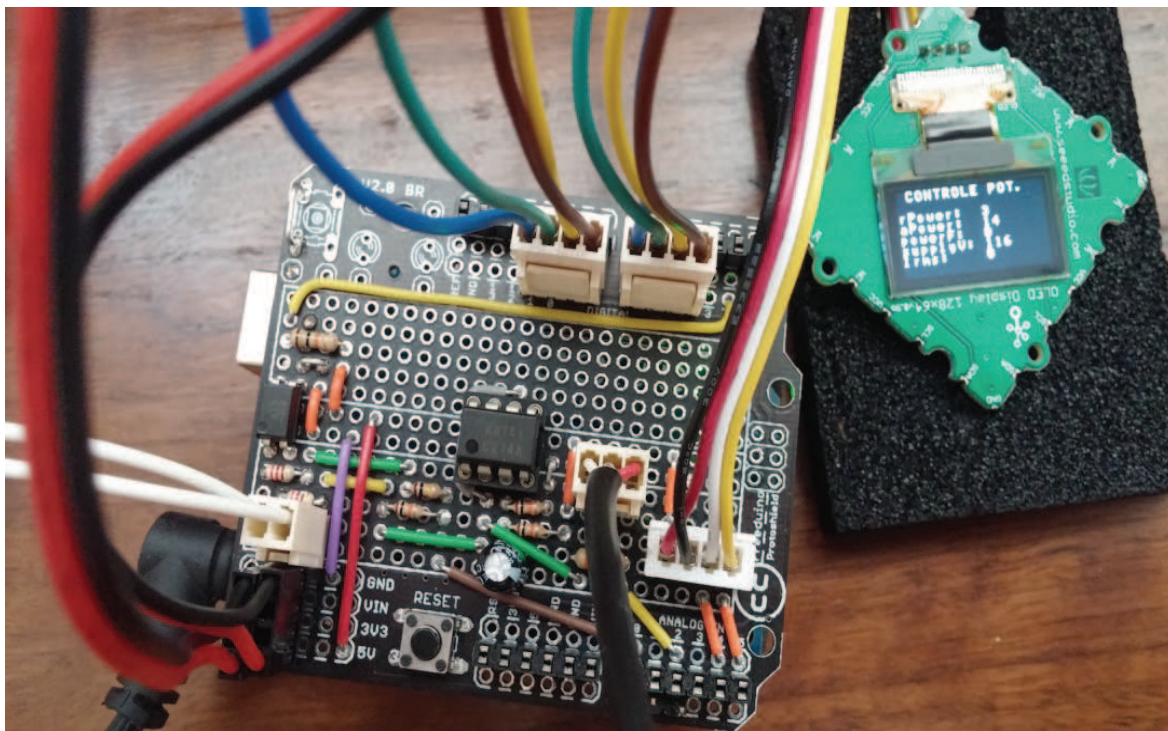
Figura 25: Fotografia do Protótipo



1- relés, 2 - sensor de tensão, 3 - fonte, 4 - circuito analógico, 5 - Arduino e 6 - display

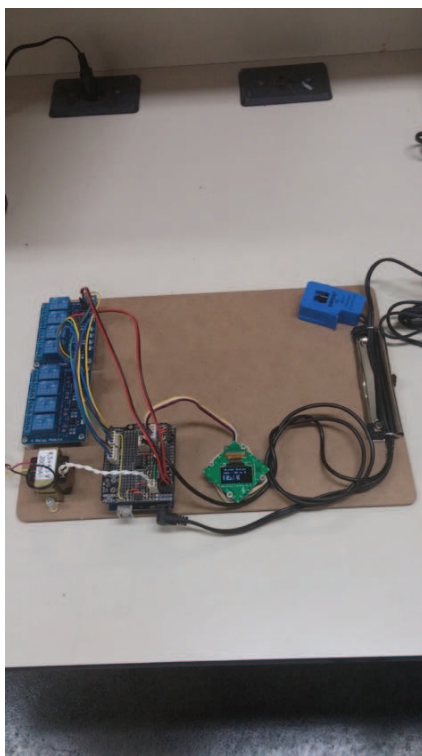
Fonte: Fotografia produzida pelo próprio autor

Figura 26: Fotografia do Circuito Analógico e Display



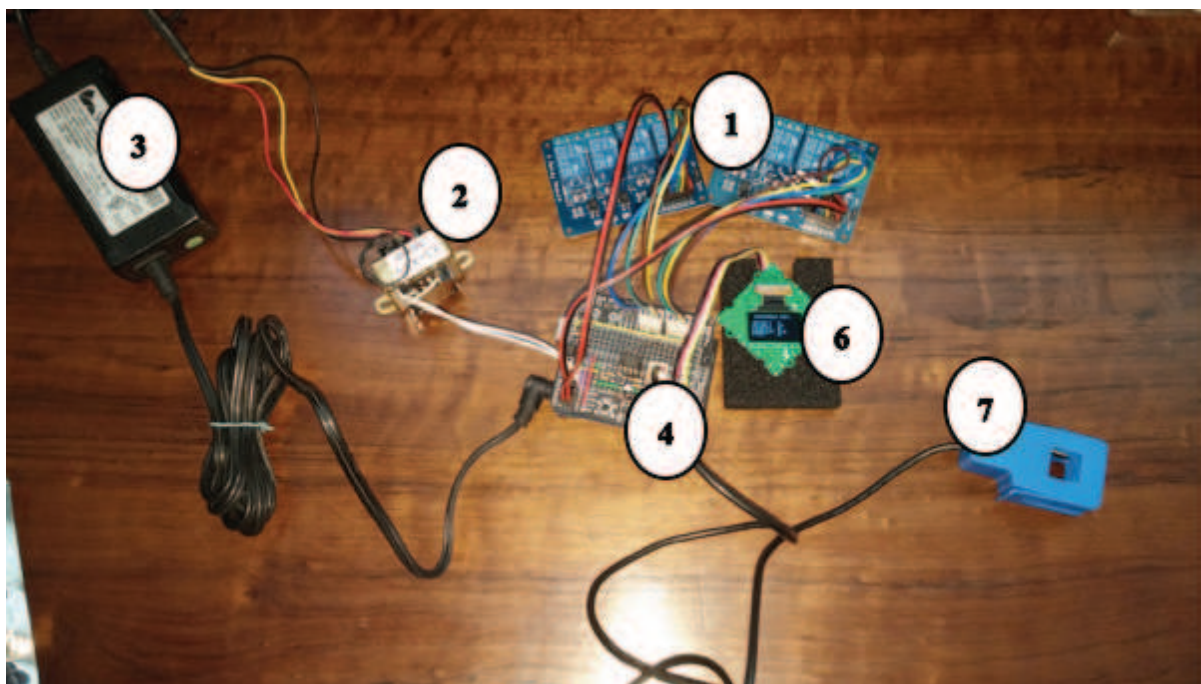
Fonte: Imagem produzida pelo próprio autor

Figura 27: Fotografia do Arranjo Experimental sem a fonte de alimentação



Fonte: Imagem produzida pelo próprio autor

Figura 28: Fotografia do Arranjo em desenvolvimento



1-relés, 2-sensor de tensão, 3-fonte, 4-circuito analógico, 6–display, 7-sensor de corrente

Fonte: Imagem produzida pelo próprio autor

Figura 29: Fotografia do Arduino utilizado



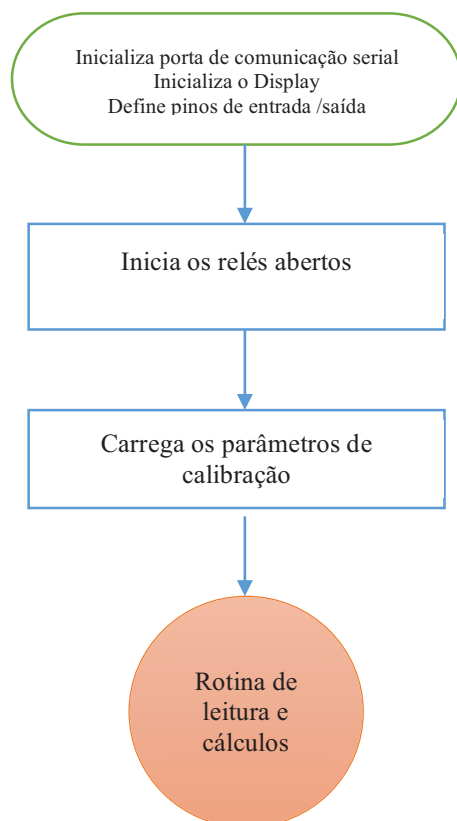
Fonte: fotografia produzida pelo próprio autor

2.2 Software de Controle

O software desenvolvido segue a rotina apresentada nos fluxogramas seguintes e utiliza os valores digitalizados a partir dos sinais entregues nas portas analógicas e digitais do microcontrolador.

O fluxograma a seguir mostra visualmente o funcionamento do programa de controle carregado no protótipo:

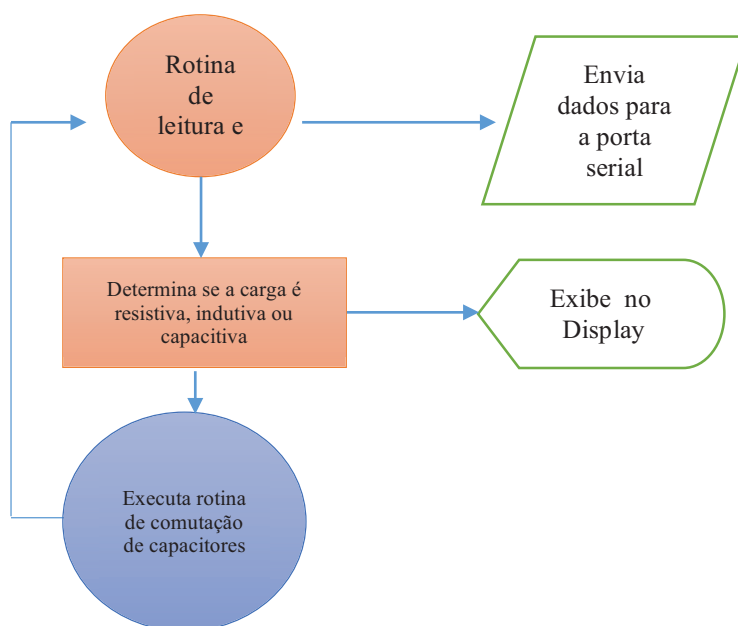
Figura 30: Fluxograma – parte 1



Antes de iniciar a rotina de leitura dos valores de tensão e corrente da rede elétrica o programa inicializa a porta de comunicação serial para que o Arduino possa transmitir dados para o computador por meio da porta USB, permitindo um melhor acompanhamento do seu funcionamento.

Após o Setup inicia-se a rotina de leitura dos valores da rede e se determina a natureza da carga existente na linha. Em seguida procede-se ao acoplamento ou desacoplamento de capacitores.

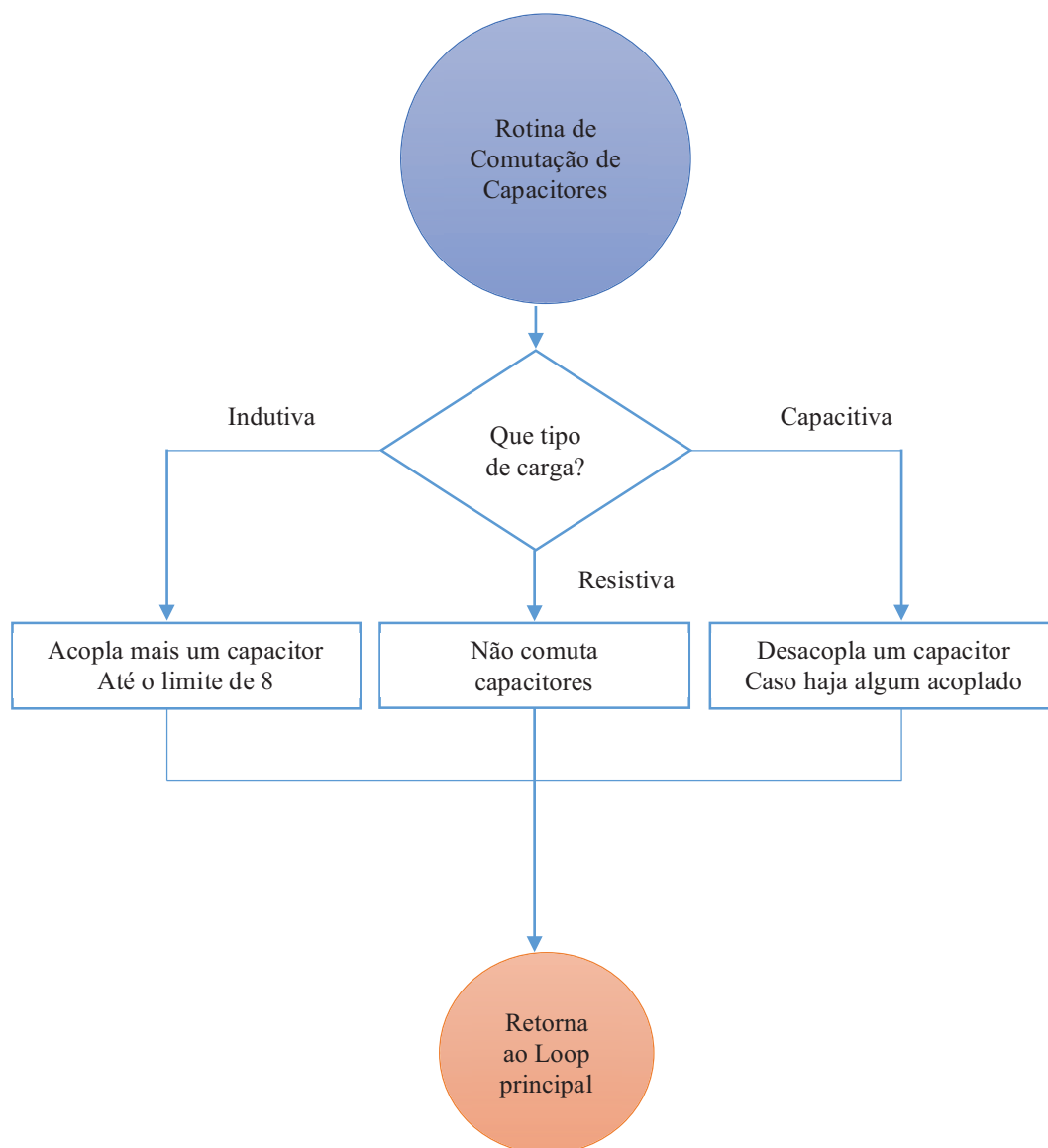
Figura 31: Fluxograma – parte 2



Os capacitores são acoplados ou desacoplados conforme a natureza da carga encontrada na rede. Sendo a carga indutiva o protótipo acopla um capacitor à rede e faz nova medição. Caso a carga continue indutiva ele adiciona mais um capacitor e repete o processo até que a carga se torne resistiva ou até que todos os capacitores existentes tenham sido acoplados.

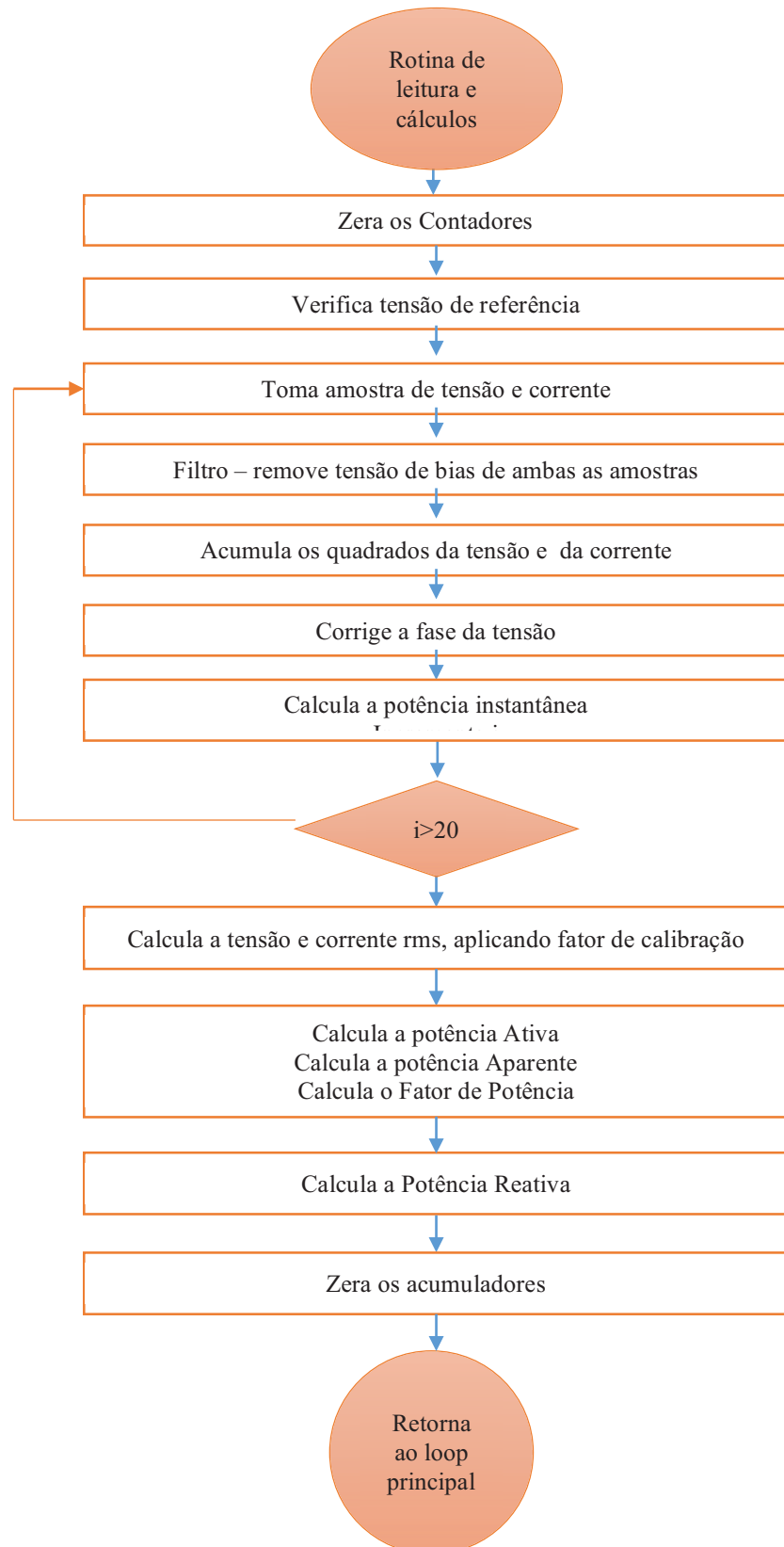
Encontrando carga resistiva o protótipo não adiciona nem desliga capacitores, apenas reinicia o ciclo de verificação. Encontrando carga capacitiva, um capacitor é desligado e uma nova verificação é realizada. Caso a carga continue capacitiva, mais um outro capacitor é desligado e assim sucessivamente até que a carga se torne resistiva ou que todos os capacitores tenham sido desligados.

Figura 32: Fluxograma - parte 3



O trecho da rotina a seguir demonstra a sequência em que os cálculos são elaborados.

Figura 33: Fluxograma - parte 4



O circuito analógico entrega, para o microcontrolador, tensões reduzidas e condicionadas que representam os valores e as fases da tensão e da corrente existentes na rede. O microcontrolador opera digitalmente e faz leituras discretas dos valores que lhe são entregues ininterruptamente. O processo de leitura consiste em ativar um conversor analógico-digital interno que converte o valor da tensão existente no pino em um número digital entre 0 e 1023 proporcional a tensão de entrada de 0 a 5 V.

O Software opera com valores digitais já convertidos para esta escala. Entre 0 e 1023 há 1024 divisões, dividindo 5 volts por 1024 temos que cada divisão corresponde a um incremento de 0,0049 V. Ao fazer uma leitura de 5 V em seu pino, o conversor A/D irá convertê-lo para o número 1023 digital. No modo digital, o número 1023 corresponde a 5 V, o número 512 corresponde a 2,5 V de entrada e o número zero corresponde a 0V em relação à leitura nos pinos.

Os quadros 2 e 3 apresentam alguns dos valores das correntes e tensões que se apresentam em alguns pontos do circuito. Foram tomados apenas alguns valores para ilustração, porém a interpolação linear de outros valores é válida dada à linearidade do circuito dentro dos parâmetros de operação normal.

O método de aquisição de dados utiliza a técnica da discretização e da quantização para obtenção dos valores. São realizadas várias leituras instantâneas sucessivas da tensão e da corrente da rede. Os valores instantâneos são utilizados pelo algoritmo para cálculo da tensão e da corrente eficaz e ainda da potência aparente e da potência ativa. A partir destas potências se calcula a potência reativa e então o fator de potência.

Para os cálculos mencionados, são tomadas amostras da tensão e da corrente instantâneas, primeiro a tensão e depois a corrente. Este modelo de Arduíno não faz duas leituras simultâneas, pois só dispõe de um conversor AD, então as faz sucessivamente, o que gera um pequeno atraso e, conseqüentemente, uma defasagem de leitura que é tratada digitalmente para a devida compensação pelo algoritmo de correção de fase.

A tensão disponível na rede é senoidal e apresenta valores positivos e negativos. A redução desta tensão por meio de um transformador e de um divisor de tensão produz uma senóide de menor amplitude e de mesma frequência. Os limites dessa senóide de menor amplitude são proporcionais à variação da tensão da rede e como o fator de divisão é conhecido, ela é representativa da tensão da instalação. Essa tensão menor, entretanto, fiel à original, continua oscilando entre valores negativos e positivos.

Porque o Arduíno só faz leituras de valores positivos aplica-se a tensão de *bias*, que desloca a senóide para cima, mantendo íntegra a sua forma e eliminando os valores negativos.

A apuração das potências é feita a partir de diversos valores discretos oriundos de uma onda contínua pelo método estatístico da raiz do valor quadrático médio ou RMS, do inglês *root mean square* que resulta no valor eficaz.

Este método de cálculo impede que o resultado apresente valores negativos, o que implica que os resultados das potências calculadas sejam sempre positivos. Dado que as potências são grandezas fasoriais, os sinais são sua indicação de sentido. A potência reativa de sinal positivo indica uma potência reativa indutiva e o sinal negativo indica potência reativa capacitiva.

O protótipo, ao detectar na rede uma carga reativa precisa saber se ela é indutiva para adicionar capacitores ou se é capacitiva, oriunda dos capacitores já adicionados, para desligá-los.

Há um algoritmo no software desenvolvido para a detecção do sinal, ou da natureza, da potência reativa que opera pela verificação da posição da onda da corrente em relação à onda da tensão, ou seja, ele verifica se a corrente está atrasada ou adiantada em relação à tensão.

Foram desenvolvidos e testados algoritmos diferentes para verificação desta defasagem, sendo que apenas um apresentou bons resultados com a configuração de *hardware* escolhida.

O método que deu bons resultados utiliza o sensor de zero, *Zero-Crossing Detector*, ZCD, que é um sensor conectado ao secundário do transformador do circuito antes do divisor de tensão. Essa conexão permite que o sensor ZCD monitore com maior precisão o momento em que a tensão muda de sinal. A saída do sensor é conectada a uma entrada digital do microcontrolador.

O sensor comuta muito próximo de zero volt. O sensor é um Acoplador Óptico, uma chave eletrônica que é acionada por meio de uma pequena corrente e consiste basicamente em de um diodo emissor de luz – LED, do inglês *Light Emitter Diode*, um transistor sensível à luz dentro de um invólucro de encapsulamento mostrado na Figura 21.

No circuito de entrada o optoacoplador é ligado à rede em série com dois resistores, um em cada polo. Quando a tensão é aplicada ao diodo, em série com os resistores, uma

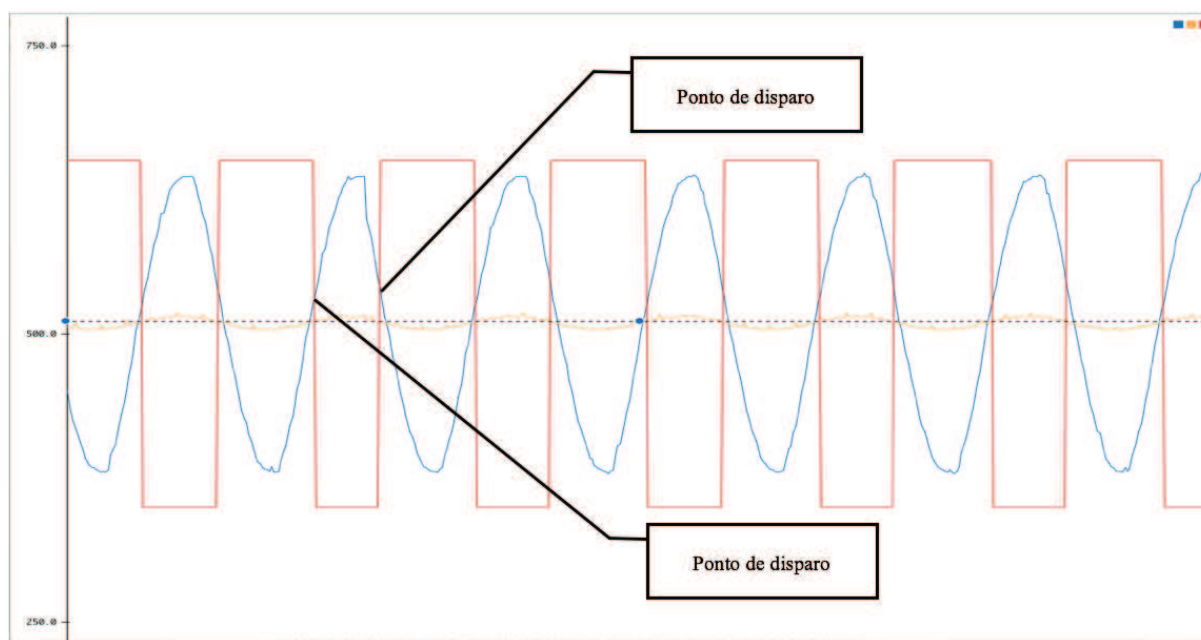
pequena corrente o atravessa e ele emite luz que atinge o transistor que passa a conduzir, interligando o terra do circuito com a porta do Arduino, levando-a para sinal baixo. Quando o sentido da corrente se inverte, o LED não conduz, não emite luz e o transistor também não conduz. A porta do Arduino, configurada com um resistor interno de *pull-up* vai para sinal alto.

Este circuito opera com muita rapidez, mas não exatamente no momento em que a tensão é zero porque para conduzir o diodo precisa de uma corrente mínima que só obtida quando há uma pequena tensão de gatilho denominada *threshol*d. Na descida da senóide, ocorre o mesmo, o sensor de zero comuta pouco antes de atingir o zero uando a tensão cai abaixo do mínimo necessário para produzir a corrente em intensidade suficiente para que o diodo pare de emitir, conforme *datasheet* do fabricante (SHARP, 2003).

O fenômeno não é prejudicial para a detecção pretendida porque o mesmo atraso que existe na borda de subida do semiciclo existe também ao final e um compensa o outro em relação ao método escolhido. As linhas verticais do sinal de zero exibidas na

Figura 34 representam o momento de disparo do sensor.

Figura 34: Sinal do Sensor de Zero



A linha azul indica a tensão, a linha laranja a corrente, a linha vermelha o sinal (ampliado) do sensor, a linha tracejada indica o zero. Os valores são leituras do AVR comunicados pela porta serial.

Fonte : Recorte de tela do software de plotagem do Arduino capturado pelo próprio autor.

Tem-se na rede a senóide da tensão e a senóide da corrente. O sensor de zero é sensível à variação de tensão da rede. Para monitoramento da corrente utiliza-se a informação do sensor de corrente conectado a um dos pinos de entrada analógica do processador. Para esta rotina não é utilizada a informação do sensor de tensão aplicada ao pino analógico do Arduino. Toma-se somente os valores digitais fornecidos pelo ZCD para demarcação do tempo em que a senóide, na rede, é positiva, desprezando-se o restante do tempo.

Quando o sensor de zero está em sinal baixo, a tensão na rede está em seu semiciclo positivo e se representada no plano cartesiano descreve uma parte da senóide com concavidade para baixo que demarca uma área entre ela e o eixo das abscissas. O mesmo ocorre com a curva que representa a variação da corrente e que descreve uma área entre a própria curva da corrente e o eixo das abscissas que indica o zero.

Ocorre que quando a carga é resistiva a senóide da corrente fica perfeitamente sincronizada com a da tensão quando a carga é resistiva, quando a corrente se torna capacitiva a curva da corrente é adiantada e se desloca para a esquerda em relação à tensão e se desloca para a direita em relação à da tensão quando a corrente se torna capacitiva. Este deslocamento da senóide da corrente em relação à tensão é o que se quer detectar.

O tempo de medição é dado pelo nível baixo do sensor de zero que opera em relação à senóide da tensão, mas as medições feitas nesse período são feitas com base no sensor de corrente, ou seja, avalia-se o comportamento da corrente durante o intervalo em que o sensor de zero está em sinal baixo, ou seja, durante o tempo em que a tensão da rede é positiva.

Fazendo-se as medições, uma pequena parte do início do semiciclo e do seu final não são computados devido ao atraso na comutação do sensor de zero, entretanto a parte do tempo em que não há medição é insignificante em relação à sua duração.

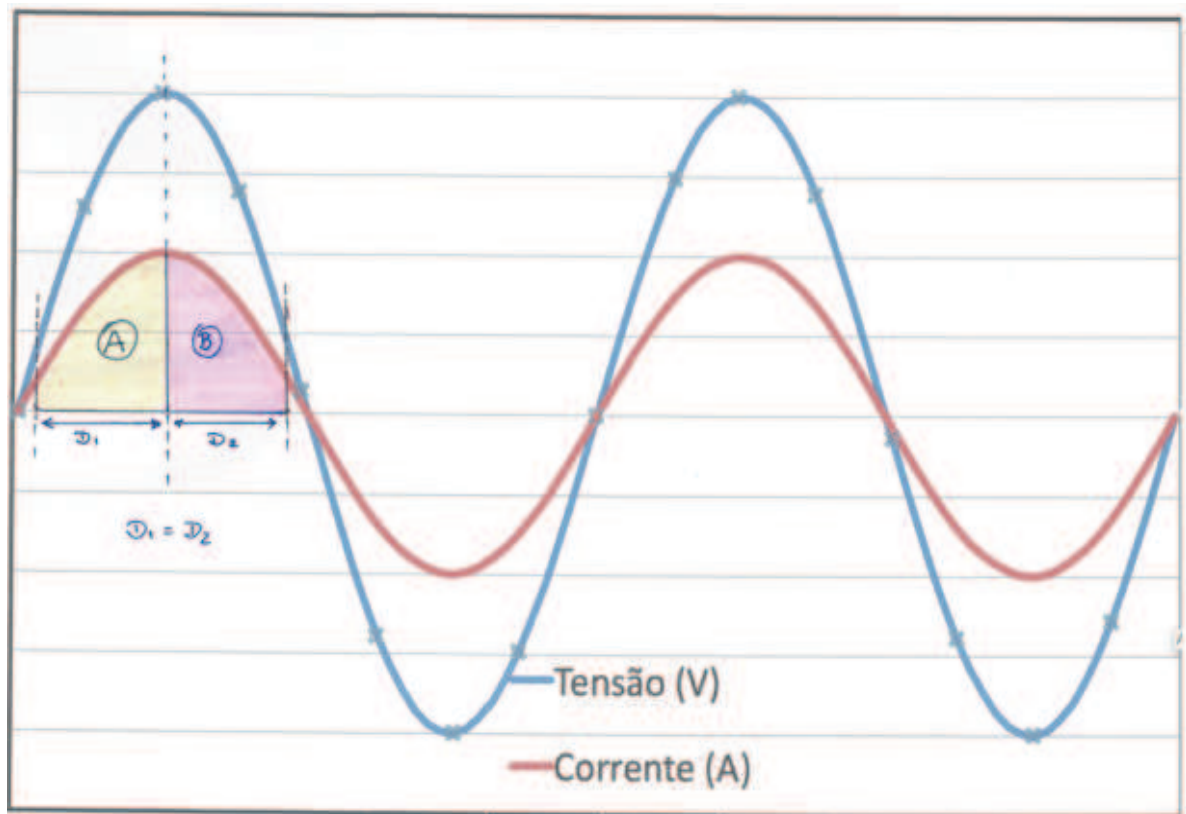
Quando não há defasagem entre corrente e tensão, ambas as senóides simultaneamente cruzam o zero na borda de subida, têm seus picos de máxima, cruzam o zero na borda descendente e apresentam simultaneamente seus pontos de mínima. Quando há defasagem das ondas isso não ocorre. Quando estão em fase a intersecção entre as áreas das senóides de corrente e tensão é máxima e à medida que a defasagem entre elas aumenta (até o limite de 90°) esta área vai diminuindo .

O método utilizado divide a área do semiciclo positivo da tensão em duas metades, uma metade da esquerda que vai do início da comutação do sensor de zero até a metade do

tempo e a outra que começa nessa metade do tempo e vai até o sensor comutar para sinal alto. É o mesmo que dividir a área sob a senóide em uma metade que vai do zero até o pico e outra que vai do pico até o zero, portanto uma metade à esquerda do pico e outra à sua direita.

A Figura 31 a seguir mostra ambas as senóides, tensão e corrente em fase. As áreas denominadas A e B são iguais, os picos das senóides ocorrem ao mesmo tempo.

Figura 35: Áreas 'a' e 'b' situadas entre a curva da corrente e o zero



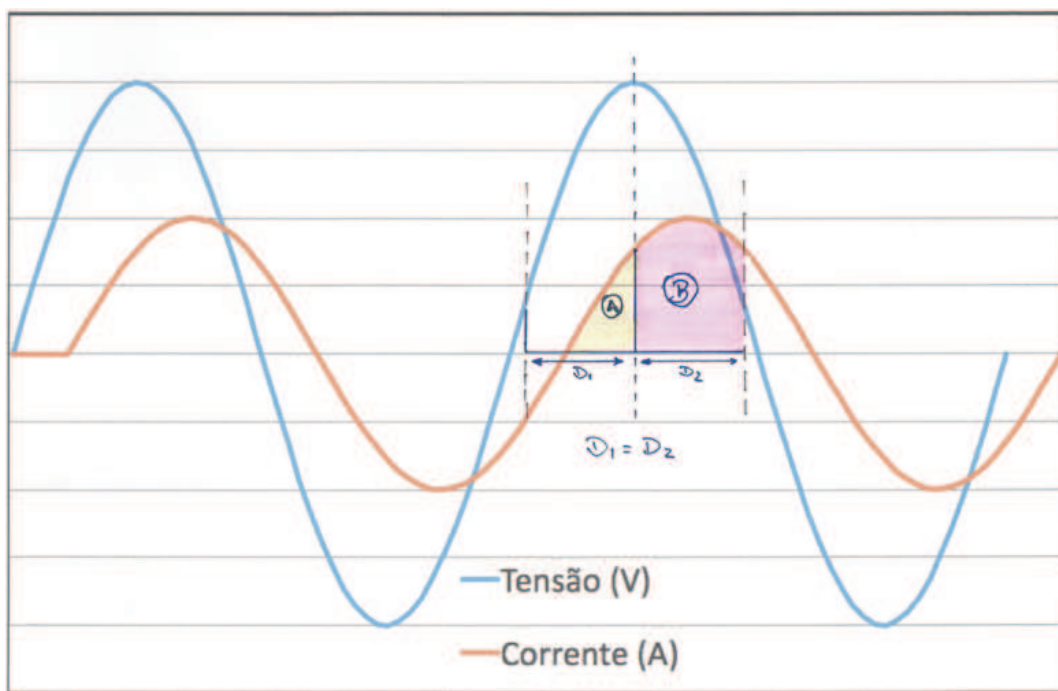
Área 'a', situada à esquerda do pico da tensão ou da metade do semiciclo positivo

Área 'b', situada à direita do pico da tensão ou da metade do semiciclo positivo

Fonte: Desenho produzido pelo próprio autor com Excel complementado à mão

Quando tensão e corrente estão em fase, as áreas tem o mesmo valor. Quando a corrente atrasa em relação à tensão, conforme mostra a Figura 36 a área de intersecção após o pico, ou a área B da direita, fica maior que a outra à esquerda. O inverso também ocorre, quando a corrente está adiantada em relação à tensão a área da esquerda fica maior que a da direita. A Figura 31 e a Figura 36 ilustram este fato.

Figura 36: Comparação entre as áreas 'a' e 'b'



A figura representa uma carga é indutiva, a área 'b' é maior que a área 'a'.

Fonte: Produzido pelo próprio autor com Excel complementado à mão

O software construído avalia em que percentual uma área é maior que a outra, se a percentagem for pequena, ou seja, se as áreas forem diferentes dentro de uma pequena tolerância que pode ser calibrada, consideramos a carga meramente resistiva. Se a área da direita for maior que a da esquerda a carga é indutiva e se a área da direita for menor que a da esquerda a carga é capacitiva.

Respeita-se uma certa margem de tolerância porque há que se considerar os limites de medição tais como resolução e exatidão do protótipo, ruídos existentes na linha entre outras avarias e também porque uma pequena carga reativa na linha, não justifica a manobra de um capacitor, entendida como pequena uma carga menor que a metade do valor do menor capacitor disponível no banco para manobras.

Este método é utilizado tão somente para apurar se a carga existente na linha é resistiva, capacitiva ou indutiva. A determinação dos valores é feita pela rotina principal de cálculo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O protótipo foi submetido a testes de bancada iniciando-se com uma carga resistiva. Nenhuma reação de comutação ocorreu na presença de cargas resistivas, conforme era esperado teoricamente. Submetido a cargas indutivas o protótipo comuta os relés em sequencia até que a carga se torne resistiva, neste momento ele não acrescenta mais capacitores. Com alguns relés acionados, quando submetido a cargas capacitivas o protótipo prossegue acoplando mais capacitores na sequência até o total de oito. Com alguns relés acionados, se reduzida a capacitância na rede, o protótipo desliga os capacitores na ordem inversa até que a carga se torne resistiva ou até que tenha desligado todos os relés.

A sequência de acionamento de capacitores é sempre a mesma, do primeiro até o oitavo e seu desligamento do oitavo até o primeiro.

Os relés possuem mostradores luminosos individuais, *leds* que indicam quando estão acionados.

Embora a lógica de acionamento seja funcional o protótipo apresentou alguns problemas de funcionamento em razão do modo pelo qual ele detecta se a rede está capacitiva, resistiva ou indutiva. O algoritmo escolhido não funciona bem quando a tensão ou a corrente não são simétricas em relação aos seus picos, tal como ocorre quando há cargas controladas por *dimmers* e controladores de potência por variação do ângulo de disparo. Contudo, é funcional quando as curvas mantêm sua simetria.

Esta forma de detecção da defasagem foi escolhida porque o processador AVR, embora tenha resolução de corrente de 0,0048V, que corresponde a 0,6 V de variação na linha, apresenta ruídos e instabilidade nas suas portas analógicas causando erros de leitura de até 3 ou 4 vezes esse valor. Submetido a uma tensão ou correntes estável, o AVR indicou oscilações nos valores da leitura. Esta imprecisão, implica um erro de leitura que não é significativo para a correção do fator de potência, mas é suficientemente grande para impedir que se utilize os valores de leitura para identificação dos momentos em que ocorrem picos das senóides de tensão e corrente, impedindo a identificação da sua defasagem por meio de verificação dos picos.

A velocidade de processamento e quantidades de leituras que o microcontrolador utilizado é capaz de realizar por segundo não permite que métodos de cronometragem sejam utilizados para detecção da defasagem.

O AVR opera somente com valores positivos de leitura, além disso o filtro de bias não é capaz de remover as oscilações de leitura apresentadas, isso dificulta a identificação precisa do ponto de zero da tensão e da corrente por meios digitais, o que frustrou as tentativas de identificação da defasagem por meio da verificação da polaridade da tensão e corrente.

Somente um protótipo foi desenvolvido e testado então não é possível assumir que todos os processadores semelhantes ao utilizado apresentem as mesmas oscilações nas leituras. A folha de dados do fabricante nada menciona acerca do assunto.

Existem placas da plataforma Arduino equipadas com processadores AVR ATMega com velocidade e capacidade de processamento algumas vezes maiores que o processador utilizado, além de possuírem mais de um conversor analógico-digital interno o que multiplica a velocidade de leitura. A precisão das portas analógicas do ATMega também é superior ao do controlador utilizado, a ponto de operarem sinais de áudio.

Acredita-se que a modificação do hardware, ou a escolha de um microcontrolador ATMega mais poderoso ou o acréscimo de mais um optoacoplador atuando como sensor de zero para a corrente seja suficiente para gerar um protótipo confiável para uso comercial.

O protótipo original apresentou problemas no momento em que comutou os relés. Os relés possuem, cada qual, uma entrada lógica em que recebem o sinal que os controla e cada grupo de relés, outra entrada para alimentação de suas bobinas que necessitam de uma corrente mais alta para mantê-los acionados.

Quando os relés foram comutados o AVR passou a apresentar erros em seus resultados, pois a carga representada pelos próprios relés interferiu com a alimentação do Arduino, alimentação que é utilizada como referência para as medições. O *software* foi modificado, introduziu-se uma pausa no processamento após a comutação do relê afim de que o AVR não se desestabilizasse

Os testes foram feitos com cargas indutivas e capacitivas existentes em pequenos protótipos tais como ventiladores, processadores de alimentos, pequenos motores e com pequenos capacitores o que só assegura o tipo de carga aplicada, mas não garante o valor.

Os testes demonstraram que o protótipo é sensível às cargas pequenas que lhe foram aplicadas e reagiu corretamente a elas, isso demonstra que o protótipo consegue identificar e reagir corretamente as defasagens entre tensão e corrente. Ele reconhece em menos de um segundo se a carga da rede é capacitiva, resistiva ou indutiva e opera corretamente a manobra dos capacitores.

A aplicação de cargas maiores fará variar o valor da tensão e o valor da corrente, o que não prejudica a medição da defasagem, ao contrário, correntes maiores são mais fáceis de serem detectadas, o limite inferior é o caso crítico.

3.1 Procedimentos experimentais com diferentes métodos de detecção I - Simulação

Para teste do funcionamento do circuito analógico aplicou-se, em vez do sensor de tensão, tensões de valores conhecidos e se verificou a resposta de saída do circuito com o osciloscópio. Para a tensão o circuito se comportou como esperado. Em relação à corrente, o método de substituir o sensor de corrente por uma tensão conhecida não apresentou valores confiáveis. Ao se aumentar a tensão, simulando o sensor, ocorria um achatamento da senóide de saída. Isso possivelmente ocorreu porque o sensor é uma fonte de corrente e não uma fonte de tensão. Como fonte de corrente, o sensor faz gerar no resistor de carga uma tensão com a qual se opera. A utilização de uma fonte de tensão em substituição ao sensor não contribuiu para os testes.

A solução encontrada foi a criação de uma extensão, com dois fios elétricos em paralelo, com uma tomada em uma extremidade e um plug na outra para a conexão à rede e à carga fazendo com que a corrente atravessasse os fios.

Como os fios são separados fisicamente, em alguns pontos se enrolou o cabo de modo a formar cinco anéis com 2, 3, 4, 5 e 6 espiras.

Ao se conectar o sensor de corrente a cada uma destas bobinas, simulou-se para cada uma a multiplicação da corrente pelo número de espiras que possui, permitindo simular correntes diferentes com a mesma carga.

3.2 Procedimentos experimentais com diferentes métodos de detecção II – Sinal do produto ($v \times i$)

Sempre que a carga é indutiva, imediatamente após a tensão passar pelo valor zero, na borda de subida ou na de descida da tensão, o produto entre a tensão e a corrente resultará em um valor negativo. No caso da carga ser capacitiva ou resistiva após a tensão cruzar o zero, o produto da tensão pela corrente será positivo.

A verificação do sinal do produto tem de ocorrer imediatamente após a tensão cruzar o zero, pois um atraso na medição pode acusar um resultado errado, pois, o sinal se mantém apenas por um curto intervalo enquanto não houver mudança de sinal decorrente da passagem da corrente pelo zero.

A medição deve ocorrer entre o momento do cruzamento do zero pela tensão e o momento do cruzamento do zero pela corrente. Este intervalo corresponde ao tempo de defasagem entre as senóides da tensão e da corrente e corresponde também ao ângulo de defasagem fasorial. O método não ofereceu valores confiáveis porque o tempo de obtenção e processamento dos dados pelo Arduíno é insuficiente.

O período da senóide neste sistema elétrico é de $1/60$ s, ou seja 0,0167 s, esse tempo corresponde a 360° . Cada grau de defasagem corresponde então a $0,167/360 = 0,00046$ s. O fator de potência exigido é de 0,92 ou menos, o ângulo cujo cosseno corresponde a este valor é $23^\circ 07'$, assim, para correção do fator de potência é necessário colocar as senóides da tensão e da corrente em um ângulo de defasagem inferior a $23^\circ 07'$. Esta defasagem corresponde a um intervalo de aproximadamente $23 \times 0,00046 = 0,01058$ s. É dentro desse intervalo que a medição deve ser feita para resultar um valor correto.

O microcontrolador conseguiu efetuar 32 medições de tensão e corrente por segundo, considerando o tempo de armazenamento em variáveis e todas as etapas de processamento necessárias para que os valores possam ser utilizados. Assim o tempo de leitura é próximo de $1/32$ s, ou seja, 0,0313 s, esse tempo é mais de três vezes o tempo da defasagem a ser atingida.

3.3 Procedimentos experimentais com diferentes métodos de detecção III – Defasagem entre picos

Quando a carga é indutiva o atraso da corrente em relação à tensão acontece em toda a senóide de modo que o mesmo atraso ocorre nos zeros, nos vales, nos picos etc. Assim a defasagem entre as ondas pode ser identificada pela defasagem entre os picos de uma e de outra. A simples identificação de que o pico da tensão ocorre antes do pico da corrente revela que a carga é indutiva.

Para essa verificação com valores discretos, durante um intervalo de tempo se tomou conjuntamente amostras de tensão e de corrente que foram armazenadas em dois vetores, que são coleções de valores armazenados em sequência. Em um vetor se armazena os valores da amostra da tensão e no outro se armazena os valores da corrente. Em teoria os valores armazenados variam de acordo com a senóide original e apresentam pontos de máxima e de mínima. Em tese, comparando-se os vetores, ou seja, comparando-se a sequência de números lidos, fazendo uma varredura dos vetores do começo para o final, aquele vetor que apresentar o seu pico, maior valor, antes, é o vetor cuja onda está adiantada em relação à outra.

Na prática o método não apresentou valores confiáveis. É que é difícil detectar os picos. Os topos das senóides se aproximam muito de um segmento de reta, ao se aproximar dos picos das senóides, os vetores apresentam uma sequência de valores iguais, devido à quantização, formando um platô, representando a parte superior da senóide como uma reta.

Este efeito ocorre em ambos os vetores, por um período de tempo suficientemente longo para que as “retas” de ambas se mantenham paralelas, de modo a impossibilitar a avaliação de qual pico ocorre antes.

Embora a resolução de leitura do Arduino seja 0,0048V há ainda as distorções do circuito analógico como não linearidade e ruídos que atingem e ultrapassam este valor. O Arduino utilizado apresentou também oscilações de leitura, ruído, equivalente a 3 vezes este valor. Assim, a detecção exata de onde se encontram os picos não foi possível, pois a margem de tolerância de ambas as curvas se tornou grande o suficiente para que houvesse um período longo de intersecção entre as incertezas, o suficiente para impedir a verificação de qual ocorre antes.

3.4 Procedimentos experimentais com diferentes métodos de detecção IV - *Zerocrossing*

O protótipo dispõe de um único sensor de zero conectado ao sensor de tensão. Este sensor está conectado a uma porta digital que efetua leituras dezenas de vezes mais rapidamente que as portas analógicas. Uma vez identificada a passagem da tensão pelo zero, na borda ascendente, se a carga for indutiva, a defasagem entre ela e o ponto de inflexão da corrente, que corresponde ao zero da corrente, não poderá ultrapassar 90° angulo em que se situa o pico da tensão se a carga for capacitiva. Este ponto deverá estar entre 90° e 180°.

O ângulo de 90° corresponde a 1/4 do período ou $0,01667 \text{ s} / 4 = 0,00416 \text{ s}$.

Este método não funcionou em razão do tempo de leitura não ser rápido o suficiente. O Software de controle utilizou o procedimento de comparação de áreas, descrito no item 2.2 para a operação do protótipo. Foram realizadas medições em locais diferentes com a energia disponível nas tomadas alimentadas pelas respectivas redes locais.

Para a calibração do protótipo foram utilizadas cargas comerciais conectadas à rede de fornecimento elétrico sem qualquer tratamento. Não foram utilizadas cargas padronizadas nem fonte de energia que se pudesse ter a certeza que estivesse isenta de ruídos, harmônicas e outras perturbações.

Fora utilizados os seguintes equipamentos para a realização dos testes:

- Ventilador Arno, da década de 80, modelo FAN 16, 127V, 106 W;
- Motor Monofásico WEG Monofásico - 1/4 cv127/220 V, 6,75/2,90 A;
- Motor Trifásico Voges modelo V80 - 1 cv - 1730 rpm, 220/380 V 2,85/1,65 A, Cos φ 0,84;
- Arranjo de 3 lâmpadas incandescentes de 100W cada uma, ligadas em paralelo, totalizando 300W;
- Compressor de Ar Planet-Air, modelo L-S50-25, do Laboratório da Fatec – 115 V, 400W, 4,8 A;
- Condicionador de Ar Daikin, 12.000 btu com inversos de frequência, 220-230 V, corrente máxima 9,3 A.

- Transformador 1:1, 220V/220V, 10 A.
- Quadro de Distribuição da rede elétrica do Laboratório de Eletrotécnica da Fatec-SP;
- Capacitores eletrolíticos de 1nF, 48 n F, 150nF, 0,2 mF, 0,5 mF, 5 mF e 40 mF;

Fora utilizados os seguintes instrumentos de medição elétrica para a realização dos testes:

Amperímetro, analógico marca Engro, modelo 71 - 0-5 A, Resolução 0,1 A, precisão de 0,5%;

Wattímetro analógico marca Engro, com resolução de 10 W na escala de 240 V, precisão de 0,5%;

Voltímetro analógico marca Engro, 300 V com resolução de 5 V, precisão de 0,5%;

Estes três medidores analógicos estavam calibrados, mas não rastreados.

Alicate Wattímetro Digital Minipa modelo ET-4091, True RMS, Faixa de leitura de Fator de Potência 0,10 a 0,99, Precisão básica 0,5% conforme informação do catálogo do fabricante;

Multímetro Digital Minipa modelo ET - 2231A, Precisão básica 0,5% conforme informação do catálogo do fabricante;

O primeiro teste consistiu na avaliação da sensibilidade do protótipo, ou seja a identificação de que valores mínimos de capacitância e indutância ele necessita para detectar alterações na rede e operar.

Aplicou-se uma carga indutiva suficiente para que o protótipo comutasse todos os seus reles para o estado de 'ligado', ou seja, estado de acoplamento. Nesta condição se conectou capacitores de valores cada vez maiores, um após outro até que o protótipo comutasse. Fez-se novamente o teste com valores decrescentes e então com valores aleatórios. Determinou-se que o protótipo apresenta reação sempre que é submetido a capacitâncias superiores a 1mF.

A corrente mínima para a operação do protótipo (que opera com sensor de corrente de 100 A) é de 0,5 A. Portanto, em 220 V a carga mínima de operação não pode ser inferior a 110 VA e em 110 V, 55 VA. Para valores iguais ou maiores que estes, o protótipo sempre é capaz de identificar cargas puramente resistivas.

Operando em 125 V a menor carga indutiva reativa a que o protótipo foi submetido foi de 92,10 VAR e este detectou a carga indutiva.

Operando em 216 V a menor carga indutiva reativa a que o protótipo foi submetido foi de 17,00 VAR e este detectou a carga indutiva. Não houve testes com valores menores.

Para verificação da exatidão dos valores apresentados pelo protótipo foram feitos vários testes. Com o ventilador operando em 125 V nas velocidades 1, 2 e 3 foram obtidos os seguintes resultados no Laboratório de Eletrônica da Fatec-SP:

Quadro 4: Testes com Ventilador em velocidade 1 (mais lenta)

Medidor	Corrente (A)	Tensão (V)	PAT (W)	PAP (VA)	Q (Var)	FP	Natureza
Protótipo	1,00	125,00	83,00	124,00	92,10	0,83	Indutiva
Medidores Analógicos	0,94	126,70	85,00	119,10	83,43	0,71	-

Nos testes em que foram utilizados instrumentos analógicos, os Valores de corrente, tensão e potência ativa foram lidos diretamente nos instrumentos, os demais valores transcritos na mesma linha, foram calculados segundo as fórmulas teóricas, com base nos valores lidos, porque os instrumentos analógicos não apresentam estas medidas.

O cálculo do fator de potência depende dos demais valores e acumula o erro de todas as demais variáveis portanto apresenta o maior desvio. Qualquer erro imputado a outra variável qualquer, reflete no fator de potência, então escolhemos esta medida como a mais rigorosa para avaliação dos desvios do protótipo.

Neste caso do ventilador na velocidade 1, o protótipo indicou um fator de potência de 0,83 e o valor calculado a partir dos instrumentos analógicos foi de 0,71. O erro apresentado foi de 16,3 %. Quanto à natureza indutiva da corrente o protótipo indicou corretamente.

Como o protótipo detectou corretamente a natureza da corrente, ele acionou os relés de acoplamento de capacitores adequadamente, o que se constatou pelo acendimento dos respectivos leds.

Em todas as medições houve oscilações das variáveis no tempo. Procurou-se anotar os valores visualmente mais persistentes para cada uma das variáveis.

Quadro 5: Testes com Ventilador em velocidade 2 (intermediária)

Medidor	Corrente (A)	Tensão (V)	PAT (W)	PAP (VA)	Q (Var)	FP	Natureza
Protótipo	1,18	125,00	97,00	147,50	118,80	0,80	Indutiva
Medidores Analógicos	1,13	126,90	97,50	143,40	115,15	0,68	-

O erro apresentado neste caso foi de 17,6 %. Quanto à natureza indutiva da corrente o protótipo indicou corretamente. A operação dos relês também foi adequada.

Quadro 6: Testes com Ventilador em velocidade 3 (mais rápida)

Medidor	Corrente (A)	Tensão (V)	PAT (W)	PAP (VA)	Q (Var)	FP	Natureza
Protótipo	1,51	126,00	124,00	190,26	144,00	0,77	Indutiva
Medidores Analógicos	1,49	126,90	120,00	189,08	146,12	0,66	-

O erro apresentado neste caso foi de 21,3 %. Quanto à natureza indutiva da corrente o protótipo indicou corretamente. A operação dos relês também foi adequada.

Nota-se que percentualmente o erro aumentou nestas medições. É que o desvio na primeira medição foi de $0,83 - 0,71 = 0,12$, na segunda também 0,12 e na terceira 0,11. Embora o desvio tenha diminuído com o incremento da velocidade e da corrente como os valores envolvidos são menores, percentualmente são maiores, pois o cálculo do erro envolve a razão entre o desvio e o valor da variável considerada para comparação.

Quadro 7: Testes com Lâmpada de 100 W, 220 V

Medidor	Corrente (A)	Tensão (V)	PAT (W)	PAP (VA)	Q (Var)	FP	Natureza
Protótipo	0,00	220,00	-	-	-	1,00	Resistiva
Medidores Analógicos	0,48	220,00	105,00	105,60	11,24	0,99	-

O protótipo, como esperado, não apresentou os valores das potências porque ele não opera com valores de corrente inferiores a 0,5 A, no entanto, detectou corretamente a natureza resistiva da carga.

Quadro 8: Testes com conjunto de Lâmpadas - 300 W, 220 V

Medidor	Corrente (A)	Tensão (V)	PAT (W)	PAP (VA)	Q (Var)	FP	Natureza
Protótipo	1,51	215,00	325,00	325,00	0,00	1,00	Resistiva
Medidores Analógicos	1,40	215,00	300,00	301,60	24,52	1,00	-
Alicate Wattímetro	1,28	214,50	265,00	269,00	16,00	0,99	Resistiva

O erro constatado neste caso foi menor que 0,01, menor que 1% e seu valor exato não foi constatado porque em todos os testes trabalhou-se com dois dígitos após a vírgula.

O fato do alicate amperímetro ter apontado uma pequena indução provavelmente deve-se ao fato de que as lâmpadas, apesar de terem carga sabidamente resistiva, são dotadas de filamentos que apresentam alguma indutância.

Quadro 9: Testes com resistor - 400 W, 220 V

Medidor	Corrente (A)	Tensão (V)	PAT (W)	PAP (VA)	Q (Var)	FP	Natureza
Protótipo	1,97	216,00	417,00	434,00	176,00	0,96	Resistiva
Medidores Analógicos	1,90	217,00	410,00	412,30	43,49	0,99	-
Alicate Wattímetro	1,92	217,00	406,00	286,00	260,00	0,97	Resistiva

No teste realizado no laboratório de Eletrotécnica da Fatec-SP com um resistor de 400 W o protótipo apresentou erro de 3,12% para o fator de potência quando comparado ao valor calculado a partir dos valores apresentados pelos medidores analógicos e erro de 1,04% quando comparado ao valor apresentado pelo alicate wattímetro. Acredita-se no maior valor de erro encontrado porque os equipamentos de medição digitais utilizados apresentam menor acerto com correntes baixas e também porque em se tratando de carga resistiva espera-se um fator de potência próximo de 1,00. A Natureza da corrente foi corretamente detectada pelo protótipo.

Quadro 10: Teste com Condicionador de Ar operando no momento 1

Medidor	Corrente (A)	Tensão (V)	PAT (W)	PAP (VA)	Q (Var)	FP	Natureza
Protótipo	3,16	236,00	560,00	567,00	432,00	0,75	Indutiva
Alicate Wattímetro	2,81	238,40	520,00	680,00	432,00	0,75	Indutiva

Quadro 11: Teste com Condicionador de Ar operando no momento 2

Medidor	Corrente (A)	Tensão (V)	PAT (W)	PAP (VA)	Q (Var)	FP	Natureza
Protótipo	3,00	238,00	560,00	712,00	432,00	0,79	Indutiva
Alicate Wattímetro	2,62	238,00	490,00	623,00	409,00	0,76	Indutiva

Quadro 12: Teste com Condicionador de Ar operando no momento 3

Medidor	Corrente (A)	Tensão (V)	PAT (W)	PAP (VA)	Q (Var)	FP	Natureza
Protótipo	3,16	236,00	560,00	567,00	432,00	0,75	Indutiva
Alicate Wattímetro	2,81	238,00	520,00	680,00	432,00	0,75	Indutiva

O equipamento condicionador de ar utilizado no teste possui um inversor de frequência que varia progressivamente a rotação do motor e, portanto, a potência de trabalho a cada instante. Foram tomadas medições em momentos diferentes do dia. Nas 3 medições foi constatado erro de fator de potência inferior a 1%.

As oscilações apresentadas pelos instrumentos nestas medições foram as mais intensas de todos os testes realizados, tanto por gerarem variações de maior valor como pela velocidade em que os valores mudavam. Provavelmente esse fenômeno se deu em decorrência da presença do inversor de frequência. As diferenças de leitura entre as correntes refletem a dificuldade na captação dos valores dos instrumentos em virtude de oscilações e também da impossibilidade de fazer a leitura dos displays ao mesmo tempo, sobretudo porque para a leitura dos diferentes valores captados pelo Alicate Wattímetro é necessário pressionar um botão para a escolha da variável a ser apresentada em seu display. Contudo, o valor do fator de potência se apresentou igual para ambos os instrumentos em cada leitura.

Como esperado, as cargas foram identificadas por ambos os instrumentos como indutivas.

Quadro 13: Teste com compressor de Ar do Laboratório de Eletrônica da Fatec-SP

Medidor	Corrente (A)	Tensão (V)	PAT (W)	PAP (VA)	Q (Var)	FP	Natureza
Protótipo	5,30	126,00	447,00	667,80	497,70	0,67	Indutiva
Medidores Analógicos	5,52	126,00	450,00	695,52	530,33	0,65	-

O teste apontou erro de 3,5% no fator de potência. Esta foi a única medição com corrente acima de 3 A em que o erro não foi menor que 1%. Provavelmente o erro se deu em razão da corrente apresentada 5,52 A estar acima do limite de medição dos instrumentos analógicos utilizados. O teste foi feito rapidamente para evitar a queima dos equipamentos mas pode ter gerado distorções nas medições.

Quadro 14: Teste de medição realizado na fase 1 do quadro de distribuição elétrica

Medidor	Corrente (A)	Tensão (V)	PAT (W)	PAP (VA)	Q (Var)	FP	Natureza
Protótipo	8,18	125,00	966,00	1027,00	343,00	0,94	Capacitiva
Alicate Wattímetro	8,05	124,50	938,30	1003,00	352,00	0,93	Capacitiva

A medição realizada na fase 1 (fase R) no quadro de distribuição de energia da rede elétrica do laboratório de Eletrotécnica da Fatec-SP apresentou erro inferior a 1% para o fator de potência. O protótipo identificou corretamente a natureza capacitiva da fase.

Quadro 15: Teste de medição realizado na fase 3 do quadro de distribuição elétrica

Medidor	Corrente (A)	Tensão (V)	PAT (W)	PAP (VA)	Q (Var)	FP	Natureza
Protótipo	2,36	128,00	253,00	297,00	158,00	0,84	Indutiva
Alicate Wattímetro	2,37	127,70	248,00	298,10	66,40	0,82	Indutiva

A medição realizada na fase 3 (fase T) no quadro de distribuição de energia da rede elétrica do laboratório de Eletrotécnica da Fatec-SP apresentou erro de 1,9% para o fator de potência. O protótipo identificou corretamente a natureza indutiva da fase.

Quadro 16: Teste com motor trifásico de 1 cv.

Medidor	Corrente (A)	Tensão (V)	PAT (W)	PAP (VA)	Q (Var)	FP	Natureza
Protótipo	1,45	211,00	204,00	319,00	245,00	0,62	Indutiva
Alicate Wattímetro	1,38	211,00	176,50	275,00	206,00	0,67	Indutiva

O teste realizado no laboratório de eletrotécnica do Instituto Federal de São José dos Campos, em uma das fases do motor trifásico, operando com as 3 fases ativas, apresentou erro de 8,06%. A natureza indutiva foi detectada corretamente.

Todos os testes com motores foram realizados com eles operando em vazio.

Quadro 17: Teste com motor monofásico de 1/4 cv.

Medidor	Corrente (A)	Tensão (V)	PAT (W)	PAP (VA)	Q (Var)	FP	Natureza
Protótipo	2,64	215,00	145,00	574,00	545,00	0,26	Indutiva
Medidores Analógicos	2,60	215,00	140,00	559,00	541,18	0,25	-
Alicate Wattímetro	2,66	214,70	115,70	560,00	500,00	0,20	Indutiva

O teste realizado no laboratório de eletrotécnica da Fatec-SP com motor monofásico, operando sem carga, apresentou erro de 3,8%. A natureza indutiva foi detectada corretamente.

Quadro 18: Teste com motores monofásicos de 1/4 cv com capacitor de 40 uF.

Medidor	Corrente (A)	Tensão (V)	PAT (W)	PAP (VA)	Q (Var)	FP	Natureza
Protótipo	1,52	217,00	141,00	328,00	290,00	0,42	Indutiva
Medidores Analógicos	1,37	219,00	122,00	300,03	274,11	0,41	-
Alicate Wattímetro	1,29	217,00	106,00	286,00	260,00	0,39	Indutiva

Foi realizado novo teste com o mesmo motor acoplando-se em paralelo um capacitor de 40 uF. Conforme esperado o fator de potência aumentou e o aumento foi detectado tanto pelo protótipo como pelos outros instrumentos. O erro em relação ao fator de potência foi de 3,2%. A natureza indutiva da carga foi detectada corretamente

Quadro 19: Teste com dois motores iguais monofásicos de 1/4 cv.

Medidor	Corrente (A)	Tensão (V)	PAT (W)	PAP (VA)	Q (Var)	FP	Natureza
Protótipo	5,35	219,00	303,00	1170,00	1134,00	0,26	Indutiva
Medidores Analógicos	5,36 verif. dig	220,00	300,00	1179,20	1140,40	0,25	-
Alicate Wattímetro	5,36	219,00	270,00	1180,00	1142,00	0,23	Indutiva

O teste realizado no laboratório de eletrotécnica da Fatec-SP com motor monofásico, operando sem carga, apresentou erro de 13,0%. Em relação ao alicate wattímetro e erro de 4,0% em relação ao cálculo teórico. A natureza indutiva foi detectada corretamente. Para o cálculo teórico utilizou-se o multímetro digital para medição do valor da corrente. O valor do erro pode ser menor se considerarmos que os valor apontado pelo protótipo 0,26 pode ter sido oriundo de arredondamento de valores mais próximos de 0,25. O desvio apontado foi de 0,01. A natureza indutiva da corrente foi corretamente detectada.

Quadro 20: Teste com dois motores de 1/4 cv mais capacitores de 40 uF e 5 uF.

Medidor	Corrente (A)	Tensão (V)	PAT (W)	PAP (VA)	Q (Var)	FP	Natureza
Protótipo	3,76	216,00	728,00	814,00	170,00	0,91	Indutiva
Medidores Analógicos	3,70	217,00	740,00	802,90	311,53	0,92	-
Alicate Wattímetro	3,48	216,50	692,00	763,80	325,80	0,90	Indutiva

Foi realizado novo teste com o mesmo motor acoplando-se em paralelo um capacitor de 40 μF e outro de 5 μF . Conforme esperado o fator de potência aumentou e o aumento foi detectado tanto pelo protótipo como pelos outros instrumentos. O erro em relação ao fator de potência foi de 1,3%. A natureza indutiva da carga foi detectada corretamente

Quadro 21: Teste com o motor de 1/4 cv ligado ao transformador.

Medidor	Corrente (A)	Tensão (V)	PAT (W)	PAP (VA)	Q (Var)	FP	Natureza
Protótipo	1,79	217,00	0,00	391,00	391,00	0,00	Indutiva
Medidores Analógicos	1,75	220,00	80,00	385,00	376,60	0,21	-
Alicate Wattímetro	1,19	217,90	27,70	261,00	266,10	0,10	Indutiva

Para este teste utilizou-se um transformador cujo enrolamento primário foi ligado à rede e o secundário, com o mesmo número de espiras, foi ligado ao motor. As medições foram feitas entre a rede e o primário.

O protótipo apresentou valores de fator de potência e de potência ativa inesperados, provavelmente em razão da influência do campo magnético do transformador sobre o protótipo. O comprimento dos fios não permitiu o distanciamento. Durante a montagem inicial do protótipo verificou-se que o campo magnético gerado pelos relés do próprio protótipo interferiam com seu funcionamento.

Nos testes verificou-se que o protótipo acionou corretamente os relés para a correção do fator de potência, mesmo naqueles testes em que os erros apresentados foram maior.

O protótipo é destinado a operar com cargas de até 100 A, e para isso possui um sensor de corrente de 100 A. Este sensor gera valores muito baixo de sinal para correntes pequenas e isso prejudica o funcionamento do protótipo. Para operar com correntes menores é possível a substituição do sensor de corrente por outros semelhantes destinados a operar com correntes de até 10 A, 20 A, 30 A ou 60 A que estão disponíveis no mercado. Além da

substituição do sensor é necessária a recalibração do equipamento e a retirada do resistor de carga (Burden) existente no circuito analógico, já que os demais sensores possuem este resistor acoplado internamente.

Os erros apresentados pelo protótipo para corrente acima de 3 A foram inferiores a 1%, salvo o erro apontado no teste com o compressor de Ar em que supõe-se que o erro encontrado seja devido à corrente que ultrapassa a capacidade do medidor.

Presume-se que os sensores operem com menor erro quando estão mais próximos de sua faixa central de operação e que na proximidade das extremidades haja um aumento do erro. O quadro 22 apresenta testes realizados com cargas resistivas, capacitivas e indutivas e os fatores de potência obtidos.

Quadro 22 – Erro inferior a 1%.

Carga	Medidor	corr. - A	tensão - V	PAT (W)	PAP (VA)	Q (VAr)	FP	Natureza	
Experimento 10									
Lâmpadas 300W	Protótipo	1,51	215,00	325,00	325,00	325,00	1,00	Resistiva	Erro menor que 1%
Lab. Elétrica Fatec	Analógicos	1,40	215,00	300,00	301,00	24,52	1,00		
	Alicate	1,28	214,50	265,00	269,00	16,00	0,99		
Experimento 17									
Quadro Distrib. Fase 1	Protótipo	8,18	125,00	966,00	1027,00	343,00	0,94	Capacitiva	Erro menor que 1%
Lab. Elétrica Fatec	Digitais	8,05	124,50	938,30	1002,23	352,20	0,94		
	Alicate	8,05	124,50	938,30	1003,00	3,55	0,93		
Experimento 06									
Ar Condicionado 1	Protótipo	3,16	236,00	560,00	567,00	432,00	0,75	Indutiva	Erro menor que 1%
Casa	Analógicos	-	-	-	-	-	-		
	Alicate	2,81	238,40	520,00	680,00	432,00	0,75		
Experimento 07									
Ar Condicionado 2	Protótipo	3,00	238,00	560,00	712,00	432,00	0,79	Indutiva	Erro menor que 1%
Casa	Analógicos	-	-	-	-	-	-		
	Alicate	2,62	238,00	490,00	623,00	409,00	0,76		
Experimento 08									
Ar Condicionado 3	Protótipo	3,16	236,00	560,00	750,00	432,00	0,75	Indutiva	Erro menor que 1%
Casa	Analógicos	-	-	-	-	-	-		
	Alicate	2,81	238,00	520,00	680,00	432,00	0,75		

O quadro 23 mostra a tendência de diminuição do erro encontrado para o fator de potência à medida que a corrente aumenta, atingindo valores maiores com correntes mais baixas e menores à medida que se aproxima de 8 A. Algumas medidas realizadas a partir de 3 A já revelam valores de erro inferiores a 1%, duas das medidas realizadas com correntes acima de 3 A, entretanto, apresentaram valores de até 3,5%.

Quadro 23: Tendência de diminuição do erro com aumento da corrente

Experimento 02									Erro 17,6% Corrente abaixo de 3,00 A Diferença = 0,12
Ventilador - Veloc. 2	Protótipo	1,18	125,00	97,00	147,50	118,80	0,80	Indutiva	
Lab. Eletrônica Fatec	Analógicos	1,13	126,90	97,50	143,40	105,15	0,68		
	Alicate	-	-	-	-	-	-		
Experimento 18									Erro 1,63% Diferença = 0,01
Motor Trifásico	Protótipo	1,45	211,00	204,00	319,00	245,00	0,62	Indutiva	
Lab. IFSP-SJC	Digitais	1,38	211,00	176,50	291,18	231,59	0,61		
	Alicate	1,38	211,00	176,50	275,00	206,00	0,67		
Experimento 13									Erro 3,4% Diferença = 0,03
Resistor 220 V	Protótipo	1,97	216,00	417,00	434,00	176,00	0,96	Resistiva	
Lab. Elétrica Fatec	Analógicos	1,90	217,00	410,00	412,30	43,49	0,99		
	Alicate	1,29	217,00	406,00	286,00	260,00	0,99		
Experimento 16									Erro 1,9% Diferença = 0,02
Quadro Distrib. Fase 3	Protótipo	2,36	128,00	253,00	297,00	158,00	0,84	Indutiva	
Lab. Elétrica Fatec	Digitais	2,37	127,00	248,00	300,99	170,56	0,82		
	Alicate	2,37	127,70	248,00	298,10	66,40	0,82		
Experimento 15									Erro 1,3% Diferença = 0,01
2 Mts + Cap 40 uF + 5 uF	Protótipo	3,76	216,00	728,00	814,00	17,00	0,91	Indutiva	
Lab. Elétrica Fatec	Analógicos	3,70	217,00	740,00	802,90	311,53	0,92		
	Alicate	3,48	216,50	692,00	763,80	325,80	0,90		
Experimento 17									Erro menor que 1%
Quadro Distrib. Fase 1	Protótipo	8,18	125,00	966,00	1027,00	343,00	0,94	Capacitiva	
Lab. Elétrica Fatec	Digitais	8,05	124,50	938,30	1002,23	352,20	0,94		
	Alicate	8,05	124,50	938,30	1003,00	3,55	0,93		

O quadro 24 apresente os erros mais significativos encontrados nas medições, todos eles em medições em que a corrente era inferior a 3 A.

Quadro 24: Erros mais significativos

		Medições (Valores em Itálico e amarelo foram calculados cfe. teoria)						Natureza	Desvio no Fator de Potência
Carga	Medidor	corr. - A	tensão - V	PAT (W)	PAP (VA)	Q (VAR)	FP		
Experimento 01									Erro 16,3% Corrente abaixo de 3,00 A Diferença = 0,12
Ventilador - Veloc. 1	Protótipo	1,00	125,00	83,00	124,00	92,10	0,83	Indutiva	
Lab. Eletrônica Fatec	Analógicos	0,94	126,70	85,00	119,10	83,43	0,71		
	Alicate	-	-	-	-	-	-		
Experimento 02									Erro 17,6% Corrente abaixo de 3,00 A Diferença = 0,12
Ventilador - Veloc. 2	Protótipo	1,18	125,00	97,00	147,50	118,80	0,80	Indutiva	
Lab. Eletrônica Fatec	Analógicos	1,13	126,90	97,50	143,40	105,15	0,68		
	Alicate	-	-	-	-	-	-		
Experimento 03									Erro 21,3% Corrente abaixo de 3,00 A Diferença = 0,14
Ventilador - Veloc. 3	Protótipo	1,51	126,00	124,00	190,26	144,00	0,77	Indutiva	
Lab. Eletrônica Fatec	Analógicos	1,49	126,90	120,00	189,08	146,12	0,63		
	Alicate	-	-	-	-	-	-		
Experimento 09									Erro 3,8% Corrente < 3A Diferença = 0,01
Motor 1/4 CV Vazio	Protótipo	2,64	215,00	145,00	574,00	545,00	0,26	Indutiva	
Lab. Elétrica Fatec	Analógicos	2,60	215,00	140,00	559,00	541,18	0,25		
	Alicate	2,66	214,70	115,70	560,00	500,00	0,20		

CONCLUSÃO

Os ensaios elaborados para atestar funcionalidade e levantamento de dados do protótipo construído se mostrou bastante satisfatório. Foi conseguido o êxito de calcular e operar sistemas elétricos indutivos para diminuir a defasagem entre a tensão de alimentação e sua corrente elétrica. Os relés do dispositivo fabricado foram atuados automaticamente dando a entender o chaveamento para a inserção ou desligamento de banco de capacitores quando necessário para corrigir a carga indutiva do circuito.

Mesmo nos casos em que houve alguns desvios de cálculo, mensuráveis, apresentados pelos protótipo, seu correto funcionamento não foi prejudicado. Em todos os casos testados o protótipo comutou corretamente os relés para acionamento ou desligamento dos capacitores.

Para correntes superiores a 8,05 A o maior erro do fator de potência apresentado foi inferior a 1%. Nas cargas que geram corrente entre 3 A e 8,05 A os maiores erros encontrados foram de 3,5% em relação ao fator de potência. Para correntes inferiores a 3 A o erro máximo encontrado foi de 21,3%.

Apesar do desvio numérico em correntes inferiores a 3 A os testes comprovaram que a lógica do programa funciona adequadamente e que o protótipo reconhece com acerto a natureza da carga em teste e acrescenta ou reduz corretamente a quantidade de capacitores na linha até que se torne resistiva.

O protótipo funciona adequadamente para cargas que não provoquem distorções na forma senoidal da corrente e desde que a tensão também tenha sua forma senoidal preservada. O protótipo apresenta corretamente os valores de corrente rms, de tensão rms e das potências e do fator de potência da rede.

O protótipo opera satisfatoriamente em sistemas elétricos que não apresentem ruídos e harmônicos que provoquem distorções no formato senoidal da tensão e da corrente.

O tempo de manobra de cada capacitor é inferior a um segundo o que significa que em menos de 8 segundos o protótipo é capaz de comutar todos os seus relés, acoplando a totalidade dos capacitores a ele conectados ou os desacoplando.

Para o desenvolvimento de novos protótipos mais aprimorados é possível a colocação de mais um optoacoplador para monitorar o zero da corrente e que se verifique a defasagem entre corrente e tensão mediante verificação dos sinais de ambos os optoacopladores.

O protótipo não opera corretamente na proximidade de equipamentos que gerem campos magnéticos.

O sistema de cálculo utilizado, rms, faz com que se perca o sinal matemático correspondente à natureza da carga, de modo que somente pelo resultado numérico não é possível verificar se é indutiva ou capacitiva. A versão utilizada do arduíno não tem características de velocidade de processamento e acuidade para verificar a natureza da carga utilizando o método de verificação do sinal do produto da tensão pela corrente que se segue imediatamente ao *zerocrossing*.

A placa utilizada também não é capaz de fazer essa verificação pelo método de armazenamento, em vetores, de tensão e corrente com a posterior contagem dos valores que antecedem o pico de cada onda para apurar qual deles ocorre primeiro. Por insuficiência da velocidade de leitura e processamento a verificação do ângulo existente entre o *zerocrossing* e o ângulo no qual se situa o ponto de inflexão da corrente também não gera resultados confiáveis.

É possível fazer a verificação da natureza da corrente utilizando o método criado pelo autor que foi implementado no algoritmo e que consiste na verificação da assimetria das áreas existentes entre a corrente e o eixo das abscissas separadas pela metade da largura encontrada entre o disparo do *zerocrossing* ascendente e do *zerocrossing* descendente, desprezando a medida central quando o total de medições for ímpar. O método descoberto é capaz de superar a falta de maior velocidade de leitura e processamento do Arduíno e também superar sua resolução, tempo de leitura e os ruídos e instabilidade característicos de suas leituras analógicas. Trata-se de uma inovação que pode ser implementada em microcontroladores AVR e que permitem que sejam capazes de verificar a natureza da corrente utilizando somente um sensor de *zerocross* superando a impossibilidade do implemento mediante utilização dos métodos tradicionais.

TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros e continuidade do desenvolvimento deste trabalho almeja-se fazer a pesquisa para solicitação da patente da invenção do algoritmo utilizado para identificação da natureza indutiva, resistiva ou capacitiva da corrente.

Também pretende-se criar um protótipo que seja comercialmente viável para ser instalado em equipamentos de condicionamento de ar e de refrigeração que operem com inversores de frequência.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Rômulo de Oliveira. **Análise de circuitos em corrente alternada**: 2 ed. São Paulo: Érica, 2007.

Arduíno. 2015. Disponível em:
<<http://playground.Arduíno.cc/Portugues/HomePage>>. Acesso em: 03 Jun 2014.

AUGUSTO, Thiago Rider. **Controlador para correção do fator de potencia com microcontrolador**. 130f. Dissertação (Dissertação de Graduação em Engenharia da Computação) Centro Universitário de Brasília – Uniceub, Brasília 2010.

BISANOVIC, Smajo; HAJRO, Mensur; SAMARDZIC Mersiha. **One Approach for reactive power control of capacitor in distribution and industrial networks**, Sarajevo, Bosnia e Herzegovina; Electrical Power and Energy Systems. 2014.

CODI – COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA da Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE), **Manual de Orientação aos Consumidores**. Energia Reativa Excedente, p.13, 2004.

CREDER, Hélio. **Instalações Elétricas**, 15. ed. Rio de Janeiro, RJ, LTC, 2008.

EDMINISTER, Joseph A. **Circuitos Elétricos**. 2.ed. São Paulo, Makron, McGraw-Hill, 1991.

ELETROPAULO – Eletricidade de São Paulo, **Energia Reativa**. 2015. Disponível em
< <https://www.aeseletropaulo.com.br/poder-publico/sobre-energia/conteudo/energia-reativa> >. Acesso em 17 nov 2014.

HALLIDAY, David. **Fundamentos de Física**, 8.ed. Rio de Janeiro, LTC, 2010. Vol.3.

INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL – ISA - Org. Paula Franco Moreira. **O Setor Elétrico Brasileiro e a Sustentabilidade no Século 21**: Oportunidades e Desafios. 2. ed. Internacional Rivers Network – Brasil, Brasília, novembro de 2012.

MARKUS, Otávio. **Circuitos elétricos**: corrente contínua e corrente alternada: teoria e exercícios. 9. ed. Rev. São Paulo: Érica, 2011.

MERCADOLIVRE – Anúncio **Arduíno Uno Rev3 R3 Atmega328 Smd C/ Cabo Usb**, Disponível em <http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-760165956-Arduíno-uno-rev3-r3-atmega328-smd-c-cabo-usb-_JM> Acesso em 28 set 2016.

OSAFEHINTI, S.I.; AROBIEKE O.O. A. S.B.; OLUSOLADE M.A.. **Generating Multiplying Factor to Determine Capacitor Value for all Range of Power Factor Correction in Industrila Environment**, London. Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol II. 2013.

OPENENERGYMONITOR - **Explanation of the phase correction algorithm**,

Disponível em <<https://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/explanation-of-the-phase-correction-algorithm>>. Acesso em 13 jan 2017.

REIS, Lineu Belico dos. **Geração de Energia Elétrica**, 2.ed. ver e atual. Barueri, SP: Manole, 2011

ROBREDO, Gustavo A. Ruiz. **Electrónica Básica para Ingenieros**. 1.ed. Santander, Espanha, Facultad de Ciencias Universidad de Cantabria. 2001.

ROSA, Bruno. **Sistema Elétrico já opera perto do limite e pode voltar a falhar neste ano, dizem especialistas**. – O Globo, 2014. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/economia/sistema-eletrico-ja-opera-perto-do-limite-pode-voltar-falhar-neste-ano-dizem-especialistas-11506192>>. Acesso em: 29 maio 2015.

SHARP CORPORATION – **DIP 4pin General Purpose Photocoupler. PC817X Series**. - Japão, Osaka , setembro de 2003

TELLES, Dirceu DÁlkmin; NETTO João Mongelli, **Física com Aplicação Tecnológica – Eletrônica, Eletricidade, Eletromagnetismo e Fenômenos de Superfície**, 3.ed. São Paulo, Blucher, 2016. Cap. 9. Vol.3.

TIWARI, A. Kumar et al. **Automatic Power Factor Correction Using Capacitive Bank**, Bilaspur. Journal of Engineering Research and Applications. 2014.

APÊNDICE A

Demonstração do Triângulo de Potência

O triângulo de potências é um modelo simplificado que permite que se relacionem as potências aparente, ativa e reativa mediante aplicação das relações trigonométricas, sobretudo o Teorema de Pitágoras para seu cálculo.

Esta possibilidade decorre do seguinte:

Como extensão da Lei de Ohm $V = R.i$, temos:

$$V_r(t) = R.i(t),$$

$$V_l(t) = L.\frac{di(t)}{dt}$$

$$V_c(t) = \frac{1}{C} i(t)$$

assim,

$$V = R.i(t) + L.\frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} i(t)$$

$$V = V_r(t) + V_c(t) + V_l(t)$$

Em uma malha, em conformidade com as leis de Kirchhoff a soma algébrica de todas as diferenças de potencial dos componentes tem de ser nula.

Assim para uma malha fechada em que tenhamos uma fonte de tensão, um resistor, um capacitor e um indutor, o valor da somas das tensões das fontes e das quedas de potencial dos componentes deverá ser nulo.

$$R \cdot \frac{di(t)}{dt} - \frac{1}{C} i(t) + L \cdot \frac{d^2 i(t)}{dt^2} = 0$$

Para simplificação vamos adotar um circuito RL

$$v(t) = V_{ef} \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

Assumindo uma corrente

$$i(t) = I_{ef} \cdot \text{sen}(\omega t)$$

temos:

$$v(t) = V_{ef} \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) = R \cdot I_{ef} \cdot \text{sen}(\omega t) - \frac{1}{C} i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} [I_{ef} \cdot \text{sen}(\omega t)]$$

$$v(t) = V_{ef} \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) = R \cdot I_{ef} \cdot \text{sen}(\omega t) - \frac{1}{C} i(t) + L \cdot \omega \cdot [I_{ef} \cdot \text{sen}(\omega t)]$$

Utilizando a relação de soma de funções trigonométricas chegamos à expressão:

$$V_{ef} \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) = I_{ef} \cdot \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi)]$$

Sendo,

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$$

Para manter a igualdade:

$$V_{ef} \text{ deve ser } I_{ef} \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

Assim,

$$V_{ef} = I_{ef} \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

que é a extensão da Lei de Ohm para o circuito RL

Deduzimos, pois que a impedância

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

que no caso dos capacitores é

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_c)^2}$$

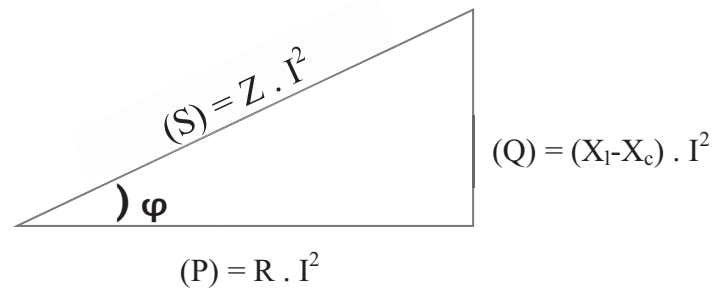
e para circuitos RLC chega-se à expressão geral para a impedância:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_l - X_c)^2}.$$

A relação pitagórica denota um triângulo de impedâncias. Multiplicando-se cada lado deste triângulo por I^2 chega-se ao triângulo de potências.

Figura 37: Relação

de impedâncias



S - Potência Aparente [W], P - potência Ativa [VA], Q - Potência Reativa [VAr]

APÊNDICE B

Figura 38: Circuito Analógico

