

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
DANIEL KRIESEL SPEROTTO**

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR DE FATOR DE
POTÊNCIA RESIDENCIAL MONOFÁSICO**

**CASCADEL
2018**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
DANIEL KRIESEL SPEROTTO**

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR DE FATOR DE
POTÊNCIA RESIDENCIAL MONOFÁSICO**

Projeto de pesquisa apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz para elaboração do Trabalho de Conclusão de Curso.

Professor Orientador: Ederson Zanchet

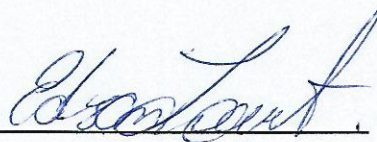
**CASCADEL
2018**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
DANIEL KRIESEL SPEROTTO**

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR DE FATOR DE
POTÊNCIA RESIDENCIAL MONOFÁSICO.**

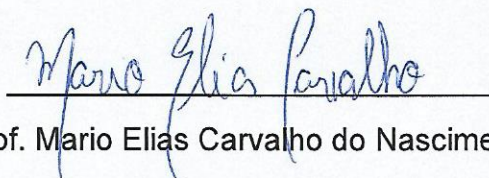
Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Elétrica, do Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, sob orientação do Professor Especialista Ederson Zanchet.

BANCA EXAMINADORA



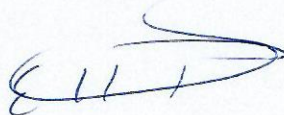
Prof. Esp. Ederson Zanchet

Centro Universitário Assis Gurgacz



Prof. Mario Elias Carvalho do Nascimento

Centro Universitário Assis Gurgacz



Prof. Ewerson Luiz Poisk

Centro Universitário Assis Gurgacz

Cascavel, 08 de dezembro de 2018.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, irmãos, esposa e a toda minha família que, com muito carinho, apoio e dedicação, não mediram esforços para me motivar a alcançar meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

A todos os Professores da instituição, com ênfase ao Prof. Esp. Ederson Zanchet pela orientação e grande desprendimento em ajudar.

Aos ilustres colegas de classe e de trabalho, pela paciência em ajudar e ensinar, e ao grande companheirismo e lealdade.

“O que pode ser medido, pode ser melhorado.”

Peter Drucker

RESUMO

A correção do fator de potência, é um assunto amplamente conhecido e aplicado com grande sucesso na indústria de consumidores do grupo A, portanto, e por que não aplicar os métodos de correção de fator de potência aos consumidores residenciais do grupo B? Pode-se levar em conta que a demanda residencial isolada não seja significativa, porem juntando-se todas as 60,7 milhões de residências do território brasileiro chega-se a uma demanda considerável. O desenvolvimento de um controlador de fator de potência protótipo, utilizando-se de tecnologia microcontrolada, específico para residência, se faz necessário considerando-se a característica das cargas residenciais que em sua grande maioria são monofásicas, diferentemente das indústrias onde praticamente predomina-se cargas trifásicas equilibradas. Assim sendo, o controle do fator de potência residencial deve ser realizado individualmente em cada fase, tendo-se assim um controle mais eficaz e eficiente. Este estudo desenvolve, portanto, um controlador de fator de potência protótipo microcontrolado, é aplicado à uma residência modelo para análise da viabilidade do mesmo.

Palavra-chave: Fator de potência residencial; Correção de Fator de potência; Tecnologia microcontrolada.

ABSTRACT

The power factor correction is a widely known and applied subject with great success in the industry consumers of group A, so why not apply the power factor correction methods to the residential consumers of group B? It can be taken into account that the isolated residential demand is not significant, but joining all the 60.7 million residences of the Brazilian territory comes to a considerable demand. The development of a prototype power factor controller, using microcontrolled technology, specific for residence, is necessary considering the characteristic of the residential loads, which are mostly single-phase, unlike the industries where practically loads are predominant balanced three-phase. Therefore, the control of the residential power factor must be performed individually in each phase, thus having a more effective and efficient control. This study therefore develops a microcontrolled prototype power factor controller, and applies to a model residence to analyze the feasibility of the same.

Keywords: Residential Power Factor; Power Factor Correction; microcontroller technology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Transformador de corrente SCT013.....	26
Figura 2.2 Sensor de tensão ZMPT101B	27
Figura 2.3 Amplificador operacional	27
Figura 2.4 <i>Arduino® Uno</i>	29
Figura 3.1 Fluxograma	31
Figura 3.2 Circuito sensor de tensão.....	32
Figura 3.3 Sinal de entrada e saída de tensão.....	33
Figura 3.4 Circuito sensor de corrente	34
Figura 3.5 Sinal de entrada e saída de corrente	34
Figura 3.6 Circuito somador	35
Figura 3.7 Circuito para tratamento dos sinais	36
Figura 3.8 Circuito de acionamento.....	36
Figura 3.9 Módulo de leitura e coleta de dados.....	37
Figura 3.10 Módulo de acionamento dos capacitores	38
Figura 3.11 Controlador de FP	38
Figura 3.12 Sinal de tensão.....	40
Figura 3.13 Sinal de corrente	41
Figura 3.14 Circuito acionamento residência modelo.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Características Elétricas de Equipamentos Residenciais.....	23
Tabela 3.1 Valores médios dos sinais.....	41
Tabela 3.2 Quadro de medidas.....	42
Tabela 3.3 Quadro de carga.....	43
Tabela 3.4 Cargas residenciais para residência modelo.....	44
Tabela 3.5 Cálculo do banco de capacitores.....	45
Tabela 3.6 Valores de corrente para residência modelo	47
Tabela 3.7 Valores de corrente média por fase.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico/digital
AOP	Amplificador operacional
C	Capacitância
I	Corrente
CA	Corrente alternada
CC	Corrente continua
$\Delta\theta$	Diferença angular
D/A	Digital/analógico
FP	Fator de potência
P	Potência
S	Potência Aparente
Q	Potência Reativa
CkVAr	Potência Reativa do banco de capacitor
Xc	Reatância capacitiva
Rms	<i>Root Mean Square</i> – Raiz média quadrática
V	Tensão
Vcc	Tensão em corrente continua

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	POTÊNCIA ELÉTRICA	15
2.1.1	Potência CA.....	15
2.1.2	Potência Reativa.....	17
2.1.3	Potência Aparente	17
2.1.4	Fator de Potência	17
2.1.5	Correção do Fator de Potência.....	18
2.2	COMPENSAÇÃO DO EXCEDENTE REATIVO INDUTIVO.....	19
2.2.1	Vantagens da Compensação do Excedente Reativo.....	21
2.2.2	Compensação Junto a Carga	21
2.2.3	Controlador de Fator de Potência, Banco de Capacitor Dinâmico	22
2.3	CARGA RESIDENCIAL	22
2.4	MEDIDOR DE FATOR DE POTÊNCIA.....	23
2.4.1	Fasímetro Monofásico	24
2.4.2	Medidas e Desvio	24
2.4.2.1	Medidas de Tendência Central.....	25
2.4.2.2	Medidas de Dispersão	25
2.4.3	Sensor de Corrente	26
2.4.4	Sensor de Tensão	26
2.4.5	Amplificadores Operacionais	27
2.4.6	Conversor A/D	28
2.4.7	Microcontroladores	28
2.4.8	Microcontrolador <i>Arduino</i> ®.....	29
2.5	VIABILIDADE DA COMPENSAÇÃO DO EXCEDENTE REATIVO RESIDENCIAL	30
3	METODOLOGIA	31
3.1	DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR DE FATOR DE POTÊNCIA.....	31
3.1.1	<i>Hardware</i>	32
3.1.1.1	Sinal de Tensão.....	32
3.1.1.2	Sinal de Corrente.....	33
3.1.1.3	Sinal Diferença	35
3.1.1.4	Circuito de Sinais Completo	35
3.1.1.5	Circuito de Cionamento	36
3.1.1.6	Desenvolvimento do Protótipo.....	37
3.1.2	<i>Software</i>	39
3.1.2.1	Processamento dos Sinais	39
3.2	AFERIÇÃO CALIBRAÇÃO	40
3.2.1	Sinais.....	40
3.2.2	Medida de FP	42
3.2.2.1	Resultados.....	42

3.3	LEVANTAMENTO DAS CARGAS RESIDENCIAIS	43
3.3.1	Residência Modelo	43
3.4	BANCO DE CAPACITORES	45
3.4.1	Dimensionamento do Banco.....	45
3.5	APLICAÇÃO DO CONTROLADOR EM LABORATÓRIO.....	46
3.5.1	Métodos de Teste.....	46
3.5.2	Coleta de Dados.....	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	48
5	CONCLUSÃO	50
6	REFERÊNCIAS	51
APÊNDICE A - TABELA 9B - POTÊNCIA MÉDIA DE APARELHOS RESIDENCIAIS E COMERCIAIS.....		53
APÊNDICE B – CIRCUITO COMPLETO DO CONTROLADOR DE FATOR DE POTÊNCIA RESIDENCIAL		55
APÊNDICE C – LISTA DE MATERIAIS E CUSTOS		56
APÊNDICE D – ALGORITMO COMPLETO DO CONTROLADOR DE FP		57
APÊNDICE E – ALGORITMO COMPLETO PARA RESIDÊNCIA MODELO .		89

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento expressivo na demanda no setor elétrico brasileiro, e vinculado com a escassez de recursos para geração, têm-se investido em tecnologia para utilizar de forma mais eficiente e eficaz os recursos já existentes. Um baixo fator de potência pode prejudicar as instalações elétricas, sobrecarregando os condutores, aumentando a queda de tensão na carga, causando sobrecarga em transformadores, tanto que para os consumidores do grupo A, é obrigatório a compensação do excedente reativo, devendo-se manter o fator de potência acima de 0,92 indutivo ou capacitivo.

Mesmo que para os consumidores de pequeno porte, do tipo residencial, ainda não seja exigida a correção do fator de potência, os novos modelos de medidores residenciais instalados já possuem a capacidade de mensurar a potência ativa e reativa. Tendo em vista a possibilidade de as concessionárias passarem a cobrar este excedente reativo, a correção do fator de potência residencial pode, então, tornar-se uma necessidade, não apenas para evitar multas, mas também para otimizar as instalações elétricas da própria residência, da rede de distribuição da concessionária local, e para o sistema elétrico nacional como um todo.

Os controladores de fator de potência vinculados a bancos de capacitores bem dimensionados, são as melhores opções para correção do excedente reativo indutivo nas indústrias, e podem vir a ser uma alternativa para as residências, assim se faz necessário o estudo e desenvolvimento de um controlador de fator de potência específico para residências.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica se dará através de conceitos sobre potência elétrica, fator de potência, vantagens e métodos da correção do excedente reativo indutivo, medidores de fator de potência (fasímetro), sensores de tensão e corrente, conversores analógico digitais e microcontroladores, buscando-se embase teórico para a realização do projeto.

2.1 POTÊNCIA ELÉTRICA

Cotrim (2003) nos diz que a potência pode ser definida como a taxa de variação da energia, conforme Equação 2.1.

$$P = dW/dt \quad \text{Equação 2.1}$$

Ainda seguindo o raciocínio de Cotrim (2003), onde considerando-se uma carga elétrica aplicada a uma tensão instantânea V , com uma corrente I , a potência P instantânea e absorvida pela carga, é definida pela Equação 2.2.

$$P = V \times I \quad \text{Equação 2.2}$$

A potência demonstrada na Equação 2.2 refere-se a circuitos em corrente contínua CC.

2.1.1 Potência CA

A potência média absorvida por circuitos em corrente alternada CA, determinada a partir de valores *rms* de tensão e corrente, pode ser determinada a partir da potência instantânea absorvida, sendo que o circuito possui uma tensão aplicada de $v = V_m \sin(\omega t + \theta)$, e uma corrente de entrada $i = I_m \sin(\omega t)$. Conforme Omalley (1993), a potência instantânea absorvida pelo circuito é expressa na Equação 2.3.

$$P = v i = V_m \sin(\omega t + \theta) \times I_m \sin(\omega t) \quad \text{Equação 2.3}$$

Simplificando através da identidade trigonométrica demonstrada na Equação 2.4.

$$\sin A \sin B = \frac{1}{2} [\cos(A - B) - \cos(A + B)] \quad \text{Equação 2.4}$$

E substituindo na Equação 2.3, $A = \omega t + \theta$ e $B = \omega t$, chega-se na Equação 2.5.

$$P = \frac{V_m I_m}{2 [\cos \theta - \cos(2\omega t + \theta)]} \quad \text{Equação 2.5}$$

Sendo a Equação 2.6.

$$\frac{V_m I_m}{2} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \times \frac{I_m}{\sqrt{2}} = VI \quad \text{Equação 2.6}$$

Substituindo a Equação 2.6 na Equação 2.5, a potência instantânea pode ser expressa como na Equação 2.7.

$$p = VI \cos \theta - VI \cos(2\omega t + \theta) \quad \text{Equação 2.7}$$

Sendo que o segundo termo senoidal possui um valor zero em um período, o primeiro termo é constante e deve ser a potência média absorvida, assim chega-se a Equação 2.8.

$$p = VI \cos \theta \quad \text{Equação 2.8}$$

Omalley (1993) nos lembra que o ângulo θ é o ângulo no qual a tensão está adiantada da corrente, tendo em vista que para um circuito puramente resistivo $\theta = 0^\circ$, puramente indutivo $\theta = 90^\circ$ e puramente capacitivo $\theta = -90^\circ$.

2.1.2 Potência Reativa

Seguindo o raciocínio de Omalley (1993) potência reativa (Q) tem como unidade de medida volt-ampère reativo (VAr) e é definida pela Equação 2.9 como.

$$Q = VI \sin \theta \quad \text{Equação 2.9}$$

Sendo θ , o ângulo no qual a tensão está adiantada da corrente. O termo $\sin \theta$ é denominado fator reativo, possuindo sinal negativo para cargas capacitivas, e sinal positivo para cargas indutivas (OMALLEY, 1993).

2.1.3 Potência Aparente

Como ilustrado por Cotrim (2003) na Equação 2.10 a potência aparente (S), que tem como unidade de medida volt-ampère (VA), é o resultado do produto da tensão pela corrente do circuito

$$S = VI^* \quad \text{Equação 2.10}$$

A potência aparente pode ser dividida em duas parcelas, potência ativa e reativa conforme a Equação 2.11.

$$S^* = P + jQ \quad \text{Equação 2.11}$$

Através da potência aparente ou da potência ativa e reativa, pode-se chegar ao fator de potência.

2.1.4 Fator de Potência

Mantendo-se no raciocínio de Cotrim (2003), o fator de potência pode ser determinado pela Equação 2.12.

$$FP = \cos \theta \quad \text{Equação 2.12}$$

Tendo em vista que θ , é o ângulo no qual a tensão está adiantada da corrente.

2.1.5 Correção do Fator de Potência

Conforme Edminister (1991) expõe que, em instalações comuns industriais e residenciais, as cargas apresentam características indutivas, onde a corrente está atrasada em relação a tensão aplicada. Neste caso mais comum de carga indutiva, normalmente é possível aumentar o fator de potência, colocando capacitores em paralelo com a carga, onde a potência ativa não se altera, porém com o adicional de carga capacitiva o fator de potência aumenta, a potência reativa indutiva diminui, trazendo assim o valor da potência aparente próxima do valor de potência ativa.

Creder (2006) nos apresenta a Equação 2.13 para o cálculo do banco de capacitor.

$$CkVAr = kW \times \Delta tg\theta \quad \text{Equação 2.13}$$

A diferença angular é determinada através do ângulo do fator de potência antigo e o desejado, conforme a Equação 2.14.

$$\Delta tg\theta = tg\theta_1 - tg\theta_2 \quad \text{Equação 2.14}$$

Sendo CkVAr a potência reativa que deve ser fornecida pelo banco de capacitor, kW o valor de potência ativa do circuito, e $\Delta tg\theta$ a diferença entre o ângulo θ_1 original do circuito, e o θ_2 o ângulo desejado. Assim pode-se chegar ao valor exato de potência reativa capacitiva que deve ser adicionada ao circuito, para que o fator de potência assuma os valores desejados.

Para calcular os capacitores Creder (2006), ilustra a Equação 2.15.

$$X_C = \frac{1000(kV)^2}{CkVAr} \quad \text{Equação 2.15}$$

Sendo X_c a reatância capacitiva em ohms, pode-se calcular o valor do capacitor pela Equação 2.16.

$$C = \frac{10^6}{2\pi f X_c} (\mu f) \quad \text{Equação 2.16}$$

Desta forma pode-se especificar o banco de capacitores e seus respectivos valores, para atender a determinada aplicação.

2.2 COMPENSAÇÃO DO EXCEDENTE REATIVO INDUTIVO

Na resolução normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, fica ressaltado que as atribuições da ANEEL consistem em regularizar e fiscalizar a geração, distribuição e comercialização de energia elétrica no país, levando em consideração a defesa do interesse do consumidor. Sendo a ANEEL responsável por conceder, permitir ou autorizar a instalação e serviços de energia, fiscalizando da prática das tarifas justas, e pelo zelo na qualidade do serviço, promovendo estímulos à competição entre as operadoras, assegurando que os serviços prestados sejam de abrangência universal, ou seja, que atendam a todos os consumidores (ANEEL, 2010).

Na seção IV da resolução normativa constam as devidas atribuições referente a Fator de Potência e Reativo Excedente.

Art. 95. O fator de potência de referência “fR”, indutivo ou capacitivo, tem como limite mínimo permitido, para as unidades consumidoras do grupo A, o valor de 0,92. (Redação dada pela REN ANEEL 569 de 23.07.2013).

Parágrafo único. Aos montantes de energia elétrica e demanda de potência reativos que excederem o limite permitido, aplicam-se as cobranças estabelecidas nos arts. 96 e 97, a serem adicionadas ao faturamento regular de unidades consumidoras do grupo A, incluídas aquelas que optarem por faturamento com aplicação da tarifa do grupo B nos termos do art. 100. (ANEEL, 2010, p.69)

No artigo 95 da resolução normativa fica claro que o fator de potência de referência, indutivo ou capacitivo, tem como limite mínimo permitido o valor de

0,92. Sendo aplicada cobrança estabelecidas nos artigos. 96 e 97, aos montantes que excederem o limite permitido.

Art. 96. Para unidade consumidora que possua equipamento de medição apropriado, incluída aquela cujo titular tenha celebrado o CUSD, os valores correspondentes à energia elétrica e demanda de potência reativas excedentes são apurados conforme as seguintes equações:
(ANEEL, 2010, p.70)

O artigo 96 apresenta a Equação 2.17.

$$E_{RE} = \sum_{T=1}^{n1} \left[EEAM_T \times \left(\frac{Fr}{Ft} - 1 \right) \right] \times VR_{ERE} \quad \text{Equação 2.17}$$

E a Equação 2.18.

$$D_{RE}(p) = \left[\text{MAX}_{T=1} \left(PAM_T \times \frac{Fr}{Ft} \right) - PAF(p) \right] \times VR_{DRE} \quad \text{Equação 2.18}$$

O artigo 97 apresenta as Equações 2.19 e 2.20, para as unidades consumidoras que não possuem o equipamento de medição para a aplicação das Equações 2.17 e 2.18.

Art. 97. Para unidade consumidora que não possua equipamento de medição que permita a aplicação das equações fixadas no art. 96, os valores correspondentes à energia elétrica e demanda de potência reativas excedentes são apurados conforme as seguintes equações:
(ANEEL, 2010, p.71)

Sendo a Equação 2.19 apresentada no artigo 97.

$$E_{RE} = EEAM \times \left(\frac{Fr}{Fm} - 1 \right) \times VR_{ERE} \quad \text{Equação 2.19}$$

Juntamente com a Equação 2.20, para as devidas cobranças.

$$D_{RE} = \left(PAM \times \frac{Fr}{Fm} - PAF \right) \times VR_{DRE} \quad \text{Equação 2.20}$$

Tais cobranças são adicionadas ao faturamento regular das unidades consumidoras do grupo A, incluídas aquelas que optarem por faturamento com aplicação da tarifa do grupo B (ANEEL, 2010).

2.2.1 Vantagens da Compensação do Excedente Reativo

Cotrim (2003) lista as principais vantagens da compensação do excedente reativo indutivo em uma instalação, de acordo com os itens de a até d:

- a) Diminuição na queda de tensão, otimizando o uso e funcionamento dos equipamentos, e da própria instalação.
- b) Liberação de capacidade no sistema, permitindo a ligação de cargas adicionais sem aumento de demanda.
- c) Diminuição nas perdas de energia pela direta redução de corrente de alimentação.
- d) Liberação da potência reativa dos geradores síncronos do sistema elétrico.

Creder (2006) afirma que para a compensação do excedente reativo indutivo, o ideal é a instalação de um capacitor junto a cada equipamento (carga), entretanto muitas vezes esta prática torna-se inviável, devendo-se adotar o uso de banco de capacitores na entrada da instalação.

2.2.2 Compensação Junto a Carga

Como salientado por Creder (2006), o ideal é a compensação do excedente reativo indutivo junto a carga, ficando a carga e o capacitor controlados pelo mesmo mecanismo de acionamento, devendo-se tomar cuidado com o emprego de capacitores junto a motores, em virtude de possibilidade de sobre tensões e de defeitos transitórios indesejáveis, além de que a corrente do capacitor não deve exceder a corrente de magnetização do motor a vazio.

Quando não é possível a compensação do excedente reativo junto a carga, adota-se o emprego de bancos de capacitor na entrada de serviço das instalações.

2.2.3 Controlador de Fator de Potência, Banco de Capacitor Dinâmico

Quando as instalações possuem equipamentos em que as potências absorvidas sejam extremamente variáveis, e determinadas variações acarretem valores de fator de potência indesejáveis, o emprego de compensação automática aplicada na entrada das instalações é justificado.

Um banco de capacitores automático ou um banco de capacitor dinâmico, é constituído por unidades que são ligadas e desligadas de acordo com a necessidade. Um controlador de fator de potência, tem a capacidade de mensurar o fator de potência, e adicionar e remover capacitores de acordo com a necessidade do sistema (COTRIM, 2003).

2.3 CARGA RESIDENCIAL

Cavalin (2005) salientam que o fator de potência residencial se apresenta de duas formas, onde circuitos puramente resistivos (lâmpadas incandescente, chuveiros, aquecedores, etc) apresentam um $FP = \cos\theta = 1,0$, e circuitos indutivos (motores, transformadores, reatores, etc) com $FP = \cos\theta < 1,0$. O fator de potência dos equipamentos residenciais varia de acordo com cada fabricante, e deve ser especificado no equipamento.

De acordo com Creder (2006), as tomadas de uso geral das instalações elétricas residenciais, devem ser previstas com fator de potência de 0,8 ainda na fase de projeto, obedecendo as prescrições da NBR 5410:2004, item 4.2.1.2.1.

4.2.1.2.1 Geral: a) a carga a considerar para um equipamento de utilização é a potência nominal por ele absorvida, dada pelo fabricante ou calculada a partir da tensão nominal, da corrente nominal e do fator de potência; b) nos casos em que for dada a potência nominal fornecida pelo equipamento (potência de saída), e não a absorvida, devem ser considerados o rendimento e o fator de potência.
(NBR 5410, 2004, p.13)

Rios e tal. (2014) apresenta uma planilha de levantamento de cargas residenciais, contendo as características elétricas de alguns típicos equipamentos residenciais, conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Características Elétricas de Equipamentos Residenciais

Equipamento	Tensão(V)	Potência(W)	FP
Chuveiro	127	4400	1,00
Computador	127	150	0,80
Geladeira	127	150	0,98
Lâmpada Fluorescente compacta	127	32	0,55
Lâmpada Fluorescente compacta	127	26	0,55
Máquina de Costura	127	300	0,60
Máquina de Lavar	127	1000	0,60
Micro-ondas	127	400	0,60
Secadora de Roupas	127	1000	0,80
Televisão de Led 32"	127	135	0,85
Televisão de LCD – 42"	127	150	0,85
Televisão de Led 32"	127	150	0,80

Fonte: RIOS et al. (2014)

A ND-5.1(2017), da CEMIG apresenta uma tabela com a potência média e consumo típicos de aparelhos residenciais e comerciais para utilização em cálculos de demanda. O APÊNDICE A contempla a tabela que apresenta a potência média das típicas cargas residenciais.

Para mensurar o real fator de potência de uma instalação residencial em pleno funcionamento, deve-se empregar o uso de um medidor de fator de potência.

2.4 MEDIDOR DE FATOR DE POTÊNCIA

Creder (2006) expõe dois métodos para obtenção do fator de potência, método direto e indireto. O método direto é realizado por um instrumento chamado co-seno- θ -metro, que mede diretamente o $\cos \theta$ em escala graduada (indutivo ou capacitivo). Já o método indireto pode ser realizado com um

wattímetro e um kVA-metro ou varmetro, tendo estes dados o fator de potência pode ser obtido pela Equação 2.21.

$$FP = \frac{kW}{kVA} \quad \text{Equação 2.21}$$

Ou pela Equação 2.22.

$$tg\theta = \frac{kVAr}{kW} \quad \text{Equação 2.22}$$

A grandeza elétrica chamada de fator de potência, é a defasagem entre a potência ativa e a potência aparente, esta defasagem aparece sempre que adicionado cargas indutivas e/ou capacitivas em circuitos AC, para medir esta defasagem pode-se utilizar de um instrumento específico, o fasímetro (PINTO, 2008).

2.4.1 Fasímetro monofásico

Um fasímetro monofásico é constituído por um jogo de bobinas fixas, e um sistema móvel com duas bobinas cruzadas, com eixos geométricos de 90° entre si. Sendo desta forma a bobina fixa é responsável por medir a corrente, pois é conectada em série com a carga. As bobinas móveis, responsáveis por medir a tensão são conectadas uma em série com um resistor, outra com um indutor. Assim o fasímetro tem capacidade de medir a defasagem da corrente em relação a tensão (PINTO, 2008).

O ângulo do fator de potência pode ser determinado a partir da defasagem entre a tensão e a corrente (COTRIM, 2003).

2.4.2 Medidas e Desvio

Como exposto por Balbinot (2010), independente do experimento em questão, em todos os processos de medições ocorrem variações, o que pode gerar incertezas quanto aos valores obtidos. Para tanto caracteriza-se os métodos para medidas e desvios.

2.4.2.1 Medidas de Tendência Central

Conforme descrito por Balbinot (2010) existem diferentes modelos de médias para cada fim específico, sendo as principais, média aritmética, mediana e moda, ficando conveniente uma previa avaliação de qual tipo utilizar para cada aplicação.

Seguindo a linha de pensamento de Balbinot (2010) a média é caracterizada pelo valor mais típico ou o valor mais esperado em uma seção de dados ou eventos, a Equação 2.23 apresenta a média aritmética(X) caracterizada pela soma de todos os valores(V) subtraído pelo número de valores(n)

$$X = \sum_{i=1}^n V_i / n \quad \text{Equação 2.23}$$

A mediana é representada pelo valor médio de um conjunto de dados ordenados por ordem de grandeza, sendo assim a média aritmética dos dois valores centrais. A moda pode ser definida com o valor que ocorre com mais frequência em um conjunto de dados (BALBINOT, 2010).

2.4.2.2 Medidas de Dispersão

Conforme Balbinot (2010), a medida de dispersão tem duas propriedades, sendo a primeira a variância (σ^2), definida pela Equação 2.24

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 / N \quad \text{Equação 2.24}$$

A segunda propriedade o desvio padrão (σ), é a raiz quadrada da variância, Equação 2.25

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 / N} \quad \text{Equação 2.25}$$

Onde os dados são representados por X , a média aritmética dos dados é representada por $\bar{X}$, e por fim N é o número de dados (BALBINOT, 2010).

2.4.3 Sensor de Corrente

Há várias formas de implementar um sensor para medir corrente elétrica, os melhores sensores são os que tem a melhor resposta em frequência e mínimo de deslocamento de fase. Os sensores de corrente mais comuns são os sensores resistivos, transformadores de corrente, magnetorresistivos, de efeito *Hall* e *CMOS* de campo. A Figura 2.1 exemplifica um transformador de corrente que é uma opção para trabalhar em corrente alternada, pois não apresenta perdas, e não necessita de fonte externa (BALBINOT, 2010).

Figura 2.1 Transformador de corrente SCT013



Fonte: Tectronics Comércio e Importação

O transformador de corrente SCT013 apresentado na Figura 2.1, denomina-se não invasivo por não se fazer necessário, a abertura do circuito a ser medido, facilitando a operação de obtenção do sinal de corrente.

2.4.4 Sensor de Tensão

Em sua grande maioria os sensores de tensão são do tipo divisor de tensão resistivo, onde é empregado o uso de resistores em série para que o nível de tensão seja reduzido para atender os medidores. O mesmo acontece para

com os transformadores de potencial, com a diferença de que o medidor fica isolado magneticamente do circuito a ser medido (BALBINOT, 2010).

A Figura 2.2 nos apresenta um sensor de tensão ZMPT101B, que trabalha com transformador de potencial, fazendo uma isolação magnética entre o circuito de potência a ser medido e o medidor.

Figura 2.2 Sensor de tensão ZMPT101B



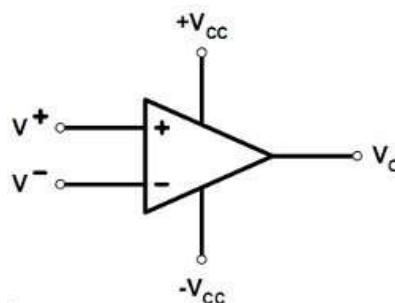
Fonte: QQ Online Trading

O sensor de tensão ZMPT101B apresentado na Figura 2.2, é uma opção para trabalhar o sinal de tensão com circuitos micro processados.

2.4.5 Amplificadores Operacionais

Omalley (1993) nos mostra que os amplificadores operacionais, também chamados de AOPs, são basicamente um amplificador de elevado ganho de tensão. A Figura 2.3 exemplifica o símbolo para um AOP, sendo os terminais identificados como, entrada não inversora (V^+), entrada inversora (V^-), terminal de saída (V_o) e fonte de alimentação ($+V_{cc}$ e $-V_{cc}$).

Figura 2.3 Amplificador Operacional



Fonte: Electronica PT

Os AOPs podem ser utilizados como conversores de sinais de tensão em corrente, conversores de corrente em tensão, geradores de varredura, comparadores, somadores, conversores A/D e D/A, etc. (OMALLEY, 1993).

2.4.6 Conversor A/D

Os conversores A/D (Analógico/Digital) são equipamentos que tem como função transformar valores de sinais analógicos em informações digitais, trabalham com velocidade de conversão seguindo a frequência de amostragem desejada, através de um oscilador (*clock*). As principais técnicas de conversão são a de integração e não integração, ambas as técnicas utilizam AOPs como comparador (BASTOS, 2000).

Após o tratamento e conversão dos sinais, pode-se ser empregado um micro controlador para fazer o processamento dos dados.

2.4.7 Microcontroladores

Gimenez (2002) salienta que antes de se iniciar um estudo detalhado sobre microcontroladores, deve-se ter alguns conceitos básicos fundamentais, dentre os quais destacam-se o *Bit*, que corresponde ao valor lógico zero (0) ou um (1), a representação numérica de 8 bits é chamada *Byte*, os registradores, que são formados por um conjunto de *flip-flop's* ligados em paralelo entre si, são responsáveis pelo armazenamento de uma informação, e apresentam memória volátil.

A instrução define uma única ação ou tarefa que o microcomputador deve executar por vez, o programa ou *software* é constituído por um conjunto de instruções definidas por um programador, para informar ao microcomputador quais tarefas devem ser executadas.

Micro controlador: dispositivo semiconductor em forma de CI, que integra todas as partes básicas de um microcomputador – microprocessador (CPU), memórias não-voláteis (ROM/ PROM/ EPROM/ EEPROM), memórias voláteis (RAM, SRAM, DRAM, *Flash* RAM), portas de entrada e saída (portas de comunicação paralela, portas de comunicação serias, conversores analógicos / digitais, conversores digitais / analógicos etc.). Ele é conhecido como computador implementado em um único CI. Geralmente, é limitado em

termos de quantidade de memória de dados, e é utilizado em aplicações específicas, [...]
(GIMENEZ, 2002, p. 4)

Há vários microcontroladores disponíveis no mercado, tendo-se a opção de escolher livremente o que melhor se aplica a necessidade. Uma opção muito popular é o *Arduino®*, devido a sua popularidade, versatilidade e programação baseada em C, de *software* livre.

2.4.8 Microcontrolador Arduino®

Existem no mercado uma serie de versões do *Arduino®*, sendo todas baseadas em um microprocessador de 8 bits *Atmel AVR reduced instructionset computer (RISC)*, as versões mais recentes do *Arduino® Uno* (modelo que pode vir a ser utilizado no estudo) usa o *ATmega328* com memória *flash* de 32 KB. Na Figura 2.4 pode-se observar a placa *Arduino® Uno*.

Figura 2.4 *Arduino® Uno*



Fonte: Arduino Store

O *software* (IDE) para o *Arduino®* é de código aberto e gratuito, disponível para *Windows*, *Mac OS X* e *Linux*.

2.5 VIABILIDADE DA COMPENSAÇÃO DO EXCEDENTE REATIVO RESIDENCIAL

Analisando-se os resultados obtidos por Rios e tal. (2014), percebe-se que a economia gerada com a compensação do excedente reativo indutivo em residências é bastante significativa, quando se considera todas as residências existentes no território Brasileiro.

Considerando que, com a correção do fator de potência, a corrente circulante em cada residência fosse reduzida na mesma proporção do caso estudado em 9,85%, em um universo de 60,7 milhões de ligações residenciais, seria obtida uma redução bastante expressiva das perdas joulicas no sistema (RIOS e tal., 2014, p. 10).

Rios e tal. (2014) chega e estimar um retorno para o investimento em torno de cinco meses após a instalação de sistemas de compensação de excedente reativo indutivo, e prevê uma redução na utilização das usinas termoelétricas.

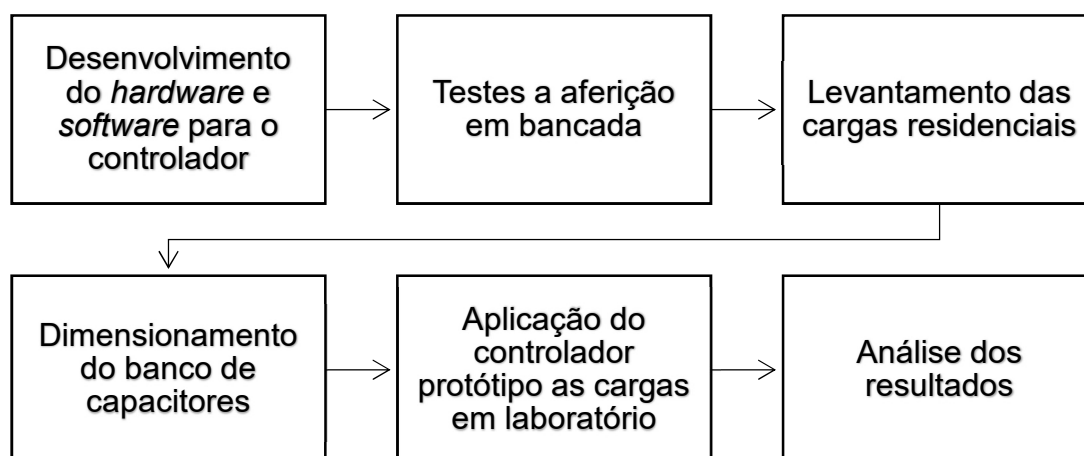
Além disso, haveria menor utilização das usinas termoelétricas de distribuição, o que traz como principais vantagens a menor poluição do meio ambiente e a redução de gastos para os cofres públicos, e, indiretamente, para a economia brasileira (RIOS e tal., 2014, p. 10).

Considerando-se todos estes fatores justifica-se a correção do fator de potência em residências.

3 METODOLOGIA

A fim de estruturar de forma a organizar o desenvolvimento do projeto, as etapas estão dispostas em um fluxograma conforme destacado na Figura 3.1.

Figura 3.1 Fluxograma



Fonte: Autor

As etapas consistem em desenvolvimento do circuito (*hardware*) e algoritmo (*software*) para o controlador assim como testes e aferição, com as etapas do controlador concluídas, deve-se fazer o levantamento das cargas para poder dimensionar o banco de capacitores, e então aplicar o controlador as cargas em laboratório e analisar os resultados.

3.1 DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR DE FATOR DE POTÊNCIA

Para o desenvolvimento desta etapa do projeto utilizou-se o software *Multisim* da *National Instruments* TM em versão gratuita, para realizar as simulações dos circuitos, para o *hardware* do controlador de FP, já para o desenvolvimento do algoritmo aderiu-se ao *software Arduino (IDE)* TM. Sendo assim as etapas do desenvolvimento estarão divididas entre *hardware* e *software*.

3.1.1 Hardware

O *hardware* para o controlador estará dividido entre coleta e fornecimento de dados ao *software*, e acionamento de cargas.

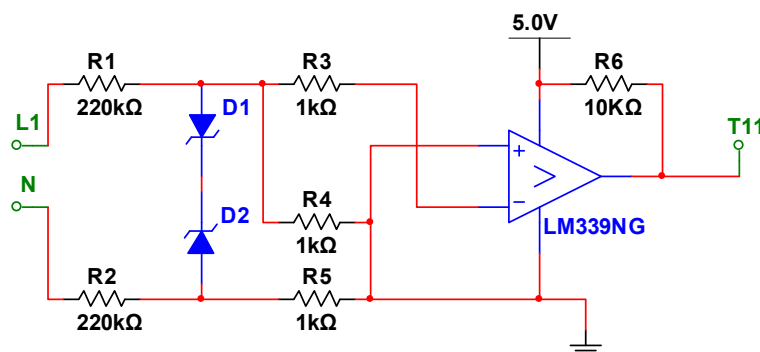
Serão fornecidos ao controlador, sinais de tensão, corrente e sinal diferença. O tratamento dos sinais será feito através do emprego de AOP, como comparadores para detecção de passagem por zero. Um terceiro AOP é empregado para fazer a soma dos sinais de corrente e tensão, gerando um sinal chamado diferença.

3.1.1.1 Sinal de Tensão

O circuito ilustrado na Figura 3.2 é responsável pelo tratamento do sinal de tensão, onde os terminais L1 (fase) e N (neutro) são ligados à rede. Os resistores R1 e R2 formam um divisor de tensão, permitindo que o circuito trabalhe ligado diretamente a rede. Os diodos *zener* (D1 e D2) fazem a proteção do circuito contra um surto indesejado de tensão.

No circuito do comparador os resistores R4 e R5 fornecem o zero para a porta positiva do AOP, e R3 fornece o sinal de tensão a porta negativa. Sempre que o sinal de tensão for maior que zero a saída do AOP fica saturada em 0Vcc, e conseqüentemente quando o sinal de tensão for menor que zero a saída fica em +5Vcc, isso ocorre devido ao modelo construtivo do circuito adotado.

Figura 3.2 Circuito sensor de tensão

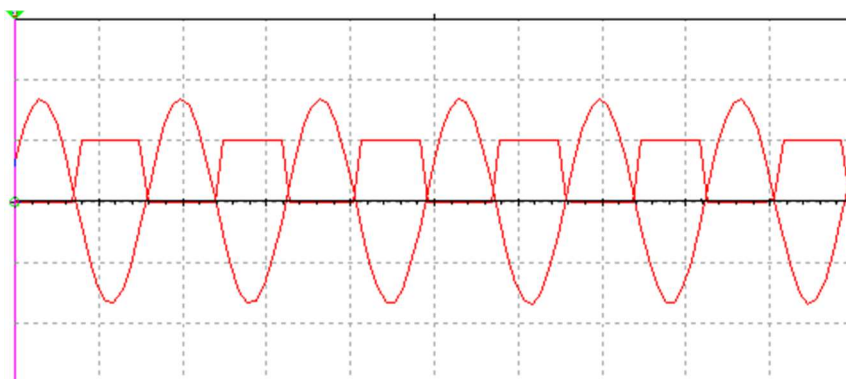


Fonte: Autor

Na Simulação do circuito com o auxílio do *software Multisim™*, pode-se chegar ao gráfico apresentado na Figura 3.3 onde observa-se o sinal senoidal

na entrada, e a onda quadrada formada na saída do AOP, nota-se que a saída fica saturada em +5Vcc nos semiciclos negativos do sinal senoidal.

Figura 3.3 Sinal de entrada e saída de tensão



Fonte: Autor

A onda quadrada formada na saída do AOP, será processada pelo micro controlador.

3.1.1.2 Sinal de Corrente

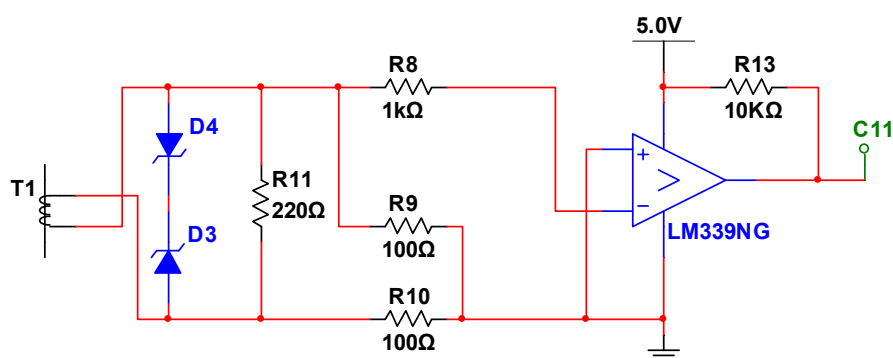
O circuito ilustrado na Figura 3.4 é responsável pelo tratamento do sinal de corrente, onde o transformador de corrente sct-013-000 (T1), está conectado a fase, no mesmo ponto onde está conectado o circuito do sensor de tensão. Os diodos zener (D3 e D4) fazem a proteção do circuito, o resistor R11 é chamado de resistor de carga, e conforme descrito no *datasheet* do transformador de corrente (SCT-013-000) para o cálculo do resistor de carga utiliza-se a Equação 3.23.

$$R_C = \frac{T.ref.}{\frac{Corrente\ maxima\ RMS \times \sqrt{2}}{N.sec.}} \quad \text{Equação 3.23}$$

Onde T.ref. é denominada tensão de referência, que utilizaremos 15 V, N.sec. é o número de voltas do secundário (2000 voltas), e a corrente máxima RMS é de 100 Amperes. O resistor de carga RC encontrado é de 212,1Ω, como este valor não é comercial será utilizado um resistor de 220Ω.

De forma análoga ao sensor de tensão, no circuito comparador os resistores R9 e R10 fornecem o zero para a porta positiva do AOP, e R8 fornece o sinal de tensão a porta negativa. Sempre que o sinal de tensão for maior que zero a saída do AOP fica saturada em 0Vcc, e consequentemente quando o sinal de tensão for menor que zero a saída fica em +5Vcc, isso ocorre devido ao modelo construtivo adotado para o circuito.

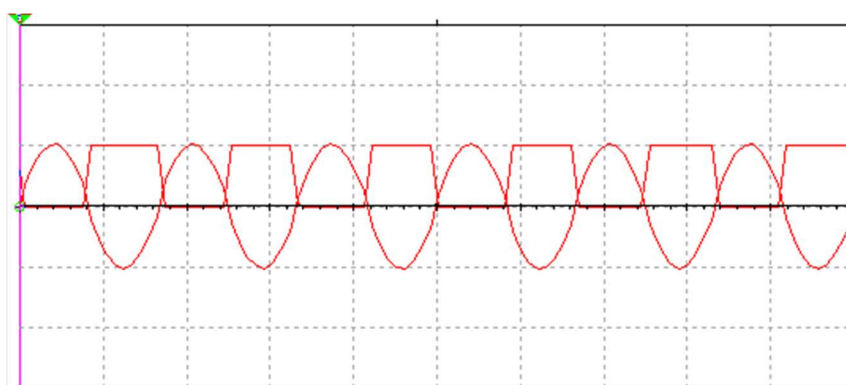
Figura 3.4 Circuito sensor de corrente



Fonte: Autor

Na Simulação do circuito com o auxílio do *software Multisim™*, pode-se chegar ao gráfico apresentado na Figura 3.5 onde observa-se o sinal senoidal na entrada do circuito ou saída do transformador de corrente, e a onda quadrada formada na saída do AOP, nota-se que a saída fica saturada em +5Vcc nos semiciclos negativos do sinal senoidal, de mesma forma que no circuito do sensor de tensão, apresentado anteriormente.

Figura 3.5 Sinal de entrada e saída de corrente.



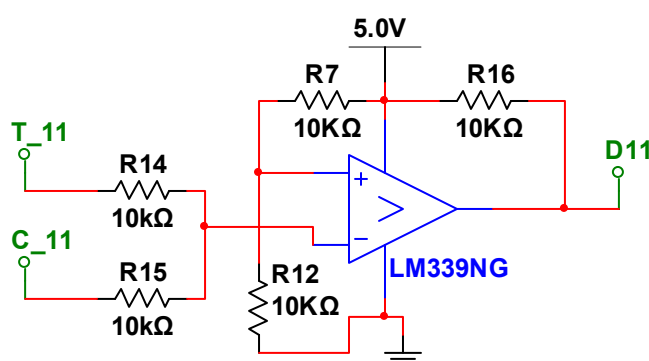
Fonte: Autor

A onda quadrada formada na saída do AOP, será processada pelo micro controlador e comparada com o sinal de tensão para determinar se o FP está indutivo ou capacitivo.

3.1.1.3 Sinal Diferença

Para o desenvolvimento do medidor se faz necessário realizar a soma dos sinais de tensão e corrente, para isso foi utilizado um terceiro AOP trabalhando como somador, o circuito pode ser observado na Figura 3.6.

Figura 3.6 Circuito somador



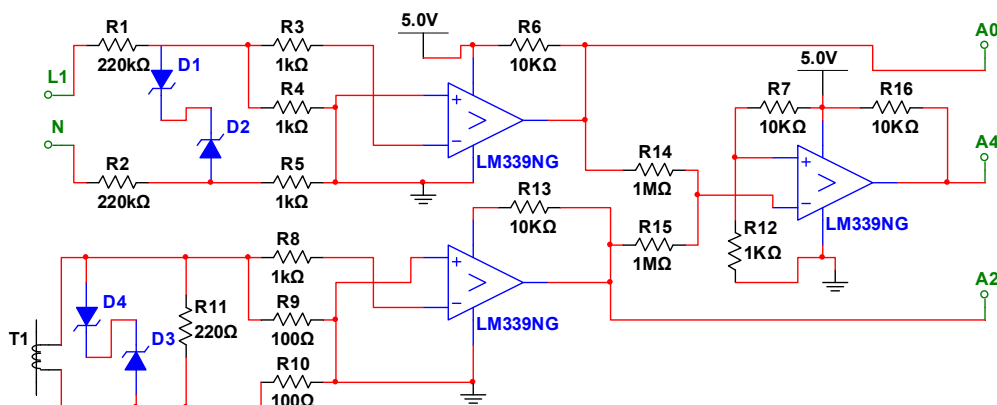
Fonte: Autor

Onde T11 e C11 são respectivamente os sinais de tensão e corrente, como resultado da subtração dos sinais, temos o sinal D11, que será utilizado no algoritmo para determinar o ângulo do fator de potência, ao ser confrontado com o sinal de tensão e corrente.

3.1.1.4 Circuito de Sinais Completo

O circuito completo para o tratamento dos sinais, pode ser observado na Figura 3.7, que se trata da junção dos circuitos exemplificados anteriormente nas Figuras 3.2, 3.4 e 3.6.

Figura 3.7 Circuito para tratamento dos sinais



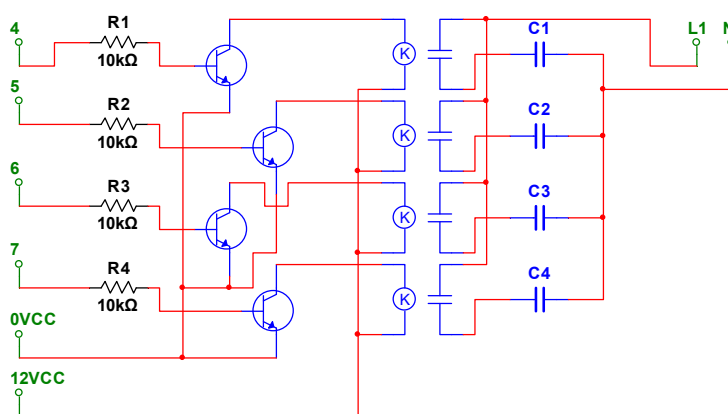
Fonte: Autor

Os terminais L1 e N são conectados diretamente a rede, assim como o transformador de corrente T1. Os terminais A0, A4, e A2 são ligados diretamente as entradas digitais do microcontrolador.

3.1.1.5 Circuito de Acionamento

De maneira simplificada o circuito de acionamento do banco de capacitores, representado na Figura 3.8, injeta as cargas capacitivas paralelamente ao circuito da residência, conforme o acionamento dos relés.

Figura 3.8 Circuito de acionamento



Fonte: Autor

Os terminais de 4 a 7 são as respectivas saídas digitais do microcontrolador, que acionam os relés através de transistores PNP (BD135).

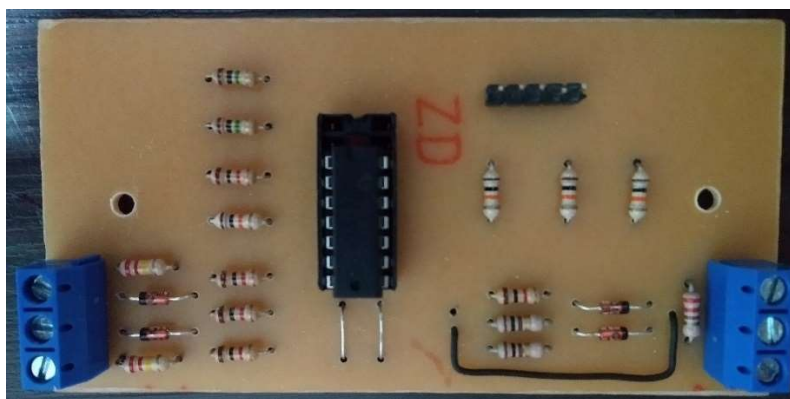
3.1.1.6 Desenvolvimento do Protótipo

Como o controlador de FP será desenvolvido para um sistema monofásico, com duas fases mais neutro, será necessário duplicar os circuitos de tratamento de sinais e acionamento de capacitores. Tendo-se assim um conjunto para cada fase, esperando-se ter uma leitura e um controle mais fino do FP.

O controlador será dividido entre quatro módulos, permitindo assim adicionar ou remover módulos, para adaptar o controlador a circuitos monofásicos ou trifásicos, sem a necessidade de trocar todo o controlador.

Sendo dois módulos para leitura e coleta de dados, contendo o circuito exposto pela Figura 3.7. A Figura 3.9 ilustra mais detalhadamente um destes módulos.

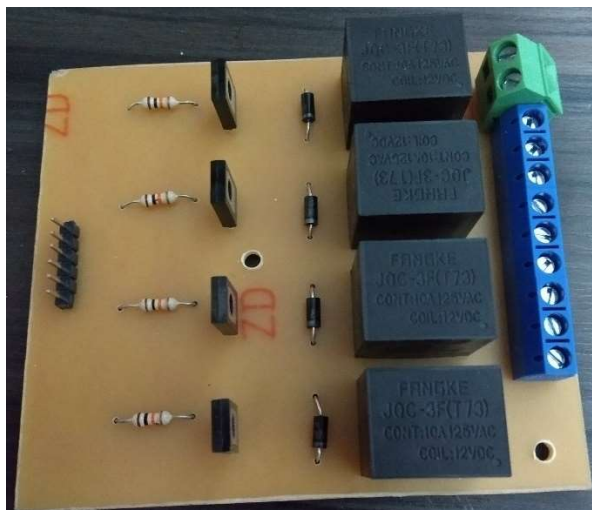
Figura 3.9 Módulo de leitura e coleta de dados



Fonte: Autor

Outros dois módulos para acionamento dos capacitores, contendo o circuito exposto na Figura 3.8. A Figura 3.10 ilustra mais detalhadamente um destes módulos.,

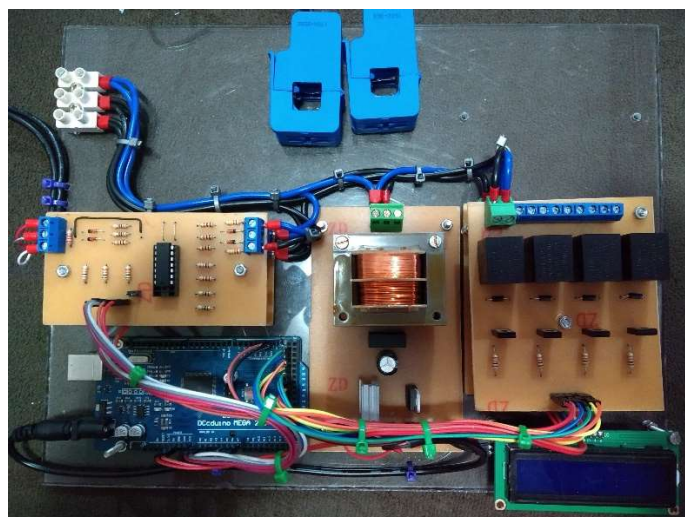
Figura 3.10 Módulo de acionamento dos capacitores



Fonte: Autor

Além destes quatro módulos, haverá o microcontrolador *Arduino® Mega 2560*, um *Display LCD 16x2* e uma fonte (12VCC e 5VCC). O protótipo estará montado em uma placa de acrílico com dimensões de 300 X 230 mm, como apresentado na Figura 3.11.

Figura 3.11 Controlador de FP



Fonte: Autor

Os capacitores serão instalados no controlador após o seu dimensionamento, levando-se em conta a demanda da residência a se corrigir o FP. Assim pode-se adaptar o controlador para diferentes modelos e demandas residenciais, apenas redimensionado os capacitores.

No APENDICE B encontra-se o circuito completo para o controlador de fator de potência residência, e APENDICE C a lista completa com os materiais e custos, para o desenvolvimento do controlador protótipo.

3.1.2 Software

O processamento dos sinais coletados e acionamento dos capacitores, será feito através do microcontrolador *Arduino® Mega 2560*, pelas facilidades de conexão e linguagem de programação simples, permitindo rápidas alterações e adaptações conforme o desenvolvimento de projeto.

O algoritmo está dividido em partes e comentado de acordo com a necessidade, facilitando o desenvolvimento e compreensão do mesmo.

3.1.2.1 Processamento dos Sinais

Os sinais são processados contando-se o tempo em que se permanece em nível alto (+5Vcc), ou nível baixo (0Vcc), através da função *pulseIn*. Cada sinal é coletado 20 vezes, dos quais são ignoradas as leituras inválidas, e realizada uma média aritmética, dos valores válidos.

Tendo-se a informação do tempo de duração de cada semiciclo, do sinal de tensão(T11) e corrente(C11), calcula-se o fator de potência comparando a duração do sinal diferença(D11) com os sinais de tensão e corrente. Assim encontra-se o tempo de defasagem entre a tensão e a corrente, para assim ser possível calcular o ângulo do FP.

Para determinar se o FP é capacitivo ou indutivo, o algoritmo compara os sinais de tensão(T11) e corrente(C11), através da função *lf*. Esta comparação é realizada no máximo dez vezes, após se não for obtido resultado, entende-se como FP resistivo ou indeterminado.

Após ser determinado o fator de potência atual do circuito o algoritmo compara o valor da leitura com o valor predeterminado (0,92), e define a necessidade de injetar ou extrair carga capacitiva do circuito, fazendo o controle das cargas capacitivas de forma linear.

O valor do fator de potência é apresentado para o usuário através do *Display LCD*, assim como mensagens de erro de leitura.

No APÊNDICE D observa-se o algoritmo completo do Controlador de Fator de Potência

No período de testes, para recolher os dados o microcontrolador estará conectado a um computador via comunicação serial através da porta USB, assim os dados serão apresentados pela ferramenta monitor serial disponível no *software IDE*.

3.2 AFERIÇÃO CALIBRAÇÃO

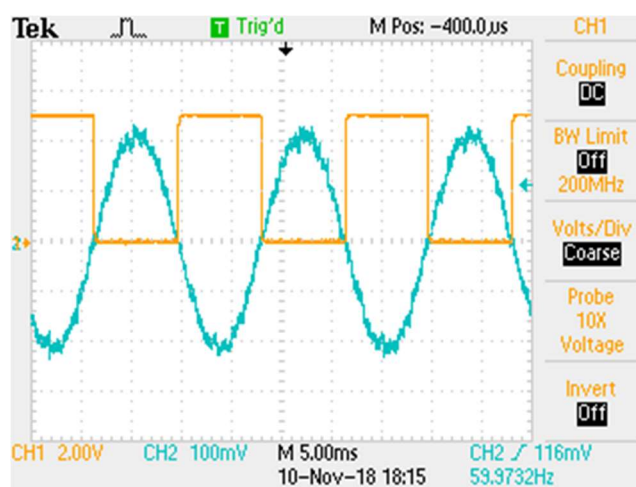
Aplicou-se o protótipo a testes em laboratório, para verificar se os sinais do *hardware* estão coerentes com a simulação, e se os valores de FP medidos e processados pelo *software* estão corretos, ou dentro de uma faixa de erro.

3.2.1 Sinais

Aplicando-se o controlador a uma carga resistiva genérica (lâmpada incandescente 40W), a fim de conseguir obter sinal de corrente, para assim medir os sinais com o auxílio do osciloscópio.

Na Figura 3.12 observa-se o sinal de tensão da entrada (azul) e saída (laranja) do circuito.

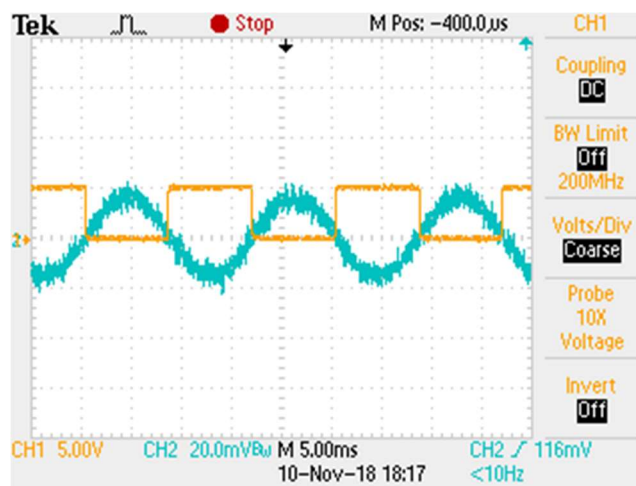
Figura 3.12 Sinal de tensão



Fonte: Autor

Na Figura 3.13 observa-se o sinal de corrente da entrada (azul) e saída (laranja) do circuito.

Figura 3.13 Sinal de corrente



Fonte: Autor

Observa-se um nível muito elevado de ruído no sinal de entrada de corrente, estima-se que tal nível de ruído seja caracterizado, pelo baixo nível de corrente exigida pela carga utilizada no teste.

Verificando-se o coerente funcionamento do *hardware*, o próximo passo é verificar as medidas realizadas pelo controlador. A Tabela 3.1 contempla os valores médios de cada sinal, assim como os valores de frequência e ângulo do fator de potência calculados.

Tabela 3.1 Valores médios dos sinais

Descrição	Medida	Ideal	Erro
Tm11	8255.20 microssegundos	8333.33 microssegundos	0,94%
Tm12	8253.50 microssegundos	8333.33 microssegundos	0,96%
Cm11	8235.00 microssegundos	8333.33 microssegundos	1,18%
Cm12	8249.37 microssegundos	8333.33 microssegundos	1,01%
Ângulo 11	18.14		
Ângulo 22	13.40		
F11	60.67 Hz	60.00Hz	1,12%
F12	60.78 Hz	60.00 Hz	1,30%

Fonte: Autor

Tendo-se em vista que o tempo de duração de cada ciclo, para uma frequência de 60Hz é de aproximadamente 16666,67 microssegundos, assim

sendo meio ciclo é aproximadamente 8333.33 microssegundos, observa-se que para os sinais de tensão e corrente (T_m e C_m) de ambas as fases os valores se aproximam do real com uma margem de erro média de 1,0%.

3.2.2 Medida de FP

Para aferir o controlador protótipo, ele será submetido a cargas definidas e comparando-se os resultados com o medidor *Power Logic PM3000 series - METSEPM3255*. Os testes serão realizados em uma bancada WEG™ para automação modelo bancada didática eletrotécnica industrial. As cargas serão divididas entre resistiva, indutiva e capacitiva.

Como carga resistiva será utilizado um ferro de passar roupa de 1200W, 220V, 60Hz. Para carga indutiva será utilizado um motor de indução monofásico 220/240V, 46/47W, 50/60Hz de dois polos, e por fim como carga capacitiva será utilizado um capacitor eletrolítico de partida não polarizado de $20\mu F \pm 10\%$, 250V.

3.2.2.1 Resultados

Os resultados dos testes estão expostos na Tabela 3.2, onde pode-se comparar a leitura do controlador protótipo com a leitura do Medidor *PM3000*.

Tabela 3.2 Quadro medidas

Fase L1	FP Medidor <i>PM3000</i>			FP Contro. Protótipo		
	Ângulo	FP		Ângulo	FP	
C. Resistiva	27,12	0,89	ind	12,10	0,97	ind
C. Indutiva	24,49	0,91	ind	41,62	0,74	ind
C. Capacitiva	78,46	0,20	cap	82,60	0,12	cap
Fase L2						
C. Resistiva	16,26	0,97	ind	18,20	0,94	ind
C. Indutiva	24,49	0,91	ind	35,93	0,81	ind
C. Capacitiva	78,46	0,20	cap	88,9	0,19	cap

Fonte: Autor

Verifica-se ao analisar a Tabela 3.2 que os valores dos ângulos de defasagem entre tensão e corrente medidos pelo controlador protótipo, encontram-se em divergência aos valores obtidos pelo Medidor *PM3000*. Porém

o controlador conseguiu identificar a natureza do FP, e chegar a um valor de ângulo aproximado do real.

Assim sendo justifica-se aplicar o controlador protótipo a cargas residenciais variáveis, para analisar os resultados a serem obtidos.

3.3 LEVANTAMENTO DAS CARGAS RESIDENCIAIS

O medidor será desenvolvido para uma residência alimentada por padrão de 63 Ampère monofásico com duas fases mais neutro. Para levantamento das cargas será admitida uma residência de 45 metros quadrados, com dois quartos, um banheiro, sala e cozinha conjugada, lavanderia e uma área para recreação com 15 metros quadrados. A Tabela 3.3 apresenta o quadro de carga típico para tal residência.

Tabela 3.3 Quadro de carga

Circuito	Descrição	Quant.	P. (VA)	P. Total (VA)	Tensão(V)
01	Iluminação	10	25	250	127
02	Tomadas sala banheiro e dormit.	6	200	1200	127
03	Tomadas cozinha	4	500	2000	127
04	Tomadas lavanderia	3	500	1500	127
05	Tomadas área de recreação	3	100	300	127
06	Tomada condicionador de ar	1	1500	1500	220
07	Chuveiro	1	7500	7500	220

Fonte: Autor

Para otimizar o estudo prático do controlador de FP, será utilizado uma residência modelo contendo as principais cargas residenciais detalhadas no APÊNDICE A, levando-se em conta o quadro de carga apresentado na Tabela 3.3.

3.3.1 Residência Modelo

Um microcontrolador será utilizado para controlar as cargas da residência modelo de forma aleatória, com a real intenção de simular o dia a dia de uma

residência. A Tabela 3.4 contempla as cargas utilizadas para a residência modelo.

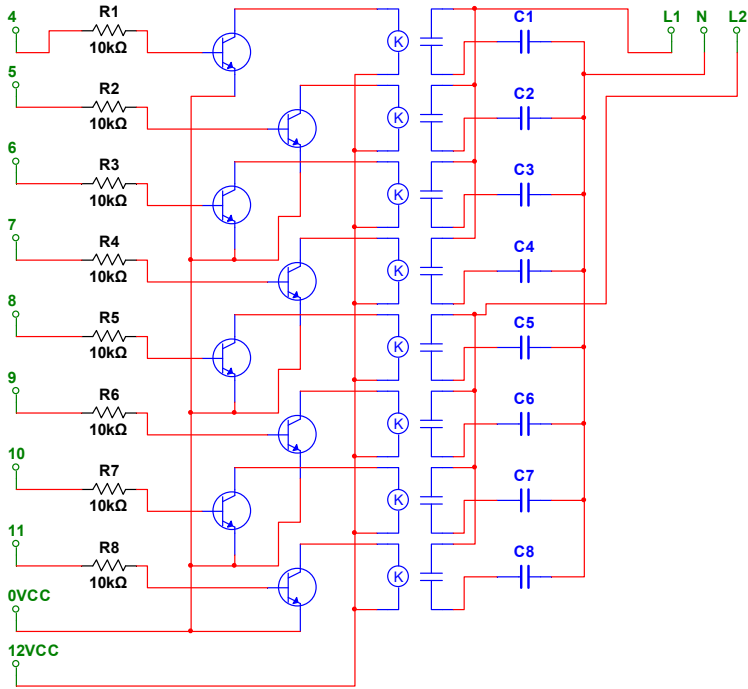
Tabela 3.4 Cargas residenciais para residência modelo

Carga	Descrição	Quant.	Potência (VA)	Tensão(V)
1 e 5	Lâmpada Fluorescente Compacta	1	25	127
2 e 6	Lâmpada LED	1	12	127
3 e 7	Fonte chaveada	1	190	127
4 e 8	Motor de indução monofásico	1	75	127
Total			302	

Fonte: Autor

O circuito para acionamento das cargas está descrito na Figura 3.14, onde as cargas (C) de 1 a 8 serão compostas pelas cargas residências destacadas na Tabela3.4 exposta anteriormente.

Figura 3.14 Circuito acionamento residência modelo



Fonte: Autor

O microcontrolador utilizado para a residência modelo será o *Arduino® Uno*, onde o algoritmo para simulação da residência apresentado no APENDICE

E, foi desenvolvido utilizando-se da função *random* (), para selecionar de forma aleatória quais cargas ligar ou desligar.

3.4 BANCO DE CAPACITORES

O protótipo fará uso de banco de capacitor dinâmico, podendo assim ser adaptado para atender a outros modelos de residência com cargas diferenciadas. De forma bem simplifica o funcionamento do banco de capacitores dinâmico, se dá através da inserção ou remoção de carga reativo capacitiva do circuito, de acordo com a necessidade, buscando-se manter o valor do FP dentro de limites pré-definidos.

3.4.1 Dimensionamento do Banco

Para o dimensionamento do banco de capacitores precisa-se da potência ativa média do circuito (Kw) assim como o ângulo do FP($tg\theta_1$) , que para cálculo será estimado em 0,8. O ângulo do FP($tg\theta_2$) desejado, que será de 0,92 (mínimo exigido pela ANELL para consumidores do grupo A). Assim aplicando-se os valores as Equações 2.14 e 2.13, obtemos a potência reativo indutiva ($CkVAr$). O próximo passo é calcular a reatância capacitiva (X_c) pela Equação 2.15, para assim através da Equação 2.16 calcular o valor da capacitância (C) necessária.

A Tabela 3.5 contempla os valores obtidos para a residência modelo, a qual o controlador protótipo será aplicado.

Tabela 3.5 Cálculo do banco de capacitores

Grandezas	Valores
P(kW)	0,302
Fp01	0,80
Fp02	0,92
$tg\theta_1$	0,748
$tg\theta_2$	0,424
$\Delta tg\theta$	0,323
$CkVAr(KVAr)$	0,097
$X_c(\Omega)$	166,28
$C(\mu f)$	15,95
Capacitores	4 x 3,98(μf)

Fonte: Autor

Por não haver capacitores comerciais com valores de $3,98\mu f$, adota-se capacitores eletrolíticos não polarizados de $4\mu f/250V$, facilmente encontrados no comercio.

3.5 APLICAÇÃO DO CONTROLADOR EM LABORATÓRIO

O controlador desenvolvido será aplicado a residência modelo em laboratório, com a intenção de otimizar o tempo de realização e obtenção dos resultados dos testes.

3.5.1 Métodos de Teste

A residência modelo será conectada à rede, estando os tc's e os sinais de tensão do controlador, conectados juntamente na entrada do circuito.

Como a residência modelo liga e desliga cargas aleatoriamente a cada 30 segundos, os dados serão coletados a cada 1 minuto, com exceção da primeira coleta que será realizada após 45 segundos de funcionamento. No total serão realizadas vinte amostras de corrente elétrica em cada fase.

3.5.2 Coleta de Dados

Os dados serão coletados medindo-se a corrente do circuito da residência modelo, em dois pontos, sendo eles antes e depois do banco de capacitores. Assim tem-se a leitura da corrente do circuito sem a correção do FP, e com a correção, para ambas as fases (L1 e L2).

A tabela 3.6 contempla os valores de corrente elétrica obtidos na aplicação do controlador de fator de potência protótipo a residência modelo.

Tabela 3.6 Valores de corrente para residência modelo

Amostras	Corrente elétrica com correção		Corrente elétrica sem correção	
	Fase A	Fase B	Fase A	Fase B
45s	0,46	0,26	0,44	0,26
1min 45s	0,70	0,74	0,60	0,25
2min 45s	0,66	0,26	0,60	0,25
3min 45s	0,55	0,16	0,58	0,16
4min 45s	0,47	0,19	0,42	0,20
5min 45s	0,45	0,16	0,44	0,16
6min 45s	0,46	0,17	0,41	0,17
7min 45s	0,22	0,59	0,18	0,57
8min 45s	0,18	0,91	0,20	0,59
9min 45s	0,57	0,32	0,49	0,36
10min 45s	0,90	0,25	0,59	0,22
11min 45s	0,89	0,67	0,48	0,68
12min 45s	0,78	0,25	0,58	0,18
13min 45s	1,05	0,43	0,50	0,31
14min 45s	0,60	0,05	0,50	0,01
15min 45s	0,52	0,37	0,47	0,31
16min 45s	0,53	0,23	0,50	0,19
17min 45s	0,98	0,62	0,47	0,59
18min 45s	0,54	0,67	0,48	0,47
19min 45s	0,89	0,68	0,25	0,56

Fonte: Autor

Os valores médios de corrente serão utilizados na análise de resultados, para verificar a viabilidade e eficácia do protótipo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Observa-se um aumento na corrente exigida pelas cargas residenciais após a correção do fator de potência, tal elevação fica mais evidente ao se observar a corrente média em cada fase, como exposto na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 Valores de corrente média por fase

	Corrente média sem correção	Corrente média com correção
Fase A	0,46 A	0,62 A
Fase B	0,32 A	0,39 A
Elevação Fase A		0,16 A
Elevação Fase B		0,07 A

Fonte: Autor

O controlador de fator de potência protótipo não se mostrou eficaz para a residência modelo, utilizada no estudo. Para o dimensionamento do banco de capacitores adotou-se um fator de potência médio de 0,8 para a residência modelo, durante o período de testes observa-se que o banco de capacitores foi sobre dimensionado, ou seja, o fator de potência médio da residência modelo utilizado para o cálculo se mostrou incorreto. Deve-se fazer um estudo mais aprimorado do real fator de potência residencial, antes de dimensionar o banco de capacitores.

Apesar do protótipo tentar corrigir o fator de potência da residência modelo, cada vez que era injetada carga ao circuito, o controlador adicionava uma carga capacitiva maior que o necessário, assim na próxima leitura a carga era retirada, assim o controle do fator de potência se demonstrou ineficiente.

4.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Aplicar o controlador de fator de potência protótipo a uma residência real, fazendo-se um estudo do fator de potência médio da residência antes de calcular o banco de capacitores. Para então aplicar o controlador protótipo, em período mensal ou semestral, e avaliar o consumo médio, afim de obter-se a comprovação da eficiência ou não da correção do fator de potência residencial.

Desenvolver um controlador de fator de potência dinâmico utilizando-se de gradadores para o controle linear da carga reativo capacitiva, variando seu valor, para buscar manter o fator de potência unitário. Tal medida de controle pode ser utilizada não apenas para as residências, podendo também ser utilizada em indústrias

A tecnologia microcontrolada permite ilimitadas possibilidades, uma abordagem diferente para os métodos utilizados com o protótipo pode se mostrar mais eficaz, trabalhando-se apenas em cima da programação.

5 CONCLUSÃO

Para realizar a correção do FP, antes de tudo precisa-se efetuar a leitura do mesmo, no decorrer do desenvolvimento do protótipo a correta leitura do FP se mostrou um grande desafio, tanto para o desenvolvimento do *hardware* como para o *software*, como pode ser observado durante o decorrer dos testes, apesar da correta identificação da natureza do ângulo, em estar atrasado ou adiantado, o valor do ângulo apresentou erro elevado.

Neste estudo, o desenvolvimento do controlador de fator de potência residencial, se mostrou inviável para o caso estudado, devido ao fato de que, ao invés de reduzir a corrente média exigida pelo circuito da residência, o mesmo acabou apresentando um aumento, contrariando outros estudos relacionados, onde a compensação do excedente reativo indutivo em residências havia se mostrado vantajoso.

Apesar do correto controle do FP, a carga reativo capacitiva adicionada ao circuito era superior às necessidades da residência modelo. Uma medida que pode ser adotada, como solução a este problema, é a de fracionar mais o banco de capacitores, aumentando-se assim o seu número e diminuindo seus respectivos valores, mas mantendo-se a potência reativo capacitiva total. Assim aumenta-se a quantidade de acionamentos disponíveis, para a realização do controle de FP.

Ao observar a lista de materiais no APÊNDICE B, observa-se um elevado custo para a construção do controlador protótipo, entretanto, deve-se levar em conta que todos os materiais foram adquiridos no comércio local, em pequenas quantidades. Para um possível desenvolvimento em série do controlador, uma pesquisa de preços e fornecedores mais elaborada pode reduzir o valor total do projeto.

Os desafios de planejamento e desenvolvimento do protótipo, trouxeram grande aprendizado, tanto na análise de circuitos, processamento de dados e desenvolvimento de *software*. Os conhecimentos adquiridos ao enfrentar tais desafios serão levados para a vida profissional, ajudando com soluções em meio as adversidades, e pressões do cotidiano.

6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 414**: Condições gerais de fornecimento de energia elétrica. Brasília: ANEEL, 2010.

ARDUINO STORE. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>>. Acesso em: 23 maio 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 209 p.

BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

BASTOS, Arilson. **Instrumentação Eletrônica Analógica e Digital Para Telecomunicações**. Rio de Janeiro: Gráfica Frense, 2002.

CAVALIN, Geraldo; CERVELIN, Severino. **Instalações Elétricas Prediais**. 12. ed. São Paulo: Érica Ltda., 2005.

COTRIM, Ademaro A. M. B. **Instalações Elétricas**. 4. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

CREDER, Hélio. **Instalações Elétricas**. 14. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

EDMINISTER, Joseph A.. **Circuitos Elétricos**. 13. ed. São Paulo: Makron Books, 1991.

ELECTRONICA PT. Disponível em: <<https://www.electronica-pt.com/amplificadores-operacionais-ampop>>. Acesso em: 21 maio 2018.

EVANS, Martin; NOBLE, Joshua; HOCHENBAUM, Jordan. **Arduino em Ação**. São Paulo: Novatec, 2013.

Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária-Rede de Distribuição Aérea Edificações Individuais, Norma de Distribuição, ND-5.1, Belo Horizonte, dezembro de 2017.

GIMENEZ, Salvador Pinillos. **Microcontroladores 8051**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2002.

KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos César Barioni de; ROBBA, Ernesto João. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2005.

O'MALLEY, John. **Análise de Circuitos**. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 1993.

PINTO, Luiz Antonio Vargas. **Instrumentos de Medidas Elétricas**, 2008.

QQ ONLINE TRADING. Disponível em: <<http://qqtrading.com.my/ac-voltage-sensor-module-zmpt101b-single-phase>>. Acesso em: 20 maio 2018.

RIOS, Frederico Santiago Romualdo et al. **O Fator de Potência em Unidades Consumidoras Residenciais**: e-xacta, Belo Horizonte, v. 7, n. 1, p.01-11, 31 maio 2014. Editora UniBH. Disponível em: www.unibh.br/revistas/exacta/

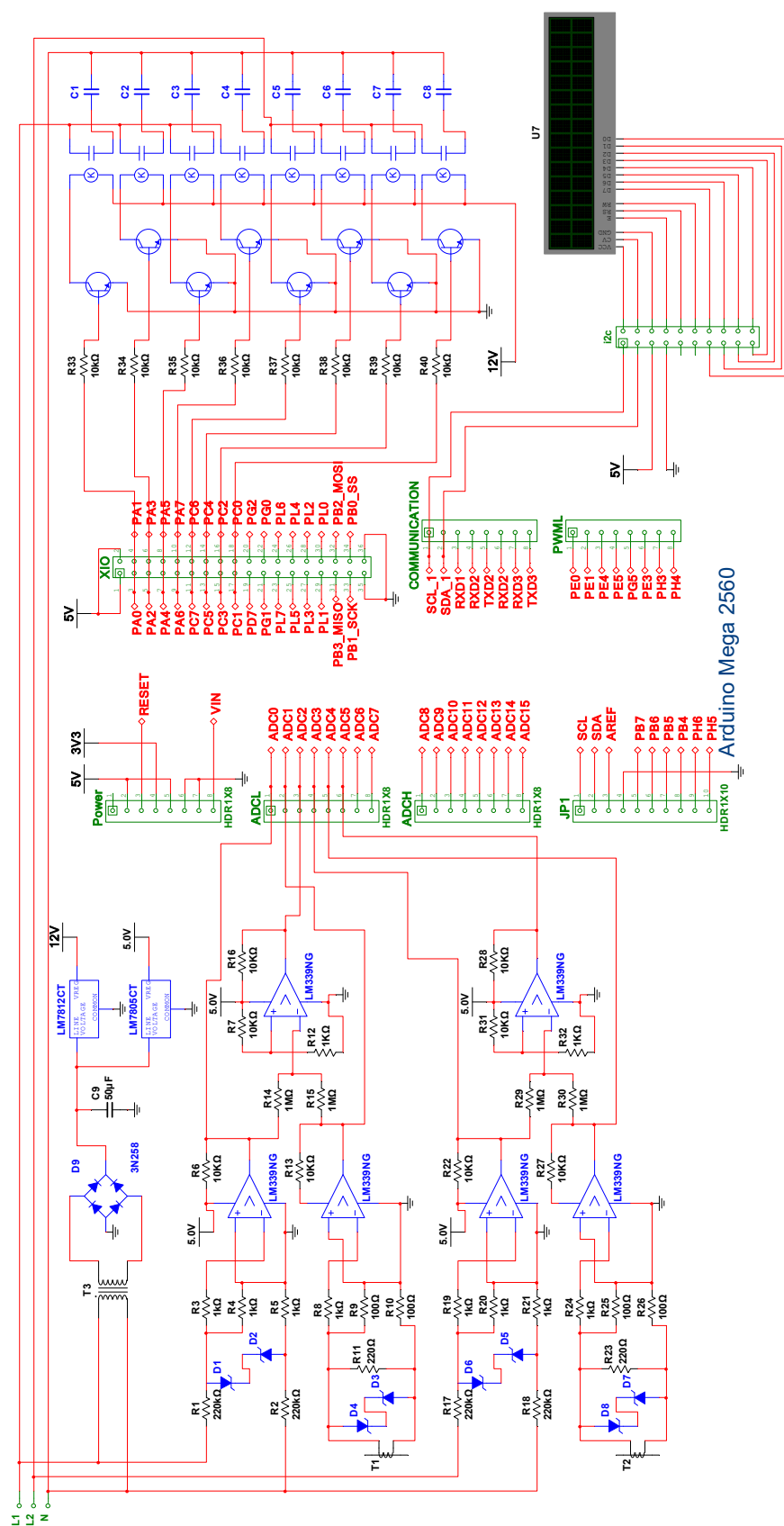
TECTRONICS COMÉRCIO E IMPORTAÇÃO. Disponível em: <<https://www.tecnotronics.com.br/sensor-de-corrente-nao-invasivo-100a-sct-013.html>>. Acesso em: 20 maio 2018.

**APÊNDICE A - TABELA 9B - POTÊNCIA MÉDIA DE APARELHOS
RESIDENCIAIS E COMERCIAIS**

Equipamento	Potência (w)
Aquecedor de água por acumulação até 80 L	1500
Aquecedor de água por acumulação de 100 a 150 L	2500
Aquecedor de água por acumulação de 200 a 400 L	4000
Aquecedor de água por tampa	6000
Aquecedor de ambiente	1000
Aspirador de pó residencial	600
Assadeira grande	1000
Assadeira pequena	500
Banheira de hidromassagem	6600
Batedeira de bolo	100
Bomba d'água 1/4 CV monofásica	390
Bomba d'água 1/3 CV monofásica	520
Bomba d'água 1/2 CV trifásica	570
Bomba d'água 3/4 CV trifásica	820
Bomba d'água 1 CV monofásica	1100
Cafeteira elétrica pequena, uso doméstico	600
Cafeteira elétrica uso comercial	1200
Chuveiro elétrico 127V	4400
Chuveiro elétrico 220V	6000
Chuveiro 4 estações	6500
Conjunto de som	100
Ebulidor	1000
Enceradeira residencial	300
Espremedor de frutas	200
Exaustor	150
Ferro elétrico automático de passar roupa	1000
Ferro elétrico simples de passar roupa	500
Fogão comum com acendedor	90
Fogão elétr. de 4 bocas potência por cada queimador	1500
Fogão elétr. de 6 bocas potência por cada queimador médio	2100
Fogão elétr. de 6 bocas potência por cada queimador grande	2700
Forno de micro-ondas	750
Forno elétrico de embutir	4500
Freezer vertical Pequeno	300
Freezer horizontal médio	400
Freezer horizontal grande	500
Geladeira comum	250
Geladeira duplex	300
Grill	1200
Impressora comum	90
Impressora laser	900
Impressora laser	200
Lâmpada Incandescente de 15W	15

Lâmpada Incandescente de 20W	20
Lâmpada Incandescente de 25W	25
Lâmpada Incandescente de 40W	40
Lâmpada Incandescente de 60W	60
Lâmpada Incandescente de 100W	100
Lâmpada Incandescente de 150W	150
Lâmpada Incandescente de 200W	200
Lâmpada Incandescente de 250W	150
Lâmpada Fluorescente de 20W	20
Lâmpada Fluorescente de 40W	40
Máquina de lavar louças	1500
Máquina de lavar roupas com aquecimento	1000
Máquina de secar roupas	3500
Máquina para costurar	100
Máquina de lavar pratos	1200
Máquina de lavar roupas	1500
Máquina de xerox grande	2000
Máquina de xerox pequena	1500
Microcomputador	250
Micro forno elétrico	1000
Panela elétrica	1200
Raio X (dentista)	1090
Raio X (hospital)	12100
Refletor odontológico	150
Sanduicheira	640
Sauna comercial	12000
Sauna residencial	4500
Scanner	50
Secador de cabelos grande	1250
Secador de cabelos pequeno	700
Secador de roupa comercial	5000
Secador de roupa residencial	1100
Televisor colorido	200
Televisor preto e branco	90
Torneira elétrica	2000
Vaporizador	300
Ventilador grande	250
Ventilador médio	200
Ventilador pequeno	70
Vídeo game	10

Fonte ND-5.1(2017).



APÊNDICE C –LISTA DE MATERIAIS E CUSTOS

Descrição	Unid.	Qtde.	Unitário(R\$)	Total(R\$)
Arduino Mega 2560 - Compatível	PÇ	1	66,99	66,99
Borne 3 polos - KF-301 3T	Pç	12	1,15	13,80
Capacitor 4uF/250VAC	Pç	8	3,50	28
C.I. LM339	Pç	2	0,99	1,98
Diodo zener 1N5240	Pç	8	0,12	0,96
Diodo 1N4007	Pç	8	0,09	0,72
Display LCD 16x2	Pç	1	9,35	9,35
Placa de fenolite virgem 10x20	Pç	2	5,40	10,80
Regulador de Tensão L7805	PÇ	1	1,75	1,75
Regulador de Tensão L7812	Pç	1	1,75	1,75
Resistor 1MΩ 1/4W	Pç	4	0,10	0,40
Resistor 220KΩ 1/4W	Pç	4	0,10	0,40
Resistor 10KΩ 1/4W	Pç	16	0,10	1,60
Resistor 1KΩ 1/4W	Pç	10	0,10	1,00
Resistor 220Ω 1/4W	Pç	2	0,10	0,20
Resistor 100Ω 1/4W	Pç	4	0,10	0,40
Relé 12V- 2 posições – 125V 10A	Pç	8	2,35	18,80
Transformador de corrente SCT013	Pç	2	44,97	89,94
Transistor PNP BD135	Pç	8	1,75	14
TOTAL				262,84

Fonte Autor.

APÊNDICE D – ALGORITMO COMPLETO DO CONTROLADOR DE FP

```

1.  /*
2.  CENTRO UNIVERSITÁRIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
3.
4.  Projeto: Controlador de fator de potência residencial monofásico
5.
6.  Professor Orientador: Ederson Zanchet
7.  Aluno: Daniel Kriesel Sperotto
8.  */
9.
10. #include <Wire.h>
11. #include <LiquidCrystal_I2C.h>
12. LiquidCrystal_I2C lcd (0x3f, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);
13.
14. int ecc1 = 0, ecc2 = 0, ecc3 = 0, ecc4 = 0, ecc5 = 0, ecc6 = 0, ecc7 =
    0, ecc8 = 0; //estados das saídas
15. int i = 0, d = 0, a, b, ai = 0, bi = 0; //variáveis de processo
16. int T11, T12, C11, C12;
17. const int cc1 = 22; //saídas
18. const int cc2 = 24; //saídas
19. const int cc3 = 26; //saídas
20. const int cc4 = 28; //saídas
21. const int cc5 = 30; //saídas
22. const int cc6 = 32; //saídas
23. const int cc7 = 34; //saídas
24. const int cc8 = 36; //saídas
25.
26. unsigned long t1, t2, t3, t4, t5, t6, t7, t8, t9, t10, t11, t12, t13, t14, t15,
    t16, t17, t18, t19, t20; //variável de leitura tensão
27. unsigned long c1, c2, c3, c4, c5, c6, c7, c8, c9, c10, c11, c12, c13,
    c14, c15, c16, c17, c18, c19, c20; //variável de leitura corrente
28. unsigned long d1, d2, d3, d4, d5, d6, d7, d8, d9, d10, d11, d12, d13,
    d14, d15, d16, d17, d18, d19, d20; //variável de leitura diferença

```

```
29. float n = 0;
30. float Tm11, Tm21, Cm11, Cm21, Dm11, Dm21, Fp11, f11;//variável de
    resultado
31. float Tm12, Tm22, Cm12, Cm22, Dm12, Dm22, Fp12, f12;//variável de
    resultado
32.
33. void setup () {
34.
35.     //entradas
36.     pinMode (7, INPUT);
37.     pinMode (6, INPUT);
38.     pinMode (5, INPUT);
39.     pinMode (4, INPUT);
40.     pinMode (3, INPUT);
41.     pinMode (2, INPUT);
42.
43.     //saídas
44.
45.     pinMode (cc1, OUTPUT);
46.     pinMode (cc2, OUTPUT);
47.     pinMode (cc3, OUTPUT);
48.     pinMode (cc4, OUTPUT);
49.     pinMode (cc5, OUTPUT);
50.     pinMode (cc6, OUTPUT);
51.     pinMode (cc7, OUTPUT);
52.     pinMode (cc8, OUTPUT);
53.
54.     digitalWrite (cc1, LOW);
55.     digitalWrite (cc2, LOW);
56.     digitalWrite (cc3, LOW);
57.     digitalWrite (cc4, LOW);
58.     digitalWrite (cc5, LOW);
59.     digitalWrite (cc6, LOW);
60.     digitalWrite (cc7, LOW);
```

```
61.     digitalWrite (cc8, LOW);
62.
63.     lcd. Begin (16, 2);
64.     lcd. setBacklight (HIGH);
65.     lcd. setCursor(0, 0);
66.     lcd.print("Controlador");
67.     lcd. setCursor (0, 1);
68.     lcd.print ("Protótipo 1.0");
69.
70.     Serial.begin(9600);
71.
72.     delay (2000);
73. }
74.
75. void loop () {
76.
77.     Tm11 = 0;
78.     Tm21 = 0;
79.
80.     Cm11 = 0;
81.     Cm21 = 0;
82.
83.     Dm11 = 0;
84.     Dm21 = 0;
85.
86.     //tensão
87.
88.     t1 = pulseIn (7, HIGH);
89.     t2 = pulseIn (7, HIGH);
90.     t3 = pulseIn (7, HIGH);
91.     t4 = pulseIn (7, HIGH);
92.     t5 = pulseIn (7, HIGH);
93.     t6 = pulseIn (7, LOW);
94.     t7 = pulseIn (7, LOW);
```

```
95.     t8 = pulseIn (7, LOW);
96.     t9 = pulseIn (7, LOW);
97.     t10 = pulseIn (7, LOW);
98.     t11 = pulseIn (7, HIGH);
99.     t12 = pulseIn (7, HIGH);
100.    t13 = pulseIn (7, HIGH);
101.    t14 = pulseIn (7, HIGH);
102.    t15 = pulseIn (7, HIGH);
103.    t16 = pulseIn (7, LOW);
104.    t17 = pulseIn (7, LOW);
105.    t18 = pulseIn (7, LOW);
106.    t19 = pulseIn (7, LOW);
107.    t20 = pulseIn (7, LOW);
108.
109.    Tm11 = ((t1 + t2 + t3 + t4 + t5 + t6 + t7 + t8 + t9 + t10 + t11 + t12 +
t13 + t14 + t15 + t16 + t17 + t18 + t19 + t20) / 20);
110.    n = 0;
111.    Tm21 = 0;
112.    if (t1 >= Tm11) {
113.        Tm21 = Tm21 + t1;
114.        n = n + 1;
115.    }
116.    if (t2 >= Tm11) {
117.        Tm21 = Tm21 + t2;
118.        n = n + 1;
119.    }
120.    if (t3 >= Tm11) {
121.        Tm21 = Tm21 + t3;
122.        n = n + 1;
123.    }
124.    if (t4 >= Tm11) {
125.        Tm21 = Tm21 + t4;
126.        n = n + 1;
127.    }
```

```
128.  if (t5 >= Tm11) {
129.      Tm21 = Tm21 + t5;
130.      n = n + 1;
131.  }
132.  if (t6 >= Tm11) {
133.      Tm21 = Tm21 + t6;
134.      n = n + 1;
135.  }
136.  if (t7 >= Tm11) {
137.      Tm21 = Tm21 + t7;
138.      n = n + 1;
139.  }
140.  if (t8 >= Tm11) {
141.      Tm21 = Tm21 + t8;
142.      n = n + 1;
143.  }
144.  if (t9 >= Tm11) {
145.      Tm21 = Tm21 + t9;
146.      n = n + 1;
147.  }
148.  if (t10 >= Tm11) {
149.      Tm21 = Tm21 + t10;
150.      n = n + 1;
151.  }
152.  if (t11 >= Tm11) {
153.      Tm21 = Tm21 + t11;
154.      n = n + 1;
155.  }
156.  if (t12 >= Tm11) {
157.      Tm21 = Tm21 + t12;
158.      n = n + 1;
159.  }
160.  if (t13 >= Tm11) {
161.      Tm21 = Tm21 + t13;
```

```
162.     n = n + 1;
163. }
164. if (t14 >= Tm11) {
165.     Tm21 = Tm21 + t14;
166.     n = n + 1;
167. }
168. if (t15 >= Tm11) {
169.     Tm21 = Tm21 + t15;
170.     n = n + 1;
171. }
172. if (t16 >= Tm11) {
173.     Tm21 = Tm21 + t16;
174.     n = n + 1;
175. }
176. if (t17 >= Tm11) {
177.     Tm21 = Tm21 + t17;
178.     n = n + 1;
179. }
180. if (t18 >= Tm11) {
181.     Tm21 = Tm21 + t18;
182.     n = n + 1;
183. }
184. if (t9 >= Tm11) {
185.     Tm21 = Tm21 + t9;
186.     n = n + 1;
187. }
188. if (t20 >= Tm11) {
189.     Tm21 = Tm21 + t20;
190.     n = n + 1;
191. }
192. Tm21 = (Tm21 / n);
193.
194. // corrente
195.
```

```

196.    c1 = pulseIn (6, HIGH);
197.    c2 = pulseIn (6, HIGH);
198.    c3 = pulseIn (6, HIGH);
199.    c4 = pulseIn (6, HIGH);
200.    c5 = pulseIn (6, HIGH);
201.    c6 = pulseIn (6, LOW);
202.    c7 = pulseIn (6, LOW);
203.    c8 = pulseIn (6, LOW);
204.    c9 = pulseIn (6, LOW);
205.    c10 = pulseIn (6, LOW);
206.    c11 = pulseIn (6, HIGH);
207.    c12 = pulseIn (6, HIGH);
208.    c13 = pulseIn (6, HIGH);
209.    c14 = pulseIn (6, HIGH);
210.    c15 = pulseIn (6, HIGH);
211.    c16 = pulseIn (6, LOW);
212.    c17 = pulseIn (6, LOW);
213.    c18 = pulseIn (6, LOW);
214.    c19 = pulseIn (6, LOW);
215.    c20 = pulseIn (6, LOW);
216.
217.    Cm11 = ((c1 + c2 + c3 + c4 + c5 + c6 + c7 + c8 + c9 + c10 + c11 +
c12 + c13 + c14 + c15 + c16 + c17 + c18 + c19 + c20) / 20);
218.    n = 0;
219.
220.    Cm21 = 0;
221.
222.    if (c1 >= Cm11) {
223.        Cm21 = Cm21 + c1;
224.        n = n + 1;
225.    }
226.    if (c2 >= Cm11) {
227.        Cm21 = Cm21 + c2;
228.        n = n + 1;

```

```
229.  }
230.  if (c3 >= Cm11) {
231.      Cm21 = Cm21 + c3;
232.      n = n + 1;
233.  }
234.  if (c4 >= Cm11) {
235.      Cm21 = Cm21 + c4;
236.      n = n + 1;
237.  }
238.  if (c5 >= Cm11) {
239.      Cm21 = Cm21 + c5;
240.      n = n + 1;
241.  }
242.  if (c6 >= Cm11) {
243.      Cm21 = Cm21 + c6;
244.      n = n + 1;
245.  }
246.  if (c7 >= Cm11) {
247.      Cm21 = Cm21 + c7;
248.      n = n + 1;
249.  }
250.  if (c8 >= Cm11) {
251.      Cm21 = Cm21 + c8;
252.      n = n + 1;
253.  }
254.  if (c9 >= Cm11) {
255.      Cm21 = Cm21 + c9;
256.      n = n + 1;
257.  }
258.  if (c10 >= Cm11) {
259.      Cm21 = Cm21 + c10;
260.      n = n + 1;
261.  }
262.  if (c11 >= Cm11) {
```



```
263.     Cm21 = Cm21 + c11;
264.     n = n + 1;
265. }
266. if (c12 >= Cm11) {
267.     Cm21 = Cm21 + c12;
268.     n = n + 1;
269. }
270. if (c13 >= Cm11) {
271.     Cm21 = Cm21 + c13;
272.     n = n + 1;
273. }
274. if (c14 >= Cm11) {
275.     Cm21 = Cm21 + c14;
276.     n = n + 1;
277. }
278. if (c15 >= Cm11) {
279.     Cm21 = Cm21 + c15;
280.     n = n + 1;
281. }
282. if (c16 >= Cm11) {
283.     Cm21 = Cm21 + c16;
284.     n = n + 1;
285. }
286. if (c17 >= Cm11) {
287.     Cm21 = Cm21 + c17;
288.     n = n + 1;
289. }
290. if (c18 >= Cm11) {
291.     Cm21 = Cm21 + c18;
292.     n = n + 1;
293. }
294. if (c19 >= Cm11) {
295.     Cm21 = Cm21 + c19;
296.     n = n + 1;
```

```

297.     }
298.     if (c20 >= Cm11) {
299.         Cm21 = Cm21 + c20;
300.         n = n + 1;
301.     }
302.
303.     Cm21 = Cm21 / n;
304.
305.     // diferença
306.
307.     d1 = pulseIn (5, LOW);
308.     d2 = pulseIn (5, LOW);
309.     d3 = pulseIn (5, LOW);
310.     d4 = pulseIn (5, LOW);
311.     d5 = pulseIn (5, LOW);
312.     d6 = pulseIn (5, LOW);
313.     d7 = pulseIn (5, LOW);
314.     d8 = pulseIn (5, LOW);
315.     d9 = pulseIn (5, LOW);
316.     d10 = pulseIn (5, LOW);
317.     d11 = pulseIn (5, LOW);
318.     d12 = pulseIn (5, LOW);
319.     d13 = pulseIn (5, LOW);
320.     d14 = pulseIn (5, LOW);
321.     d15 = pulseIn (5, LOW);
322.     d16 = pulseIn (5, LOW);
323.     d17 = pulseIn (5, LOW);
324.     d18 = pulseIn (5, LOW);
325.     d19 = pulseIn (5, LOW);
326.     d20 = pulseIn (5, LOW);
327.
328.     Dm11 = ((d1 + d2 + d3 + d4 + d5 + d6 + d7 + d8 + d9 + d10 + d11 +
d12 + d13 + d14 + d15 + d16 + d17 + d18 + d19 + d20) / 20);
329.

```

```
330.    n = 0;
331.
332.    Dm21 = 0;
333.
334.    if (d1 >= Dm11) {
335.        Dm21 = Dm21 + d1;
336.        n = n + 1;
337.    }
338.    if (d2 >= Dm11) {
339.        Dm21 = Dm21 + d2;
340.        n = n + 1;
341.    }
342.    if (d3 >= Dm11) {
343.        Dm21 = Dm21 + d3;
344.        n = n + 1;
345.    }
346.    if (d4 >= Dm11) {
347.        Dm21 = Dm21 + d4;
348.        n = n + 1;
349.    }
350.    if (d5 >= Dm11) {
351.        Dm21 = Dm21 + d5;
352.        n = n + 1;
353.    }
354.    if (d6 >= Dm11) {
355.        Dm21 = Dm21 + d6;
356.        n = n + 1;
357.    }
358.    if (d7 >= Dm11) {
359.        Dm21 = Dm21 + d7;
360.        n = n + 1;
361.    }
362.    if (d8 >= Dm11) {
363.        Dm21 = Dm21 + d8;
```

```
364.     n = n + 1;
365. }
366. if (d9 >= Dm11) {
367.     Dm21 = Dm21 + d9;
368.     n = n + 1;
369. }
370. if (d10 >= Dm11) {
371.     Dm21 = Dm21 + d10;
372.     n = n + 1;
373. }
374. if (d11 >= Dm11) {
375.     Dm21 = Dm21 + d11;
376.     n = n + 1;
377. }
378. if (d12 >= Dm11) {
379.     Dm21 = Dm21 + d12;
380.     n = n + 1;
381. }
382. if (d13 >= Dm11) {
383.     Dm21 = Dm21 + d13;
384.     n = n + 1;
385. }
386. if (d14 >= Dm11) {
387.     Dm21 = Dm21 + d14;
388.     n = n + 1;
389. }
390. if (d15 >= Dm11) {
391.     Dm21 = Dm21 + d15;
392.     n = n + 1;
393. }
394. if (d16 >= Dm11) {
395.     Dm21 = Dm21 + d16;
396.     n = n + 1;
397. }
```

```

398.  if (d17 >= Dm11) {
399.      Dm21 = Dm21 + d17;
400.      n = n + 1;
401.  }
402.  if (d18 >= Dm11) {
403.      Dm21 = Dm21 + d18;
404.      n = n + 1;
405.  }
406.  if (d19 >= Dm11) {
407.      Dm21 = Dm21 + d19;
408.      n = n + 1;
409.  }
410.  if (d20 >= Dm11) {
411.      Dm21 = Dm21 + d20;
412.      n = n + 1;
413.  }
414.  Dm21 = ((Dm21 / n) - Tm21);
415.
416.  Fp11 = ((Dm21 * 360) / 16666);
417.
418.  f11 = (1000000 / (Tm21 * 2));
419.
420.  Tm12 = 0;
421.  Tm22 = 0;
422.
423.  Cm12 = 0;
424.  Cm22 = 0;
425.
426.  Dm12 = 0;
427.  Dm22 = 0;
428.
429.  //tensão
430.
431.  t1 = pulseln (4, HIGH);

```

```

432.    t2 = pulseIn (4, HIGH);
433.    t3 = pulseIn (4, HIGH);
434.    t4 = pulseIn (4, HIGH);
435.    t5 = pulseIn (4, HIGH);
436.    t6 = pulseIn (4, LOW);
437.    t7 = pulseIn (4, LOW);
438.    t8 = pulseIn (4, LOW);
439.    t9 = pulseIn (4, LOW);
440.    t10 = pulseIn (4, LOW);
441.    t11 = pulseIn (4, HIGH);
442.    t12 = pulseIn (4, HIGH);
443.    t13 = pulseIn (4, HIGH);
444.    t14 = pulseIn (4, HIGH);
445.    t15 = pulseIn (4, HIGH);
446.    t16 = pulseIn (4, LOW);
447.    t17 = pulseIn (4, LOW);
448.    t18 = pulseIn (4, LOW);
449.    t19 = pulseIn (4, LOW);
450.    t20 = pulseIn (4, LOW);
451.
452.    Tm12 = ((t1 + t2 + t3 + t4 + t5 + t6 + t7 + t8 + t9 + t10 + t11 + t12 +
t13 + t14 + t15 + t16 + t17 + t18 + t19 + t20) / 20);
453.    n = 0;
454.
455.    if (t1 >= Tm12) {
456.        Tm22 = Tm22 + t1;
457.        n = n + 1;
458.    }
459.    if (t2 >= Tm12) {
460.        Tm22 = Tm22 + t2;
461.        n = n + 1;
462.    }
463.    if (t3 >= Tm12) {
464.        Tm22 = Tm22 + t3;

```

```
465.     n = n + 1;
466. }
467. if (t4 >= Tm12) {
468.     Tm22 = Tm22 + t4;
469.     n = n + 1;
470. }
471. if (t5 >= Tm12) {
472.     Tm22 = Tm22 + t5;
473.     n = n + 1;
474. }
475. if (t6 >= Tm12) {
476.     Tm22 = Tm22 + t6;
477.     n = n + 1;
478. }
479. if (t7 >= Tm12) {
480.     Tm22 = Tm22 + t7;
481.     n = n + 1;
482. }
483. if (t8 >= Tm12) {
484.     Tm22 = Tm22 + t8;
485.     n = n + 1;
486. }
487. if (t9 >= Tm12) {
488.     Tm22 = Tm22 + t9;
489.     n = n + 1;
490. }
491. if (t10 >= Tm12) {
492.     Tm22 = Tm22 + t10;
493.     n = n + 1;
494. }
495. if (t11 >= Tm12) {
496.     Tm22 = Tm22 + t11;
497.     n = n + 1;
498. }
```

```
499.  if (t12 >= Tm12) {
500.      Tm22 = Tm22 + t12;
501.      n = n + 1;
502.  }
503.  if (t13 >= Tm12) {
504.      Tm22 = Tm22 + t13;
505.      n = n + 1;
506.  }
507.  if (t14 >= Tm12) {
508.      Tm22 = Tm22 + t14;
509.      n = n + 1;
510.  }
511.  if (t15 >= Tm12) {
512.      Tm22 = Tm22 + t15;
513.      n = n + 1;
514.  }
515.  if (t16 >= Tm12) {
516.      Tm22 = Tm22 + t16;
517.      n = n + 1;
518.  }
519.  if (t17 >= Tm12) {
520.      Tm22 = Tm22 + t17;
521.      n = n + 1;
522.  }
523.  if (t18 >= Tm12) {
524.      Tm22 = Tm22 + t18;
525.      n = n + 1;
526.  }
527.  if (t19 >= Tm12) {
528.      Tm22 = Tm22 + t19;
529.      n = n + 1;
530.  }
531.  if (t20 >= Tm12) {
532.      Tm22 = Tm22 + t20;
```



```

533.     n = n + 1;
534. }
535.
536.     Tm22 = (Tm22 / n);
537.
538.     // corrente
539.
540.     c1 = pulseIn (3, HIGH);
541.     c2 = pulseIn (3, HIGH);
542.     c3 = pulseIn (3, HIGH);
543.     c4 = pulseIn (3, HIGH);
544.     c5 = pulseIn (3, HIGH);
545.     c6 = pulseIn (3, LOW);
546.     c7 = pulseIn (3, LOW);
547.     c8 = pulseIn (3, LOW);
548.     c9 = pulseIn (3, LOW);
549.     c10 = pulseIn (3, LOW);
550.     c11 = pulseIn (3, HIGH);
551.     c12 = pulseIn (3, HIGH);
552.     c13 = pulseIn (3, HIGH);
553.     c14 = pulseIn (3, HIGH);
554.     c15 = pulseIn (3, HIGH);
555.     c16 = pulseIn (3, LOW);
556.     c17 = pulseIn (3, LOW);
557.     c18 = pulseIn (3, LOW);
558.     c19 = pulseIn (3, LOW);
559.     c20 = pulseIn (3, LOW);
560.
561.     Cm12 = ((c1 + c2 + c3 + c4 + c5 + c6 + c7 + c8 + c9 + c10 + c11 +
c12 + c13 + c14 + c15 + c16 + c17 + c18 + c19 + c20) / 20);
562.     n = 0;
563.
564.     if (c1 >= Cm12) {
565.         Cm22 = Cm22 + c1;

```

```
566.     n = n + 1;
567. }
568. if (c2 >= Cm12) {
569.     Cm22 = Cm22 + c2;
570.     n = n + 1;
571. }
572. if (c3 >= Cm12) {
573.     Cm22 = Cm22 + c3;
574.     n = n + 1;
575. }
576. if (c4 >= Cm12) {
577.     Cm22 = Cm22 + c4;
578.     n = n + 1;
579. }
580. if (c5 >= Cm12) {
581.     Cm22 = Cm22 + c5;
582.     n = n + 1;
583. }
584. if (c6 >= Cm12) {
585.     Cm22 = Cm22 + c6;
586.     n = n + 1;
587. }
588. if (c7 >= Cm12) {
589.     Cm22 = Cm22 + c7;
590.     n = n + 1;
591. }
592. if (c8 >= Cm12) {
593.     Cm22 = Cm22 + c8;
594.     n = n + 1;
595. }
596. if (c9 >= Cm12) {
597.     Cm22 = Cm22 + c9;
598.     n = n + 1;
599. }
```

```
600.  if (c10 >= Cm12) {
601.      Cm22 = Cm22 + c10;
602.      n = n + 1;
603.  }
604.  if (c11 >= Cm12) {
605.      Cm22 = Cm22 + c11;
606.      n = n + 1;
607.  }
608.  if (c12 >= Cm12) {
609.      Cm22 = Cm22 + c12;
610.      n = n + 1;
611.  }
612.  if (c13 >= Cm12) {
613.      Cm22 = Cm22 + c13;
614.      n = n + 1;
615.  }
616.  if (c14 >= Cm12) {
617.      Cm22 = Cm22 + c14;
618.      n = n + 1;
619.  }
620.  if (c15 >= Cm12) {
621.      Cm22 = Cm22 + c15;
622.      n = n + 1;
623.  }
624.  if (c16 >= Cm12) {
625.      Cm22 = Cm22 + c16;
626.      n = n + 1;
627.  }
628.  if (c17 >= Cm12) {
629.      Cm22 = Cm22 + c17;
630.      n = n + 1;
631.  }
632.  if (c18 >= Cm12) {
633.      Cm22 = Cm22 + c18;
```

```
634.     n = n + 1;
635. }
636. if (c19 >= Cm12) {
637.     Cm22 = Cm22 + c19;
638.     n = n + 1;
639. }
640. if (c20 >= Cm12) {
641.     Cm22 = Cm22 + c20;
642.     n = n + 1;
643. }
644.
645. Cm22 = Cm22 / n;
646.
647. // diferença
648.
649. d1 = pulseIn (2, LOW);
650. d2 = pulseIn (2, LOW);
651. d3 = pulseIn (2, LOW);
652. d4 = pulseIn (2, LOW);
653. d5 = pulseIn (2, LOW);
654. d6 = pulseIn (2, LOW);
655. d7 = pulseIn (2, LOW);
656. d8 = pulseIn (2, LOW);
657. d9 = pulseIn (2, LOW);
658. d10 = pulseIn (2, LOW);
659. d11 = pulseIn (2, LOW);
660. d12 = pulseIn (2, LOW);
661. d13 = pulseIn (2, LOW);
662. d14 = pulseIn (2, LOW);
663. d15 = pulseIn (2, LOW);
664. d16 = pulseIn (2, LOW);
665. d17 = pulseIn (2, LOW);
666. d18 = pulseIn (2, LOW);
667. d19 = pulseIn (2, LOW);
```

```
668.    d20 = pulseIn (2, LOW);
669.
670.    Dm12 = ((d1 + d2 + d3 + d4 + d5 + d6 + d7 + d8 + d9 + d10 + d11 +
           d12 + d13 + d14 + d15 + d16 + d17 + d18 + d19 + d20) / 20);
671.    n = 0;
672.    Dm22 = 0;
673.
674.    if (d1 >= Dm12) {
675.        Dm22 = Dm22 + d1;
676.        n = n + 1;
677.    }
678.    if (d2 >= Dm12) {
679.        Dm22 = Dm22 + d2;
680.        n = n + 1;
681.    }
682.    if (d3 >= Dm12) {
683.        Dm22 = Dm22 + d3;
684.        n = n + 1;
685.    }
686.    if (d4 >= Dm12) {
687.        Dm22 = Dm22 + d4;
688.        n = n + 1;
689.    }
690.    if (d5 >= Dm12) {
691.        Dm22 = Dm22 + d5;
692.        n = n + 1;
693.    }
694.    if (d6 >= Dm12) {
695.        Dm22 = Dm22 + d6;
696.        n = n + 1;
697.    }
698.    if (d7 >= Dm12) {
699.        Dm22 = Dm22 + d7;
700.        n = n + 1;
```

```
701.  }
702.  if (d8 >= Dm12) {
703.      Dm22 = Dm22 + d8;
704.      n = n + 1;
705.  }
706.  if (d9 >= Dm12) {
707.      Dm22 = Dm22 + d9;
708.      n = n + 1;
709.  }
710.  if (d10 >= Dm12) {
711.      Dm22 = Dm22 + d10;
712.      n = n + 1;
713.  }
714.  if (d11 >= Dm12) {
715.      Dm22 = Dm22 + d11;
716.      n = n + 1;
717.  }
718.  if (d12 >= Dm12) {
719.      Dm22 = Dm22 + d12;
720.      n = n + 1;
721.  }
722.  if (d13 >= Dm12) {
723.      Dm22 = Dm22 + d13;
724.      n = n + 1;
725.  }
726.  if (d14 >= Dm12) {
727.      Dm22 = Dm22 + d14;
728.      n = n + 1;
729.  }
730.  if (d15 >= Dm12) {
731.      Dm22 = Dm22 + d15;
732.      n = n + 1;
733.  }
734.  if (d16 >= Dm12) {
```

```

735.     Dm22 = Dm22 + d16;
736.     n = n + 1;
737. }
738. if (d17 >= Dm12) {
739.     Dm22 = Dm22 + d17;
740.     n = n + 1;
741. }
742. if (d18 >= Dm12) {
743.     Dm22 = Dm22 + d18;
744.     n = n + 1;
745. }
746. if (d19 >= Dm12) {
747.     Dm22 = Dm22 + d19;
748.     n = n + 1;
749. }
750. if (d20 >= Dm12) {
751.     Dm22 = Dm22 + d20;
752.     n = n + 1;
753. }
754.
755. Dm22 = ((Dm22 / n) - Tm22);
756.
757. Fp12 = ((Dm22 * 360) / 16666);
758.
759. f12 = 1000000 / (Tm22 * 2);
760.
761. // Indutivo ou capacitivo 1
762. d = 0;
763. do {
764.     T11 = digitalRead (7);
765.     C11 = digitalRead (6);
766.     if (T11 == LOW && C11 == LOW) {
767.         delay (1);
768.         T11 = digitalRead (7);

```

```
769.     C11 = digitalWrite (6);
770.     if (T11 == HIGH && C11 == LOW) {
771.         a = 1;
772.         d = 1;
773.     }
774.     if (T11 == LOW && C11 == HIGH) {
775.         a = 0;
776.         d = 1;
777.     }
778. }
779. if (T11 == HIGH && C11 == HIGH) {
780.     delay (1);
781.     T11 = digitalWrite (7);
782.     C11 = digitalWrite (6);
783.     if (T11 == HIGH && C11 == LOW) {
784.         a = 0;
785.         d = 1;
786.     }
787.     if (T11 == LOW && C11 == HIGH) {
788.         a = 1;
789.         d = 1;
790.     }
791. }
792. delay (1);
793. i = i++;
794. if (i >= 8) {
795.     a = 2;
796.     d = 1;
797. }
798. } while (d == 0);
799.
800. // Indutivo ou capacitivo 1
801. d = 0;
802. do {
```



```
803.   T12 = digitalWrite (4);
804.   C12 = digitalWrite (3);
805.   if (T12 == LOW && C12 == LOW) {
806.       delay (1);
807.       T12 = digitalWrite (4);
808.       C12 = digitalWrite (3);
809.       if (T12 == HIGH && C12 == LOW) {
810.           b = 1;
811.           d = 1;
812.       }
813.       if (T12 == LOW && C12 == HIGH) {
814.           b = 0;
815.           d = 1;
816.       }
817.   }
818.   if (T12 == HIGH && C12 == HIGH) {
819.       delay (1);
820.       T12 = digitalWrite (4);
821.       C12 = digitalWrite (3);
822.       if (T12 == HIGH && C12 == LOW) {
823.           b = 0;
824.           d = 1;
825.       }
826.       if (T12 == LOW && C12 == HIGH) {
827.           a = 1;
828.           d = 1;
829.       }
830.   }
831.   delay (1);
832.   i = i++;
833.   if (i >= 8) {
834.       b = 2;
835.       d = 1;
836.   }
```

```
837.     } while (d == 0);
838.
839.     Serial.println("\n Tm11:");
840.     Serial.print(Tm11);
841.     Serial.println("\n Tm21:");
842.     Serial.print(Tm21);
843.
844.     Serial.println("\n Cm11:");
845.     Serial.print(Cm11);
846.     Serial.println("\n Cm21:");
847.     Serial.print(Cm21);
848.
849.     Serial.println("\n Dm11:");
850.     Serial.print(Dm11);
851.     Serial.println("\n Dm21:");
852.     Serial.print(Dm21);
853.
854.     Serial.println("\n Fp11:");
855.     Serial.print(Fp11);
856.     Serial.println("\n frequência 11:");
857.     Serial.print(f11);
858.
859.     Serial.println("\n Tm12:");
860.     Serial.print(Tm12);
861.     Serial.println("\n Tm22:");
862.     Serial.print(Tm22);
863.
864.     Serial.println("\n Cm12:");
865.     Serial.print(Cm12);
866.     Serial.println("\n Cm22:");
867.     Serial.print(Cm22);
868.
869.     Serial.println("\n Dm12:");
870.     Serial.print(Dm12);
```

```
871.     Serial.println("\n Dm22:");
872.     Serial.print(Dm22);
873.
874.     Serial.println("\n Fp12:");
875.     Serial.print(Fp12);
876.     Serial.println("\n frequência 12:");
877.     Serial.print(f12);
878.     Serial.println("\n ");
879.
880.     if (a == 0) {
881.         Serial.println("\n Fp 1 capacitivo\n");
882.     }
883.     if (a == 1) {
884.         Serial.println("\n Fp 1 indutivo\n");
885.     }
886.     if (a == 2) {
887.         Serial.println("\n Fp 1 resistivo ou não determinado\n");
888.     }
889.     if (b == 0) {
890.         Serial.println("\n Fp 2 capacitivo\n");
891.     }
892.     if (b == 1) {
893.         Serial.println("\n Fp 2 indutivo\n");
894.     }
895.     if (b == 2) {
896.         Serial.println("\n Fp 2 resistivo ou não determinado\n");
897.     }
898.
899.     // acionamento
900.     if (a == 1) {
901.         if (Fp11 >= 20 ) {
902.             if (ecc1 == 1) {
903.                 if (ecc2 == 1) {
904.                     if (ecc3 == 1) {
```

```
905.         if (ecc4 == 1) {
906.         } else {
907.             digitalWrite (cc4, HIGH);
908.             ecc4 = 1;
909.         }
910.     } else {
911.         digitalWrite (cc3, HIGH);
912.         ecc3 = 1;
913.     }
914. } else {
915.     digitalWrite (cc2, HIGH);
916.     ecc2 = 1;
917. }
918. } else {
919.     digitalWrite (cc1, HIGH);
920.     ecc1 = 1;
921. }
922. }
923. }
924. if (a == 0) {
925.     if (ecc1 == 0) {
926.         if (ecc2 == 0) {
927.             if (ecc3 == 0) {
928.                 if (ecc4 == 0) {
929.                     } else {
930.                         digitalWrite (cc4, LOW);
931.                         ecc4 = 0;
932.                     }
933.                 } else {
934.                     digitalWrite (cc3, LOW);
935.                     ecc3 = 0;
936.                 }
937.             } else {
938.                 digitalWrite (cc2, LOW);
```

```
939.     ecc2 = 0;
940. }
941. } else {
942.     digitalWrite (cc1, LOW);
943.     ecc1 = 0;
944. }
945. }
946.
947. if (b == 1) {
948.     if (Fp12 >= 20) {
949.         if (ecc5 == 1) {
950.             if (ecc6 == 1) {
951.                 if (ecc7 == 1) {
952.                     if (ecc8 == 1) {
953.                         } else {
954.                             digitalWrite (cc8, HIGH);
955.                             ecc8 = 1;
956.                         }
957.                     } else {
958.                         digitalWrite (cc7, HIGH);
959.                         ecc7 = 1;
960.                     }
961.                 } else {
962.                     digitalWrite (cc6, HIGH);
963.                     ecc6 = 1;
964.                 }
965.             } else {
966.                 digitalWrite (cc5, HIGH);
967.                 ecc5 = 1;
968.             }
969.         }
970.     }
971.     if (b == 0) {
972.         if (ecc5 == 0) {
```

```
973.     if (ecc6 == 0) {
974.         if (ecc7 == 0) {
975.             if (ecc8 == 0) {
976.                 } else {
977.                     digitalWrite (cc8, LOW);
978.                     ecc8 = 0;
979.                 }
980.             } else {
981.                 digitalWrite (cc7, LOW);
982.                 ecc7 = 0;
983.             }
984.         } else {
985.             digitalWrite (cc6, LOW);
986.             ecc6 = 0;
987.         }
988.     } else {
989.         digitalWrite (cc5, LOW);
990.         ecc5 = 0;
991.     }
992. }
993.
994. lcd.setCursor (0, 0);
995. lcd.print ("Fp1:      ");
996. lcd.setCursor (6, 0);
997. lcd.print (Fp11);
998. if (a == 0) {
999.     lcd.setCursor(13, 0);
1000.    lcd.print("Cap");
1001. }
1002. if (a == 1) {
1003.     lcd.setCursor (13, 0);
1004.     lcd.print("Ind");
1005. }
1006. lcd.setCursor (0, 1);
```

```
1007.  lcd.print ("Fp2:      ");
1008.  lcd.setCursor (6, 1);
1009.  lcd.print (Fp12);
1010.  if (b == 0) {
1011.    lcd.setCursor (13, 1);
1012.    lcd.print("Cap");
1013.  }
1014.  if (b == 1) {
1015.    lcd.setCursor (13, 1);
1016.    lcd.print("Ind");
1017.  }
1018.  delay (2000);
1019.
1020.  lcd.setCursor (0, 0);
1021.  lcd.print ("Frequência 1:  ");
1022.  lcd.setCursor (12, 0);
1023.  lcd.print(f11);
1024.  lcd.setCursor (0, 1);
1025.  lcd.print ("Frequência 2:  ");
1026.  lcd.setCursor(12, 1);
1027.  lcd.print(f12);
1028.  delay (2000);
1029.
1030.  ai = ecc1 + ecc2 + ecc3 + ecc4;
1031.  bi = ecc5 + ecc6 + ecc7 + ecc8;
1032.
1033.  lcd.setCursor (0, 0);
1034.  lcd.print ("Saídas L1:    ");
1035.  lcd.setCursor (12, 0);
1036.  lcd.print(ai);
1037.  lcd.setCursor (0, 1);
1038.  lcd.print ("Saídas L2:    ");
1039.  lcd.setCursor (12, 1);
1040.  lcd.print(bi);
```

```
1041.  
1042.  delay (2000);  
1043. }
```


APÊNDICE E – ALGORITMO COMPLETO PARA RESIDÊNCIA MODELO

```
1.  /*
2.  CENTRO UNIVERSITÁRIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
3.
4.  Projeto: Residência modelo
5.
6.  Professor Orientador: Ederson Zanchet
7.  Aluno: Daniel Kriesel Sperotto
8.  */
9.
10.  int x, i = 0;
11.  int a = 0, b = 0, c = 0, d = 0, e = 0, f = 0, g = 0, h = 0;
12.
13.  void setup () {
14.    pinMode (2, OUTPUT);
15.    pinMode (3, OUTPUT);
16.    pinMode (4, OUTPUT);
17.    pinMode (5, OUTPUT);
18.    pinMode (6, OUTPUT);
19.    pinMode (7, OUTPUT);
20.    pinMode (8, OUTPUT);
21.    pinMode (9, OUTPUT);
22.    digitalWrite (2, LOW);
23.    digitalWrite (3, LOW);
24.    digitalWrite (4, LOW);
25.    digitalWrite (5, LOW);
26.    digitalWrite (6, LOW);
27.    digitalWrite (7, LOW);
28.    digitalWrite (8, LOW);
29.    digitalWrite (9, LOW);
30.
31.    delay (10000);
32.  }
```

```
33. void loop () {
34.
35.   x = random (0, 9);
36.   if (x == 0) {
37.     if (a == 0) {
38.       digitalWrite (2, HIGH);
39.       a = 0;
40.     } else {
41.       digitalWrite (2, LOW);
42.       a = 1;
43.     }
44.   }
45.   if (x == 1) {
46.     if (b == 0) {
47.       digitalWrite (3, HIGH);
48.       b = 1;
49.     } else {
50.       digitalWrite (3, LOW);
51.       b = 0;
52.     }
53.   }
54.   if (x == 2) {
55.     if (c == 0) {
56.       digitalWrite (4, HIGH);
57.       c = 1;
58.     } else {
59.       digitalWrite (4, LOW);
60.       c = 0;
61.     }
62.   }
63.   if (x == 3) {
64.     if (d == 0) {
65.       digitalWrite (5, HIGH);
66.       d = 1;
```

```
67.     } else {
68.         digitalWrite (5, LOW);
69.         d = 0;
70.     }
71. }
72. if (x == 4) {
73.     if (e == 0) {
74.         digitalWrite (6, HIGH);
75.         e = 1;
76.     } else {
77.         digitalWrite (6, LOW);
78.         e = 0;
79.     }
80. }
81. if (x == 5) {
82.     if (f == 0) {
83.         digitalWrite (7, HIGH);
84.         f = 1;
85.     } else {
86.         digitalWrite (7, LOW);
87.         f = 0;
88.     }
89. }
90. if (x == 6) {
91.     if (g == 0) {
92.         digitalWrite (8, HIGH);
93.         g = 1;
94.     } else {
95.         digitalWrite (8, LOW);
96.         g = 0;
97.     }
98. }
99. if (x == 7) {
100.    if (h == 0) {
```

```
101.  digitalWrite (9, HIGH);  
102.  h = 1;  
103.  } else {  
104.  digitalWrite (9, LOW);  
105.  h = 0;  
106.  }  
107.  }  
108.  delay (45000);  
109.  }
```