

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
VINÍCIUS LOPES DA SILVA**

CONTROLADOR DE FATOR DE POTÊNCIA UTILIZANDO ARDUINO

**Varginha
2017**

VINÍCIUS LOPES DA SILVA

CONTROLADOR DE FATOR DE POTÊNCIA UTILIZANDO ARDUINO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. Me. Hugo Rodrigues Vieira.

**Varginha
2017**

VINÍCIUS LOPES DA SILVA

CONTROLADOR DE FATOR DE POTÊNCIA UTILIZANDO ARDUINO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas- UNIS/MG, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em / /

Prof. Me. Hugo Rodrigues Vieira

Prof. Roberto L.P. Mudesto

Prof. Paulo Roberto Paiva Novo

OBS:

Dedico este trabalho a toda minha família e aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à minha avó – senhora Nadir –, responsável por garantir o meu início nessa graduação.

Aos meus pais pelo todo apoio que recebi nessa jornada, principalmente no começo onde foi uma situação delicada, mas que consegui superar graças a eles.

À Adriana Comunian, pelo seu auxílio neste trabalho, por me ajudar a superar um dos momentos mais difíceis que passei, dando todo apoio para superar e recomeçar.

A todos os professores que tive oportunidade de conhecer ao longo dessa jornada, e em especial, ao meu orientador Professor Me. Hugo Rodrigues Vieira e ao Coordenador da graduação Me. Eduardo Henrique Ferroni, pelos conhecimentos, experiência, oportunidades fornecidas ao longo dessa graduação.

Aos meus amigos, que sempre me apoiaram nessa jornada, e em especial, aos amigos que fiz ao decorrer desta graduação, pela nossa união e companheirismo.

Sou grato!

“Se você não consegue explicar algo de modo simples é porque não entendeu bem a coisa”.

Albert Einstein

RESUMO

Em virtude da qualidade de energia elétrica, este trabalho tem como objetivo a criação de um sistema baseado em Arduino para fazer o controle do fator de potência indutivo de forma automática e conseqüentemente avaliar o seu desempenho comparado com os sistemas já consolidados no mercado. Para o desenvolvimento do projeto foi realizado um estudo no Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) módulo 8, conceitos sobre eletricidade, transformadores de medida, cargas indutivas, potências, fator de potência, correção do fator de potência e o Arduino. Para a validação do sistema elaborado foi utilizado o analisador de qualidade ION 7650 da Schneider, onde se adotou os valores lidos pelo ION 7650 como referência. Além da validação o sistema foi submetido a mais testes, sempre acompanhado do ION 7650. Em todos os testes de leitura foram calculados os erros do sistema e dispostos em quadros, onde o maior erro do sistema foi de 7,05 % e o menor de 0 %. O sistema também foi submetido a teste de correção do fator de potência, na qual foram inseridos capacitores ao sistema para que o mesmo pudesse corrigir a carga indutiva. Apesar do sistema ter conseguido fazer a correção do fator de potência, o mesmo teve um cenário de instabilidade no chaveamento de capacitores na rede elétrica. Em função da instabilidade apresentada pelo sistema e o mesmo não ler harmônicos, fica como proposta futura a otimização do gerenciamento do banco de capacitores e a leitura de harmônicos.

Palavras-Chave: Arduino. Fator de potência. Controlador de fator de potência.

ABSTRACT

Due to the electric power quality, this work has the objective of creating an Arduino based system to automatically control the inductive power factor and consequently evaluate its performance compared to the systems already consolidated in the market. For the development of the project, a study was carried out on the Electricity Distribution Procedure in the National Electric System (PRODIST) module 8, concepts about electricity, transformers, inductive loads, power factor, power factor correction and Arduino. For the validation of the system, the ION 7650 quality analyzer from Schneider was used, where the values read by the ION 7650 were used as reference. In addition to the validation, the system was subjected to further tests, always accompanied by the ION 7650. In all the reading tests, the system errors were calculated and arranged in frames, where the biggest error of the system was of 7.05 % and the lowest of 0 %. The system was also submitted to a power factor correction test, in which capacitors were inserted into the system so that it could correct the inductive load. Although the system was able to correct the power factor, it had a scenario of instability in the switching of capacitors in the power grid. Due to the instability presented by the system and the same does not read harmonics, it remains as a future proposal the optimization of the management of the capacitor bank and the reading of harmonics.

Keywords: *Arduino. Factor power. Power factor controller.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de energia elétrica de janeiro até dezembro de 2014.	20
Figura 2 – Curva de magnetização.	22
Figura 3 – Orientação dos domínios.	22
Figura 4 – Modelo atômico de Rutherford.	26
Figura 5 – Sentido da corrente elétrica.	30
Figura 6 – Polaridade da tensão elétrica.	31
Figura 7 – Polaridade da tensão elétrica.	31
Figura 8 – Formas de onda.	32
Figura 9 – Utilização de voltímetro e amperímetro.	35
Figura 10 – Placa do capacitor.	43
Figura 11 – Relação das três potências.	44
Figura 12 – Correção do fator de potência.	47
Figura 13 – Método de correção junto a carga.	49
Figura 14 – Circuito indutivo.	50
Figura 15 – Defasagem da corrente.	50
Figura 16 – Circuito indutivo com capacitor.	51
Figura 17 – Corrente em fase.	51
Figura 18 – Arduino Mega.	53
Figura 19 – Portas do Arduino.	55
Figura 20 – Monitor serial.	56
Figura 21 – Portas do Arduino.	57
Figura 22 – Sistema regulador de tensão.	58
Figura 23 – Conexão USB.	58
Figura 24 – Comutador de alimentação.	59
Figura 25 – Diagrama de blocos do sistema.	61
Figura 26 – Circuito de leitura de tensão.	63
Figura 27 – TC.	64
Figura 28 – Circuito de leitura de corrente.	65
Figura 29 – Placa de leitura do sistema em três dimensões.	67
Figura 30 – Fluxograma do algoritmo.	70
Figura 31 – Trilhas da placa de leitura do sistema.	71
Figura 32 – Trilhas da placa de comunicação com o <i>display</i>	72
Figura 33 – Placa de comunicação com o <i>display</i> do sistema em três dimensões.	72
Figura 34 – Sistema.	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Grupos de consumidores.	16
Quadro 2 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais.	16
Quadro 3 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão.	17
Quadro 4 – Valores de referência.	18
Quadro 5 – Classificação das variações de tensão de curta duração.	19
Quadro 6 – Características da placa Arduino Mega.	54
Quadro 7 – Teste de validação.	74
Quadro 8 – Erro em percentual do teste de validação.	74
Quadro 9 – Teste com carga resistiva.	75
Quadro 10 – Erro do teste com carga resistiva.	75
Quadro 11 – Teste com carga indutiva.	75
Quadro 12 – Erro com carga indutiva.	76
Quadro 13 – Características PFW01-T06.	77
Quadro 14 – Custo do sistema.	78

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Aspectos Importantes Referentes à Qualidade de Energia Elétrica.....	15
2.1.1 Tensão em regime permanente	15
2.1.2 Fator de potência	15
2.1.3 Harmônicas	16
2.1.4 Desequilíbrio de tensão	17
2.1.5 Flutuação de tensão	18
2.1.6 Variação de tensão de curta duração	18
2.1.7 Tensão em regime permanente	19
2.2 Cenário Energético	19
2.3 Eficiência energética.....	21
2.3.1 Possíveis problemas com eficiência na indústria	23
2.3.1.1 Iluminação	23
2.3.1.2 Tensão de alimentação.....	24
2.3.1.3 Quadros e Painéis	24
2.3.1.4 Fator de potência	24
2.3.1.5 Equipamentos	25
2.3.2 Indústrias eficientes	25
2.4 Tensão e corrente.....	26
2.4.1 Sentido e forma de onda	30
2.4.2 Valor eficaz.....	33
2.5 Medidores de tensão e corrente.....	34
2.6 Transformadores de medida	36
2.6.1 Transformador de corrente	36
2.6.2 Transformador de potencial.....	38
2.7 Cargas.....	40
2.8 Potência	42
2.8.1 As três potências	44
2.8.2 Potência complexa.....	45
2.8.3 Fator de potência	46
2.9 Correção do fator de potência	46
2.10 Arduino.....	52
2.10.1 Características.....	54
2.10.2 Partes do Arduino	57
2.10.3 Conversor A/D.....	59
3 METODOLOGIA.....	61
3.1 Rede elétrica	62
3.2 Transformadores de medida e sistema modelador.....	62
3.2.1 Sistema de leitura de tensão	62
3.2.2 Sistema de leitura de corrente.....	63
3.3 IHM.....	65
3.4 Sistema de acionamento	65
3.5 Montagem dos componentes.....	66
3.6 Arduino.....	67

3.6.1 Programação da leitura	67
3.6.2 Programação da verificação e acionamento	69
4 RESULTADOS	71
4.1 Validação	73
4.2 Testes	74
4.2.1 Teste de correção	76
4.3 Levantamento financeiro	77
5 CONCLUSÃO.....	79
REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

A sociedade moderna é cada vez mais dependente de serviços e produtos, desde serviços básicos como tratamento de água, assistência médica e hospitalar, tráfego coletivo, esgoto, fornecimento de energia elétrica, entre outros, até serviços como internet, sinal de rádio e televisão, telefonia móvel, entre outros. Um ponto importante a se observar é que todos os serviços para seu perfeito funcionamento dependem diretamente ou indiretamente da energia elétrica e essa energia deve ser de qualidade, pois de nada adianta se todos os dias tem falta de energia ou então magnitudes elétricas não são respeitadas causando danos e mau funcionamento em equipamentos. Percebe-se que não basta ter energia elétrica, a mesma deve ser de qualidade. A qualidade de energia é mais importante do que ter a energia, pois uma tensão elevada pode causar a queima de equipamentos deixando uma cidade sem semáforos, equipamentos hospitalares, comunicação e vários outros problemas devido uma energia sem qualidade.

A prestação do serviço de fornecimento de energia é um dos serviços mais desafiantes da sociedade moderna. Para que o consumidor disponha de energia no momento que aciona um interruptor ou conecta um aparelho elétrico na tomada é preciso que um vasto aparato – composto por centenas de centrais geradoras, linhas de transmissão, subestações, linhas e transformadores de distribuição – esteja apto a operar de forma coordenada. (RACHED, 2014, p. 2).

Manter a energia elétrica respeitando as magnitudes torna-se algo extremamente complexo, pois é preciso sincronizar a produção de energia com o consumo em tempo real, tal situação fica mais complexa quando o cenário é uma cidade, onde tem a todo momento variação de consumo de energia elétrica. É preciso um sistema de controle rápido, preciso e exato para que em nenhum momento a energia elétrica saia dos padrões estipulados e um erro do sistema de controle pode colapsar todo o sistema, causando severos problemas a seus consumidores.

Uma energia de qualidade vai além da presença da energia todos os dias para seus consumidores com suas características em conforme. Para uma energia de qualidade é preciso admitir que conceitos como confiabilidade, adequabilidade, segurança, conformidade e atendimento comercial foram alcançados.

A confiabilidade da energia é fácil de entender na situação de falta, então em função da frequência e duração da falta é possível determinar a confiabilidade. Existem indicadores como o Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) e Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC). Logo quanto menor a frequência e duração de interrupção mais confiável é o sistema.

A adequabilidade de um sistema refere-se a sua capacidade de atender à demanda de energia do consumidor, ou seja, valores de geração, transmissão e distribuição devem estar adequados com os valores de consumo de energia a cada instante, levando conta as oscilações de carga (RACHED, 2014).

Segurança do sistema refere-se à sua capacidade de lidar com ocorrências internas, como por exemplo, falhas de equipamentos e ocorrências de origem externas, como descargas atmosféricas. Algumas medidas adotadas para melhorar a segurança do sistema é a utilização de equipamentos com um certo grau de redundância, desta maneira, proporcionando ao sistema elétrico a possibilidade de ocorrerem falhas ou manutenções nos componentes sem que ocorra falta de energia (RACHED, 2014).

A conformidade está relacionada as magnitudes da energia como o nível de tensão em regime permanente, desequilíbrio de tensão, variação de tensão de curta duração, flutuação de tensão, variação de frequência, fator de potência e harmônicos. Essas magnitudes devem ser respeitadas, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estipula faixas aceitáveis para todos os valores através do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional 8 (PRODIST 8). Logicamente todas as magnitudes devem estar dentro dos valores aceitáveis para que o quesito conformidade seja alcançado.

No que se refere à atendimento comercial a relação da empresa com o consumidor não se manifesta apenas por meio da entrega física de elétrons. O consumidor também deseja ter suas solicitações atendidas com presteza e cortesia. Isso inclui o tratamento recebido nas centrais de atendimento, nos *call centers* (centrais de atendimento telefônico) e no atendimento de serviços solicitados na unidade de consumo, tais como: vistoria, ligação, aferição de medidor, ressarcimento por danos elétricos, elaboração de estudos, orçamentos, projetos, etc. (RACHED, 2014, p. 9).

Entre uma tomada elétrica e o gerador existem uma grande quantidade de componentes, conexões, controladores, cabos, chaves, sistemas de proteção, entre outros. Por trás do fornecimento de energia existe mais de uma empresa responsável para atender os consumidores. O sistema elétrico de potência é grande e complexo, a quantidade de pontos a serem alcançados para uma energia de qualidade são grandes, por isso a dificuldade é grande. Existe um trabalho de equipe entre as empresas para manter a energia com qualidade.

Em indústrias são frequentes os problemas relacionados a qualidade de energia e normalmente se trata de harmônicos e fator de potência, devido a quantidade de motores, máquinas pesadas, equipamentos eletrônicos, entre outros. Então, sabendo do deficitário cenário energético brasileiro e que a maior classe consumidora de energia elétrica é industrial, pode-se criar um grande problema caso as indústrias não se preocupem com a qualidade da

energia, principalmente ao fator de potência que pode prejudicar o sistema de distribuição, transmissão e geração.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A ANEEL por meio de documentos elaborou o PRODIST, com o intuito de normatizar e padronizar as atividades técnicas referente ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. E também determinar os procedimentos a qualidade de energia elétrica, abordando qualidade da energia e a qualidade do serviço prestado. O PRODIST é separado em módulos, ao todo são onze módulos que tratam de assuntos diferentes (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015).

2.1 Aspectos Importantes Referentes à Qualidade de Energia Elétrica

O módulo 8 do PRODIST, aborda questões sobre a qualidade de energia elétrica, determinando faixas aceitáveis de valores de algumas magnitudes, como por exemplo, tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, entre outros.

2.1.1 Tensão em regime permanente

A tensão em regime permanente para tensão igual ou superior a 230 kV deverá ser a tensão nominal de operação do sistema no ponto de conexão. Caso a tensão contratada seja inferior a 230 kV a tensão nominal deve variar entre 95% e 105% no ponto de conexão (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015).

2.1.2 Fator de potência

O fator de potência é uma grandeza adimensional devido a ser obtido pela razão entre duas potências (ativa e aparente) ou pela defasagem angular entre a tensão e a corrente. A ANEEL determina para o fator de potência de referência, indutivo ou capacitivo, ter como permitido entre 0,92 e 1,00 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015).

O fator de potência não é analisado de forma obrigatória para todos os tipos de consumidores. A ANEEL divide em dois grupos, grupo A e grupo B como mostra a quadro 1, são considerados do grupo A aqueles consumidores onde a tensão de fornecimento é superior a 2,3 kV caracterizado pela tarifa binômia e do grupo B consumidores com tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV caracterizado pela tarifa monômia (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008). Como já mencionado existe uma faixa aceitável para o valor de

potência, porém a aferição e aplicação de multa são obrigatórios somente para os consumidores do grupo A e para o grupo B é facultativo (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015). Isso significa que consumidores residenciais, comerciais, rurais podem ou não serem multados pelo baixo fator de potência. A multa é aplicada no caso de excedente de reativo.

Quadro 1 – Grupos de consumidores.

Subgrupo	Tensão de fornecimento
A1	≥ 230 kV
A2	88 kV a 138 kV
A3	69 kV
A3a	30 kV a 44 kV
A4	2,3 kV a 25 kV
AS	$\leq 2,3$ (A partir de sistema subterrâneo de distribuição)
B1	Residencial
B2	Rural
B3	Demais classes
B4	Iluminação Pública

Fonte: (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008, p. 151).

2.1.3 Harmônicas

As distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015). No quadro 2 estão dispostas as distorções totais de tensão permitidas para cada valor de tensão nominal.

Quadro 2 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais.

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1$ kV	10
1 kV < $V_N \leq 13,8$ kV	8
$13,8 < V_N \leq 69$ kV	6
69 kV < $V_N \leq 230$ kV	3

Fonte: (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015, p. 23).

As harmônicas possuem suas ordens e são separadas em pares e ímpares. A ordem de número um é a frequência fundamental, que para o Brasil é de 60 Hertz (Hz). Essas ordens são múltiplas da onde fundamental.

Assim como existe limites de distorções totais, também existe limites de distorções em função da ordem da harmônica, sendo considerado também a tensão nominal. Esses limites são apresentados pelo quadro 3.

Quadro 3 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão.

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1$ kV	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8$ kV	$13,8 < V_n \leq 69$ kV	$69 \text{ kV} < V_n \leq 230$ kV	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015, p. 24).

2.1.4 Desequilíbrio de tensão

Em desequilíbrio de tensão o valor de referência nos barramentos do sistema de distribuição, com exceção da BT (baixa tensão), deve ser igual ou inferior a 2%. Esse valor serve para referência do planejamento elétrico em termos de QEE (qualidade da energia elétrica) e que, regulatoriamente, será estabelecido em resolução específica, após período experimental de coleta de dados. (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015, p. 26).

2.1.5 Flutuação de tensão

A flutuação de tensão é uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão. A determinação da qualidade da tensão de um barramento do sistema de distribuição quanto à flutuação de tensão tem por objetivo avaliar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação luminosa no consumidor, que tenha em sua unidade consumidora pontos de iluminação alimentados em baixa tensão (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015).

Para cálculos e referência na flutuação de tensão são determinadas pela ANEEL no PRODIST 8 algumas variáveis PST (severidade de curta duração), PLT (severidade de longa duração), PSTD95% (Valor diário do indicador PST que foi superado em apenas 5 % dos registros obtidos no período de 24 horas), PLTS95% (valor semanal do indicador PLT que foi superado em apenas 5 % dos registros obtidos no período de sete dias completos e consecutivos) e fator de transferência (FT).

Os valores de referência são mostrados no quadro 4, onde há faixas determinando a situação em adequado, precário e crítico. Desta forma é possível determinar a qualidade de energia no quesito flutuação de tensão.

Quadro 4 – Valores de referência.

Valor de Referência	PSTD95%	PLTS95%
Adequado	< 1 p.u. / FT	< 0,8 p.u. / FT
Precário	1 p.u. – 2 p.u. / FT	0.8 – 1.6 p.u. / FT
Crítico	> 2 p.u. / FT	> 1,6 p.u. / FT

Fonte: (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015, p. 28).

2.1.6 Variação de tensão de curta duração

Variações de tensão de curta duração são desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015). O quadro 5, mostra como é classificado a variação de tensão em curta duração. Os valores de referência não são estipulados pela ANEEL, mas isso não significa que se o consumidor estiver com problemas respectivo a variação de tensão, o mesmo não possa entrar em contato com a concessionária para solução do problema.

Quadro 5 – Classificação das variações de tensão de curta duração.

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão
Variação Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u.
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u.
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u.
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u.
	Afundamento temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u.
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u.

Fonte: (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015, p. 29).

2.1.7 Tensão em regime permanente

O sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. As instalações de geração conectadas ao sistema de distribuição devem garantir que a frequência retorne para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz, no prazo de 30 (trinta) segundos após sair desta faixa, quando de distúrbios no sistema de distribuição, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração. (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015, p. 31).

Detalhamentos sobre tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação de tensão de curta duração e variação de frequência são encontrados no PRODIST 8, onde estão dispostos conceitos mais aprofundados, equações, características de equipamentos para medições, entre outros.

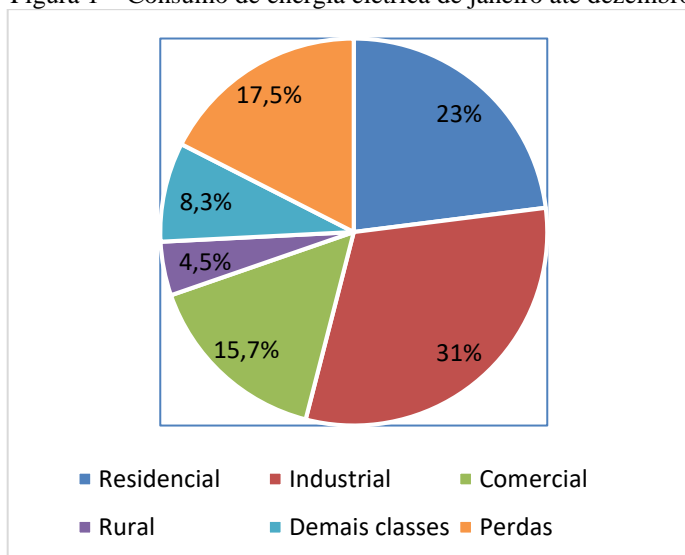
2.2 Cenário Energético

O Brasil é constituído por uma área territorial muito extensa, possuindo diversos e extensos rios. Logo o potencial hídrico é grande, por esta razão grande parte da energia elétrica gerada no país é propícia das hidrelétricas, mas também conta com uma boa contribuição das

usinas térmicas (por gás, carvão, petróleo, nuclear e biomassa). Desta maneira pode-se denominar a produção de energia elétrica do Brasil como hidrotérmico, uma vez que em janeiro de 2015 possuiu uma contribuição de 66,6% das hidrelétricas e 29,7% das termoelétricas de um total de 134008 MW de capacidade instalada. O restante da geração conta com a usina eólica e a fotovoltaica (BRASIL, 2015).

O consumo de energia elétrica no Brasil incluindo a classe residencial, industrial, comercial, rural, perdas e demais classes (poder público, iluminação pública, serviço público e consumo próprio das distribuidoras) no período de janeiro até dezembro de 2014 foi de 573.899 giga watts hora (GWh). Porém boa parte desse consumo de energia elétrica foi do setor industrial com o valor de 31% do total consumido de energia elétrica, conforme ilustra a figura 1.

Figura 1 – Consumo de energia elétrica de janeiro até dezembro de 2014.



Fonte: (BRASIL, 2015, p. 11).

A produção de energia elétrica no Brasil no período de janeiro até dezembro de 2014 no sistema interligado foi de 537225 GWh e de 12622 GWh no sistema isolado, totalizando em 549847 GWh. Sabendo do grande potencial térmico e hídrico os mesmos tiveram uma contribuição de 138945 e 386329 GWh respectivamente entre janeiro e dezembro de 2014 (BRASIL, 2015).

Levantando dados de produção e consumo de energia elétrica é possível observar que há um déficit no sistema elétrico, logo justificando a importação de energia elétrica de países vizinhos para suprir o consumo. Obviamente que essa situação não é positiva para o país, ainda mais quando se leva em conta o crescimento do consumo de energia elétrica.

2.3 Eficiência energética

Pode-se entender como eficiência energética a relação entre a quantidade de energia final utilizada e de um bem produzido ou serviço realizado (BRASIL, 2010). Um conceito aparentemente simples, mas ao se analisar eficiência energética de uma forma panorâmica se torna complexo. Eficiência energética vai muito mais além do que troca de equipamentos que consomem menos com a mesma produção.

Eficiência energética no setor elétrico além de analisar cargas, deve-se também analisar se a construção aproveita a ventilação e iluminação natural para dispensar uso de equipamentos elétricos, valor da tensão utilizada, comprimento de cabos, seção transversal de cabos, fator de potência, motores superdimensionados, emendas de cabos, localização de quadros de disjuntores, transformadores superdimensionados, localização de transformadores, entre outros conceitos que devem ser analisados.

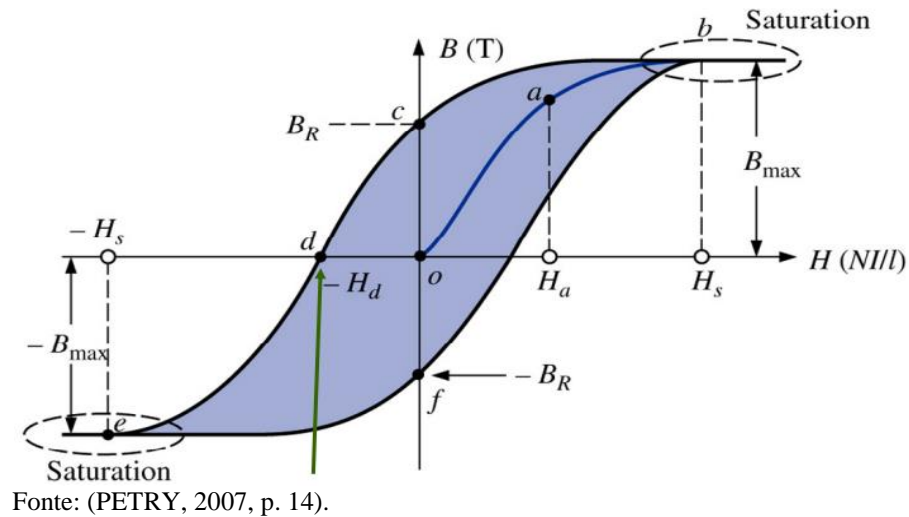
Sabe-se que perdas são inversamente proporcional à eficiência energética, até porque uma análise de eficiência energética é justamente para diminuir ou em alguns casos sanar as perdas. Em circuitos elétricos as principais perdas são perdas por efeito Joule, Histerese e corrente de Foucault.

Efeito Joule, ocorre devido à colisão dos elétrons em movimento (livres) com átomos do condutor. Os átomos recebem parte da energia cinética proveniente do movimento dos elétrons e acabam aumentando sua vibração (agitação térmica) dentro do condutor, o que equivale a aumento em sua temperatura. De modo simplificado, pode-se dizer que o efeito Joule é a transformação de energia elétrica em calor. (AFONSO, 2011, p. 35).

Perdas por Histerese ocorrem, por exemplo, em transformadores. O núcleo do transformador é magnetizado pela bobina primária, ou seja, o núcleo é submetido a uma força magnética provinda da bobina, desta forma os domínios do núcleo que antes eram desordenados se alinham com o sentido da força magnética. A alimentação de um transformador é com tensão alternada, conseqüentemente passa por ele uma corrente alternada que por sua vez irá gerar uma força magnética alternada, porém o alinhamento dos domínios permanece no mesmo sentido de sua primeira magnetização, ou seja, a força magnética já assumiu outro sentido enquanto os domínios do material permaneceram no mesmo sentido. Desta forma é necessário um consumo de energia para realinhar os domínios no mesmo sentido da força magnética, como é uma tensão senoidal esse processo de realinhamento do domínio a cada mudança de polaridade

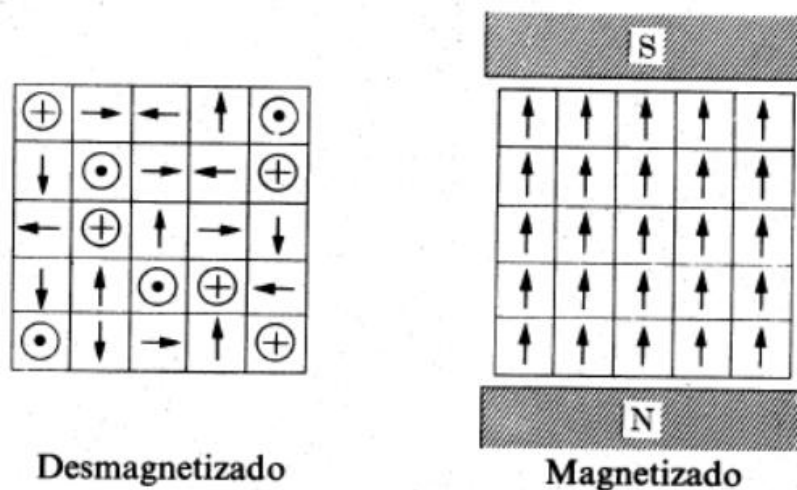
é infinito enquanto houver energia elétrica no transformador, esse processo é representado pela figura 2.

Figura 2 – Curva de magnetização.



Os domínios desordenados e alinhados por uma força magnética são mostrados pela figura 3, onde o desenho da esquerda representa os domínios desordenados e o da direita representa os domínios ordenados por um campo magnético.

Figura 3 – Orientação dos domínios.



Fonte: (PETRY, 2007, p. 11).

Segundo a Lei de Faraday um fluxo magnético variante no tempo ao atravessar uma bobina irá produzir na mesma uma força eletromotriz, essa definição é de grande importância para compreender a perda por corrente de Foucault. Analisando o núcleo de um transformador percebe-se que o mesmo pode ser compreendido como uma bobina de uma espira em curto

circuito, o fluxo magnético variável oriundo da bobina primária induz uma tensão no núcleo do transformador. Como resultado, ocorrerá circulação de corrente no núcleo do transformador, pois o mesmo é um circuito fechado. Com essa circulação de corrente haverá dissipação de potência indesejada, ou seja, perdas. Tal fenômeno é denominado como perda por corrente de Foucault (FITZGERALD, 1975).

Qualquer consumidor de energia pode ser analisado para ver como o mesmo utiliza a sua energia elétrica, em residências por exemplo, ações simples como utilizar melhor a ventilação e iluminação natural, não deixar a geladeira próximo ao fogão ou forno, fazer troca de lâmpadas por lâmpadas mais eficientes, já podem proporcionar benefícios.

No setor industrial o fator de potência é bastante prejudicial por elevar a corrente elétrica aumentando perdas por efeito Joule e resultam em multas para o consumidor quando apresentam valores fora do aceitável. Perdas por Histerese e/ou corrente de Foucault também estão presentes devido à grande quantidade de equipamentos com princípio em eletromagnetismo.

2.3.1 Possíveis problemas com eficiência na indústria

Em indústrias é comum grandes áreas de construção e alto consumo de energia elétrica, isso implica em grandes instalações elétricas com transformadores, máquinas, motores, iluminação dependente de reator, grandes lances de cabos elétricos, painéis, quadros de distribuição, entre outros. Com tantos equipamentos presentes na indústria é interessante uma análise da eficiência da energia elétrica na mesma.

2.3.1.1 Iluminação

Com uso de um luxímetro e de um wattímetro é possível determinar a quantidade de lúmens por watt de uma determinada área, desta maneira, também está determinando a eficiência da lâmpada. Atualmente o mercado conta com uma grande variedade de lâmpadas, uma substituição pode melhorar essa eficiência, inclusive por lâmpadas que possuam um alta fator de potência. Outras decisões possíveis a serem tomadas são, utilizar o máximo possível a luz natural, separar circuitos de iluminação por setores, instalar a iluminação localizada estrategicamente, entre outras medidas (COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, 2005).

2.3.1.2 Tensão de alimentação

Uma corrente elevada pode contribuir com vários tipos de perdas, principalmente por efeito Joule. Sabe-se que uma potência é dada pelo produto da tensão e corrente, logo utilizar tensões maiores para a mesma potência ocasiona diminuição da corrente elétrica. Logicamente que existem situações onde não é possível aumentar a tensão, porém em grandes distâncias pode ser viável a elevação e diminuição da tensão por transformadores para evitar perdas maiores. A elevação da tensão também ameniza a queda de tensão nos cabos elétricos (COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, 2005).

2.3.1.3 Quadros e Painéis

Escolher estrategicamente a localização dos quadros e painéis pode diminuir o custo de instalação além de permitir a mesma instalação com cabos mais curtos, resultando em menores perdas nos cabos, pois a resistência apresentada pelo cabo é diretamente proporcional ao seu comprimento. A perda em um cabo é pelo efeito Joule e pode ser calculada pelo produto da resistência do cabo com a corrente ao quadrado. Outro benefício é a diminuição da queda de tensão, uma vez que cabos menores proporcionam diminuição na queda de tensão (COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, 2005).

2.3.1.4 Fator de potência

Cargas reativas, como transformadores, motores, alguns tipos de lâmpadas, entre outras, podem alterar o fator de potência. O problema de fator de potência é um dos principais no meio industrial, pois o mesmo pode ocorrer devido ao baixo fator de potência da carga, má utilização de motores e transformadores, variação de cargas, a utilização de transformadores e motores superdimensionados ou a vazio podem diminuir o fator de potência. A tentativa de correção do fator de potência de forma errada pode piorar ainda mais a situação.

As indústrias são consumidores do grupo A, isso implica que a concessionária de sua região irá aferir e aplicar multas caso o consumidor não mantenha o seu fator de potência dentro das normas, então além do fator de potência prejudicar a eficiência energética ele pode também resultar em despesas. Um outro problema causado pelo baixo fator de potência é a elevação da corrente, essa elevação contribui para a saturação do sistema elétrico além de aumentar as perdas (efeito Joule, Histerese, corrente de Foucault), pois todas essas perdas estão ligadas

diretamente com a magnitude da corrente (COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, 2005).

O fator de potência é algo do cotidiano do setor industrial pelas razões de contar com cargas (reatores, motores, transformadores, entre outros) que contribuem para o baixo fator de potência. Valores de fator de potência não condizentes com a norma impactam diretamente na parte financeira do consumidor com aplicação de multas, e indiretamente também por perdas de energia elétrica, devido à elevação da corrente.

2.3.1.5 Equipamentos

Com o avanço constante da tecnologia surgem equipamentos cada vez mais eficientes, logo é sempre benéfico realizar estudos avaliando o rendimento, eficiência, custos, diminuição das perdas, vida útil e o tempo do retorno do investimento para troca do equipamento. Em algumas situações observar a disposição de maquinários também é válido, equipamentos com finalidade inversa, por exemplo, equipamentos destinados a aquecer e equipamentos destinados a esfriar, em situações como essa é benéfico deixá-los distantes para que um não interfira termicamente no outro.

2.3.2 Indústrias eficientes

Tomar ações para aprimorar a eficiência energética, por exemplo de uma indústria, pode proporcionar benefícios, como melhorar o aproveitamento das instalações e equipamentos elétricos. Consequente melhoria na qualidade do produto, redução do consumo energético e consequentemente aumento da produtividade, sem afetar a segurança (COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, 2005). Para a sociedade em geral pode trazer benefícios como redução dos investimentos para a construção de usinas e redes elétricas e consequentemente redução dos custos com a eletricidade, redução dos preços de produtos e serviços, maior garantia de fornecimento de energia elétrica e de atendimento a novos consumidores no futuro (COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, 2005).

É indiscutível a importância da eficiência energética visto que proporcionam diversos benefícios particulares e coletivos, e a não preocupação com a eficiência energética também traz grandes problemas. É fato que fazer uma análise da eficiência energética minuciosa de uma planta industrial pode ser algo complexo, mas o custo benefício compensa mesmo que seja a longo prazo.

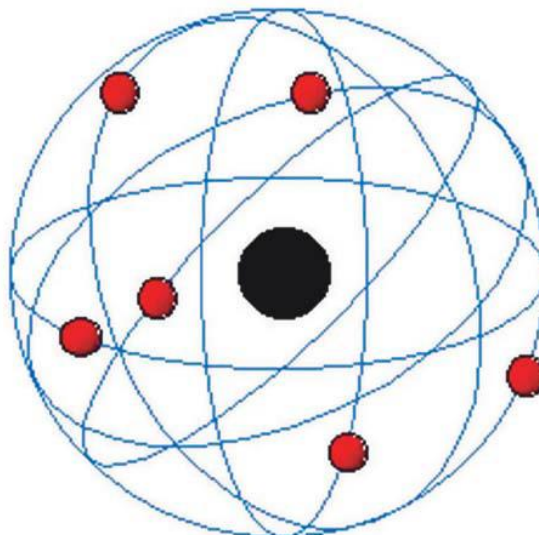
2.4 Tensão e corrente

Em circuitos elétricos, tensão e corrente elétrica são variáveis importantes e fundamentais, tão importantes que existem circuitos com objetivo de medi-las, controla-las e alterar suas propriedades. A partir de tensão e corrente que demais variáveis são possíveis de serem calculadas, como por exemplo, a potência elétrica. Para entender a definição de corrente e tensão elétrica é necessário saber o conceito de carga elétrica e campo elétrico.

O conceito de carga elétrica é o princípio fundamental para explicar todos os fenômenos elétricos. Da mesma forma, a quantidade mais elementar em um circuito elétrico é a carga elétrica. Carga é uma propriedade elétrica das partículas atômicas que compõem a matéria, medida em coulomb (C) (SADIKU, 2013). De uma forma simples, pode se interpretar carga, como se fosse um conjunto de elétrons em excesso no átomo.

Um átomo é formado por prótons, nêutrons e elétrons. O modelo do átomo apresentado por Rutherford mostra apenas prótons e elétrons como ilustra a figura 4, mas foi implementado (inclusão do nêutron no átomo) por Chadwick.

Figura 4 – Modelo atômico de Rutherford.



Fonte: (AFONSO, 2011, p. 24).

Prótons e elétrons possuem uma propriedade denominada carga elétrica, representada por q . As cargas dessas partículas têm a mesma intensidade, porém sinais contrários. A carga elétrica elementar, ou seja, a carga de um elétron ou de um próton vale $|e| = 1,6 * 10^{-19} \text{ C}$ (AFONSO, 2011).

Um átomo é considerado eletricamente neutro quando tem número de prótons e de elétrons iguais. Se, por algum motivo, houver um desequilíbrio nessa igualdade numérica, o átomo passa a se chamar íon. Os íons são positivos (cátions), no caso de perda de elétrons, ou negativos (ânions), no caso de ganho de elétrons. (AFONSO, 2011, p. 25).

Sabendo que a carga elétrica de elétrons é igual a de prótons, basta uma diferença unitária para que esse átomo, ou analisando de uma forma mais ampla, que este corpo tenha carga positiva ou negativa. A carga elétrica será o produto do número de elétrons com a carga elementar, tal cálculo é representado pela equação 1.

$$Q = n \cdot e \quad (1)$$

Sendo:

Q: Carga elétrica, dada em coulomb, [C];

n: Número de elétrons;

e: Carga elementar, $1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Um conceito importante sobre carga elétrica é a lei da conservação das cargas que afirma que cargas não podem ser criadas nem destruídas, apenas transferidas. Uma característica da carga elétrica é o fato de ela ser móvel, isto é, ela pode ser transferida de um lugar a outro, onde pode ser convertida em outra forma de energia (SADIKU, 2013).

O campo elétrico pode ser compreendido como um campo de força criado por uma carga, e em situações em que uma outra carga é exposta a este campo, a carga exposta fica sujeita a forças de atração ou repulsão, conhecida como lei de coulomb (HAYT, 2003). A equação de campo elétrico pode ser dada pela razão da força pela unidade de carga conforme a equação 2, onde o campo elétrico pode ser dado por volt por metro.

$$E = \frac{F}{q} \quad (2)$$

Sendo:

E: Campo elétrico, dado em newton por coulomb, [N/C];

F: Força, dada em newton, [N];

q: Carga elétrica de prova, dada em coulomb, [C].

A força criada por um campo elétrico quando uma determinada carga é exposta a ele é obtida pelo produto da carga elétrica com o campo elétrico, conforme a equação 3. Para deslocar uma carga presente em um campo elétrico de um ponto ao outro é preciso realizar um trabalho. O trabalho necessário para fazer o deslocamento linear é representado pela equação 4, o valor negativo presente na equação 4 é pelo fato do trabalho ser feito por um agente externo

(SADIKU, 2004). Logo se a pretensão de locomover a carga de um ponto inicial até o final, a equação é dada pelo produto da carga com a integral do campo elétrico do ponto inicial até o ponto final, representado pela equação 5. Em sùmula, movimentar uma carga presente em um campo elétrico é necessário realizar trabalho (energia), o que normalmente virá de um agente externo.

$$F = q \cdot E \quad (3)$$

$$W = -q \cdot E \cdot dl \quad (4)$$

Sendo:

W: Trabalho de deslocamento dentro do campo elétrico, dada em joule, [J].

$$W = -q \cdot \int_A^B E \cdot dl \quad (5)$$

A equação 5 como já mencionado determina o trabalho necessário para movimentar carga elétrica dentro do campo elétrico de um ponto a outro, mas analisando essa equação é possível determinar a tensão, que é dada em volt (V). Ao dividir a equação pela carga q o resultado será conforme a equação 6.

$$V_{ab} = \frac{W}{q} = \int_A^B E \cdot dl \quad (6)$$

Sendo:

V_{ab} : Tensão entre os pontos, dada em volt, [V].

A integral definida de um campo elétrico na qual sua unidade de medida é dada por volt por metro tem como resultado apenas volt. Pela equação também é perceptível que 1 volt representa 1 joule por coulomb, ou seja, quanto de energia presente por carga.

A tensão elétrica é dada por uma série de fatores, onde começa pela interação das cargas (Lei de Coulomb), interação da carga presente em um campo elétrico, o trabalho necessário para deslocar a carga em um campo elétrico e só a partir disso é possível determinar o que é tensão elétrica. A tensão elétrica também chamada de diferença de potencial (ddp) é obtida entre dois pontos e que normalmente é representado pela letra U ou V.

Lembrando que carga elétrica pode ser interpretada como um conjunto de elétrons, e que esses elétrons se movem quando estão na presença de uma ddp, ao se analisar esse fenômeno com a inclusão do tempo é possível determinar o que é corrente elétrica, pois a corrente elétrica é a variação de carga por unidade de tempo, medido em ampère (A) (SADIKU, 2013). Analisando uma superfície transversal de um cabo elétrico energizado, a corrente elétrica será dada pela quantidade de carga que passa por essa superfície por segundo, então corrente elétrica pode ser definida pela equação 7. Logo 1 ampère corresponde a 1 Coulomb por 1 segundo.

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (7)$$

Sendo:

I: Corrente elétrica, dada em ampère, [A];

dq: Elemento diferencial de carga;

dt: Elemento diferencial de tempo.

A corrente elétrica, de uma forma geral, é uma consequência da tensão, pois se há tensão também há uma força nas cargas elétricas, essa força faz com que as cargas se mexam, resultando então em corrente elétrica.

É importante ressaltar que a corrente não é visível, mas ela possui alguns efeitos, como o efeito térmico, químico, magnético, luminoso e fisiológico. O efeito térmico, também conhecido como efeito Joule, ocorre devido a colisão dos elétrons em movimento (livres) com átomos do condutor. Os átomos recebem parte da energia cinética proveniente do movimento dos elétrons e acabam aumentando sua vibração (agitação térmica) dentro do condutor, o que equivale a aumento em sua temperatura. De modo simplificado, pode-se dizer que o efeito Joule é a transformação de energia elétrica em calor. Efeito químico ocorre quando a corrente elétrica passa por certas soluções, contribuindo para a reação química. Alguns exemplos de utilização na indústria são a eletrolise, aplicada na separação de gases, purificação do alumínio, entre outros. Efeito magnético, ocorre quando a passagem da corrente elétrica por um condutor dá origem a um campo magnético a seu redor. Efeito luminoso, a corrente elétrica circulando em um recipiente no qual há gases metálicos provoca emissão de luz, como acontece com a lâmpada fluorescente. Efeito fisiológico, ao passar através dos seres vivos, a corrente pode causar diferentes efeitos, dependendo da intensidade, da duração e do caminho que ela percorre nos tecidos. Pode ocorrer desde formigamento até contração, paralisia muscular, perda de

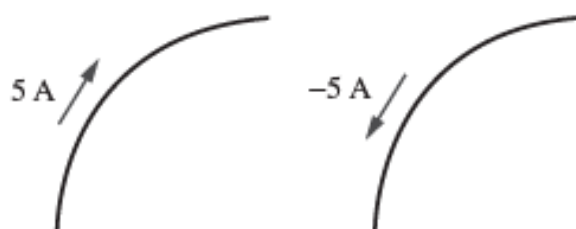
consciência, asfixia, queimaduras, entre outros (AFONSO, 2011).

2.4.1 Sentido e forma de onda

Considerando que a corrente elétrica é dada por cargas que se movimentam uniformemente e tensão como diferença de potencial, então é adotado sentidos que acabam resultando em polaridades (positivo e negativo). É comum no meio da eletrônica palavras como positivo e negativo, a polaridade é muito importante para cálculos e medições.

Tratando-se de corrente elétrica, a determinação onde é positivo e onde é negativo é feito por convenção, ou seja, a corrente é positiva na situação onde o sentido da mesma é igual ao adotado. A corrente elétrica só pode adotar dois sentidos, logo se a corrente é negativa, isso significa que o fluxo dela está ao contrário ao adotado, a figura 5 mostra tal situação. Na figura 5 em ambos os desenhos a corrente está fluindo no sentido horário, logo a primeira convenção resultou em uma corrente positiva, pois o sentido é igual ao atribuído. Diferentemente ocorre no desenho ao lado, onde a atribuição foi feita ao contrário do real, então a corrente terá valor negativo.

Figura 5 – Sentido da corrente elétrica.



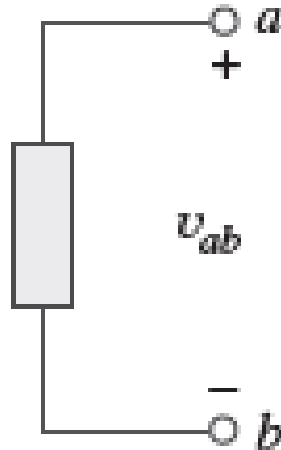
Fonte: (SADIKU, 2013, p. 6).

Entende-se que a corrente flui da polaridade positiva para a negativa, esse sentido é denominado como convencional. Isso ocorre porque, no passado, acreditava-se que as cargas positivas eram as que se moviam. Mas ao analisar a estrutura do átomo, percebe-se que não há como os prótons (considerados como carga positiva) se mexerem, então o fluxo da corrente elétrica é dado por elétrons, dessa forma a corrente flui no sentido do potencial negativo para o positivo, esse sentido é considerado como real (AFONSO, 2011). O sentido mais utilizado em cálculos é o convencional.

A determinação da polaridade da tensão é feita por valores de potencial, ou seja, o positivo é considerado o maior potencial e o negativo o menor potencial. A figura 6 ilustra que

o ponto a tem um potencial maior que o ponto b, desta maneira o ponto a é considerado positivo e o ponto b negativo.

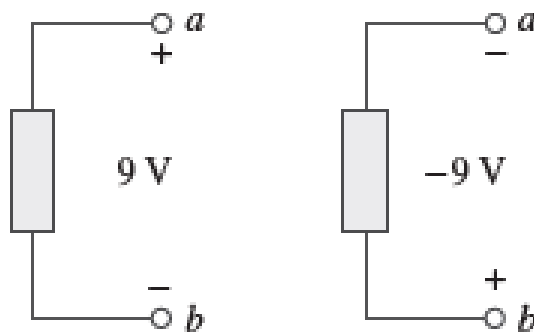
Figura 6 – Polaridade da tensão elétrica.



Fonte: (SADIKU, 2013, p. 9).

A mesma ideia de adotar o sentido da corrente ocorre para a tensão. Então, em situações em que o adotado é diferente do real, o valor da tensão será negativo, a figura 7 ilustra tal situação. Em ambas as situações na figura 7 a tensão tem a mesma polaridade.

Figura 7 – Polaridade da tensão elétrica.



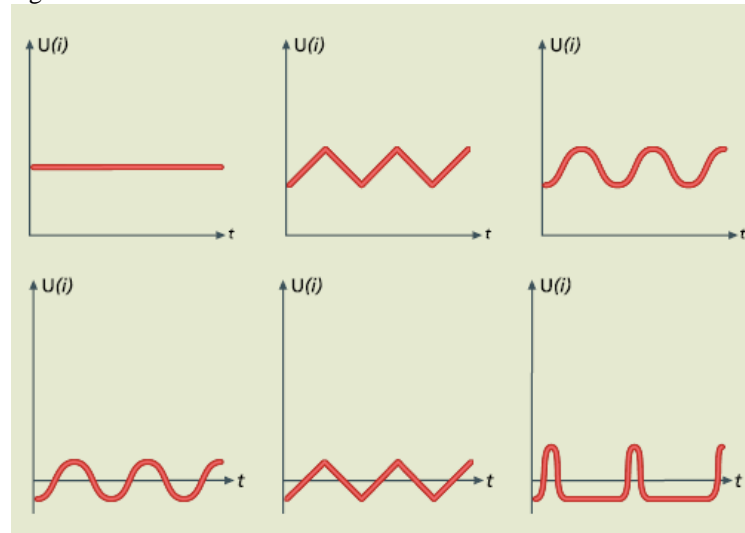
Fonte: (SADIKU, 2013, p. 9).

Adotar sentidos de corrente pode parecer algo supérfluo, porém para cálculos de circuitos são importantes e imprescindíveis para caracterizar se a tensão e corrente são contínuas ou alternadas. Em função da polaridade e magnitude que a tensão assume e em função do tempo pode ser possível gerar gráficos para analisar a forma de onda da tensão e corrente.

Existem basicamente dois tipos de tensão e corrente, o sinal de tensão e corrente alternada (CA) e a tensão e corrente contínua (CC). O sinal contínuo não muda sua polaridade

ao longo do tempo. O sinal alternado muda sua polaridade periodicamente ao longo do tempo (AFONSO, 2011). A figura 8 ilustra algumas formas de ondas possíveis.

Figura 8 – Formas de onda.



Fonte: (AFONSO, 2011, p. 37).

O transporte de energia elétrica em sua grande maioria no sistema elétrico de potência é dado por tensão alternada, desde a tomada de uma residência até a geração de energia a tensão alternada está presente. Isso é natural do sistema pelo motivo de normalmente as usinas possuem geradores rotativos, como resultado produzem uma tensão senoidal periódica.

O nome senoidal vem de seno, então a tensão senoidal pode ser representada por seno ou cosseno. A representação da tensão senoidal se dá pela frequência dada em radianos por segundo, fase dado em graus e a amplitude da onda. A tensão senoidal é em função do tempo, pois a cada instante o valor da tensão será diferente dentro de um ciclo. A equação de uma tensão senoidal é dada pela equação 8. É importante ressaltar que onda senoidal e cossenoidal diferem apenas no ângulo.

$$V(t) = V_m \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \phi) \quad (8)$$

Sendo:

$V(t)$: Tensão senoidal, dada em volt, [V];

V_m : Tensão de pico, dada em volt, [V];

ω : Frequência angular, dada em radiano por segundo, [Rad/s];

t : Tempo, dado em segundos, [s];

ϕ : Fase, dada em graus.

2.4.2 Valor eficaz

Como mencionado, a energia elétrica provinda do sistema elétrico brasileiro tem característica senoidal sem *offset*, isso significa que a tensão do sistema elétrico brasileiro é alternada, então possui um valor de frequência e RMS (Root Mean Square) ou também conhecido como valor eficaz. O valor eficaz ou RMS pode ser compreendido como uma componente contínua imaginária que, no mesmo intervalo de um ciclo do sinal CA, produz a mesma potência total desse sinal alternado (AFONSO, 2011).

O valor médio de qualquer onda corresponde a uma componente contínua que divide a onda ao meio. Uma tensão senoidal sem *offset* terá valor médio igual a zero, pois a metade de uma tensão senoidal desse tipo se localiza exatamente no valor zero.

O conceito de valor eficaz provém da necessidade de medir a eficácia de uma fonte de tensão ou de corrente na liberação de potência para uma carga resistiva. Segundo Sadiku (2013, p. 414) o “valor eficaz de uma corrente periódica é a corrente CC que libera a mesma potência média para um resistor que a corrente periódica”. O valor em RMS para qualquer função periódica é dada pela equação 9.

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2 dt} \quad (9)$$

Sendo:

X_{rms} : Valor eficaz;

T: período, dado em segundo, [s];

X: Função senoidal.

Como as vezes pode ser trabalhoso usar a equação 9, então é aplicado alguns métodos matemáticos a fim de simplificar os cálculos. Como o objetivo é determinar uma equação mais simples para cálculos RMS de sinal senoidal ou cossenoidal, primeiramente deve-se inserir a expressão que representa uma forma de onda periódica. Adotando uma onda de tensão cossenoidal, a inserção da expressão na equação 9 resulta na equação 10.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [V_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi)]^2 dt} \quad (10)$$

Sendo:

V_{rms} : tensão eficaz, dada em volt, [V].

Resolvendo a integral da equação 10 e considerando que o ângulo da onda começa em zero grau e que a frequência angular é igual $\frac{2 \cdot \pi}{T}$, então obtém-se o resultado apresentado na equação 11. Seno de múltiplo de 2π é igual a zero, então o que está multiplicando o seno também resulta em zero. Desta maneira a equação ficará da forma como a equação 12.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_m^2 \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot T} \left[\frac{1}{4} \cdot \text{sen} \left[2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot T}{T} \right) \right] + \frac{2 \cdot \pi \cdot T}{2 \cdot T} \right]} \quad (11)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_m^2 \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot T} \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot T}{2 \cdot T} \right]} \quad (12)$$

A partir da equação 12 é necessário aplicar regras de multiplicação de fração, onde é possível reduzir a equação e aplicar a regra de raiz quadrada resultando em uma equação simples, onde é possível calcular para toda onda senoidal ou cossenoidal periódica o seu valor em RMS. Após a aplicações a equação fica como mostra a equação 13.

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (13)$$

2.5 Medidores de tensão e corrente

A energia elétrica é humanamente impossível de ser enxergada e também de ser medida sem algum tipo de aparelho, o máximo que um ser humano consegue sem equipamentos é a constatação da presença ou não da tensão elétrica, ou seja, choque elétrico. Então só é possível medir a energia elétrica com os equipamentos.

Equipamentos de medição são diversos pela sua qualidade, precisão, exatidão e capacidade, pois existem muitas grandezas possíveis de serem medidas, como tensão, corrente, potência, frequência, fator de potência, harmônicas, entre outras grandezas. Obviamente que quanto mais grandezas e qualidade o equipamento tiver maior será o seu custo, atualmente existem equipamentos com custo de algumas dezenas de reais até algumas dezenas de milhares de reais. Muitos equipamentos são denominados pela grandeza que ele mede, por exemplo,

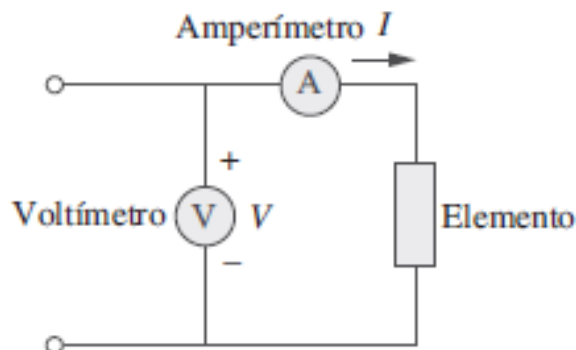
voltímetro mede tensão dado em volt, amperímetro mede corrente dado em ampère, wattímetro mede potência dado em watt (W) e assim por diante.

Existem também equipamentos mais sofisticados como o analisador de qualidade de energia capaz de medir várias grandezas, gerar gráficos, o analisador de qualidade de energia consegue gerar relatório completo de uma rede elétrica, e diversas outras funções. Outro equipamento mais sofisticado bastante utilizado é o multímetro que engloba várias funções como o voltímetro, amperímetro, ohmímetro, entre outras grandezas.

Pela grande quantidade de equipamentos de medição existentes, é uma das funções de um engenheiro saber qual o melhor equipamento para cada situação, conseguir o melhor equipamento de medição em função do custo benefício para cada função empregada.

Para cada tipo de medidor a se utilizar existe uma forma de empregá-lo no circuito para fazer a correta medição. Equipamentos responsáveis por medir tensão, normalmente, são colocados em paralelo e para medir corrente são colocados em série, conforme a figura 9. Existem equipamentos que medem corrente que não ficam em série com o circuito, eles conseguem medir através do efeito magnético criado pela corrente.

Figura 9 – Utilização de voltímetro e amperímetro.



Fonte: (SADIKU, 2013, p. 54).

Existem diversos métodos para equipamentos realizarem as medições elétricas, e isso varia de acordo com o tipo de equipamento, se é analógico, digital ou micro processado. Equipamentos analógicos normalmente possuem uma bobina móvel que controla um ponteiro, então de acordo com a corrente que passa por essa bobina, resultará em uma posição de ponteiro. O digital usa de métodos para converter o sinal de entrada em sinais digitais. Os medidores micro processados tem como princípio do processo amostrar o sinal a ser lido, através dessas amostras em número suficientes e com resolução adequada, é possível realizar os devidos cálculos para saber o valor da magnitude. Segundo Belchior (2014, p. 171) “os valores das amostras são armazenados sob a forma binária em um trecho de memória que, ao

final da amostragem do período, serão numericamente manipulados para que se obtenha os valores das grandezas”.

Alguns dos equipamentos indispensáveis no cotidiano de um engenheiro eletricitista para medição de energia elétrica é o multímetro e o analisador de qualidade de energia. Como já mencionado o multímetro tem a função de medir várias grandezas elétricas, o analisador tem funções bem mais sofisticadas. Para avaliação da qualidade de energia de alguma instalação o uso de um analisador de qualidade de energia é indispensável.

Os valores referência para leitura do projeto proposto será obtido através do analisador de qualidade de energia ION 7650. Este equipamento apresenta as seguintes características, 512 amostras por ciclo, uma precisão de tensão de $\pm 0,1\%$, corrente de $\pm 0,1\%$, frequência de $\pm 0,005$ hertz e fator de $\pm 0,2\%$. A faixa de leitura direta de tensão do analisador é 0 a 347 V entre fase e neutro, a faixa de corrente é de 0 a 5 A (SCHNEIDER, 2009). Este analisador tem boas características de exatidão de leitura e possui o selo do INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) o que reforça a capacidade de o analisador servir de referência para o projeto.

2.6 Transformadores de medida

Transformadores de medida são equipamentos que permitem aos instrumentos de medição e proteção funcionar adequadamente sem que seja necessário possuírem correntes e tensões nominais de acordo com a corrente de carga e a tensão do circuito principal (MAMEDE 2011). Isso significa que um medidor que opera por volta de alguns volts e ampères possa fazer a leitura de milhares de volts e ampères através da utilização de transformadores de medida.

Existem transformadores para medir corrente, denominados como transformador de corrente (TC) e os transformadores para medir tensão, denominados como transformador de potência (TP).

2.6.1 Transformador de corrente

Segundo Mamede (2011, p. 54) “os transformadores de corrente na sua forma mais simples possuem um primário, geralmente de poucas espiras, e em um secundário, no qual a corrente nominal transformada é, na maioria dos casos, igual a 5 A”.

Os TCs transformam, por meio do fenômeno de conversão magnética, correntes elevadas, que circulam no seu primário, em pequenas correntes secundárias, segundo uma relação de transformação. A corrente primária a ser medida, circulando nos enrolamentos primários, cria um fluxo magnético alternado que faz induzir forças eletromagnéticas nos enrolamentos primário e secundário. (MAMEDE, 2011, p. 54).

Em síntese, a corrente primária induz uma corrente no secundário, a qual é proporcional ao número de enrolamentos do primário e secundário. Então há uma relação de número de espiras primária e secundária com as correntes primária e secundária, na qual é expressa pela equação 14.

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} \quad (14)$$

Sendo:

N_1 : Número de espiras do enrolamento primário;

N_2 : Número de espiras do enrolamento secundário;

I_1 : Corrente no enrolamento primário, dada em ampère, [A];

I_2 : Corrente no enrolamento secundária, dada em ampère, [A].

Existem diversos tipos de TC quanto a sua construção, eles são do tipo barra, enrolado, janela, bucha, núcleo dividido, com vários enrolamentos primários, com vários núcleos secundários, com vários enrolamentos secundários e do tipo derivação no secundário. Cada um com suas particularidades quanto ao uso.

Sabendo que o TC é utilizado para medições de corrente elétrica, então a inserção dele no circuito é de forma que o TC fique em série com a carga, esse tipo de TC é conhecido como invasivo, pois o TC entra no circuito para realizar a medição, TC tipo barra é um exemplo de invasivo. Existe também o TC não invasivo, onde o cabo é envolvido totalmente pelo TC e assim não há necessidade do TC entrar no circuito, um exemplo de TC não invasivo é o tipo janela.

Ao escolher um TC é preciso verificar suas características elétricas também para que o mesmo possa atuar no sistema de forma correta. As características são, corrente nominal, carga nominal, fator de sobrecorrente, corrente de magnetização, tensão secundária, reatância, fator térmico nominal, corrente térmica nominal, fator térmico de curto-circuito, corrente dinâmica nominal, tensão suportável à frequência industrial, polaridade, erros dos transformadores de corrente e classe de exatidão.

Um ponto importante são as simbologias adotadas para fazer uma correta leitura do TC. A Norma Brasileira (NBR) 6856 adota as seguintes simbologias para definir as relações de corrente: o sinal de dois pontos deve ser usado para exprimir relações de enrolamentos, como

por exemplo, 300:1; O hífen deve ser usado para separar correntes nominais de enrolamentos diferentes, como por exemplo, 300-5 A, 300-300-5 A (dois enrolamentos primários), 300-5-5 (dois enrolamentos secundários); O sinal de multiplicação deve ser usado para separar correntes primárias nominais, ou ainda relações nominais duplas, como, por exemplo, 300X600-5 A (correntes primárias nominais) cujos enrolamentos podem ser ligados em série ou paralelo; A barra deve ser usada para separar correntes primárias nominais ou relações nominais obtidas por derivações, efetuadas tanto nos enrolamentos primários como nos secundários, como por exemplo, 300/400-5 A ou 300-5/5 A (MAMEDE, 2011).

Todo TC deve fazer leituras acima da sua corrente nominal, essa capacidade de o TC realizar leituras de valores acima do nominal é denominado como fator de sobrecorrente ou fator de segurança. A NBR 6856 especifica o fator de sobrecorrente para serviço de proteção em 20 vezes a corrente nominal. No caso de transformadores de corrente para uso na medição, o fator de sobrecorrente vale 4 vezes a corrente nominal (MAMEDE, 2011).

2.6.2 Transformador de potencial

Segundo Mamede (2011, p. 78) “os transformadores de potencial são equipamentos que permitam aos instrumentos de medição e proteção funcionarem adequadamente sem que seja necessário possuir tensão de isolamento de acordo com a da rede à qual estão ligados”.

Na sua forma mais simples, os transformadores de potencial possuem um enrolamento primário de muitas espiras e um enrolamento secundário por meio do qual se obtém a tensão desejada. Dessa forma, os instrumentos de proteção e medição são dimensionados em tamanhos reduzidos com bobinas e demais componentes de baixa tensão. (MAMEDE, 2011, p. 78).

Em síntese o TP tem seu princípio de funcionamento igual ao TC, a diferença está na construção que acaba resultando em alterações de grandezas diferentes, TP altera valores de tensão. O TP também possui uma relação de transformação apresentada pela equação 15.

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (15)$$

Sendo:

V_1 : Tensão no enrolamento primário, dada em volt, [V];

V_2 : Tensão no enrolamento secundário, dada em volt, [V].

Existem dois tipos de TP, o tipo indutivo e do tipo capacitivo. Os transformadores de potencial do tipo indutivo, são dotados de um enrolamento primário envolvendo um núcleo de ferrosilício que é comum ao enrolamento secundário. Os transformadores de potencial funcionam com base na conversão eletromagnética entre os enrolamentos, o primário e secundário. Assim, para uma determinada tensão aplicada no enrolamento primário, obtém-se no terminal secundário uma tensão proporcional em função da relação de transformação. Da mesma forma, se aplicada uma tensão no secundário, obtém-se no terminal primário uma tensão de valor em função da relação de transformação (MAMEDE, 2011).

Os transformadores do tipo capacitivo são construídos basicamente com a utilização de dois conjuntos de capacitores que servem para fornecer um divisor de tensão e permitir a comunicação de dados e de voz pelo sistema *carrier*. O transformador de potencial capacitivo é constituído de um divisor capacitivo, cujas células que formam o condensador são ligadas em série e o conjunto fica imerso no interior de um invólucro de porcelana. (MAMEDE, 2011, p. 82).

A utilização de um TP é para monitoramento da tensão, então a inserção do TP em um circuito elétrico é de forma que o mesmo fique em paralelo com demais cargas. Desta maneira as correntes das cargas não passam pelo TP e somente é amostrado a tensão elétrica para medidores ou sistemas de proteção.

Ao escolher um TP é preciso verificar suas características elétricas também para que o mesmo possa atuar no sistema de forma correta. As características são, erro de relação de transformação (erro de ângulo e classe de exatidão), tensões nominais, cargas nominais, polaridade, descargas parciais, potência térmica nominal e tensões suportáveis.

Segundo a NBR 6855 para os transformadores de potencial o sinal de dois pontos deve ser usado para representar relações nominais, como, por exemplo, 120:1; O hífen deve ser usado para separar relações nominais e tensões primárias de enrolamentos diferentes, como, por exemplo, 13800-115 V; O sinal de multiplicação deve ser usado para separar tensões primárias nominais e relações nominais de enrolamentos destinados a serem ligados em série ou paralelo, como, por exemplo, 6900 X 13800 – 115 V; A barra deve ser usadas para separar tensões primárias nominais e relações nominais obtidas por meio de derivações, seja no enrolamento primário, seja no enrolamento secundário, como, por exemplo, $69000/\sqrt{3} - 115/115/\sqrt{3}$ (MAMEDE, 2011).

2.7 Cargas

No âmbito elétrico estão presentes três tipos de cargas, resistivas, indutivas e capacitivas, apesar de na prática não existir cargas totalmente resistivas, indutivas ou capacitivas. As cargas indutivas ou capacitivas são consideradas como cargas reativas, logo o valor ôhmico de determinada carga não é chamado mais por resistência e sim por impedância.

Como próprio nome descreve, cargas indutivas ou capacitivas são aquelas que possuem características de um capacitor ou um indutor, lembrando que indutores e capacitores reagem conforme frequência, conforme mostra a equação 16 e 17. A reatância indutiva, dada em ohms, é calculada pelo produto da frequência com a indutância, a unidade de medida da indutância é dada em henry. A reatância capacitiva, dada em ohms, é calculada pela razão de 1 pelo produto da frequência com a capacitância, a capacitância é dada em farad. A frequência pode alterar o valor da impedância de uma carga reativa, justificando então o nome de cargas reativas.

$$X_L = j\omega \cdot L \quad (16)$$

Sendo:

X_L : Reatância indutiva, dada em ohms, [Ω];

L: Indutância, dada em henry, [H].

$$X_C = \frac{1}{j\omega \cdot C} \quad (17)$$

Sendo:

X_C : Reatância capacitiva, dada em ohms, [Ω];

C: Capacitância, dada em farad, [F].

Cargas reativas são compostas por uma parcela resistiva e outra parcela indutiva ou capacitiva. Em uma resultante jamais existirá uma carga indutiva capacitiva, pois essas cargas tendem a se anular quando se trata de reatância. O cálculo de um circuito resistivo e indutivo ou capacitivo na forma retangular é dado pela equação 18.

$$Z = R + jX \quad (18)$$

Sendo:

Z: Impedância, dada em ohms, [Ω];

R: Resistência, dada em ohms, [Ω];

X: Reatância, dada em ohms, [Ω].

A reatância pode ser positiva ou negativa. A impedância é indutiva quando a reatância é positiva, ou capacitiva quando a reatância é negativa. Portanto, diz-se que a impedância é capacitiva ou avançada, porque a corrente está adiantada em relação à tensão. Impedância, resistência e reatância são todas medidas em ohms. (SADIKU, 2013). A impedância também pode ser expressa pela forma polar, como mostra a equação 19, e deve ser calculada conforme equação 20 e 21.

$$Z = |Z| \angle \theta \quad (19)$$

Sendo:

θ : Ângulo da carga, dada em graus.

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (20)$$

$$\theta = \text{tg}^{-1} \frac{X}{R} \quad (21)$$

A importância de saber o ângulo de uma carga se dá pelo fato da defasagem que essa carga pode criar no sistema, de adiantamento ou atraso da corrente em relação à tensão, e a forma polar facilita essa informação. A forma retangular facilita para o cálculo das potências. Para cada tipo de cálculo é favorável deixar a impedância de uma forma ou de outra, mas também há como fazer essas conversões facilmente.

A maioria das cargas reativas encontradas são indutivas, pois é fácil encontrar, por exemplo, cargas como motores, reatores e transformadores, principalmente em um ambiente industrial. As cargas resistivas são bem encontradas também, muitas vezes são cargas que liberam energia térmica, como por exemplo fornos e chuveiros. Lâmpadas incandescentes também são consideradas resistivas. Cargas capacitivas são mais raras no âmbito elétrico, mas podem ser encontradas em algumas.

Saber a característica de cada carga é de extrema importância, pois a quantidade e a magnitude podem afetar diretamente as instalações elétricas em diversos aspectos e como já mencionado gerar muitas perdas para alguns consumidores de energia elétrica pelo fato de alterar o fator de potência.

2.8 Potência

A carga em um circuito elétrico é o componente responsável por fazer consumo de potência elétrica, é a carga que vai consumindo energia elétrica e transformando-a, como no exemplo de uma resistência que faz o consumo de energia elétrica e produz calor, assim a resistência transformou a energia elétrica em energia térmica (denominado como efeito Joule). Existem diversos tipos de cargas, nas quais consome energia para produzir luz, calor, movimentos, entre outras.

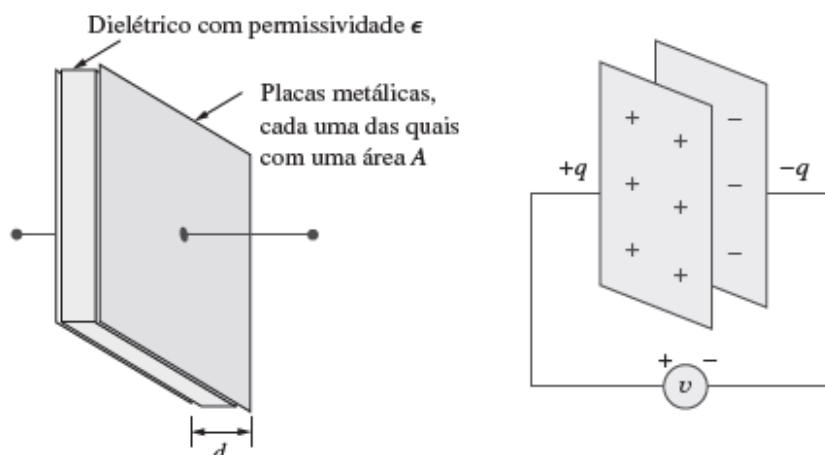
Um dos principais objetivos do sistema elétrico de potência é o transporte de energia. Colocar energia nas cargas e aplicar uma força eletromotriz para as cargas se locomoverem tem um único objetivo, transportar energia por meio da eletricidade. Uma das equações para o cálculo de potência é o produto da tensão e corrente. Tensão é joule por coulomb, ou seja, quantidade de energia para cada unidade de carga, corrente elétrica é o fluxo de carga por unidade de tempo (SADIKU, 2013). Ao multiplicar joule por coulomb com coulomb por segundo o resultado será de joule por segundo, e watt é justamente joule por segundo. Então se uma determinada carga consome 1 watt significa que ela consome 1 joule de energia por segundo.

Um conceito importante sobre potência é que não há perda de potência, não existe perda de energia e sim transformação da mesma, pois na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma (LAVOISIER, apud BRAGA, 2000, p. 46). O que costumasse chamar de perda de potência ou de energia é na verdade transformação indesejada da mesma, por exemplo, uma tomada fornecendo 100 W e a carga consumindo 90 W, logo 10 W pode estar sendo consumido por cabos e/ou conexões.

Com a variedade de carga existente, resistiva, indutiva e capacitiva, também há potências diferentes e são conhecidas como potência ativa, reativa e aparente. Para entender essas três potências é preciso entender um conceito de indutores e capacitores. A potência reativa existe quando há circuitos com características indutivo ou capacitivo, essa potência é devolvida ao circuito, logo não há transformação de energia por parte dos indutores ou capacitores.

Genericamente um capacitor é constituído por duas placas e um dielétrico entre elas conforme a figura 10. Ao interligar o capacitor em um circuito o mesmo terá suas placas polarizadas. As cargas elétricas presentes nas placas acabam se atraindo por terem suas placas bem próximas e assim o capacitor armazena energia.

Figura 10 – Placa do capacitor.



Fonte: (SADIKU, 2013, p. 190).

O capacitor em circuitos de corrente alternada tem o comportamento de carga e descarga, dessa forma toda energia fornecida ao capacitor é entregue ao circuito elétrico, ou seja, não há transformação de energia, apenas uma troca infinita entre capacitor e gerador, é importante ressaltar que na prática essa situação é impossível pois todo capacitor tem uma parcela resistiva. O capacitor é um componente que consegue armazenar energia em forma de campo elétrico. Em âmbitos de tensão e corrente o capacitor proporciona um avanço temporal da corrente em relação a tensão.

O indutor em circuitos de corrente alternada tem o comportamento de produzir campo eletromagnético. O campo eletromagnético criado por uma corrente que passa pelo indutor irá induzir uma corrente no mesmo indutor, porém no sentido contrário, este fenômeno é conhecido como lei de Lenz. Dessa forma a corrente cria um campo eletromagnético, mas esse campo também cria uma corrente no indutor e isso faz um ciclo infinito de carga e descarga de indutor, é importante observar que na prática essa situação é impossível, pois todo indutor tem uma parcela resistiva. Um indutor presente em um circuito elétrico alternado é capaz de defasar a corrente em relação a tensão. Em circuitos predominantemente indutivos a corrente se atrasa em relação a tensão.

Nos componentes reativos, capacitor e indutor, percebe-se que ambos têm características próprias de ficar trocando energia com sua fonte, ou seja, em alguns períodos consumindo energia e em outros devolvendo essa energia com a mesma magnitude, essa energia transitando é a potência reativa.

2.8.1 As três potências

Visto que a existência das três potências se dá pelo motivo de existir cargas distintas, logo o cálculo das mesmas é obtido de forma particular, porém sempre existirá correlações entre elas.

A potência aparente é o produto dos valores eficazes da tensão e corrente, conforme mostra a equação 22, a unidade de medida é dada em volt-ampère (VA) (SADIKU, 2013). Observando a figura 11 percebe-se que é possível calcular as três potências utilizando ferramentas trigonométricas. Uma observação relevante é que a potência aparente é a potência de maior magnitude e isso é comprovado pela figura 11, pois no triângulo das potências a aparente é a hipotenusa.

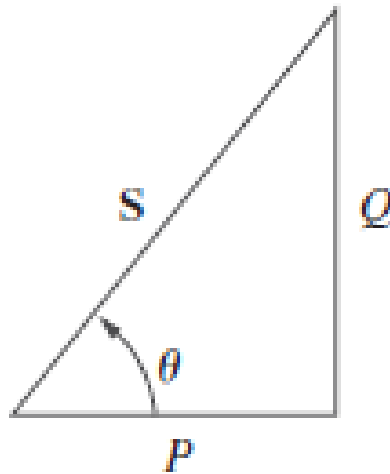
$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad (22)$$

Sendo:

S: Potência aparente, dada em volt-ampère, [VA];

I_{rms} : Corrente eficaz, dada em ampère, [A].

Figura 11 – Relação das três potências.



Fonte: (SADIKU, 2013, p. 421).

A potência reativa é dada pela troca de energia entre gerador e o componente reativo como já mencionado, sua unidade de medida é o volt-ampère reativo (VAR). A potência reativa pode ser calculada conforme a equação 23. A potência reativa não é interessante para o sistema elétrico, pois ocupa espaço no sistema sem a realização de trabalho e não é há como extingui-la, mas existem meios de se resolver esse problema para o sistema.

$$Q = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \sin(\theta_v - \theta_i) \quad (23)$$

Sendo:

Q: Potência reativa, dada em volt-ampère reativo, [VAR];

θ_v : Ângulo da tensão, graus;

θ_i : Ângulo da corrente, graus.

A potência ativa, conhecida também como potência média, é aquela potência onde realmente a carga transforma a energia elétrica consumida em outra forma de energia, em outras palavras é a potência que realiza trabalho. A capacidade de uma lâmpada produzir luz, o motor de produzir rotação, a resistência de produzir calor, entre outros exemplos, nada mais é que a transformação dessa potência ativa. A unidade de medida da potência ativa é watt. Então a potência ativa é o que a carga consegue transformar em alguma outra forma de energia (SADIKU, 2013). O seu cálculo também é feito pelo produto da corrente com a tensão, conforme a equação 24.

$$P = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (24)$$

Sendo:

P: Potência ativa, dada em watt, [W].

2.8.2 Potência complexa

Foi aplicado um esforço considerável ao longo de anos para expressar as relações de potência da forma mais simples possível. Os engenheiros de sistemas de potência criaram o termo potência complexa para determinar o efeito total das cargas em paralelo. A potência complexa é importante na análise de potência por conter todas as informações pertinentes à potência absorvida por uma determinada carga. (SADIKU, 2013, p. 419).

Usar a potência complexa é um meio de conseguir representar todas as potências ao mesmo tempo. Potência complexa é dada em VA, e seu cálculo é o produto da tensão RMS com seu fasor e a corrente RMS com seu fasor conjugado. Por ser um número complexo, sua parte real é a potência real e sua parte imaginária é a potência reativa (SADIKU, 2013).

A vantagem de trabalhar com potência complexa é pela facilidade de encontrar todas as potências e o fator de potência. A representação da potência complexa é dada pela equação 25.

$$S = P + jQ \quad (25)$$

Sendo:

S: Potência complexa, dada em volt-ampère, [VA].

Note que $Q = 0$ para cargas resistivas o fator de potência é unitário; $Q < 0$ para cargas capacitivas fator de potência adiantado; $Q > 0$ para cargas indutivas fator de potência atrasado (SADIKU, 2013).

2.8.3 Fator de potência

O fator de potência (FP) é o cosseno da diferença de fase entre tensão e corrente. Ele também é o cosseno do ângulo da impedância da carga (SADIKU, 2013). A relação da potência ativa pela potência aparente resulta no fator de potência e por esse motivo que o fator de potência é adimensional.

O fator de potência pode ser visto como aquele fator pelo qual a potência aparente deve ser multiplicada para se obter a potência média ou real. O valor do FP varia entre zero e a unidade. Para uma carga puramente resistiva, a tensão e a corrente estão em fase, de modo que $\theta_v - \theta_i = 0$ e $FP = 1$. Isso faz que a potência aparente seja igual à potência média. Para uma carga puramente reativa, $\theta_v - \theta_i = \pm 90^\circ$ e $FP = 0$. Nesse caso, a potência ativa é zero. Entre esses dois casos extremos, diz-se que o FP está adiantado ou atrasado. Um fator de potência adiantado significa que a corrente está adiantada em relação à tensão, implicando uma carga capacitiva. Um fator de potência atrasado significa que a corrente está atrasada em relação à tensão, implicando uma carga indutiva (SADIKU, 2013).

2.9 Correção do fator de potência

A maioria das cargas de utilidades domésticas, como máquinas de lavar roupa, aparelhos de ar-condicionado, refrigeradores, e também as industriais, como motores de indução, são indutivas e podem operar com um fator de potência baixo. Embora sua natureza não possa ser alterada, podemos aumentar o seu fator de potência. O processo de aumentar o fator de potência sem alterar a tensão ou corrente para a carga original é conhecido como correção do fator de potência. Como forma alternativa, a correção do fator de potência pode ser vista como o acréscimo de um elemento reativo (normalmente, um capacitor) em paralelo com a carga de modo a tornar o fator de potência mais próximo da unidade (SADIKU, 2013).

A principais causas no setor industrial para o baixo fator de potência são, motores operando em vazio, motores superdimensionados, transformadores operando a vazio, transformadores operando com baixa carga, transformadores superdimensionados, lâmpadas de

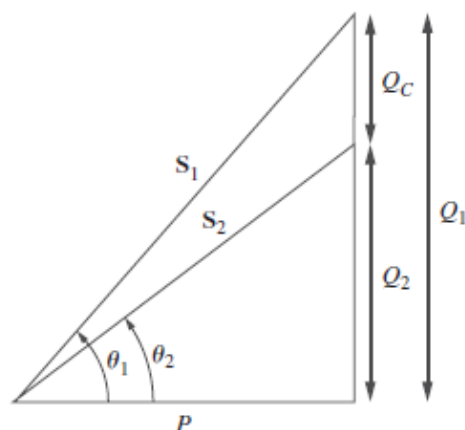
descarga e grande quantidade de motores de pequena potência (COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, 2005).

As consequências de um baixo fator de potência para a instalação do local são incremento das perdas de potência, flutuação de tensão, sobrecarga da instalação, aumento do desgaste nos dispositivos de proteção e manobra na instalação elétrica, aumento do investimento em condutores elétricos, saturação da capacidade dos equipamentos, dificuldade de regulação do sistema (COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, 2005).

Para a correção do fator de potência é preciso ter quatro assuntos já abordados em mente, primeiramente é que em um circuito predomina-se o efeito capacitivo ou indutivo, que o indutor atrasa a corrente em relação a tensão e o capacitor adianta a corrente, o triângulo das potências e um capacitor pode trocar energia com um indutor e vice-versa. Corrigir o fator de potência pode ser entendido como diminuir a potência reativa do sistema ou diminuir a sua proporção.

Observando a figura 12 e considerando que a mesma seja de uma carga indutiva, percebe-se que θ_1 é maior que θ_2 o que significa que o fator de potência do θ_1 é menor. Nesta situação, θ_1 é o ângulo da defasagem antes da correção do fator de potência e θ_2 é o ângulo da defasagem depois da correção do fator de potência. Na intenção de corrigir o fator de potência fazendo com Q_1 vá para Q_2 , é acrescentado uma potência reativa capacitiva Q_C . O acréscimo dessa potência capacitiva faz com que o novo ângulo seja θ_2 .

Figura 12 – Correção do fator de potência.



Fonte: (SADIKU, 2013, p.427).

Em função da figura 12 é possível determinar uma equação para chegar a um valor de potência reativa do Q_C . Com conceitos trigonométricos o valor de Q_1 na figura 12 pode ser dado pela equação 26 e Q_2 pela equação 27.

$$Q_1 = P \cdot \text{tg}(\theta_1) \quad (26)$$

Sendo:

Q_1 : Potência Reativa, dada em volt-ampère reativo, [VAR];

θ_1 : Ângulo da defasagem, graus.

$$Q_2 = P \cdot \text{tg}(\theta_2) \quad (27)$$

Sendo:

Q_2 : Potência Reativa, dada em volt-ampère reativo, [VAR];

θ_2 : Ângulo da defasagem, graus.

Evidentemente que Q_C da figura 12 é dado pela diferença de Q_1 e Q_2 , então chega-se na equação que define a quantidade de potência reativa capacitiva o circuito precisa para ter o fator de potência corrigido. Nesta equação θ_2 representa qual será o novo ângulo, normalmente é estipulado um novo fator de potência que é representado pelo θ_2 . A equação para o cálculo do fator de potência é dada pela equação 28.

$$Q_C = P \cdot (\text{tg}(\theta_1) - \text{tg}(\theta_2)) \quad (28)$$

Sendo:

Q_C : Potência Reativa, dada em volt-ampère reativo, [VAR].

Em alguns casos pode ser preciso saber a capacitância em farad do banco de capacitor, isso também é possível e pode ser utilizado a equação 29.

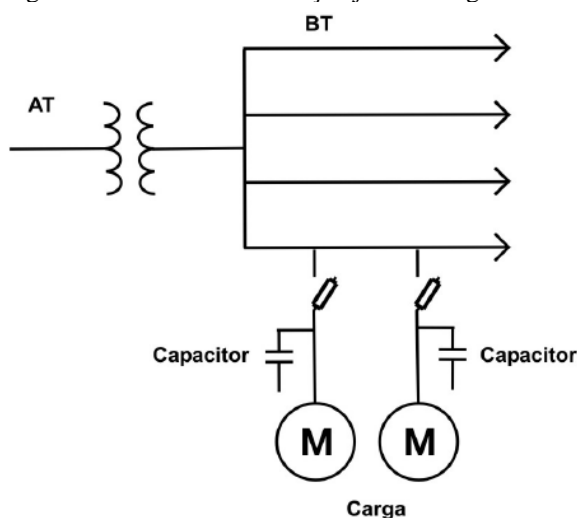
$$C = \frac{Q_C}{\omega \cdot V_{rms}^2} \quad (29)$$

A correção do fator de potência deverá ser cuidadosamente analisada e não resolvida de forma simplista, já que isto pode levar a uma solução técnica e economicamente não satisfatória. É preciso critério e experiência para efetuar uma adequada correção, lembrando que cada caso deve ser estudado especificamente e que soluções imediatas podem não ser as mais convenientes. (COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, 2005, p. 101).

Em situações em que o fator de potência é corrigido com inserção de capacitores na rede é preciso definir o local de instalação desses capacitores. Existem vantagens e desvantagens a cada método utilizado. A correção pode ser feita no lado de alta tensão dos transformadores, no lado de baixa dos transformadores, em barramentos que alimentam um grupo de cargas, individualmente em cargas, e em ramais de baixa tensão (RICHTER, 2013).

A correção individualmente na carga, conforme a figura 13, tem a vantagem de não possuir um sistema de controle ou responsáveis para fazer o controle do capacitor na rede. A desvantagem é que para cada carga indutiva é necessário um capacitor. Dependendo da quantidade de cargas indutivas esse método pode ficar inviabilizado.

Figura 13 – Método de correção junto a carga.



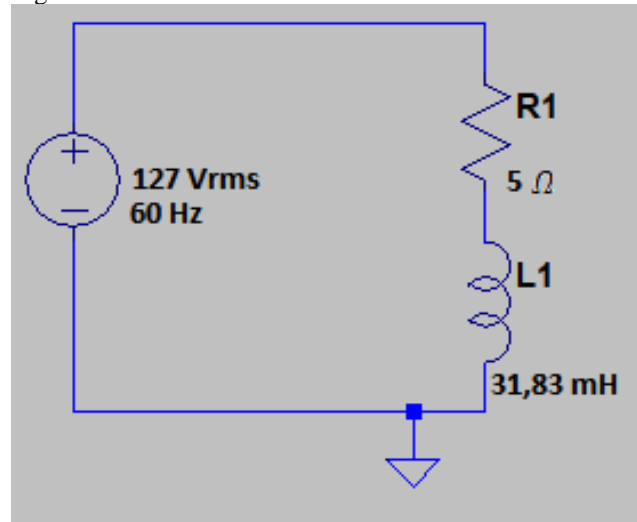
Fonte: (COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, 2005, p. 102).

Com exceção do método individual de correção, existe uma necessidade de fazer o controle do capacitor na rede elétrica, pois quando o capacitor é instalado em algum ramal ou barramento deve-se saber em qual momento inserir e retirar o capacitor da rede elétrica. Fazer esse procedimento manualmente é possível, porém ineficiente. Outra forma de fazer o controle é através de dispositivos eletrônicos, conhecidos como controladores de fator de potência ou controladores de banco capacitivo.

Os controladores de fator de potência são responsáveis por fazer leitura a todo momento da rede elétrica e verificar se há necessidade de inserir ou retirar capacitor na rede elétrica para corrigir o fator de potência. Dessa maneira o dispositivo sempre atua para tentar manter o fator de potência desejado. O ponto negativo de se usar um controlador é o custo, que varia na média de alguns milhares de reais.

Em uma simulação realizada no LT Spice é possível concretizar o conceito de correção de fator de potência. Para a realização da simulação, é inserida uma carga com uma impedância igual a $5 + j12 \Omega$ sendo alimentada por uma fonte de 120 Vrms e 60 Hz, conforme mostra a figura 14. Este circuito apresentado pode representar um motor.

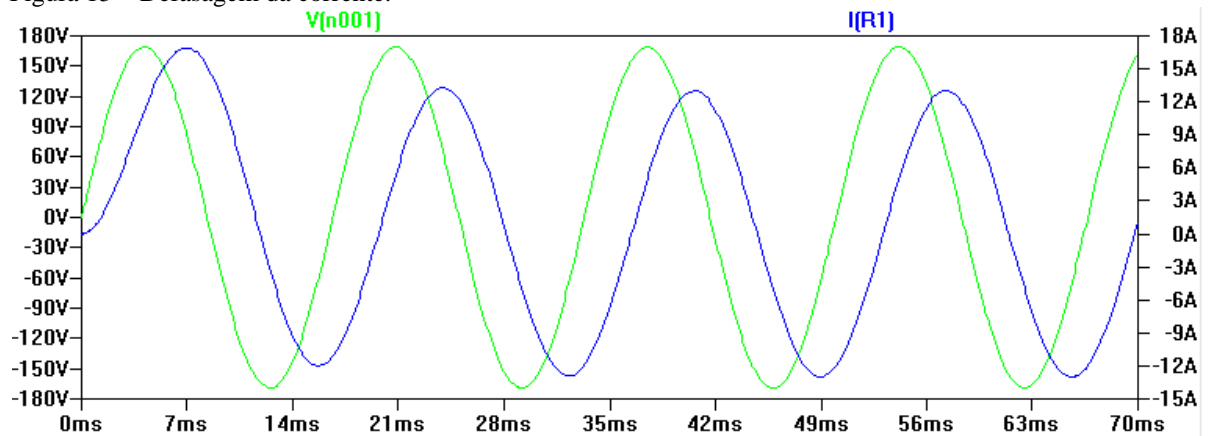
Figura 14 – Circuito indutivo.



Fonte: o autor.

Observando a figura 15 é possível afirmar que a tensão não está em fase com a corrente, pois é possível perceber o atraso da corrente em relação a tensão. Outro fator no circuito é que a corrente chega a valores de aproximadamente 13A de pico ou 9 Arms.

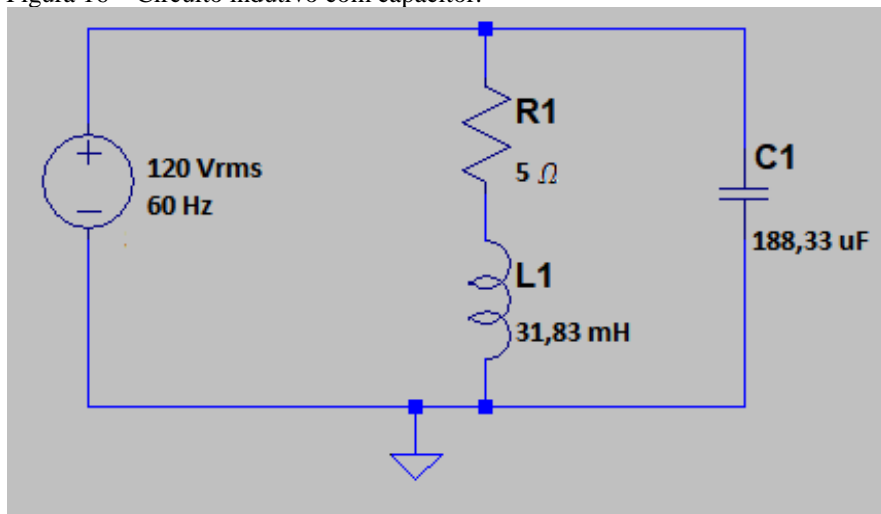
Figura 15 – Defasagem da corrente.



Fonte: o autor.

Com as equações já apresentadas é possível calcular que o circuito da figura 14 tem um fator de potência igual a 0,38, magnitude bem abaixo aceitável pela ANEEL. Mas também é possível calcular um valor de capacitor para corrigir esse sistema. Utilizando das equações já apresentadas, o valor do capacitor para essa situação buscando um fator de potência igual a 1 é de 188,33 μ F. A inserção do capacitor é em paralelo com a carga, conforme ilustra a figura 16.

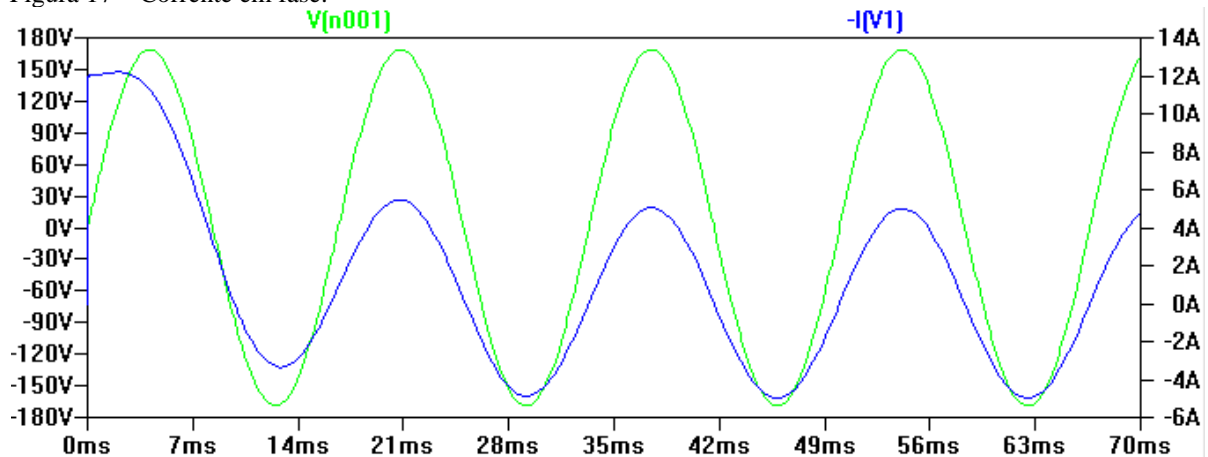
Figura 16 – Circuito indutivo com capacitor.



Fonte: o autor.

Com o capacitor já inserido, ao se realizar uma nova medida de tensão e corrente fornecida pela fonte percebe-se que a corrente fica totalmente em fase com a tensão, outro aspecto positivo é que a corrente que era de 9 Arms caiu para 3,5 Arms conforme a figura 17, uma queda bastante considerável. Com essa correção a fonte é menos exigida podendo fornecer mais energia para outras cargas.

Figura 17 – Corrente em fase.



Fonte: o autor.

Dois pontos importantes a ressaltar é que potência reativa não é atenuada, até porque energia não se cria e nem se extingue, conceito já abordado. O indutor tem a característica de trocar energia, carga e descarga, conceito já abordado também. Com a inserção do capacitor no circuito essa energia é trocada com o capacitor, ou seja, a energia reativa fica entre o indutor e capacitor, e não mais entre fonte e indutor. Justificando então a diminuição da corrente provinda da fonte. O outro ponto é que a localidade dos capacitores é tão importante quanto os cálculos

para a correção, pois dependendo do caso a correção não irá resolver, pois a correção do fator de potência não elimina a potência reativa.

2.10 Arduino

Uma sucinta definição de Arduino, é que o mesmo é uma placa na qual fornece todo o amparo para o funcionamento de um microcontrolador, desde o *software* até o *hardware*. Uma das intenções da criação do Arduino é facilitar o uso e aprendizado de microcontroladores.

Arduino é uma plataforma de eletrônica de código aberto baseada em *hardware* e *software* de fácil uso. As placas Arduino são capazes de ler entradas, luz em um sensor, um dedo em um botão ou uma mensagem no Twitter, e transformá-lo em uma saída, ativar um motor, ligar um LED (diodo emissor de luz), publicar algo *on-line*. Você pode dizer a sua placa o que fazer, enviando um conjunto de instruções para o microcontrolador na placa. (ARDUINO, 2017a, p. 1, tradução nossa).

Ao longo dos anos, o Arduino tem sido o cérebro de milhares de projetos, desde objetos cotidianos até complexos instrumentos científicos. Uma comunidade mundial de criadores, estudantes, amadores, artistas, programadores e profissionais, se reuniu em torno desta plataforma de código aberto, suas contribuições somaram uma incrível quantidade de conhecimento acessível que pode ser de grande ajuda para novatos e especialistas. (ARDUINO, 2017a, p. 1, tradução nossa).

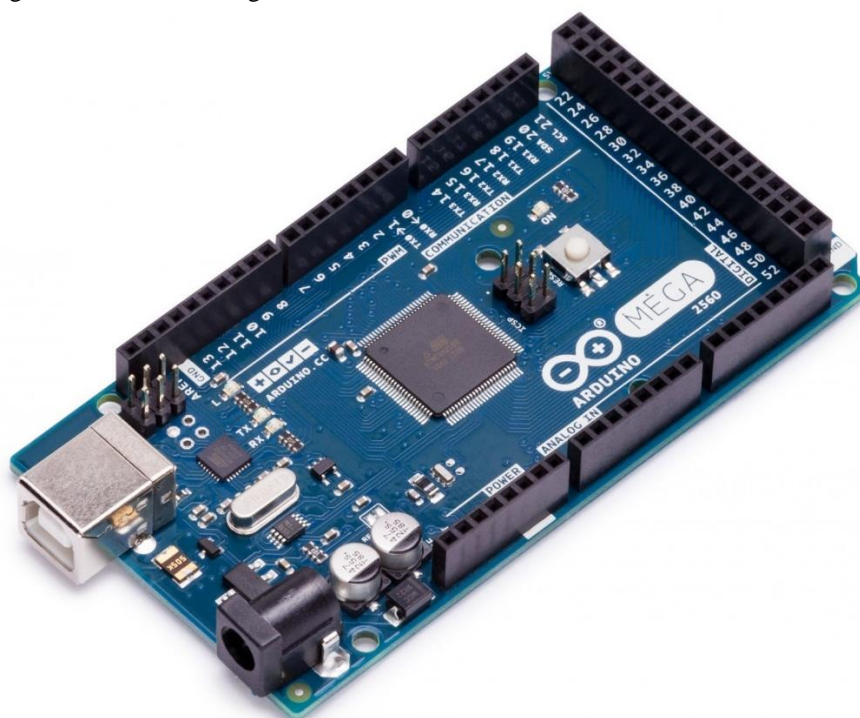
Arduino nasceu no *Ivrea Interaction Design Institute* como uma ferramenta fácil para prototipagem rápida, voltada para estudantes sem formação em eletrônica e programação. Assim que chegou a uma comunidade mais ampla, a placa Arduino começou a mudar para se adaptar às novas necessidades e desafios, diferenciando sua oferta de simples placas de 8 bits para aplicações de produtos na internet das coisas, impressão em três dimensões e ambientes incorporados. Todas as placas Arduino são completamente *open-source*, capacitando os usuários a construí-los de forma independente e eventualmente adaptá-las às suas necessidades específicas. O *software* também é *open-source* e está crescendo através das contribuições dos usuários em todo o mundo (ARDUINO, 2017a, p. 1).

A definição de *software* e *hardware* aberto, do inglês *open-source*, é que ambos estão disponíveis para qualquer pessoa que queira estudar o sistema, modificar, implementar e até copiar. O Arduino é *open-source* pela sua liberdade dada a comunidade de estudar e alterar todos os seus projetos, desde o *hardware* até o *software*. Está liberdade dada pelo Arduino possibilita também criar coisas usando suas placas, pois o Arduino tem a licença CC (*Creative Commons*). O resultado dessa liberdade toda foi uma grande variedade de placas de Arduino, pois algumas placas foram criadas pela comunidade, uma grande variedade de sensores e

bibliotecas, e muito dos criadores também mantem a filosofia de *open-source*, ou seja, mantem os seus projetos abertos. A comunidade que usa Arduino tem uma grande contribuição para o seu crescimento.

Existem diversos modelos de Arduino, os mais conhecidos são eles, Uno, Leonardo, Nano, Micro, Yún e Mega. Existem mais tipos de Arduino, cada um com sua capacidade e característica. O Mega é a placa com mais portas de conexões de todos os modelos, a placa é apresentada pela figura 18.

Figura 18 – Arduino Mega.



Fonte: (ARDUINO,2017b, p. 1).

Um Microcontrolador é um sistema computacional completo inserido em um único circuito integrado. Possui CPU, memória de dados RAM (*Random Access Memory*) e programa ROM (*Read Only Memory*) para manipulação de dados e armazenamento de instruções, sistema de *clock* para dar sequência às atividades da CPU, portas de I/O além de 2 outros possíveis periféricos como, módulos de temporização, conversores analógicos digitais e até mesmo nos mais avançados conversores USB (*Universal Serial Bus*) ou *ethernet*. (GLOVACKI, 2011, p. 1).

Apesar de seu funcionamento exigir uma frequência de *clock* de alguns MHz, o que é pouco comparado aos microprocessadores modernos, sua utilização é perfeitamente adequada para utilizações típicas. Consomem pouca energia, algo em torno de miliwatts, possuem a capacidade de hibernar enquanto aguardam o acontecimento de um evento que o colocará em funcionamento novamente, ideal para circuitos alimentados a baterias químicas pois seu consumo reduz para algo em torno de nanowatts. São componentes de baixo custo e compactos. (GLOVACKI, 2011, p. 2).

2.10.1 Características

A maioria das placas Arduino são constituídas por microcontrolador da marca Atmel. Os dois modelos de Arduinos mais utilizados, o Uno e Mega, usam microcontroladores ATmega 328 e ATmega 2560 respectivamente. Então as características atribuídas ao Arduino são na verdade em sua grande maioria as características do microcontrolador. Logo, o questionamento de porque não usar diretamente o microcontrolador é válido, mas em síntese não se deve esquecer que o Arduino dá uma grande facilidade ampla de se usar o microcontrolador desde *software* até o *hardware*.

Tomando como base o Arduino Mega, o mesmo possui as características referente ao microcontrolador, porém existe algumas particularidades devido a forma da placa utilizar o microcontrolador. Então a faixa de tensão ideal e máxima, e o *clock* são características atribuídas pela placa. Características como quantidade de portas, corrente e tensão das portas, memórias, conversor analógico digital, faixa de temperatura e gravações são características do microcontrolador. As características são apresentadas pelo quadro 6. Obviamente que a placa tenta utilizar o microcontrolador da melhor maneira possível, sem chegar a valores extremos do microcontrolador. Uma observação importante se fazer, é que a memória *Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory* (EEPROM) é uma memória não volátil, ou seja, com a falta de energia os dados armazenados nela não se apagam. E a memória *Static Random Access Memory* (SRAM) é uma memória volátil, que se apaga com a falta de energia. A SRAM no Arduino é utilizada para manipulação de variáveis do algoritmo.

Quadro 6 – Características da placa Arduino Mega.

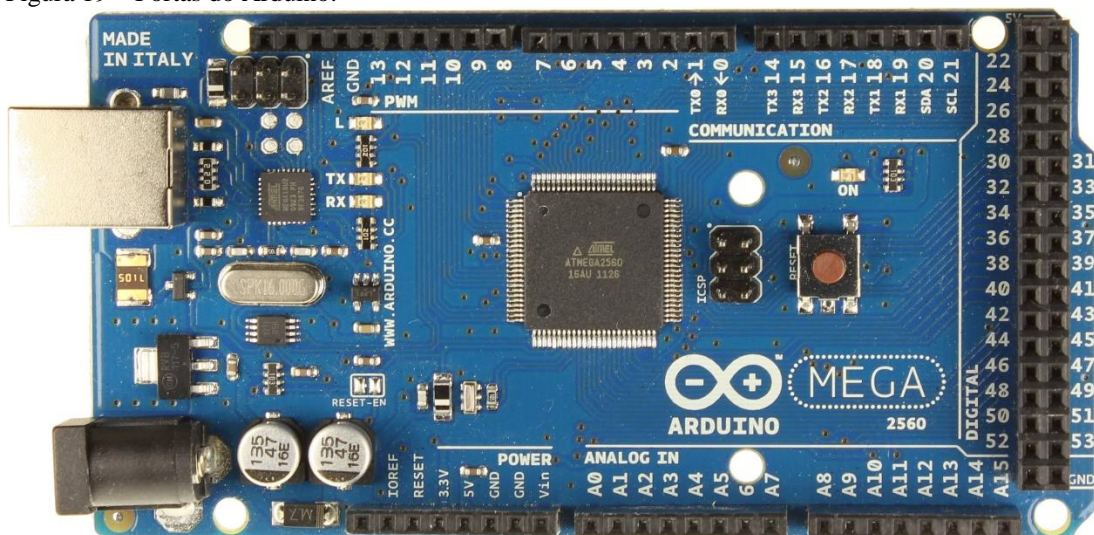
Tensão Operacional	5 V
Tensão de entrada (recomendado)	7 a 12 V
Tensão de entrada (limite)	6 a 20 V
Portas digitais	54 (sendo 15 PWM)
Portas analógicas	16
Corrente CC por pino	20 mA
Corrente CC para o pino 3,3 V	50 mA
Memória Flash	256 kB
Memória SRAM	8 kB
Memória EEPROM	4 kB
Clock	16 Mhz
Conversor A/D (Analógico / Digital)	10 bits
Temperatura do microcontrolador	-40 a 85° C
Gravações	10.000 na Flash / 100.000 na EEPROM
Conexão de programação	Porta USB

Fonte: (ATMEL, 2016, p. 1; ARDUINO, 2017b, p.1).

As portas digitais do Arduino podem funcionar como entrada ou saída, atuam sempre com 0 ou 5 V. Na placa elas são identificadas por numeração, que no caso do Arduino Mega vão de 0 a 53. As portas que podem funcionar com modulação de largura de pulso são identificadas com a sigla PWM. Portas digitais no caso de saída em sua grande maioria servem para comunicação, acionamento de cargas, leitura de chaves ou sensores digitais.

As portas analógicas servem para leitura de sinal analógico, o que permite fazer leitura de valores entre 0 e 5 V. Apesar do microcontrolador trabalhar totalmente digital existe um conversor analógico para digital que permite o microcontrolador trabalhar com sinais analógicos. O Arduino identifica suas portas analógicas com a letra A, as portas vão de A0 até A15. A distribuição das portas digitais e analógicas do Arduino estão representadas pela figura 19.

Figura 19 – Portas do Arduino.



Fonte: o autor.

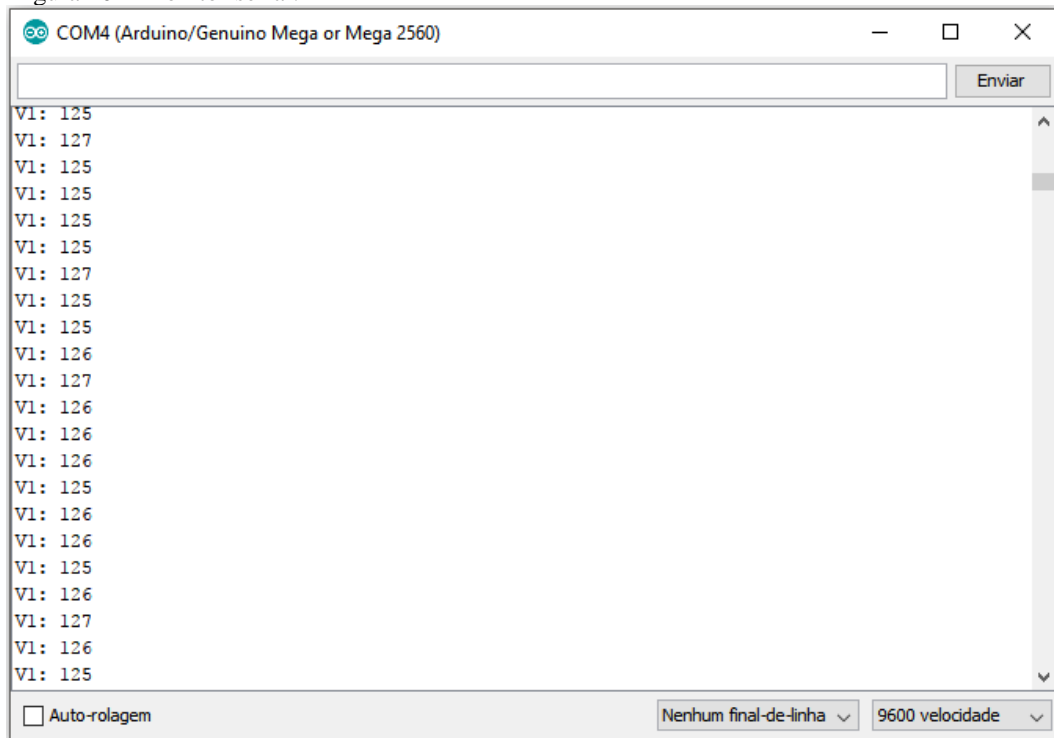
A alimentação do Arduino pode ser feita de duas formas pela porta *Universal Serial Bus* (USB) ou pelo conector P4. A porta USB também serve para transferência de dados, ou seja, é pela porta USB que a programação feita no computador é enviada ao Arduino. A tensão para alimentar o Arduino pela porta USB é de 5 V e pelo conector P4 é de 7 a 12 V.

O *software* do Arduino usa uma interface simples, é parcialmente em português, possui exemplos já prontos para conhecer a linguagem de programação, caracteriza através de cores palavras reservadas, e demais opções padrões de todos os softwares (salvar programação, abrir arquivos de programação, editar, entre outros). O *software* do Arduino nada mais é do que uma *Integrated Development Environment* (IDE) que significa ambiente de desenvolvimento

integrado, isso se dá pelo fato de em um único *software* já estar o editor de código, o compilador e o depurador, além de incluir uma ferramenta denominada como monitor serial.

Monitor serial serve para prover a interação entre o computador e o Arduino em tempo real. Possui um campo de digitação e um de leitura conforme a figura 20. Dessa maneira é possível saber valores de variáveis e receber textos do Arduino, mas isso só é possível desde que o código presente no Arduino seja escrito para enviar essas informações. É possível também enviar comandos para o Arduino pelo monitor serial, mas o Arduino também deve estar programado para interpretar os comandos. Essa interação entre Arduino e usuário dado pelo monitor serial não tem a intenção de fornecer uma conexão de comando, mas sim de fazer uma conexão a fim de ajudar a encontrar erros no código que Arduino está executando.

Figura 20 – Monitor serial.



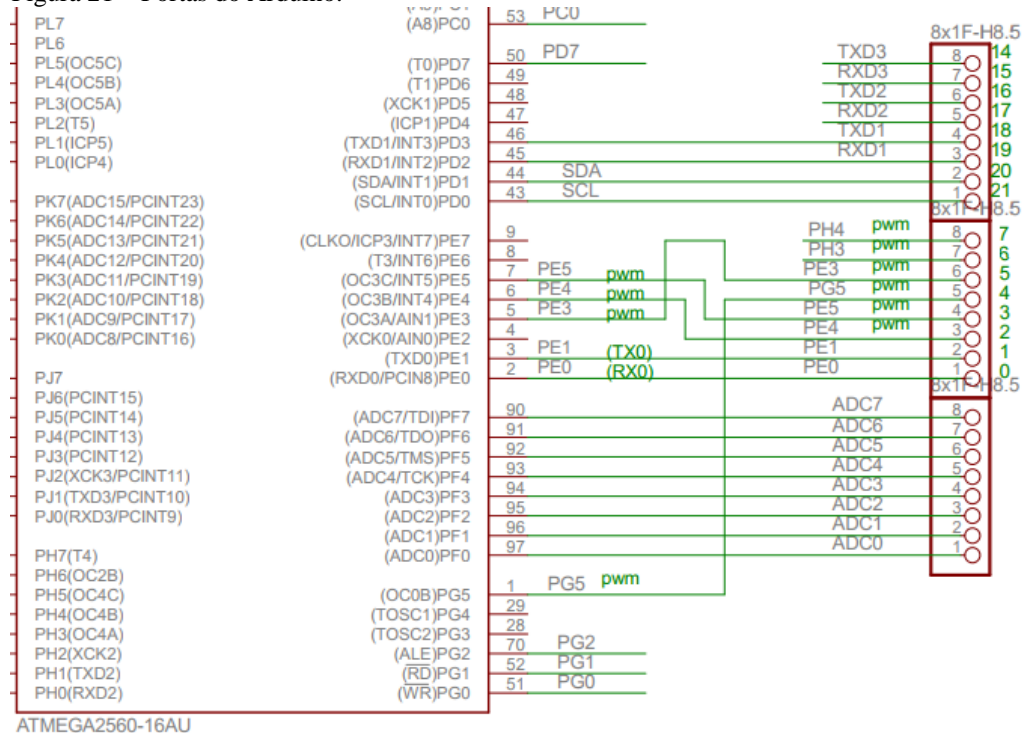
Fonte: o autor.

A IDE do Arduino assim como sua linguagem de programação servem para todas as placas. É necessário apenas fazer a seleção de qual Arduino usar e em qual porta USB do computador ele está conectado. Essa configuração também deve ser feita para utilizar o monitor serial.

2.10.2 Partes do Arduino

Como já mencionado a Arduino possui portas analógicas que servem para leitura de sinais analógicos e as digitais que servem para fazer leitura ou escrita. A placa do Arduino não utiliza nenhuma técnica de proteção ou filtro para essas portas. As portas digitais e analógicas são conectadas diretamente ao borne de conexão, a figura 21 mostra alguma dessas portas.

Figura 21 – Portas do Arduino.

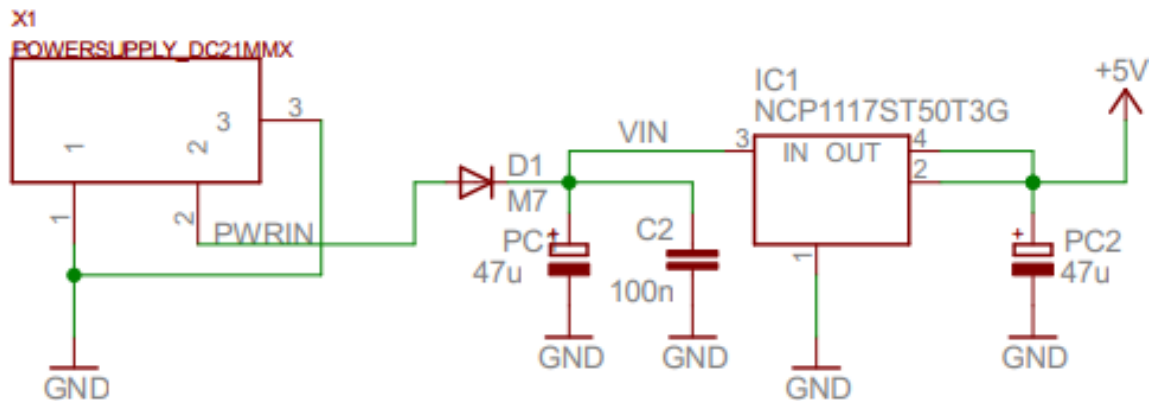


Fonte: (ARDUINO, 2017c, p.1).

Analisando o projeto do Arduino Mega é perceptível que o mesmo está basicamente dividido em quatro partes, pois existe o sistema de regulação de tensão, conexão USB, seletor automático de tensão e os microcontroladores com seus parâmetros para funcionarem.

O sistema responsável por regular a tensão é composto por um regulador de tensão para que a placa sempre possa trabalhar com 5 V. Como já mencionado existe uma faixa aceitável para alimentar a placa, lembrando que essa tensão de alimentação deve ser contínua. O sistema também utiliza de um diodo na entrada para evitar danos em caso de polarização inversa na placa, conforme figura 22.

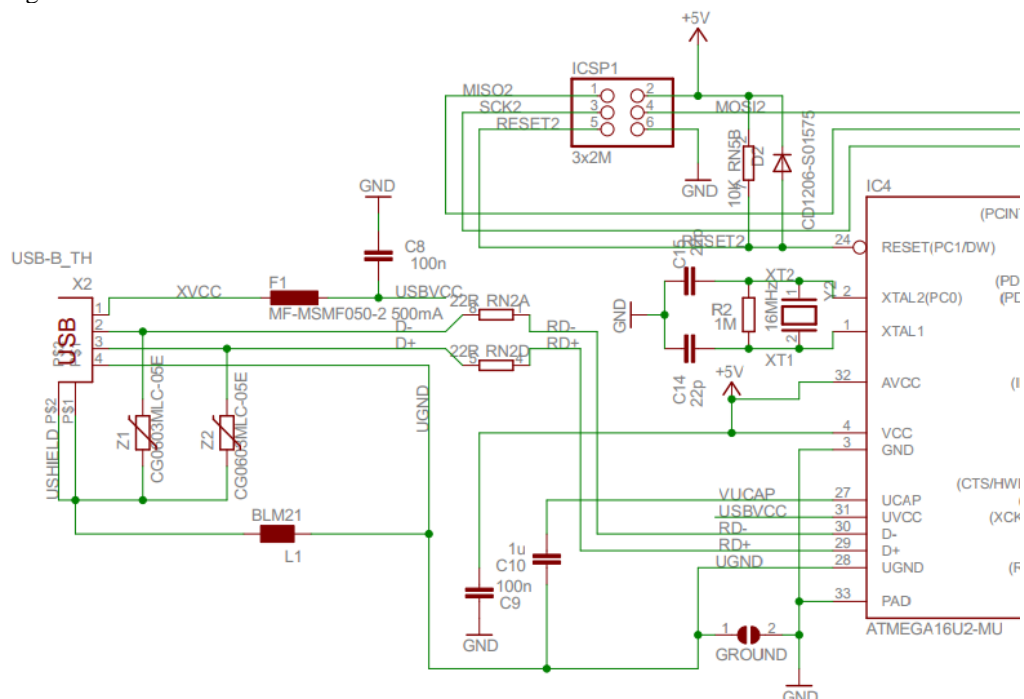
Figura 22 – Sistema regulador de tensão.



Fonte: (ARDUINO, 2017c, p.1).

A conexão USB é responsável por fazer a conexão com a placa Arduino e o computador, por essa conexão é possível fazer o envio da programação, comunicação e também fazer a alimentação da placa pelo computador, uma vez que a porta USB tem alimentação de 5 V. Existe um fusível de 500 mA para fazer a proteção da porta USB do computador, para que em situações onde a placa do Arduino tenha um curto-circuito ou uma corrente elevada, esse fusível não permite que a porta USB do computador se danifique. A conexão para o tráfego de dados não é feita diretamente com o microcontrolador ATmega 328P, mas sim pelo microcontrolador ATmega 16U-MU que é responsável por interpretar esses dados e gravar no microcontrolador ATmega 328P. O sistema de conexão USB é representado pela figura 23.

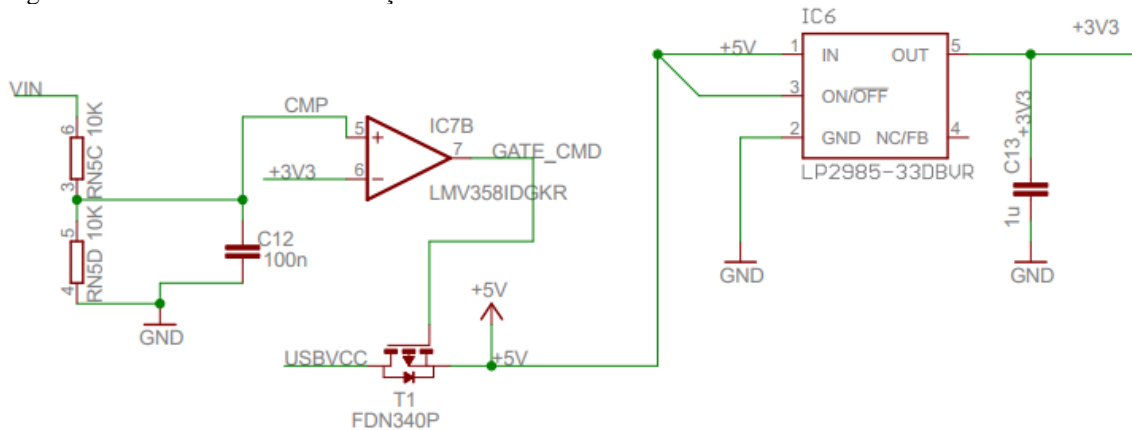
Figura 23 – Conexão USB.



Fonte: (ARDUINO, 2017c, p.1).

O seletor automático de tensão é responsável por comutar qual fonte de tensão irá alimentar o microcontrolador, pela porta USB ou pela conexão P4 que utiliza uma fonte externa. Em caso onde as duas conexões estejam ativas, a porta USB serve apenas para tráfego de dados. O sistema é apresentado pela figura 24.

Figura 24 – Comutador de alimentação.



Fonte: (ARDUINO, 2017c, p.1).

A placa do Arduino Mega, apresenta dois microcontroladores, onde um (ATmega 16U2-MU) é responsável por estabelecer a conexão com o computador, recebendo as informações para fazer a gravação no outro microcontrolador (ATmega 2560-16AU). O microcontrolador ATmega 2560 é responsável por fazer leituras de portas, ativação de portas e executar o algoritmo.

2.10.3 Conversor A/D

O conversor analógico digital de um sistema permite interpretar dados analógicos de forma digital. O Arduino Mega possui 15 portas analógicas, então para que o microcontrolador consiga realizar a leitura dessas portas é necessário um conversor analógico digital. O conversor A/D do Arduino está no próprio microcontrolador (ATmega 2560) que apresenta uma resolução de 10 bits.

Por uma visão genérica o conversor A/D possui uma faixa de tensão e a quantidade máxima possíveis de combinações em função da sua resolução. Dessa forma a capacidade de leitura de uma porta analógica é dada por quantas divisões existem entre 0V até a tensão referência, ou seja, a resolução de um conversor A/D é dada pela razão da tensão referência por 2 elevado ao número de bits do conversor, conforme a equação 30.

$$R = \frac{Aref}{2^n} \quad (30)$$

Sendo:

R: Resolução, dada em volt, [V];

Aref: Tensão referência, dada em volt, [V];

n: Número de bits.

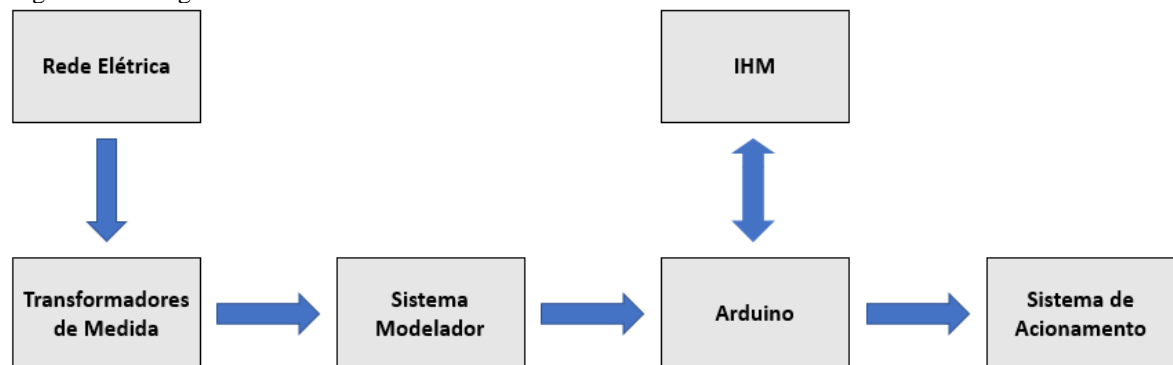
No caso do Arduino, o mesmo possui por padrão uma tensão referência de 5 V e utiliza 10 bits para conversão. Isso significa, que o Arduino consegue 1024 valores de leitura em uma faixa de 0 a 5 V, dessa forma o mesmo tem uma resolução de 4,88 mV. O valor de tensão presente na porta analógica é convertido em números pelo microcontrolador, isso significa que a cada 4,88 mV o microcontrolador incrementa uma unidade a sua contagem, lembrando que vai de 0 a 1023, pois são 1024 valores. O valor de referência no Arduino pode ser alterado com a aplicação de tensão na porta Aref, logo o novo valor de referência será o que está na porta.

3 METODOLOGIA

Os conhecimentos levantados no referencial teórico como o fator de potência permitido pelo PRODIST, polaridade de sinais de tensão e corrente, onda senoidal, valor eficaz, transformadores de medida, cargas (resistivas, indutivas e capacitivas), potência (aparente, ativa e reativa), fator de potência, correção do fator de potência e características do Arduino, são conhecimentos elementares para a realização do sistema com êxito.

O sistema como um todo irá possuir uma placa Arduino, um sistema IHM (interface homem máquina), um sistema de acionamento, TCS, TPs e um sistema modelador. Cada partição irá trabalhar em conjunto para que o sistema consiga medir as magnitudes elétricas (tensão, corrente, potência e fator de potência) e atuar a fim de corrigir o fator de potência indutivo. A comunicação entre as partes é apresentada pela figura 25, onde as setas indicam o sentido de comunicação.

Figura 25 – Diagrama de blocos do sistema.



Fonte: o autor.

Como observado, o sistema para o seu funcionamento depende de diversas seções funcionando corretamente e em comunicação com o Arduino. Para a realização de leitura de tensão e corrente é utilizado o circuito e código de programação elaborados pela organização Open Energy Monitor.

A Open Energy Monitor é uma organização fundada no País de Gales. Tem como atividades principais estudos e desenvolvimentos nos setores de monitoramento de eletricidade e de energia sustentável (OPEN ENERGY MONITOR, 2017a, p. 1).

3.1 Rede elétrica

Nesta situação a rede elétrica é qualquer ponto possível de se medir os valores de tensão e corrente. Locais como painéis e quadros de disjuntores são os mais indicados, pois possuem um agrupamento de cargas, dessa forma é possível realizar a medição de várias cargas ao mesmo tempo.

O sistema proposto tem capacidade de leitura de tensão e corrente nas 3 fases ao mesmo tempo, desde que a tensão de fase não ultrapasse extremamente os 127 V e que sua corrente não ultrapasse os 100 A.

3.2 Transformadores de medida e sistema modelador

As placas do Arduino trabalham com tensões e correntes baixas, as magnitudes das grandezas elétricas presentes nas instalações não são compatíveis com as placas Arduino. Então para que o sistema consiga realizar suas leituras é necessário utilizar TC e TP para cada fase, possibilitando assim, as leituras dos sinais de tensão e corrente.

Apenas entregar amostras de tensão e corrente de magnitudes baixas diretamente para o Arduino não é suficiente, pois o mesmo pode se danificar com sinais negativos chegando em suas portas. Desta maneira deve-se existir um circuito capaz de trabalhar para que as magnitudes coletadas pelos TP's e TC's cheguem ao Arduino dentro de sua faixa de trabalho e obedecendo sua polaridade.

Em função das características apresentadas pela rede elétrica serem incompatíveis com as características do Arduino, deve-se adotar medidas para que o sinal chegue ao Arduino de forma compatível com o mesmo, porém sem distorções do sinal a ser lido.

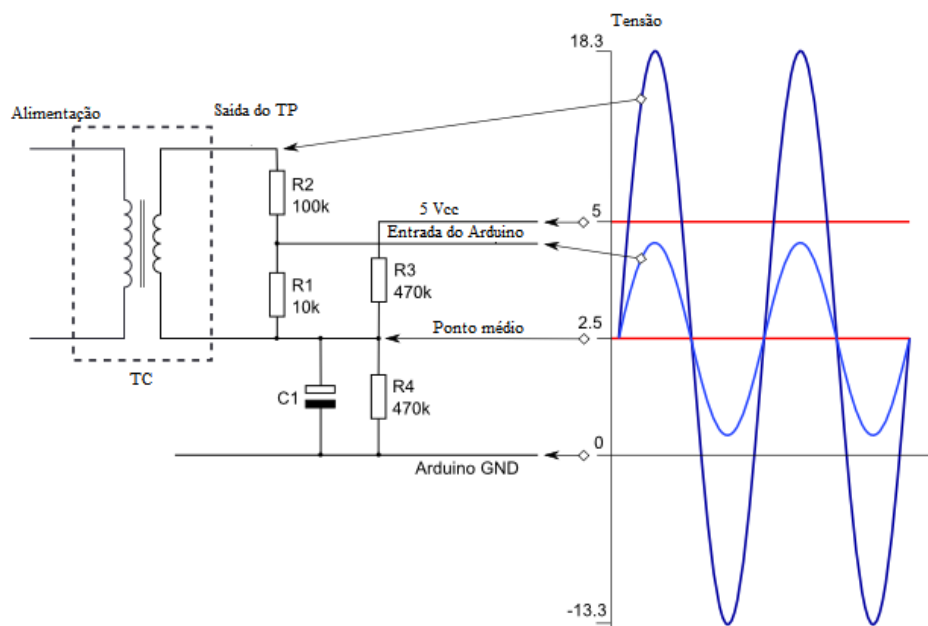
3.2.1 Sistema de leitura de tensão

Conforme já mencionado o Arduino é incapaz de realizar leituras diretamente da rede elétrica. Então um circuito é necessário para possibilitar essa leitura. O circuito utilizado para a correta leitura de tensão é apresentado pela figura 26 e seu princípio de funcionamento baseia-se no rebaixamento da tensão por meio de um TP e na aplicação de um *offset* neste sinal senoidal.

Observando a figura 26 é possível perceber que o circuito se comporta de maneira a rebaixar a tensão pelo TP. Essa tensão rebaixada é aplicada em um divisor de tensão feito por

dois resistores, onde grande parte da parcela da tensão ficara em um resistor, pois sua proporção ôhmica é dez vezes maior. Até o momento existe um sinal senoidal de magnitude extremamente rebaixada, porém com partes negativas. Então é aplicado a este sinal um *offset* de 2,5 V feito por um divisor de tensão de dois resistores de mesmo valor. Desta forma o sinal fica totalmente compatível com o Arduino para ser lido. O capacitor presente no circuito serve para auxiliar a estabilidade dos 2,5 V caso ocorra algum distúrbio nos 5 V de entrada.

Figura 26 – Circuito de leitura de tensão.



Fonte: adaptado de (OPEN ENERGY MONITOR, 2017b, p.1).

Para cada fase do sistema elétrico é necessário ter um circuito apresentado na figura 26, logo ao todo o sistema conta com três circuitos capazes de adequar o sinal de tensão para o Arduino.

3.2.2 Sistema de leitura de corrente

A mesma situação que ocorre para a realização de leitura de tensão ocorre para a leitura de corrente. Logo, é necessário também a utilização de um circuito para adequar o sinal, possibilitando a leitura da corrente elétrica com o Arduino. Porém é um circuito diferente, pois para a leitura de corrente elétrica utiliza-se um TC não invasivo com capacidade de leitura de 100 A – 50 mA. O TC utilizado neste sistema é apresentado pela figura 27. O Arduino não tem nenhum dispositivo capaz de ler corrente diretamente, então além do circuito ter que adequar a

forma de onda o mesmo também tem como objetivo amostrar sinais de tensão em função da corrente.

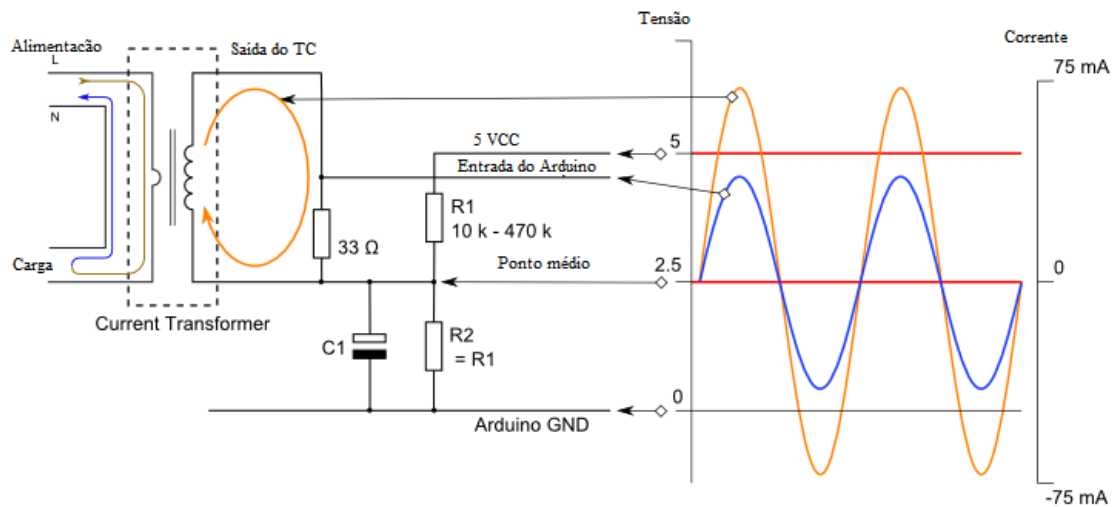
Figura 27 – TC.



Fonte: o autor.

Observando a figura 28 é possível perceber que o circuito se comporta de maneira a rebaixar a corrente pelo TC. Essa corrente rebaixada é aplicada em um resistor e consequentemente aparece uma tensão no mesmo. Até o momento existe um sinal senoidal de magnitude extremamente rebaixada, porém com partes negativas. Então é aplicado a este sinal um *offset* de 2,5 V feito por um divisor de tensão de dois resistores de mesmo valor. Desta forma o sinal fica totalmente compatível com o Arduino para ser lido. O capacitor presente no circuito serve para auxiliar a estabilidade dos 2,5 V caso ocorra algum distúrbio nos 5 V de entrada.

Figura 28 – Circuito de leitura de corrente.



Fonte: adaptado de (OPEN ENERGY MONITOR, 2017c, p.1).

Para cada fase do sistema elétrico é necessário ter um circuito apresentado na figura 28, logo ao todo o sistema conta com três circuitos capazes de adequar o sinal da corrente elétrica para o Arduino.

3.3 IHM

Para que haja uma interação entre homem máquina, o sistema conta com um *display* de cristal líquido de 128x64 e a utilização do monitor serial do Arduino. A utilização de uma IHM se dá pela necessidade do sistema mostrar suas leituras e possibilitar a realização de configurações. Os valores da potência dos bancos capacitivos serão desconhecidos pelo sistema, então deve-se informar ao sistema o valor de potência reativa capacitiva presente em cada porta. O *display* é conectado ao Arduino por meio de portas digitais. O monitor serial utiliza a porta USB para comunicação, assim que a comunicação é estabelecida é possível informar o valor de potência reativa capacitiva presente em cada porta do sistema.

3.4 Sistema de acionamento

Os bancos de capacitores trabalham em magnitudes da rede elétrica e precisam de contadores para que eles se conectem no circuito elétrico, o acionamento desses contadores não é possível de ser feito diretamente pelo Arduino, devido as baixas tensões e correntes que o

Arduino trabalha, então há uma necessidade de um circuito de eletrônica de potência para que seja possível o acionamento.

O sistema de acionamento conta com relés, que são acionados pelo Arduino por meio de um acoplador óptico. Ao todo são 4 relés, cada relé com seu acoplador óptico, o que resulta em utilizar 4 portas do Arduino para o acionamento. Então o sistema de acionamento trabalha no momento em que o Arduino aciona uma de suas portas digitais conectadas a este sistema. O sinal digital da porta acionada vai diretamente ao acoplador óptico, que por sua vez, aciona o relé fazendo-o fechar os seus contatos.

O Arduino habilita ou desabilita cada porta em função de sua leitura. O algoritmo determina a necessidade atual de habilitar ou desabilitar o relé. É importante ressaltar que o sistema tem até 16 combinações possíveis de habilitar suas portas.

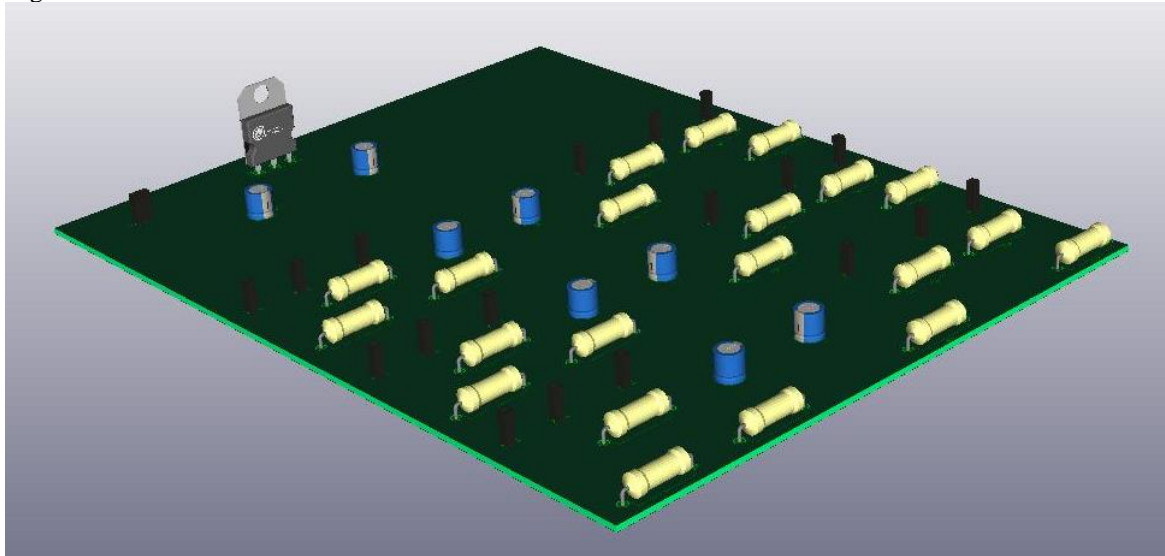
3.5 Montagem dos componentes

A quantidade de componentes eletrônicos a serem conectados para a realização dos circuitos é elevado. O número de conexões com o Arduino para o funcionamento do display e o sistema de acionamento são superiores a 20 conexões. Em função desta situação, uma alternativa eficaz é dispor todos os componentes e as conexões em placas de circuito impresso. A montagem dos circuitos na placa se dá também pelo motivo dos componentes ficarem mais organizados, evitarem maus contatos e melhorar a qualidade das conexões entre componentes.

Devido a complexibilidade de se elaborar um circuito impresso para todo o sistema, utilizar um programa para elaboração da montagem da placa é conveniente. Nesse projeto se utilizou o programa Kicad.

O Kicad é um software gratuito onde é possível realizar todo o circuito e depois gerar a placa traçando todas as trilhas automaticamente. O software é capaz de gerar o desenho da placa, mostrando os componentes e trilhas. Assim como gerar uma visualização em 3 dimensões da placa, conforme mostra a figura 29.

Figura 29 – Placa de leitura do sistema em três dimensões.



Fonte: o autor.

3.6 Arduino

O Arduino é programado através de sua IDE a fim de interpretar os sinais senoidais de corrente e tensão. Em função das amostras senoidais coletadas o Arduino calcula o valor eficaz da tensão, eficaz da corrente, as três potências e o fator de potência. Com as magnitudes calculadas, o algoritmo presente no Arduino deverá analisar a necessidade ou não de acoplar reativo capacitivo na rede elétrica para a correção do fator potência, tomando como base os valores permitidos de fator de potência estipulados pelo PRODIST. O sistema é informado por meio da IHM, da potência reativa capacitiva presente em cada porta, assim é possível calcular quais portas devem ser ativadas para que o valor reativo capacitivo seja alcançado.

O armazenamento dos valores de potência capacitiva presente em cada porta do sistema de acionamento é armazenado na memória EEPROM do Arduino, que conforme já mencionado é informado pelo usuário, via monitor serial do Arduino

3.6.1 Programação da leitura

Como já mencionado, o código de programação para a leitura de tensão e corrente tem como base a programação desenvolvida pela Open Energy Monitor. Na realização de testes com a linguagem de programação é possível o cálculo de valores incorretos, porém um tratamento devido com esses dados calculados é possível chegar a valores satisfatórios. Desta

maneira, adotou-se na parte da programação responsável por calcular os valores dos sinais de corrente e tensão, métodos de médias aritméticas para amenizar o erro.

Os cálculos realizados para leitura de tensão e corrente eficazes tem como base algumas das equações já apresentadas. Para o cálculo de tensão e corrente a equação 10 é aplicada ao código de programação, porém interpretada de uma forma diferente, pois a leitura realizada pelo Arduino é instantânea, ou seja, o sinal é lido ponto a ponto e não há como aplicar uma função para que a mesma seja integrada em um determinado intervalo. Desta maneira, é necessário realizar uma somatória para que seja possível a aplicação da equação, então a equação 10 resulta na equação 31.

$$X_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} u^2(n)}{N}} \quad (31)$$

Sendo:

X: Valor eficaz;

N: Número de amostras;

n: Variável da somatória.

Conhecidos os valores eficazes de tensão e corrente, o cálculo da potência aparente é dado aplicando diretamente a equação 22, que é o produto da tensão eficaz e corrente eficaz. Para o cálculo da potência ativa é aplicado o conceito da potência instantânea, que também é dada em watt. Os valores de tensão e corrente instantâneos já são lidos pelo Arduino para calcular valores eficazes, então para o cálculo da potência ativa basta aplicar a equação 32 no código de programação. E o fator de potência pode ser calculado pela relação da potência aparente com a potência ativa, pois estes valores já são conhecidos.

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u(n) \cdot i(n) \quad (32)$$

Conhecendo todas as magnitudes necessárias, basta analisar a situação do fator de potência e verificar se é possível uma correção para que o mesmo fique em valores aceitáveis. Caso necessário o programa fara ativação de portas do Arduino para que seja possível a correção do fator de potência.

3.6.2 Programação da verificação e acionamento

Com todas as variáveis respectivas aos valores das magnitudes elétricas preenchidas com os cálculos já apresentados, é necessário avaliar a necessidade do sistema de acionamento atuar ou não. O algoritmo foi elaborado de forma a tentar melhor atender as diversas situações.

A primeira verificação é para constatar se todas as fases ou a maioria delas estão com excesso de cargas indutivas, com a constatação positiva dessa verificação é realizado uma média entre essas potências.

A segunda etapa é a verificação do fator de potência, constatar se o mesmo está dentro de valores aceitos, em situações onde o fator de potência esteja com valores irregulares é realizado o cálculo de potência reativa necessária para a sua correção. O algoritmo visa sempre corrigir o fator de potência para 1. Com o valor necessário de capacitância já calculado para a correção, e conhecendo todas as combinações possíveis de valores de potência reativa capacitiva que o Arduino pode acoplar na rede elétrica, é realizado o cálculo de menor erro.

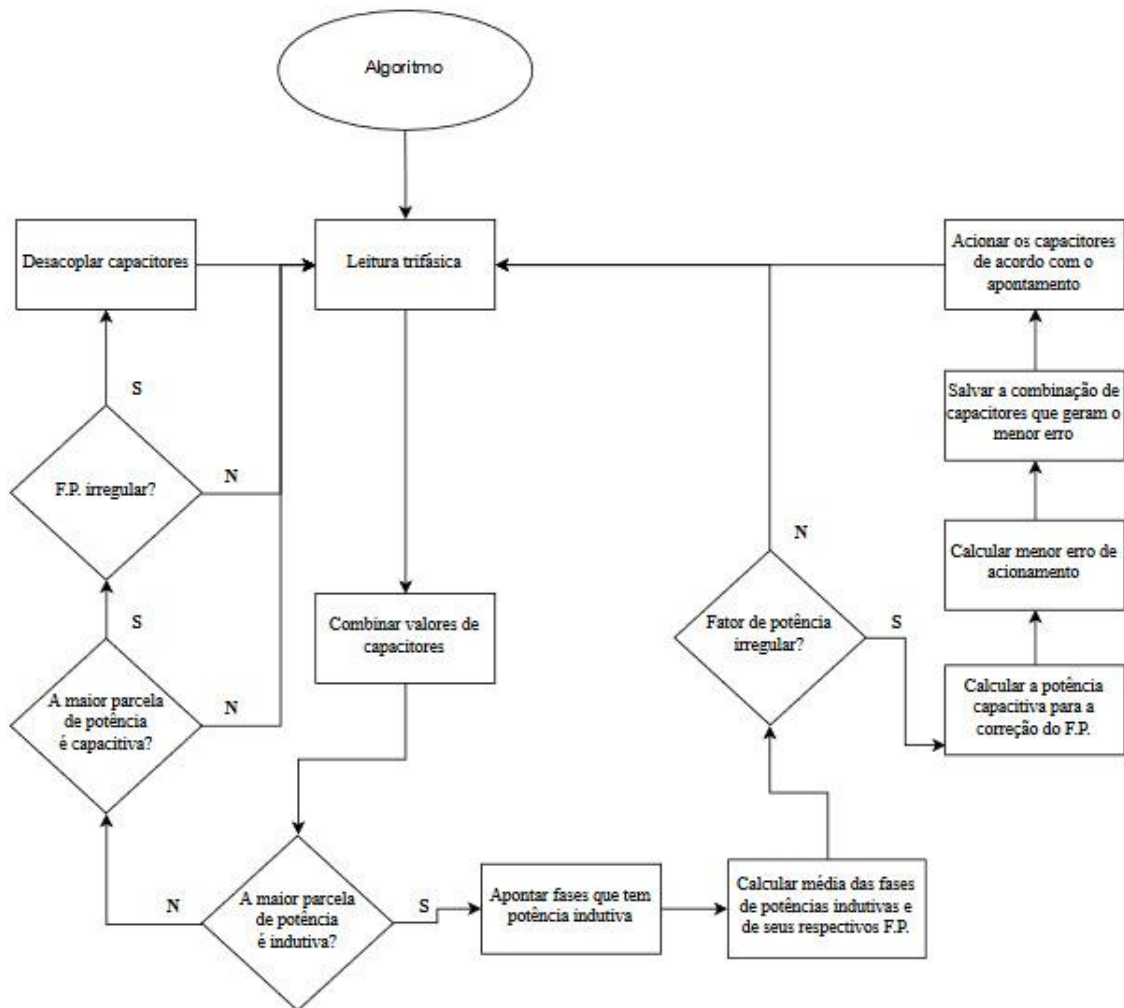
O cálculo de menor erro consiste em calcular a menor diferença entre o necessário para a correção do fator de potência e todas as combinações de potências capacitivas contidas no sistema. Desta maneira é possível saber qual a melhor combinação de capacitores a serem acoplados na rede elétrica. Essa parte do algoritmo não faz acionamento algum, somente aponta qual a melhor combinação de capacitores.

Com a variável de apontamento de combinação de banco apontada é feito o acionamento do banco, essa variável mostra para o algoritmo quais capacitores devem ser acionados. Então o algoritmo aciona as portas.

A retirada dos capacitores só ocorre no momento em que a potência das fases começa a ficar capacitiva, ou seja, excesso de capacitor na rede elétrica. Então é feito uma análise se o fator de potência capacitivo está irregular, caso esteja, o desacoplamento dos capacitores é realizado.

Em suma todo o algoritmo explicado é apresentado pela figura 30, na qual é exposto um fluxograma do algoritmo. Assim é possível analisar as ordens em que as etapas descritas ocorrem e quais são as tomadas de decisões possíveis.

Figura 30 – Fluxograma do algoritmo.



Fonte: o autor.

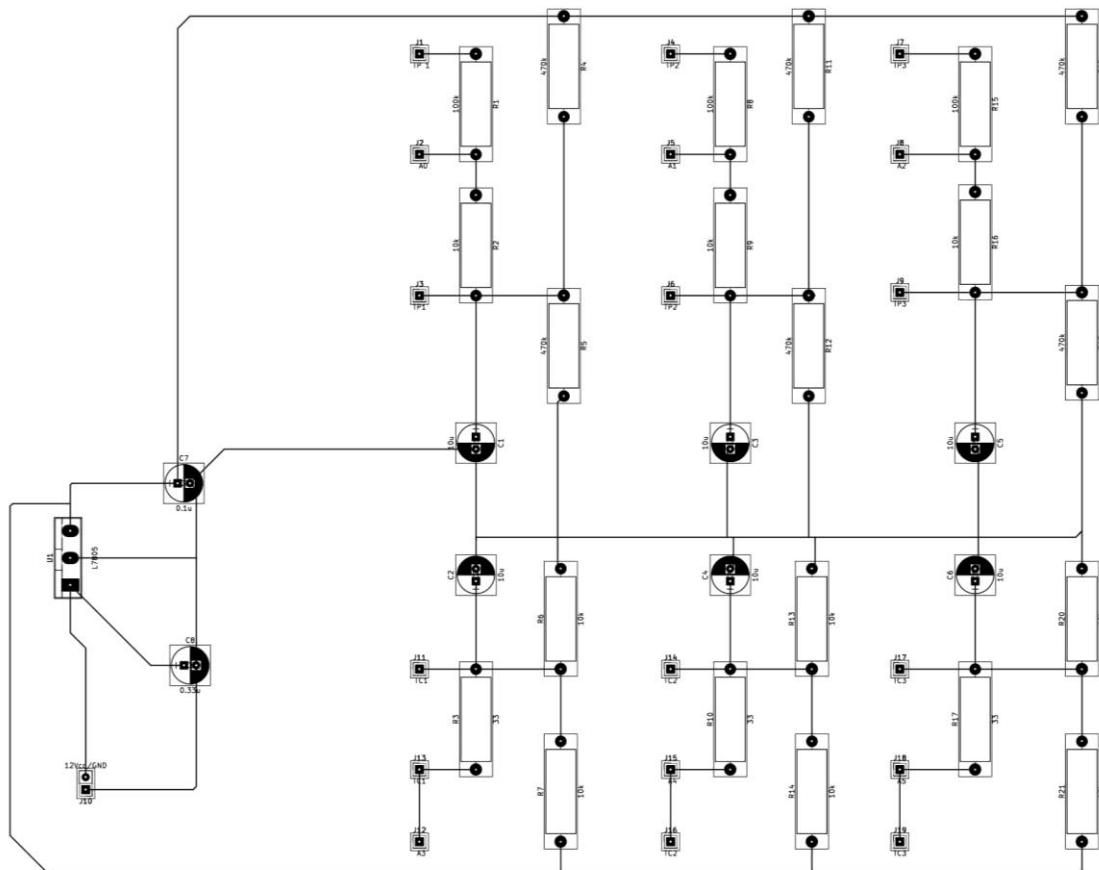
Como pode-se observar na figura 30, o algoritmo não tem paradas e nem fim, pois é um ciclo contínuo de leitura, verificação e acoplamento ou desacoplamento de capacitor. Evidentemente que o algoritmo não é todo apresentado, somente a principais etapas para o seu funcionamento.

4 RESULTADOS

O sistema elaborado foi montado conforme a descrição da metodologia, tanto a parte física como a parte do algoritmo. Ao final da montagem física, foram elaboradas duas placas, uma para tratar o sinal e a outra para fazer a comunicação com o Arduino e o *display*.

A placa responsável por modelar o sinal foi elaborada no programa Kicad, conforme mencionado na metodologia. As trilhas foram elaboradas conforme a figura 31 e sua geração em três dimensões é apresentada pela figura 29.

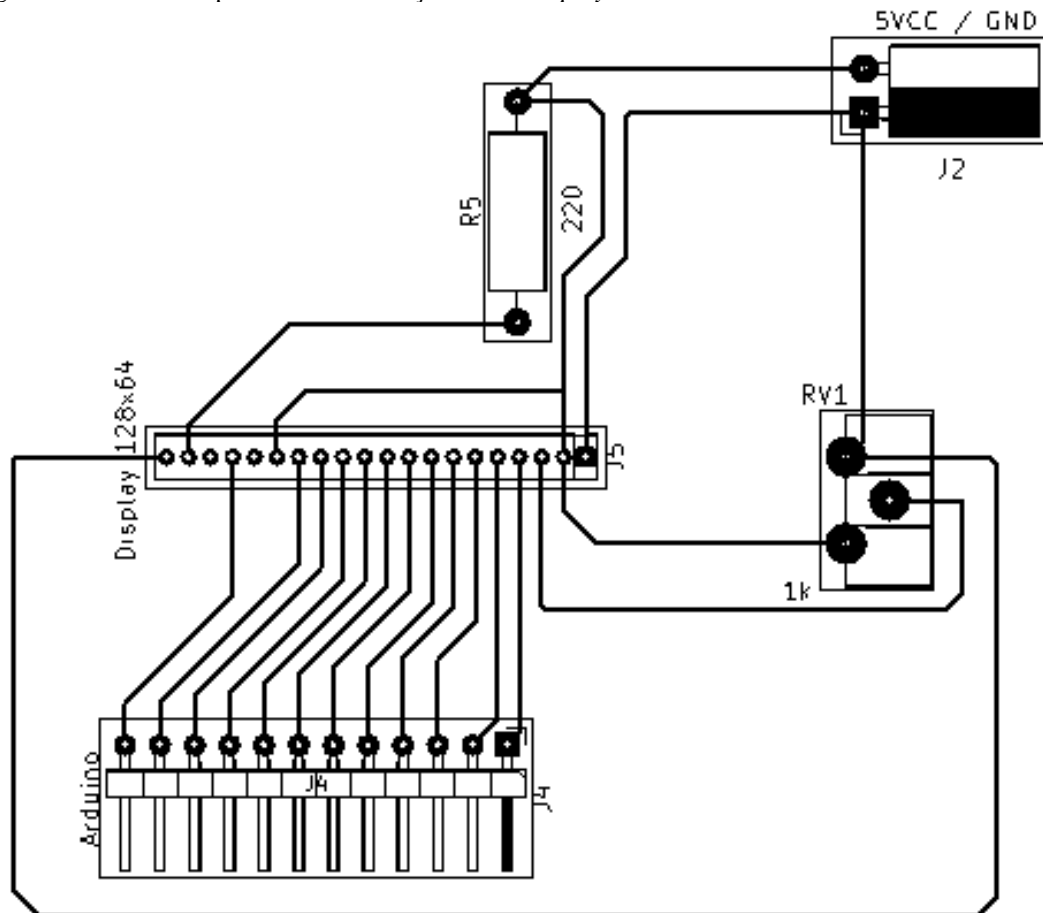
Figura 31 – Trilhas da placa de leitura do sistema.



Fonte: o autor.

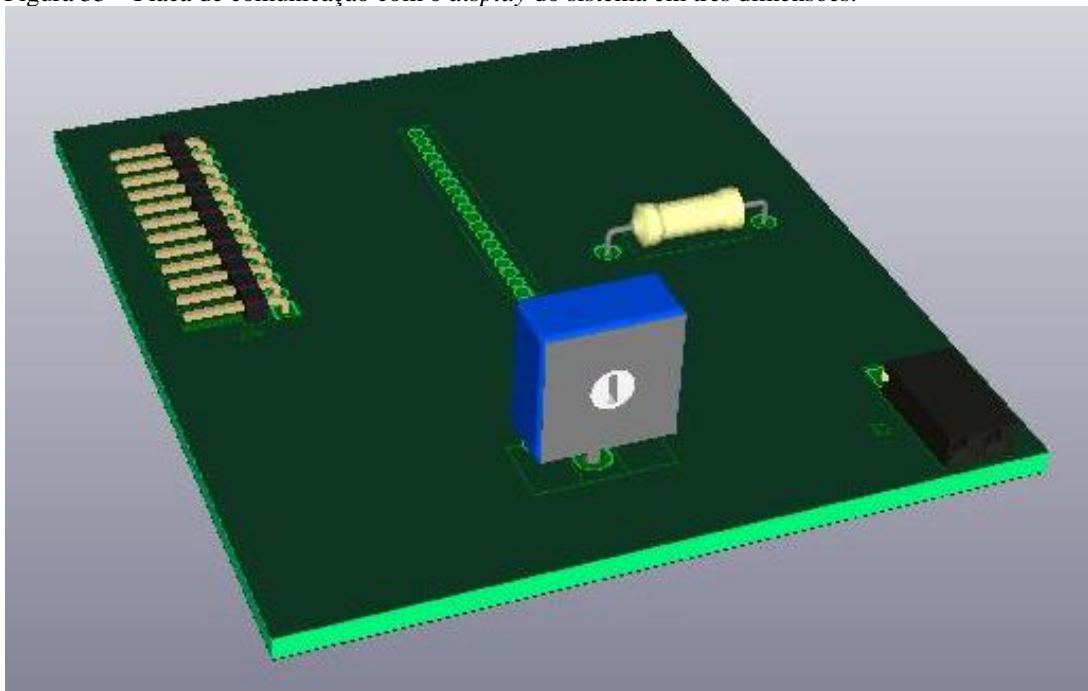
A placa do responsável por ligar o *display* ao Arduino também foi elaborada no programa Kicad. As trilhas foram elaboradas conforme a figura 32 e sua imagem em três dimensões é apresentada pela figura 33.

Figura 32 – Trilhas da placa de comunicação com o *display*.



Fonte: o autor.

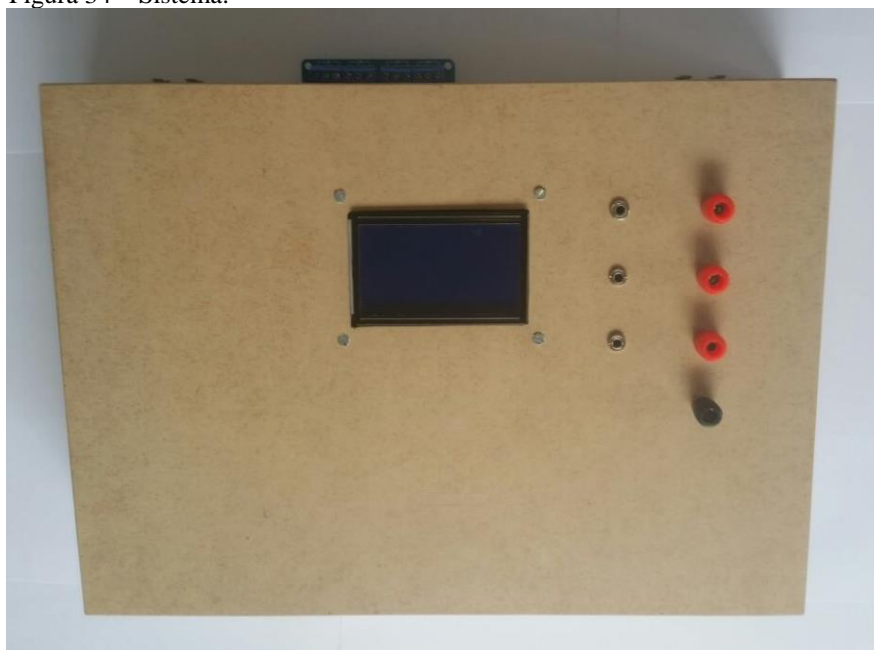
Figura 33 – Placa de comunicação com o *display* do sistema em três dimensões.



Fonte: o autor.

Com todas as placas elaboradas, conexões entre placas e conexões periféricas realizadas, o sistema produzido é apresentado pela figura 34. Como pode-se observar na figura 34, o sistema possui as conexões com as três fases para realizar leitura de tensão e corrente. O fechamento do sistema é dado em estrela, necessitando a conexão com o neutro.

Figura 34 – Sistema.



Fonte: o autor.

4.1 Validação

Com a finalização do sistema o mesmo foi testado com cargas indutivas e resistivas. Para comparação de valores utilizou-se o analisador de qualidade ION 7650. As características do analisador de qualidade foram descritas no referencial teórico.

O teste de validação realizado ocorreu em um laboratório de engenharia elétrica com uma carga indutiva trifásica. A carga utilizada é alimentada em 220 V e potência nominal de 5 cavalos. Os resultados de leitura do ION 7650, do sistema elaborado e os valores nominais da carga, estão dispostos no quadro 7.

Quadro 7 – Teste de validação.

	ION 7650			Sistema		
	1	2	3	1	2	3
Tensão (V)	133,62	130,79	134,08	133,04	131,57	132,98
Corrente (A)	9,42	8,53	9,7	9,04	8,30	9,92
Potência ativa (W)	107	184	279	108,24	185,74	290,1
Potência aparente (VA)	1255	1112	1299	1202,71	1092,60	1318,68
Fator de potência (%)	8,8	16,56	21,47	9	17	22

Fonte: o autor.

Observando o quadro 7, o sistema não teve um erro elevado, tendo o seu maior erro no fator de potência da fase 1 com 5,88% de diferença do valor do analisador. O erro em percentual de todas as características realizado no teste de validação é apresentado no quadro 8.

Quadro 8 – Erro em percentual do teste de validação.

	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Tensão	0,43 %	0,59 %	0,82 %
Corrente	4,03 %	2,69 %	2,26 %
Potência ativa	1,15 %	0,94 %	3,97 %
Potência aparente	4,16 %	1,74 %	1,51 %
Fator de potência (%)	5,88 %	2,65 %	2,46 %

Fonte: o autor.

Evidentemente que essa validação não se deu em uma única leitura. O sistema e o analisador de qualidade ficaram realizando diversas leituras ao longo do tempo, porém foi escolhido uma leitura para realizar as comparações e a validação. Em geral o sistema não apresentou grandes erros.

4.2 Testes

O sistema foi submetido a mais testes, em locais e com cargas diferentes para averiguar a sua precisão e exatidão, obviamente acompanhado do analisador de qualidade ION 7650. Ocorreram mais dois testes, porém com cargas monofásicas, sendo o primeiro com carga resistiva e o segundo com carga indutiva.

O primeiro teste ocorreu com uma carga com valores nominais para tensão de 127 V, corrente de 7,8 A, potência ativa de 1000 W. Os valores lidos pelo analisador e pelo sistema estão dispostos no quadro 9.

Quadro 9 – Teste com carga resistiva.

	ION 7650	Sistema
Tensão (V)	126,11	125,72
Corrente (A)	7,51	7,42
Potência ativa (W)	947	932,40
Potência aparente (VA)	947	932,96
Fator de potência	1	1

Fonte: o autor.

No teste realizado com a carga resistiva foram realizadas diversas medições ao longo do tempo. Os erros de leitura percentual estão dispostos no quadro 10, onde é possível observar que o maior erro foi na potência ativa com 1,54 %.

Quadro 10 – Erro do teste com carga resistiva.

	Fase 1
Tensão	0,3 %
Corrente	1,19 %
Potência ativa	1,54 %
Potência aparente	1,48 %
Fator de potência	0 %

Fonte: o autor.

Outro teste elaborado foi com carga indutiva, onde os valores de leitura do analisador e do sistema estão dispostos no quadro 11. Assim como os demais testes, também ocorreram diversas medições ao longo do tempo.

Quadro 11 – Teste com carga indutiva.

	ION 7650	Sistema
Tensão (V)	126,49	127,21
Corrente (A)	7,33	7,27
Potência ativa (W)	236	219,36
Potência aparente (VA)	928	924,87
Fator de potência	25,44	24

Fonte: o autor.

No teste realizado com a carga indutiva foram realizadas diversas medições ao longo do tempo. Os erros de leitura percentual estão dispostos no quadro 12, onde é possível observar que o maior erro foi na potência ativa com 7,05 %.

Quadro 12 – Erro com carga indutiva.

	Fase 1
Tensão	0,56 %
Corrente	0,81 %
Potência ativa	7,05 %
Potência aparente	0,33 %
Fator de potência	5,66 %

Fonte: o autor.

4.2.1 Teste de correção

A carga utilizada para o teste de correção foi apresentada pelo quadro 10, onde suas leituras foram apresentadas. Calculando a potência reativa dessa carga a mesma apresenta um valor de aproximadamente 896 VAR.

Para a realização dos testes foi colocado 4 capacitores, com valores de 110 VAR, 120 VAR, 180 VAR e 210 VAR. Os capacitores foram colocados de forma crescente, ou seja, o de 110 VAR na porta 1 do sistema, o de 120 VAR na porta 2 do sistema, e assim por diante. É importante ressaltar que máximo reativo capacitivo possível é 620 VAR.

Com essa primeira configuração de capacitores o sistema ficou instável, pois a potência reativa da rede era de 896 VAR e o sistema estava provido de 620 VAR. Desta maneira, o sistema interpretava que ainda faltavam 276 para a correção do fator de potência, então o sistema desacoplava o capacitor 3 e 4 deixando somente o capacitor 1 e 2. No próximo cenário a potência reativa remanescente seria de 666 VAR. Desta forma o sistema ficava sempre desacoplando e acoplando os capacitores e não chegava a instabilidade.

Observando este cenário se elevou a potência reativa provido no sistema. O sistema teve em suas portas capacitores de 120 VAR, 240 VAR, 425 VAR e 610 VAR. Desta forma a potência no sistema fica superior à da carga.

Refazendo os testes, com a mesma carga, o sistema foi capaz de corrigir o fator de potência, acoplando o capacitor de 240 VAR e de 610 VAR. Deixando o sistema com um fator de potência igual a 98 %. Nesta situação o sistema ficou estável, não desencadeando inúmeros acoplamentos e desacoplamentos de capacitores em um curto espaço de tempo. É importante ressaltar que ao desligar a carga o sistema percebeu o excesso de capacitivo na rede e acabou desacoplando todos os capacitores ao mesmo tempo.

Com os testes de correção percebeu-se no sistema uma pequena lentidão, onde todo o processo de cálculo, enviar valores no display, avaliar a necessidade de correção de fator de potência e acionamento de portas, levaram até 30 segundos por ciclo.

4.3 Levantamento financeiro

Uma questão pertinente na elaboração desse sistema de correção de fator de potência é o custo financeiro. Então, realizou-se um levantamento do custo de um equipamento já consolidado no mercado e do custo do sistema realizado, para uma comparação econômica.

A comparação foi embasada no controlador automático de fator de potência trifásico PFW01-T06, é um controlador da marca WEG. O controlador possui 6 estágios de acionamento, pode trabalhar de modo automático ou manual, é capaz de medir tensão elétrica, corrente elétrica, potência ativa, potência aparente, potência reativa, fator de potência, distorção e harmônica total de tensão. Demais características do equipamento estão apresentadas no quadro 13 (WEG, 2013).

Quadro 13 – Características PFW01-T06.

Características	
Display de cristal líquido	2 linhas x 20 colunas
Temperatura de operação	0 a 55 °C
Alimentação	90 a 270 V
Medição de tensão	50 a 500 V
Medição de corrente	0,05 a 5 A
Memória	Volátil e não volátil

Fonte: (WEG, 2013, p. 4).

O controlador PFW01-T06 tem um custo de 2336,41 reais, esse valor não está incluso os transformadores de medida, que são os transformadores de corrente e de potencial (ELETRO VINIMAQ, 2017). Para conseguir realizar uma comparação econômica, foi elaborado um levantamento de todos os componentes necessários para a realização do sistema, esse levantamento está disposto no quadro 14.

Quadro 14 – Custo do sistema.

Componentes	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Total (R\$)
Arduino Mega	1	62,82	62,82
Placa de fenolite	2	6,72	13,44
Módulo relé – 4 canais	1	36,47	36,47
Display LCD 128x64	1	76,42	76,42
Chave liga-desliga	1	1,34	1,34
Tomada tripolar macho	1	1,70	1,70
Fonte chaveada 12V 35W	1	48,37	48,37
Chave R13-507	1	2,98	2,98
Transformador 9V 500 mA	3	19,47	58,41
Barra de pinos 1x40 90°	2	1,19	2,38
Borne 11x33mm	4	1,06	4,24
Conector jack P2	3	4,08	12,24
Cabos	1	5,36	5,36
Resistor 220 Ω ¼ W	1	0,09	0,09
Trimpot 1 k Ω	1	1,05	1,05
Resistor 100 k Ω ¼ W	3	0,09	0,27
Resistor 10 k Ω ¼ W	9	0,09	0,81
Resistor 470 k Ω ¼ W	6	0,09	0,54
Resistor 33 Ω ¼ W	3	0,09	0,27
Capacitor 10 μ F 35 V	6	0,09	0,54
Capacitor 0,1 μ F 50 V	1	0,14	0,14
Capacitor 0,33 μ F 35 V	1	0,09	0,09
Regulador de tensão 7805	1	1,28	1,28
TC SCT-13 100 A -50 mA	3	46,67	140,01
Tubo de estanho 1mm 25g	1	6,97	6,97
		Total	478,23

Fonte: adaptado de (BAÚ DA ELETRÔNICA, 2017).

O valor total para a elaboração do sistema chegou aos R\$ 478,23, com a adição da caixa utilizada para alocar os componentes, chega-se a um valor final de R\$ 493,23. É importante ressaltar que no valor de R\$ 493,23 já estão inclusos os três transformadores de corrente.

Apesar do controlador PFW01-T06 ter uma tecnologia mais sofisticada e já ser preparado para ambientes agressivos, como o ambiente industrial, a diferença de valores entre o PFW01-T06 e o sistema elaborado chega a ser de mais de quatro vezes. Essa diferença entre valores é muito significativa, principalmente pelo fato do sistema elaborado não ter grandes erros em suas leituras.

5 CONCLUSÃO

A utilização de métodos para a correção do fator de potência é totalmente benéfica, pois é capaz de aliviar o sistema elétrico, diminuir as perdas por efeito Joule, diminuir a queda de tensão em cabos e evitar multas pelo baixo fator de potência. Equipamentos capazes de realizarem leituras de fator de potência e de corrigirem o fator de potência automaticamente têm o seu custo elevado, valores que chegam aos milhares de reais.

O Arduino respondeu à altura da proposta. Porém, é importante ressaltar que a maior parte da facilidade que o Arduino fornece, vem da sua comunidade, pois é a comunidade que cria bibliotecas que facilitam a comunicação com periféricos e leitura de sensores. Por outro lado, essa facilidade pode gerar transtornos caso sejam mal implementadas, pois um acúmulo excessivo de bibliotecas para facilitar a programação podem fazer que o Arduino não se comporte como esperado. Mas isso não significa que a utilização de bibliotecas seja ruim, apenas deve-se ter o cuidado de como utiliza-las.

O sistema elaborado foi submetido em testes com diferentes cenários, onde teve o seu maior erro de leitura na potência ativa com 7,05 %, e o menor erro no fator de potência com 0%. Também foram realizados testes de correção do fator de potência, onde se constatou instabilidade do sistema em situações onde o mesmo não está equipado com potência reativa suficiente para fazer a devida correção. Em situações onde o sistema possui a devida potência reativa para a correção, o mesmo executou a correção mantendo-se estável.

Apesar do baixo custo do sistema, chegando a ficar mais de quatro vezes mais barato que um equipamento do gênero já consolidado no mercado, ainda é necessário a realização de melhorias na questão do gerenciamento dos bancos de capacitores, pois situações de instabilidades não são convenientes. Outra necessidade de melhoria, é o sistema ser capaz de realizar leituras de distorções harmônicas.

Na maioria das vezes, é inviável a realização de um sistema sanando todas as suas deficiências, desta maneira, fica como proposta futura a otimização do gerenciamento do banco capacitivo e a atribuição de leitura de distorção harmônica para o sistema elaborado.

Com a realização desse sistema, o Arduino se demonstrou totalmente capaz de resolver problemas e de se apresentar como uma solução mais econômica. Evidentemente que o Arduino tem suas limitações, porém a facilidade que ele proporciona, acaba sendo vantajoso a sua utilização para soluções de problemas.

REFERÊNCIAS

- AFONSO, Atonio Pereira. **Eletrônica circuitos elétricos**. São Paulo, 2011.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília, 2008.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 8**. Brasília, 2015.
- ARDUINO. **Arduino MEGA**. 2017c. Disponível em: < https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/arduino-mega2560_R3-sch.pdf >. Acesso em: 29 abr. 2017.
- ARDUINO. **Overview: Arduino / Genuino Uno**. 2017b. Disponível em: < <https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3> >. Acesso em: 22 abr. 2017.
- ARDUINO. **What is Arduino?**. 2017a. Disponível em: < <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction#>>. Acesso em: 22 abr. 2017.
- ATMEL. **8-bit Atmel Microcontrolles: ATmega 2560/V**. San Jose, 2014.
- BAÚ DA ELETRÔNICA. **BAÚ DA ELETRÔNICA**. 2017. Disponível em: < <http://www.baudaeletronica.com.br/> >. Acesso em: 15 out. 2017.
- BELCHIOR, Fernando Nunes. **Medidas elétricas**. Itajubá, 2014.
- BRAGA, Marco. **Lavoisier e a ciência no iluminismo**. São Paulo, 2000.
- BRASIL. **Boletim mensal do sistema elétrico brasileiro**. Brasília, 2015.
- BRASIL. **Eficiência energética na indústria e nas residências**. Rio de Janeiro, 2010.
- COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA - COPEL. **Manual de eficiência energética na indústria**. Curitiba, 2005.
- ELETRO VINIMAQ. **06 estágios controlador automático fator de potência, trifásico, 60Hz**. 2017. Disponível em: < <https://www.eletrvinimaq.com.br/produto/1593/06-estagios-controlador-automatico-fator-de-potencia-trifasico-60hz.html> >. Acesso em: 15 out. 2017.
- FITZGERALD, A.E. **Máquinas elétricas**. São Paulo: Mcgraw-hill, 1975.
- GLOVACKI, João Luiz Graneman de Melo. **Microcontrolador PIC 18F452 / Proteus**. Curitiba: UFPR, 2011.
- HAYT, William H. **Eletromagnetismo**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- MAMEDE, João Filho. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

OPEN ENERGY MONITOR. **About**. 2017a. Disponível em: < <https://openenergymonitor.org/?q=about> >. Acesso em: 15 out. 2017.

OPEN ENERGY MONITOR. **Measuring AC voltage with an AC to AC power adapter**. 2017b. Disponível em: < <https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/voltage-sensing/measuring-voltage-with-an-acac-power-adapter> >. Acesso em: 15 out. 2017.

OPEN ENERGY MONITOR. **CT sensor – interface with an Arduino**. 2017c. Disponível em: < <https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ct-sensors/interface-with-arduino> >. Acesso em: 15 out. 2017.

PETRY, Clóvis Antônio. **Força magnetizante, histerese e perdas magnéticas**. Florianópolis: CEFET, 2007.

RACHED, Alia. **Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica: confiabilidade, conformidade e presteza**. 14. ed. São Paulo: Acende Brasil, 2014.

RICHTER, Felipe Lucas. **Correção do fator de potência de cargas industriais**. Porto Alegre: UFGRS, 2013.

SADIKU, Matthew N.O. **Elementos de eletromagnetismo**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SADIKU, Matthew N.O. **Fundamentos de Circuitos elétricos**. 5.ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

SCHNEIDER. **Guia essencial**. São Paulo, 2009.

WEG. **PFW01: controlador automático do fator de potência**. Jaraguá do Sul, 2013.