

SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO DE CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA, MICROCONTROLADO PELA PLATAFORMA ARDUINO

José Ivan Valentim da Silva¹, José Luiz Sousa Lima²

Resumo: O fator de potência é uma medida que indica o quanto de potência elétrica fornecida ao circuito está de fato sendo convertida em trabalho útil. Seu valor está no intervalo entre 0 e 1. Quanto mais próximo do valor unitário, mais eficiente é o circuito. Assim, um baixo fator de potência implica em maior corrente elétrica, demandando maiores custos e uma maior capacidade de geração de energia por parte da concessionária. Em meio a isso, o presente trabalho visa desenvolver a simulação virtual de um sistema automático de correção do fator de potência em circuitos de baixas potências, utilizando o microcontrolador Arduino. Pretende-se alcançar a simulação de um dispositivo de correção aplicável academicamente, utilizando material acessível e de baixo custo. Para isso, foram utilizados o ambiente de desenvolvimento integrado do Arduino e uma ferramenta de simulação virtual de projetos elétricos. A partir dos resultados obtidos na experimentação, verificou-se o nível de precisão das medições executadas e a eficácia do dispositivo, com correção do fator de potência bastante próxima do valor unitário. Dessa forma, foi possível constatar que o circuito projetado é capaz de corrigir o problema da ineficiência energética de circuitos monofásicos e de baixas potências.

Palavras-chave: Simulação computacional, fator de potência, qualidade energética, Arduino.

1. INTRODUÇÃO

A defasagem entre a tensão e a corrente de um sistema elétrico está relacionada diretamente pelo chamado fator de potência. Segundo Boylestad, ele é uma medida que indica o quanto de potência elétrica fornecida ao circuito está sendo transformada em trabalho útil [1]. Seu valor está no intervalo entre 0 e 1, visto que quanto mais próximo do valor unitário, mais eficiente é o circuito. Assim, um baixo fator de potência implica em maior corrente elétrica, demandando maiores custos e uma maior capacidade de geração de energia por parte da concessionária. Para as organizações, os impactos da má qualidade energética são refletidos em multas nas faturas de energias.

Dessa forma, o fator de potência apresenta bastante importância do ponto de vista da eficiência energética do projeto. Sua correção é dada pela implementação de componentes capacitivos em paralelo à carga do sistema. A especificação da capacitância do componente é determinada pelas peculiaridades do circuito. Segundo Mamede, em projetos que apresentam cargas em regimes de utilização distintos para diferentes intervalos de tempo, a implementação de sistemas automáticos de correção do fator de potência possui considerável relevância, já que é imprescindível a execução de uma regulação constante e periódica [2]. Eles geralmente apresentam um banco de capacitores que, ao serem combinados, fornecem diferentes valores capacitivos. Assim, após as medições realizadas pelos sensores, o dispositivo controla o valor capacitivo a ser fornecido pelo banco.

No mercado, existem modelos automatizados de correção amplamente sofisticados, porém, com elevado custo financeiro. Em meio a isso, o presente trabalho visa desenvolver a simulação virtual de um sistema automático de correção da qualidade energética em circuitos de baixa potência, utilizando o Arduino, plataforma livre de prototipagem eletrônica flexível e barata, capaz de construir uma ampla variedade de projetos eletrônicos. Com isso, pretende-se alcançar a simulação de um dispositivo de correção aplicável academicamente, utilizando material acessível e de baixo custo.

Vale salientar que tal equipamento não introduziria competitividade no mercado, ou seja, não apresentaria finalidade comercial, já que se restringiria às funções básicas de correção do problema energético. Porém, a programação em sua plataforma facilitaria o desenvolvimento de protótipos semelhantes para projetistas acadêmicos e amadores.

Para fins organizacionais, o estudo será constituído por quatro etapas: Referencial teórico, Metodologia, Elaboração do projeto e Conclusões. Na primeira seção, será exposta de forma sintetizada os conhecimentos acadêmicos acerca da correção do fator de potência e da plataforma Arduino. Em seguida, será mostrada a metodologia utilizada para o desenvolvimento da simulação pretendida. Na terceira etapa, serão detalhados todos os caminhos, conceitos e ideias para a concretização da simulação. Por fim, nas Conclusões, serão debatidos os principais pontos do trabalho, atentando-se para a viabilidade da prototipagem e sugestões para trabalhos futuros.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Referencial teórico

Nesta seção, serão abordados resumidamente os principais pontos da área acadêmica que fundamentam a execução da simulação. Os conceitos estudados serão: fator de potência, correção do fator de potência monofásico, Arduino e identificação de *outliers*.

2.1.1 Fator de potência

Segundo Boylestad, podem existir três tipos de potências em um sistema de corrente alternada: potência ativa, reativa e aparente [1]. A potência aparente (S) é a potência fornecida pelo gerador ao circuito, medida em VA (volt-ampere). Já a potência ativa (P) é aquela utilizada no equipamento para realizar trabalho, isto é, utilizada na conversão de energia elétrica em mecânica, térmica e etc. É essa a potência mensurada pelos medidores convencionais. Sua unidade de medida é dada em W (watts).

Por fim, a potência reativa (Q) é a parcela da potência que não é convertida em trabalho útil, sendo armazenada e retornada ao gerador. Ela pode ser indutiva ou capacitiva para o caso de equipamentos indutivos ou capacitivos, respectivamente. Conforme aponta Mamede, a energia reativa é apenas responsável pela formação do campo magnético de tais componentes [2]. Sua unidade de medida é o VAR (volt-ampere reativo).

Os três tipos de potência estão relacionados no domínio fasorial por $S = P + jQ$. Assim, de modo geral:

$$S = V \cdot I \quad (1)$$

$$P = S \cdot \cos(\theta)$$

$$Q = S \cdot \sin(\theta) = \sqrt{S^2 - P^2}$$

O parâmetro θ é chamado de defasagem, sendo definido pelo módulo da menor diferença em unidades de ângulo (ou tempo) entre a fase da tensão e da corrente do circuito ($\theta = |\theta_v - \theta_i|$). Observe a defasagem exemplificada entre os sinais apresentados na Figura 1.

A defasagem entre os parâmetros perfeitamente senoidais de tensão e corrente elétrica do circuito está relacionada diretamente pelo fator de potência (F_p), também conhecido como fator deslocamento. Como dito anteriormente, ele é uma medida que indica o quanto da potência elétrica fornecida ao sistema está de fato sendo convertida em trabalho útil. Por isso, o indicador apresenta significativa importância quando se trata da qualidade energética da rede. Matematicamente, seu cálculo é dado por:

$$F_p = \frac{P}{S} = \cos(|\theta_v - \theta_i|) \quad (2)$$

Como pode ser observado, seu valor está no intervalo entre 0 e 1. Quanto mais próximo do valor unitário, mais eficiente é o sistema, significando que os parâmetros do circuito estão em fase e toda a potência aparente fornecida está sendo convertida em outras formas de energia. Segundo a regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica, o fator de potência mínimo permitido para as contas de energia é de $F_p = 0,92$ [3]. A avaliação por parte da concessionária é realizada em cada hora do dia. Quando não atendido o limite permitido, a companhia responsável deverá cobrar multa na fatura de energia sobre o consumo excessivo de potência reativa.

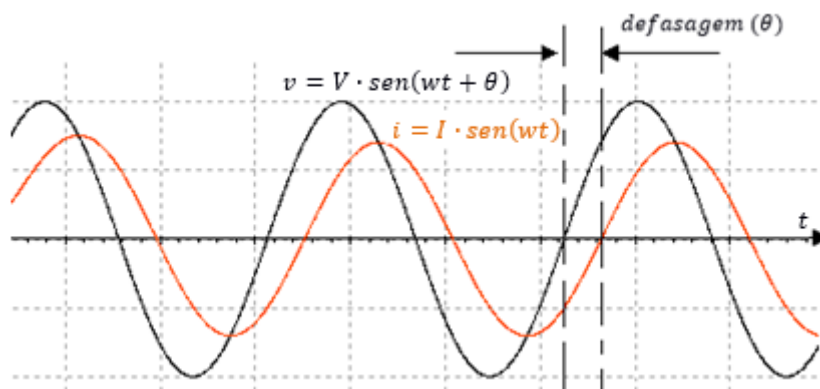


Figura 1. Ilustração da defasagem entre dois sinais. (Fonte: Autor desconhecido. Adaptado pelo autor.)

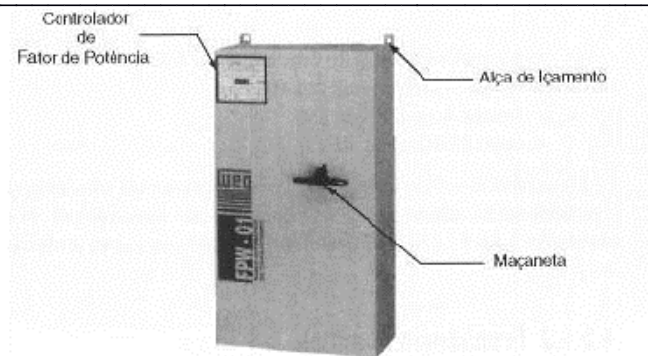


Figura 2. Banco de capacitores automático de baixa tensão. (Fonte: Ref. [2])

Para Boylestad, baixos valores do fator de potência resultam em elevada quantidade de potência reativa no sistema [1]. Assim, a consequência direta desse efeito é o aumento na corrente total que circula nas redes de distribuição de energia elétrica da concessionária, podendo sobrecarregar as linhas de transmissão e causar problemas de estabilidade no sistema.

2.1.2 Correção do fator de potência monofásico

Como explana Mamede, o processo mais empregado para a correção do fator de potência em instalações comerciais e industriais envolve a introdução de elementos capacitivos em paralelo com a carga do sistema, com o objetivo de “anular” a potência reativa provocada pelas cargas indutivas [2]. Normalmente, são utilizados bancos de capacitores fixos ou automáticos, dimensionados conforme as características apresentadas na rede (carga reativa indutiva e tensão nominal). Os bancos de capacitores automáticos geralmente são aplicados em instalações que existem variações no fator de potência com o decorrer do tempo. A Figura 2 apresenta a ilustração de um banco de capacitores automático.

Quanto ao dimensionamento do capacitor a ser incorporado à rede, em um sistema elétrico alternado alimentado por uma tensão eficaz V_{rms} , frequência f e com potência reativa Q , a capacitância C necessária para corrigir totalmente o fator de potência é dada por:

$$C = \frac{Q}{2\pi f \cdot V_{rms}^2} \quad (3)$$

2.1.3 Arduino

Para o fabricante, “o Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e software fáceis de usar. Placas Arduino são capazes de ler entradas [...] e transformá-las em uma saída [...]. Você pode dizer à sua placa o que fazer enviando um conjunto de instruções para o microcontrolador na placa. Para fazer isso, você utiliza a linguagem de programação Arduino” [4]. Assim, por ser código aberto, todas as peculiaridades do microcontrolador podem ser desenvolvidas e aprimoradas pelo público em geral. Além disso, a plataforma é constituída por duas ferramentas fundamentais: a placa Arduino (hardware) e o ambiente de desenvolvimento integrado Arduino Software (IDE).

O software utiliza a linguagem de programação de alto nível C/C++. Para facilitar a conexão entre a placa e outras máquinas, o fabricante disponibiliza a comunicação serial, artifício que viabiliza a troca de dados e o monitoramento do que está sendo executado em tempo real no projeto.

Conforme Banzí aponta, a placa Arduino apresenta um pequeno chip responsável pelo processamento da plataforma, sendo geralmente o microcontrolador de 8 bits ATmega 328 [5]. Vale destacar que a placa Arduino apresenta diversas versões, tais como Arduino Uno, Nano, Mega, entre outros. A Figura 3 apresenta a ilustração do Arduino Uno, versão mais conhecida e utilizada pelos usuários.



Figura 3. Arduino Uno. (Fonte: Ref. [4])

Segundo o fabricante, o Arduino Uno possui 14 pinos digitais de entrada/saída e 6 entradas/saídas analógicas [4]. Os pinos digitais atuam somente em dois níveis de tensão definidos, 0 V e 5 V, também conhecidos como níveis lógicos baixo e alto, respectivamente. Já as entradas analógicas são padronizadas a receber ou fornecer qualquer valor entre 0 V e 5 V. Através de um conversor analógico digital (A/D) de 8 bits, o Arduino converte linearmente a faixa de tensão em valores inteiros entre 0 e 1023. A equação que descreve a conversão de uma tensão de entrada v_{in} para o valor inteiro V_{dig} mais próximo é dada por:

$$V_{dig} = v_{in} \cdot \frac{5 V}{1023} \quad (4)$$

Vale destacar que tensões negativas, como o semiciclo negativo de um sinal senoidal, não podem ser lidas pelo Arduino devido à polarização inversa de um diodo interno. Para contornar isso, normalmente são utilizados circuitos auxiliares que fornecem uma tensão DC para o sinal de entrada, deslocando-o para a parte positiva e permitindo a leitura analógica da placa. Tais circuitos são comumente conhecidos como circuitos *off-set*.

Quanto ao princípio de funcionamento, “o dispositivo processa a informação que recebe dos sensores utilizando um comportamento que é descrito no software. Ele pode então interagir com o mundo por meio de atuadores, componentes eletrônicos que convertem um sinal elétrico em uma ação física” [4]. Assim, os sensores e atuadores estão relacionados, respectivamente, pela entrada e saída de informações dos projetos. Vale salientar que, para o funcionamento adequado do modelo, a tensão DC de alimentação necessária é $V_{DC} = 5 V$.

Do ponto de vista das aplicações, Banzi afirma que “é vantajoso utilizar o Arduino no ensino de engenharia, nas disciplinas de controle e automação, porque reduz custos de aquisição de hardware, é fácil de manusear e permite integração com outras ferramentas de automação através das suas entradas/saídas analógicas e digitais” [5].

2.1.4 Identificação de outliers

Normalmente, em uma amostra de informações experimentais, podem existir valores totalmente discrepantes da média geral, como detalha Figueira:

As observações que apresentam um grande afastamento das restantes ou são inconsistentes com elas são habitualmente designadas por *outliers*. [...] pode-se concluir que um *outlier* é caracterizado pela sua relação com as restantes observações que fazem parte da amostra. O seu distanciamento em relação a essas observações é fundamental para se fazer a sua caracterização. Estas observações são também designadas por observações anormais [...] [6].

Para a autora, “as principais causas que levam ao aparecimento de *outliers* são: erros de medição, erros de execução e variabilidade inerente dos elementos da população”. Para a diminuição dos erros nas análises estatísticas, os *outliers* precisam ser definidos.

Com a obtenção da série de dados, os *outliers* podem ser identificados pelo seu distanciamento da mediana da amostra. Cruz Júnior *et. al* explanam que, para determinar se um dado se caracteriza como um *outlier*, ele deve ser menor do que um limite inferior L_{inf} ou maior do que um limite superior L_{sup} [7]. Tais limites são definidos pelas seguintes equações:

$$L_{inf} = Q1 - n \cdot (Q3 - Q1) \quad (5)$$

$$L_{sup} = Q3 + n \cdot (Q3 - Q1) \quad (6)$$

Com o conjunto de dados ordenados, os parâmetros $Q1$ (quartil inferior) e $Q3$ (quartil superior) representam os valores que, respectivamente, separam os 25% primeiros e os 25% últimos dados dos demais. Vale salientar que, para encontrar *outliers* extremos, as barreiras de investigação L_{inf} e L_{sup} são definidas com o parâmetro n definido como $n = 3$. Já para analisar *outliers* moderados, utiliza-se $n = 1,5$. Ao identificar os *outliers* de uma série, existe a possibilidade de rejeitá-los na análise estatística ou elaborar um estudo especial sobre os mesmos.

2.2 Metodologia

Em relação à natureza da pesquisa, o método utilizado na construção deste trabalho classifica-se como aplicado, objetivando desenvolver conhecimentos acadêmicos com aplicação prática para a resolução dos problemas relacionados ao baixo fator de potência. Através de uma análise quantitativa dos resultados experimentais decorrentes da simulação, serão avaliados o desempenho e a eficácia do dispositivo de correção.

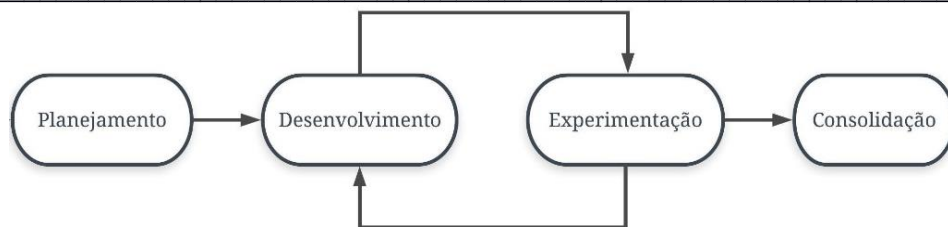


Figura 4. Etapas do projeto. (Fonte: Autoria própria)

Do ponto de vista dos objetivos, o artigo apresenta caráter explicativo e com procedimentos técnicos de característica experimental. Para a realização deste trabalho, foram utilizados o Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) Arduino Software e a uma ferramenta de simulação virtual de projetos elétricos. O primeiro foi aplicado para o desenvolvimento da lógica de programação a ser executada pela placa Arduino. Já o segundo, por sua vez, foi responsável pelo desenvolvimento da simulação do circuito.

Quanto ao mecanismo de criação do projeto, o mesmo pode ser dividido em quatro etapas: planejamento, desenvolvimento, experimentação e consolidação. Vale salientar que as duas etapas intermediárias ocorreram de forma retroalimentada, como apresentado no fluxograma da Figura 4.

Inicialmente, no planejamento, definiu-se as ferramentas de software a serem utilizadas, além da discussão das especificações do projeto, como os parâmetros máximos de funcionamento do equipamento (potência, corrente e tensão elétrica), nível de correção, capacitância máxima de correção, juntamente com os princípios de funcionamento do dispositivo.

Em seguida, foi implementada a parte executiva propriamente dita. Nesta etapa, foram desenvolvidos o circuito virtual (sensores, processamento e banco de capacitores) e a lógica de programação a ser executada pela plataforma Arduino. Conforme o desenvolvimento do projeto, foram incorporadas ferramentas para otimização do desempenho e aumento da precisão do dispositivo.

Posteriormente, na fase de experimentação, foi realizada a simulação com um circuito de teste para verificar a concretização dos objetivos do aparelho. Além disso, com os resultados dos dados experimentais, tornou-se possível analisar visualmente o gráfico da tensão e corrente elétrica do sistema antes (sinais em defasagem) e após (sinais aproximadamente em fase) a correção do fator de potência. Por fim, realizou-se a etapa de consolidação do projeto, especificando as principais peculiaridades, como limitações, regras para aplicação física, entre outros.

2.3 Elaboração do projeto

Nesta seção, serão apresentadas as principais etapas necessárias para a realização da simulação. A seção está dividida em: planejamento, desenvolvimento, experimentação e consolidação.

2.3.1 Planejamento

Em relação à unidade de processamento, a escolha do Arduino Uno (Figura 3) levou em consideração a sua simplicidade e o seu custo financeiro. A quantidade de pinos digitais e analógicos, juntamente com sua capacidade de processamento e memória, satisfazem os requisitos para o desenvolvimento da simulação. Dentre as versões ofertadas pelo fabricante, seu custo financeiro está entre os mais econômicos.

Com a escolha da versão, idealizou-se todo o processo de funcionamento da plataforma. Com isso, definiu-se que toda a etapa de correção pode ser categorizada em três procedimentos-chave: sensoriamento, análise dos dados e processo de correção. Na etapa de sensoriamento, o dispositivo realiza diversas leituras instantâneas da tensão, corrente e tempo ao longo de um período (amostra) de $16667 \mu s$. Esse tempo é referente à frequência de 60 Hz da energia elétrica brasileira. Para cada leitura é armazenado um tempo correspondente, medido pelos artifícios Arduino. Com isso, é possível detectar os picos positivos de cada parâmetro e, ao subtrair o tempo vinculado a cada pico, torna-se possível calcular o fator de potência da amostra pela Equação 2. Para uma maior precisão, é possível medir os picos e o fator de potência de diversas amostras (diferentes períodos) e, posteriormente, calcular a média entre os valores obtidos. Tal método é comumente conhecido como simulação de Monte Carlo [8].

Já na análise dos dados, por sua vez, o dispositivo calcula todos os parâmetros que caracterizam o circuito. A partir do conhecimento do fator de potência e dos picos de tensão e corrente, torna-se possível calcular: a tensão e a corrente eficaz medida, juntamente com as potências ativa, aparente e reativa. Assim, através da Equação 3, determina-se a capacitância C necessária para corrigir o problema de ineficiência energética.

Por fim, com a capacitância necessária conhecida, inicia-se o processo de correção. Nessa fase, a unidade de processamento relaciona linearmente cada faixa de valores capacitivos (em μF) a valores digitais inteiros v_d entre 0 e 255, em que a capacitância máxima a ser corrigida $C_{m\acute{a}x}$ é atribuída ao valor digital $v_{dm\acute{a}x} = 255$. A função linear que descreve a conversão é dada por:

$$v_d = C \cdot \frac{v_{dm\acute{a}x}}{C_{m\acute{a}x}} \quad (7)$$

Tabela 1. Valores pré-projetados para cada relé. (Autoria própria)

Relé (peso binário)	Valor capacitivo
Relé 1 (1)	2,08 μF
Relé 2 (2)	4,16 μF
Relé 3 (4)	8,32 μF
Relé 4 (8)	16,64 μF
Relé 5 (16)	33,29 μF
Relé 6 (32)	66,57 μF
Relé 7 (64)	133,15 μF
Relé 8 (128)	266,30 μF

Vale salientar que o valor v_d é definido em valores inteiros. Dessa forma, com o auxílio de oito relés, cada um com oito capacitores pré-projetados, o microcontrolador aciona a capacitância mais próxima da desejada através da combinação liga-desliga entre os relés. Para cada situação, quando os relés selecionados ligam, eles realizam a conexão em paralelo das capacitâncias vinculadas. Portanto, os conectores atuadores AT1 e AT2 fornecem a capacitância resultante (somatório) a ser inserida no circuito analisado (Figura 14).

Antes do desenvolvimento da programação, definiu-se as especificações máximas de operação do dispositivo de correção. Assim, a corrente eficaz máxima a ser medida pelo sensor de corrente do sistema é $I_{m\acute{a}x} = 50 A$. Já para a tensão eficaz máxima monofásica, foi definido $V_{m\acute{a}x} = 250 V$. Consequentemente, como mostrado na Equação 1, a potência aparente máxima $S_{m\acute{a}x}$ a ser analisada é de 12,5 kVA. Dessa forma, como já dito anteriormente, o modelo estudado servirá para correção de circuitos caracterizados pela baixa potência.

Com os valores máximos especificados, faz-se necessário determinar a capacitância máxima $C_{m\acute{a}x}$ a ser implementada pelo banco de capacitores. Vale ressaltar que, teoricamente, o valor máximo tende ao infinito. Nesse estudo, a capacitância máxima será definida quando a tensão e a potência reativa do sistema são máximas. Pela Equação 3, a capacitância máxima é dada por $C_{m\acute{a}x} = 530,5 \mu F$. Dessa forma, os valores pré-projetados para cada relé podem ser definidos (Tabela 1).

Portanto, observa-se que o banco de capacitores foi planejado para fornecer 256 (2^8) valores capacitivos diferentes. Verifica-se que a sensibilidade da leitura capacitiva (nível de precisão) é de 2,08 μF . Para obter um nível de precisão maior, faz-se necessário o aumento da quantidade de relés. É possível verificar que, quanto mais elevadas as especificações, maior será o banco de capacitores necessário para a correção adequada, elevando a quantidade de componentes e, consequentemente, o custo. Além disso, os sensores deveriam ser bem mais sofisticados para conseguir mensurar os parâmetros.

2.3.2 Desenvolvimento

Em relação à forma de comunicação com o usuário, definiu-se a utilização da comunicação serial como ferramenta para fornecer as informações de saída. Isso porque a utilização de *displays* demandaria uma maior quantidade de pinos da plataforma Arduino, o que impossibilitaria o controle do banco de capacitores. Além disso, utilizou-se um botão interativo para comandar o início das leituras e da correção do fator de potência.

Na fase de sensoriamento, como as entradas analógicas do Arduino detectam somente tensões positivas entre 0 V e 5 V, o valor de pico a pico de qualquer sinal mensurado deverá ser no máximo 5 V. Para permitir a leitura dos semiciclos negativos, incorporou-se um circuito *off-set* de 2,5 V (tensão DC fornecida ao sinal). A Figura 5 demonstra a importância dessa ferramenta para a adequada mensuração. Como já enfatizado, o valor digital lido pela unidade de processamento resultará em valores de 0 a 1023.

Assim, como observado na Figura 5, o eixo de tensão nula do sinal real estará definido no eixo $v = 2,5 V$ do sinal de entrada. Consequentemente, pela Equação 7, os valores digitais 511 e 512 estarão resignados à tensão nula do sinal real após a conversão A/D.

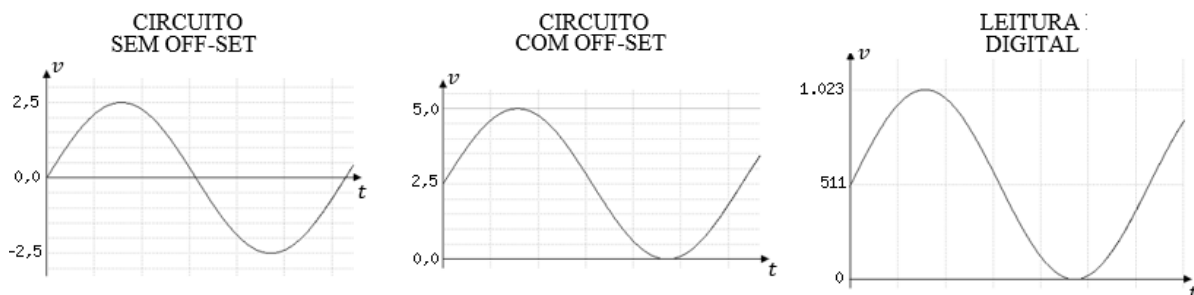


Figura 5. Representação gráfica dos princípios do circuito *off-set* e da conversão A/D. (Fonte: Autoria própria)



Figura 6. Sensor SCT-013-050. (Fonte: Ref. [9])

A partir da corrente máxima fixada, o sensor de corrente SCT-013-050 (Figura 6) foi escolhido pela precisão (0,5%) e pela praticidade em mensurar a corrente desejada sem precisar alterar os contatos do circuito externo (sensor não invasivo). Segundo o fabricante, a tensão máxima de saída do sensor é 1 V [9]. Assim, faz-se amplificar a tensão de saída até o limite de leitura do conversor (2,5 V) para elevar a faixa de conversão. Teoricamente, quando a corrente de pico real for $70,7\text{ A}$ ($50\text{ A} \cdot \sqrt{2}$), a tensão lida pelo conversor será 5,0 V.

De modo análogo, o sensor de tensão poderá ser um circuito abaixador de tensão, cuja tensão de pico máxima de entrada será $353,5\text{ V}$ ($250\text{ V} \cdot \sqrt{2}$). Já a tensão de pico máxima de saída foi programada para 2,4 V, de modo a permitir uma margem de segurança. Vale destacar que o sensor deverá ser conectado em paralelo ao gerador do circuito externo (observe os sensores SV1 e SV2 do esquema do projeto apresentado na Figura 11).

Para a leitura do tempo, utilizou-se a função “micros()”. Segundo o fabricante, ela “retorna o número de microssegundos passados desde que a placa Arduino começou a executar” [3]. A Figura 7 demonstra o código-fonte da programação utilizada para a coleta dos parâmetros.

Como mostrado na Figura 7, o dispositivo foi programado para realizar 150 leituras instantâneas de corrente, tensão e tempo por período analisado. Tal valor foi obtido experimentalmente. Verificou-se que cada processo de leitura dura em torno de $112\text{ }\mu\text{s}$. Com isso, a cada período da onda senoidal analisada, o microcontrolador possui capacidade de medir aproximadamente 150 leituras instantâneas (taxa de leituras por período).

Ao realizar todas as leituras, inicia-se as instruções para encontrar os valores de pico de cada parâmetro e subtrair a diferença de tempo entre os picos (determinação da defasagem), possibilitando o cálculo da tensão eficaz, corrente eficaz e do fator de potência da amostra. Como há a possibilidade de algum valor de pico se repetir, como mostrado na Figura 8, o dispositivo realiza o artifício do tempo médio, coletando somente o tempo intermediário t_p entre os picos encontrados. Isso eleva a precisão da simulação, evitando parâmetros totalmente discrepantes da realidade. Caso a quantidade de picos repetidos seja par, o algoritmo realiza uma média aritmética entre os tempos correspondentes aos dois picos centrais. Já para quantidades ímpares, o tempo vinculado ao pico central é extraído.

Sabendo que, na prática, os sinais senoidais são instáveis e flutuantes, medir apenas uma amostra do período pode comprometer a precisão do dispositivo. Assim, planejou-se medir diversas amostras e calcular a média aritmética de cada parâmetro (tensão, corrente e fator de potência). Levando em consideração a capacidade de memória da plataforma Arduino e o tempo de processamento, foi estabelecido a realização de 30 amostras.

Com os três conjuntos de dados obtidos (tensão, corrente e fator de potência) e utilizando os princípios de identificação de *outliers*, foram implementados comandos que realizassem uma análise estatística da presença de *outliers* extremos em cada conjunto. Primeiramente, a série é ordenada de forma crescente, permitindo a determinação da mediana e dos quartis Q1 e Q3. Feito isso, realiza-se um teste lógico para verificar se o dado se enquadra ou não na faixa de *outliers* extremos, definidos pelas equações 5 e 6. Caso positivo, foi definido que os valores discrepantes seriam desprezados do cálculo da média. A Figura 9 descreve o código-fonte da programação utilizada.

Com os parâmetros médios obtidos, o microcontrolador determina a capacitância de correção e, conseqüentemente, o valor digital v_d correspondente. Em seguida, através da lógica de programação apresentada na Figura 10, a placa Arduino emite uma tensão de nível alto nos pinos dos relés que, por sua vez, realizam o contato dos capacitores vinculados com os terminais atuadores AT1 e AT2 (Figura 14).

Pela Figura 10 é possível observar que a lógica de programação é semelhante à conversão de números decimais em números binários. Assim, cada relé representa um “bit” com determinado peso binário (0,1,2,4,..., 128). Por

```
for (int i = 0; i < numLeituras; i++) {
    sinal_c[i] = analogRead(pino_corrente);
    timeSinal[i] = micros();
    sinal_t[i] = analogRead(pino_tensao);
    // 112 microssegundos por leitura
    // numLeituras = 150;
} // fim_forLeituras
```

Figura 7. Programação da leitura dos parâmetros de entrada. (Fonte: Autoria própria)

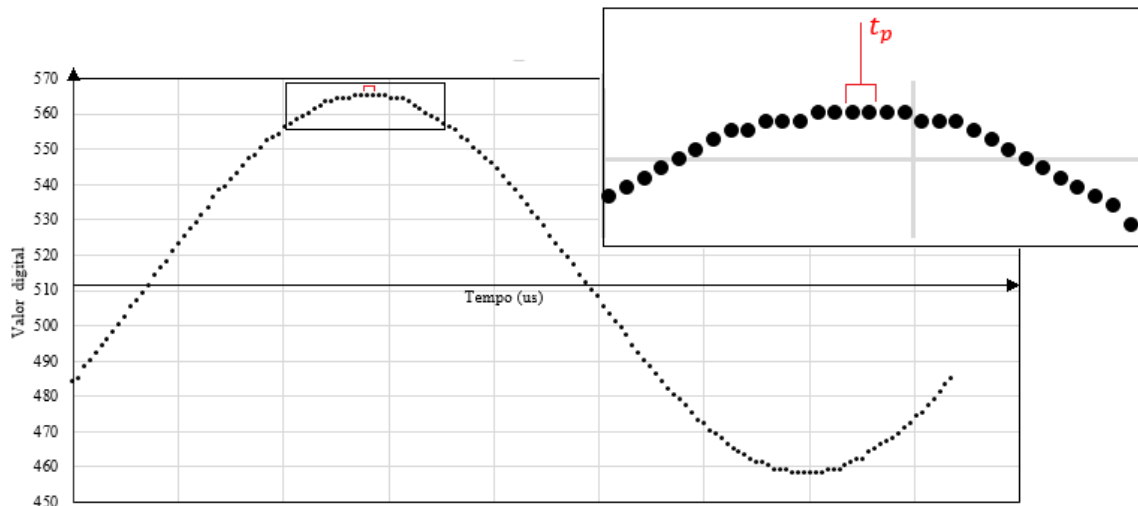


Figura 8. Representação esquemática da seleção do tempo de pico intermediário. (Fonte: Autoria própria)

exemplo, para o número digital 255 ($C_{m\acute{a}x} = 530,5 \mu F$), o microcontrolador emite uma tensão de nível alto para todos os relés que, por sua vez, conectam em paralelo todos os capacitores do banco da Tabela 1.

Segundo a folha de dados do fabricante, a tensão de acionamento dos relés (modelo JQC-3FF-S-Z) é dada por $V_{rel\acute{e}} = 5 V$ [10]. Vale destacar que o sinal emitido pelo pino do Arduino não é suficiente para acionar o relé. Portanto, necessita-se da amplificação da tensão. Na simulação, o sinal foi amplificado por meio de um transistor (modelo BC548). O pino do Arduino foi conectado no terminal da base do transistor, enquanto que o relé foi adicionado no terminal coletor.

```
//IDENTIFICAÇÃO E REMOÇÃO DE OUTLIERS EXTREMOS;
float Lsup = q3 + (q3 - q1) * 3.0;
float Linf = q1 - (q3 - q1) * 3.0;
for (int i = 0; i < numAmostras ; i++) {
    if (acum[i] < Linf || acum[i] > Lsup) {
        //outlier extremo
        cont++;
        acum[i] = 0;
    }
    soma = soma + acum[i];
} //fim for
float media = soma / (numAmostras - cont);
return media;
```

Figura 9. Programação utilizada para detecção e remoção de outliers. (Fonte: Autoria própria)

```
// valor = valor digital
// rele[0] -> 1; rele[1] -> 2; rele[2] -> 4; rele[3] -> 8
// rele[4] -> 16; rele[5] -> 32; rele[6] -> 64; rele[7] -> 128
Serial.println(F("Accionando o banco de capacitores..."));
for (int i = 7; i >= 0; i--) {
    if (valor % 2 == 0) {
        digitalWrite(rele[i], LOW);
    }
    else {
        digitalWrite(rele[i], HIGH);
    }
    valor = valor / 2;
}
Serial.println(F("Correcao do fator bem sucedida..."));
```

Figura 10. Lógica de programação utilizada para o acionamento dos relés. (Fonte: Autoria própria)

Tabela 2. Parâmetros obtidos na simulação. (Autoria própria)

Parâmetros	Antes da correção			Após a correção		
	Simulação	Valor teórico	Erro relativo (%)	Simulação	Valor teórico	Erro relativo (%)
Corrente eficaz	1,982 A	2,001 A	0,95	1,474 A	1,456 A	1,24
Tensão eficaz	219,62 V	220,00 V	0,17	219,59 V	220,00 V	0,19
Fator de potência	0,7300	0,7277	0,32	0,9986	1,0000	0,14
Potência aparente	435,33 VA	440,22 VA	1,11	323,66 VA	320,4 VA	1,02
Potência reativa	297,53 VAR	301,89 VAR	1,44	17,41 VAR	0,00 VAR	—
Potência ativa	317,79 W	320,35 W	0,80	323,19 W	320,4	0,87
Capacitância corretiva	16,36 μF	16,54 μF	1,09	0,96 μF	0,00 μF	—

2.3.3 Experimentação

Ao desenvolver o sistema, foi simulada a correção do fator de potência de um circuito de teste para avaliar quantitativamente o nível de precisão e desempenho do projeto. Dessa forma, foi analisado e corrigido o circuito externo apresentado na Figura 11. Observe que os terminais dos sensores e do atuador estão representados.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros obtidos com a simulação antes e após a correção do fator de potência. Para a análise comparativa, há também os respectivos valores teóricos e erros relativos. Pela Tabela 2, é possível observar a enorme precisão do circuito de correção, com erro relativo máximo de apenas 1,44%.

Além disso, verifica-se a eficácia do dispositivo, com correção do fator de potência bastante próxima do valor unitário. Para a análise visual da correção, a Figura 12 apresenta o gráfico de dispersão dos sinais de tensão e corrente resultantes de uma das amostras realizadas pelo dispositivo. Já a Figura 13, por sua vez, apresenta os mesmos sinais após a correção do fator de potência. Observa-se que eles estão em fase, como desejado.

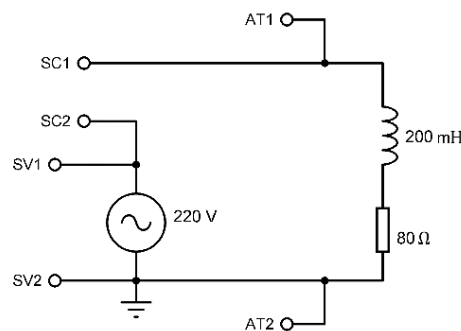


Figura 11. Circuito de teste analisado na experimentação. (Fonte: Autoria própria)

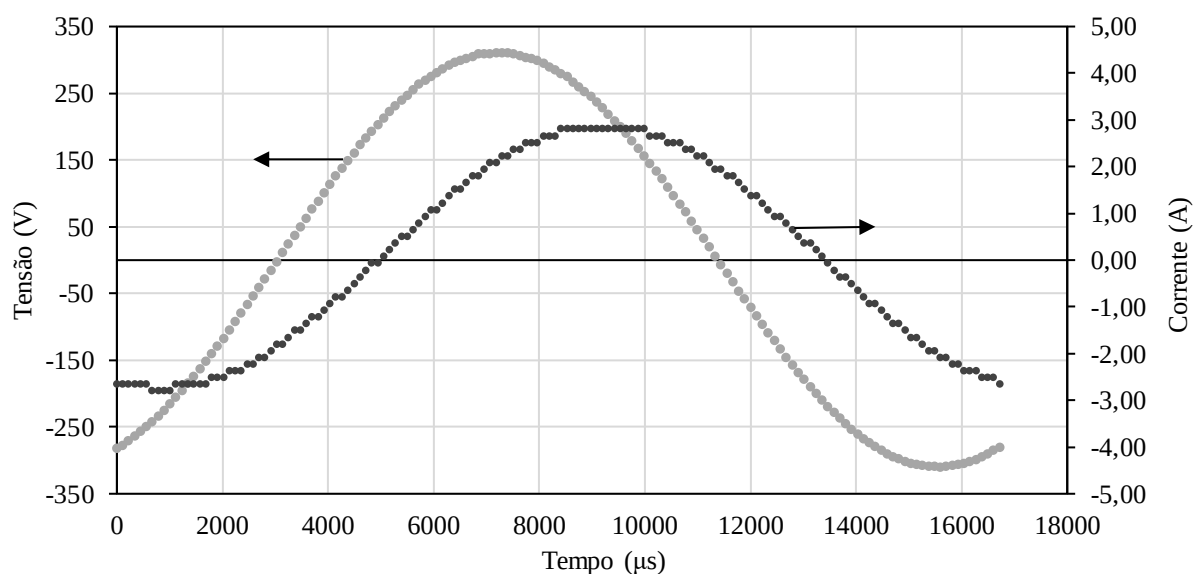


Figura 12 – Gráfico de dispersão dos parâmetros do circuito de teste antes da correção. (Fonte: Autoria própria)

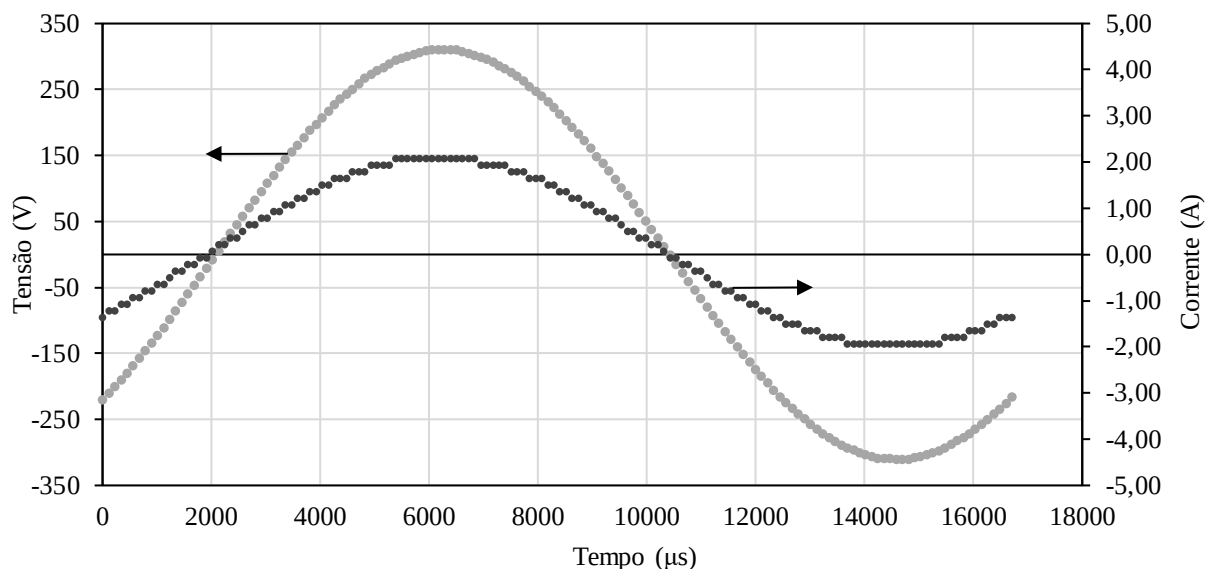


Figura 13 – Gráfico de dispersão dos parâmetros do circuito de teste após a correção. (Fonte: Autoria própria)

2.3.4 Consolidação

Segundo a IDE, todas as instruções programadas no Arduino utilizam apenas 23% do espaço de armazenamento de programas e 78% da memória dinâmica do microcontrolador. Vale ressaltar que cada procedimento de correção é realizado em torno de 10 segundos. Quanto às limitações de leitura, a sensibilidade de leitura da tensão e corrente são, respectivamente, 0,69 V e 0,14 A. Para circuitos externos com parâmetros próximos a alguma dessas medidas, a precisão do dispositivo será consideravelmente afetada.

Para a prototipagem, os valores resistivos e capacitivos projetados no circuito deverão ser modificados para os valores comerciais. Quando preciso, pode-se realizar associações em série ou paralelo. Além disso, faz-se necessário calibrar os sensores; realizar uma análise de corrente contínua do projeto de forma a impedir problemas de operação dos componentes; verificar experimentalmente a taxa de leituras por período do Arduino e realizar as adaptações conforme necessário. Vale ressaltar que o projeto pode ser utilizado para diferentes circuitos externos monofásicos e de baixa potência. O esquema final do circuito projetado está apresentado na Figura 14.

De modo geral, foram utilizados os seguintes componentes na simulação:

- 01 Arduino Uno;
- 01 bateria de 5 V;
- 01 bateria de 9 V;
- 01 botão (*push button*);
- 01 sensor de corrente (modelo SCT-013-050);
- 01 circuito *off-set* de 2,5 V;
- 01 circuito amplificador de tensão;
- 01 circuito abaixador de tensão;
- 08 módulos relés (modelo JQC-3FF-S-Z)
- 08 transistores BJT (modelo BC548);
- 08 capacitores fixos;
- 10 resistores fixos;

3. CONCLUSÕES

A partir das etapas de elaboração do projeto foi possível concretizar os objetivos pretendidos com um dispositivo de alta precisão e praticidade. Verifica-se que a utilização do Arduino foi uma alternativa adequada, principalmente pela facilidade na programação e pelo baixo custo. Apesar das adaptações realizadas para o sensoriamento apropriado, o sistema de correção conseguiu realizar as atribuições concedidas.

Assim, com base nos resultados obtidos na experimentação, pode-se afirmar que o dispositivo simulado é capaz de corrigir o problema do baixo fator de potência em circuitos monofásicos e de baixas potências. Em caso de prototipagem, devido a essas limitações, sua utilização se restringe a aplicações acadêmicas e amadoras. Vale salientar que os efeitos das harmônicas (bastante comuns e indesejados nas redes industriais) não foram considerados no desenvolvimento do estudo. Em relação ao custo, para a criação do protótipo, estima-se um investimento financeiro de R\$ 140.

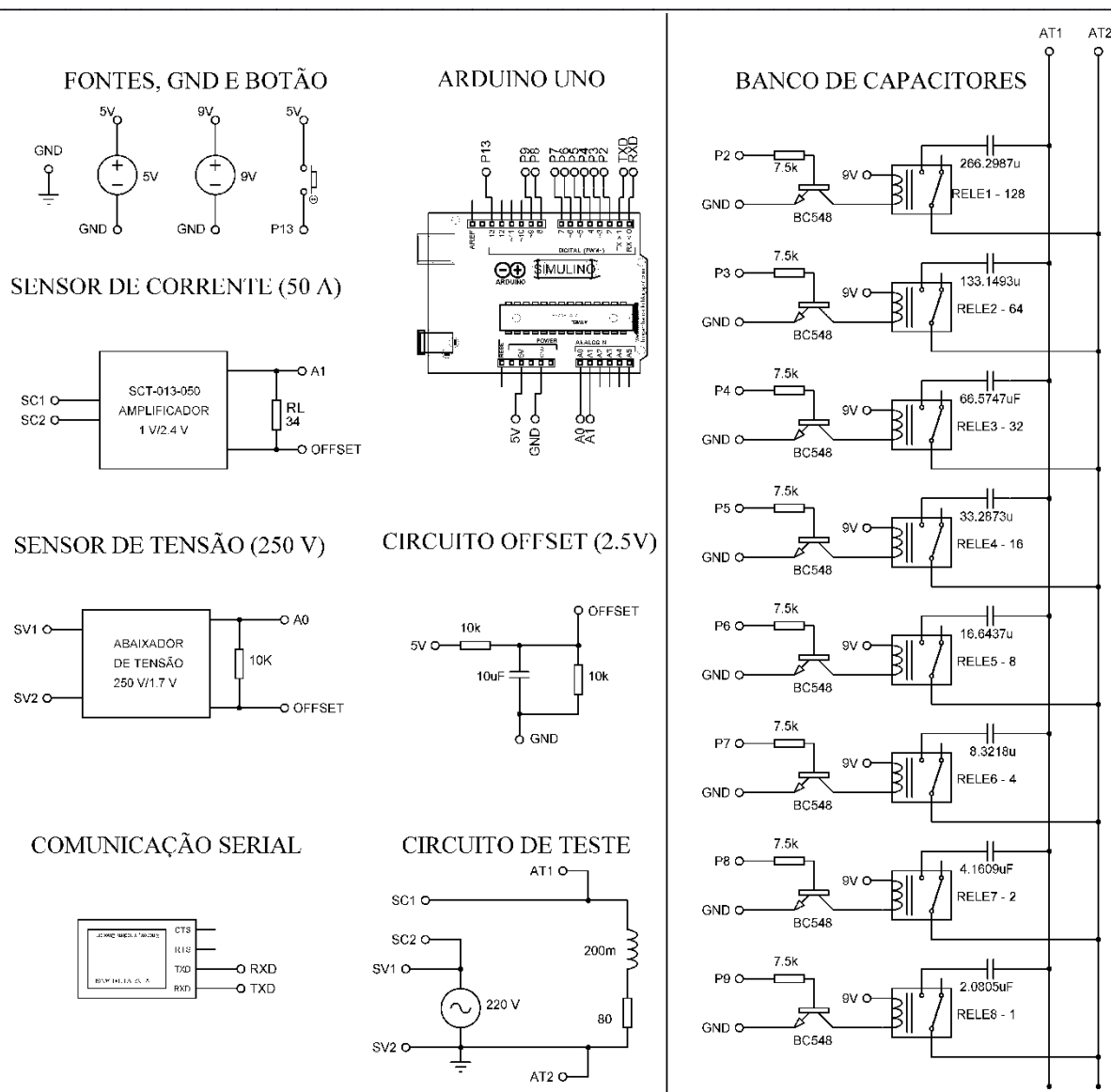


Figura 14. Representação esquemática do circuito final projetado. (Fonte: Autoria própria)

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação das limitações do projeto, tais como a extensão da potência máxima a ser medida e a possibilidade de correção em circuitos externos trifásicos. Para melhorar a precisão do sistema, podem ser implementados sensores complementares para atuar conforme a escala de tensão e corrente do circuito a ser analisado.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BOYLESTAD, Robert. Introdução à análise de circuitos. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2011.
- [2] MAMEDE, J. Instalações Elétricas Industriais. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Ltda, 2007.
- [3] BRASIL. ANEEL. Resolução normativa nº 569 de 23 de julho de 2013. Modifica a abrangência na aplicação para faturamento do excedente de reativos de unidades consumidoras e altera a Resolução Normativa nº. 414, de 9 de setembro de 2010. Disponível em: <www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2012/065/resultado/ren2013569.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2018.
- [4] ARDUINO. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Acesso em: 10 jun. 2018.
- [5] BANZI, M. Primeiros passos com o Arduino. 2. ed. São Paulo: Novatec Editora Ltda, 2015.
- [6] FIGUEIRA, M. Identificação de outliers. Revista Millenium, n.12. Out. 1998. Disponível em: <<http://repositorio.ipv.pt/millenium/arq12.htm>>. Acesso em: 28 ago. 2018.
- [7] CRUZ JUNIOR, B. G. et al. Identificando correlações entre bases de dados educacionais. In: Congresso Brasileiro de Informática na Educação, 6, 2017, Recife. Anais dos Workshops do VI Congresso Brasileiro de Informática na Educação. Recife: Sociedade Brasileira de Computação, 2017.
- [8] DONATELLI, Gustavo Daniel; KONRATH, Andréa Cristina. Simulação de Monte Carlo na Avaliação de Incertezas de Medição. Revista de Ciência & Tecnologia, Florianópolis, v. 25, n.13, p. 5-15, dez. 2005.

-
- [9] YHDC. Datasheet: SCT-013. Electronic Publication. Disponível em: <https://www.mcieletronics.cl/website_MCI/static/documents/Datasheet_SCT013.pdf> Acesso em: 09 set. 2018.
- [10] General Purpose Power Relays. Datasheet: JQC-3FF – Subminiature high power relay. Electronic Publication. Disponível em: <<https://www.generationrobots.com/media/JQC-3FF-v1.pdf>>. Acesso em: 09 set. 2018.