

Controlador de Fator de Potência de Baixo Custo para Rede Trifásica

Resumo — Cargas não lineares necessitam de certa quantidade de energia reativa para seu funcionamento, dessa forma, para manter o fator de potência nos níveis estabelecidos por lei, as empresas produzem sua própria energia reativa, seja pela aplicação de motores síncronos, ou mais comumente pela utilização de bancos de capacitores acoplados ao sistema elétrico. O uso de capacitores requer o acionamento escalonado desses componentes, evitando o excesso de energia reativa na rede. Diante disso, este projeto trata da implementação de um controlador automático de fator de potência, para sistemas trifásicos, com custo reduzido, comparado aos existentes no mercado. Os resultados obtidos mostram que o sistema de medição de FP (Fator de Potência) do protótipo desenvolvido tem uma exatidão média de 1%, e que ele consegue dinamicamente controlar a injeção de reativos capacitivos mantendo o valor do FP pré-estabelecido.

Palavras-chave — correção de fator de potência, energia reativa, sistema trifásico.

I. INTRODUÇÃO

A energia reativa requerida por motores elétricos, fornos a arco, transformadores ou qualquer outro tipo de carga não linear, deve ser fornecida localmente, por meio de fontes interligadas ao sistema elétrico pois, na ausência do fornecimento local de energia reativa, a mesma passa a ser fornecida através da rede da concessionária, tornando necessário o sobredimensionamento da matriz de geração de energia elétrica, além de problemas, como o aumento dos níveis de corrente que circulam nos condutores [1].

De acordo com a Resolução Normativa N° 414, de 9 de setembro de 2010, da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, o Fator de Potência de referência, indutivo ou capacitivo, tem como limite mínimo permitido, para as unidades consumidoras do grupo A, o valor de 0,92 [2]. Assim, para se manterem em conformidade, as empresas produzem sua própria energia reativa, seja pela aplicação de motores síncronos superexcitados ou, mais comumente e economicamente, pela utilização de bancos de capacitores, os quais conseguem fornecer localmente a energia reativa necessária [1].

Quando se aplica bancos de capacitores para melhorar o fator de potência, as empresas optam por controladores automáticos. Estes são dispositivos microprocessados, que, em sua forma mais simples, usam transformadores de potencial (TPs) e de corrente (TCs), para medição do fator de potência em tempo real, corrigindo o FP para o valor desejado, através do chaveamento de contadores, que irão introduzir ou retirar capacitores na rede elétrica, de forma escalonada [3].

Contudo, os controladores automáticos têm um custo relativamente alto e são caixas pretas, sem possibilidade de estender suas funcionalidades ou de ajustes na estratégia de controle. Dessa forma, ao atingir seu limite, no que diz respeito ao número de saídas controláveis, faz-se necessário adquirir outro controlador, ou operar com uma limitação de estágios. Diante disso, o projeto proposto trata da elaboração de um dispositivo automático de correção de fator de potência, de plataforma aberta, baseado em Arduino MEGA,

que permite interoperabilidade, atualizações de *software* e *hardware*, estendendo sua vida útil e reduzindo a necessidade de adquirir novos controladores devido à necessidade de inserção de novos grupos de capacitores na rede.

Este artigo está estruturado em quatro Seções. Na Seção I é feita a introdução do artigo, na Seção II são encontrados os materiais e métodos. Na Seção III e IV encontram-se os resultados e discussões e as considerações finais, respectivamente.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada consistiu em pesquisas e estudos referentes a modelos similares existentes no mercado, fazendo um levantamento dos parâmetros, como: número de saídas controláveis, protocolo de comunicação utilizado, interoperabilidade e custo empregado na aquisição. Neste levantamento, foi observada a falta de interoperabilidade dos controladores existentes no mercado, encontrando diversos protocolos fechados, como as linhas PFW da WEG [3] e Varlogic RT [4] da Schneider, que utilizam o protocolo Modbus, com leitura por meio de software próprio.

Após realizar a pesquisa dos modelos existentes no mercado, foi iniciada a investigação acerca da plataforma Arduino, com o objetivo de avaliar a possibilidade da leitura das grandezas elétricas para controle do fator de potência.

Logo após as pesquisas, foi montado o esboço do projeto, que se compunha de dois circuitos de medição, sendo um para tensão e outro para corrente, além das rotinas de programas que realizaram a medição dessas e de outras grandezas elétricas pertinentes ao projeto. Para melhorar a precisão das medições foram utilizadas rotinas de interrupção do Arduino e técnicas de calibração. As etapas realizadas são descritas nas subseções a seguir:

A. Medição de Tensão

O circuito de medição da tensão elétrica consistiu na utilização de sensor dedicado, de referência ZMPT101B, que pode ser visto em Fig. 1.

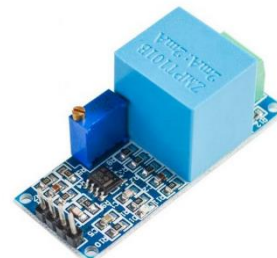


Fig. 1. Sensor de tensão.

O sensor de tensão utilizado possui um transformador abaixador, que confere ao circuito isolamento galvânica e, conseqüentemente, proteção contra sobretensão do circuito de condicionamento de sinal a jusante dele [5]. A saída dos sensores é ligada aos pinos do módulo conversor ADC (Conversor Analógico Digital) do Arduino. Este faz a amostragem do sinal de acordo com a interrupção de tempo

do microcontrolador. O sinal amostrado é armazenado num vetor x de tamanho N , e posteriormente usado para cálculo RMS (Raiz Média Quadrática - *Root Mean Square*) do valor lido, ou seja, o valor de tensão real presente no sistema [6].

Essa tensão eficaz, equivale ao valor da tensão contínua que produz a mesma dissipação de potência que a tensão alternada (periódica) [7]. Sendo o seu cálculo realizado por meio de:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

Em que:

V_{RMS} – Tensão RMS;

N – Número de amostras por período de sinal;

x_i – i -ésima amostra de cada período.

De acordo com o Teorema Central do Limite, a soma de N variáveis aleatórias independentes, com qualquer distribuição e variâncias semelhantes, tem como resultado uma variável com distribuição que se aproxima da distribuição normal, à medida que N aumenta [8]. Sendo o número N , determinado pela detecção do zero volt, que será explicado na subsecção C.

Por fim, o valor RMS calculado passa por algumas rotinas de calibração para se tornar próximo o suficiente do valor real da grandeza medida.

B. Medição de Corrente

Na medição de corrente foram utilizados três TCs, um em cada fase, já que o sistema considerado é trifásico. Em Fig. 2 pode-se visualizar o sensor de corrente não invasivo, de referência SCT-013-30/1 V, cuja relação de transformação é de 30 A/1 V [9].



Fig. 2. Sensor de corrente não invasivo.

A saída de cada um dos sensores é ligada a um pino do módulo ADC do Arduino, e para o cálculo da corrente RMS utilizou-se a mesma estratégia de cálculo da tensão RMS, por meio de:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (2)$$

Em que:

I_{RMS} – Tensão RMS;

N – Número de amostras por período de sinal;

x_i – i -ésima amostra de cada período.

C. Cálculo do Fator de Potência

Para o cálculo do FP, a estratégia usada foi, primeiramente, identificar os instantes de tempo em que os sinais de tensão e de corrente cruzam o nível de zero volt. Subtraindo esses dois instantes encontra-se a defasagem de tempo, entre os sinais.

Para uma maior precisão na medida de defasagem, fez-se uso das interrupções internas do Arduino. Dessa forma, os sinais dos sensores de tensão e corrente são responsáveis por gerar interrupções no instante que sua magnitude de sinal assume um valor maior que zero. A rotina de interrupção ou ISR (*Interrupt Service Routine*) foi configurada para ser gerada na transição de subida da tensão ou da corrente [10]. Ao ser gerada, a interrupção inicia a contagem de tempo em microssegundos, até que o outro sinal gere uma nova interrupção, cessando a contagem de tempo. Após essa nova interrupção o valor da contagem de tempo é armazenado, e passa por rotinas de calibração para que o valor do FP seja obtido.

D. Calibração

A construção das rotinas de calibração é uma das partes mais importantes desse processo, uma vez que as curvas de calibração são responsáveis por condicionar um sinal, reduzir os erros de medição e aproximá-lo do valor real lido. Toda a etapa de calibração foi implementada com a ajuda de um analisador de qualidade de energia, equipamento usado como referência para as medições, geração de curvas de calibração e cálculo de erro.

Para a calibração da rotina de medição de tensão foi utilizado um VARIAC, ou seja, um transformador dotado de um secundário variável. Essa característica construtiva o torna um equipamento útil para o projeto, à medida que é capaz de gerar, em sua saída, uma infinidade de valores de tensão alternada, simulando a tensão da rede. Nos ensaios, a tensão na saída do VARIAC foi conectada aos circuitos medidores de tensão do projeto, sendo ajustada entre cada medição. Essa variação permitiu gerar uma curva com boa resolução e, conseqüentemente, com uma boa precisão da curva de calibração.

Os dados obtidos nesse ensaio foram organizados numa planilha e usados para gerar gráficos de dispersão e sua respectiva equação da reta de tendência, usada com curva de calibração. Devido à resposta linear do sistema de medição de tensão, a equação de calibração se resumiu a uma equação de primeiro grau, o que permite ao microcontrolador a minimização do esforço computacional [11]. Os gráficos e equações de calibração são mostrados em Fig. 3. O eixo das abcissas representa o valor RMS *true*, calculado pelo microcontrolador, enquanto o eixo das ordenadas representa o valor da tensão lido pelo analisador de qualidade de energia.

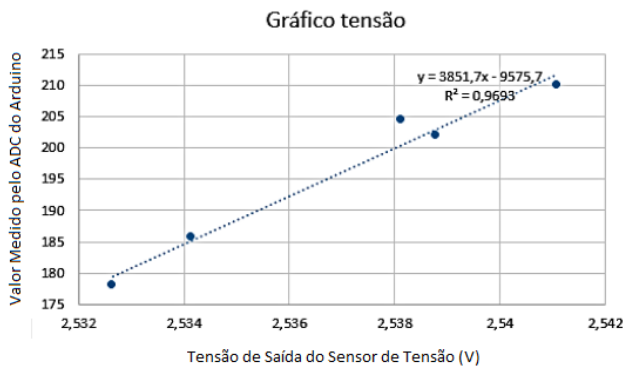


Fig. 3. Calibração do circuito medidor de tensão.

Para a calibração dos circuitos medidores de corrente, manteve-se a tensão de fase fixa em 220 Vrms, e utilizou-se de várias cargas de teor resistivo, capacitivo e indutivo, com valores conhecidos. As cargas foram adicionadas e removidas estrategicamente, de forma que se pudesse variar a intensidade da corrente. A estratégia de calibração foi a mesma usada no circuito medidor de tensão. O gráfico e a equação de tendência são mostrados em Fig. 4.

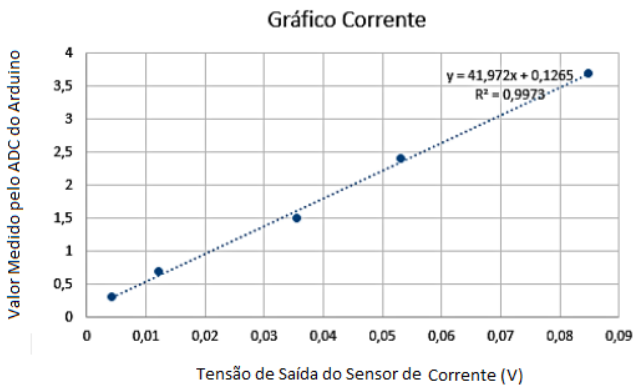


Fig. 4. Calibração do circuito medidor de corrente.

O método mais simples para calcular o FP baseia-se no cosseno do ângulo da defasagem entre tensão e corrente, como se vê em:

$$\text{Fator de Potência} = \cos\phi \quad (3)$$

Para o cálculo do FP dispomos apenas do tempo de defasagem entre tensão e corrente, se supormos a frequência da rede como sendo fixa e igual a 60 Hz, podemos deixar a carga da curva calibração a conversão da defasagem em segundos para a grandeza adimensional do FP.

Na calibração do circuito de medição do FP fez-se uso das mesmas estratégias anteriores, mas foi gerada uma curva de calibração para cargas indutivas e outra para cargas capacitivas. A vantagem dessa técnica se dá pela linearidade das duas curvas separadamente.

Antes de aplicar a função de calibração, o sistema identifica o teor da carga conectada, verificando basicamente a relação de fase entre tensão e corrente. Caso a corrente esteja adiantada, o sistema aplica a curva de calibração para cargas capacitivas (Fig. 5), caso a corrente esteja atrasada, o circuito aplica a curva de calibração para cargas indutivas (Fig. 6). Por fim, se a defasagem entre corrente e tensão for

mínima, o sistema supõe que o FP é unitário e não aplica nenhuma calibração.

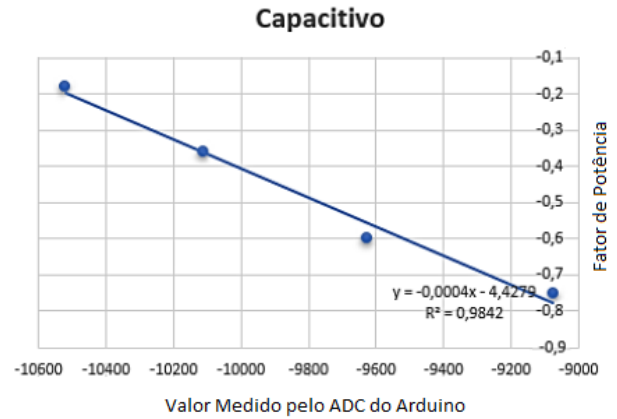


Fig. 5. Calibração de Fator de Potência para cargas capacitivas.

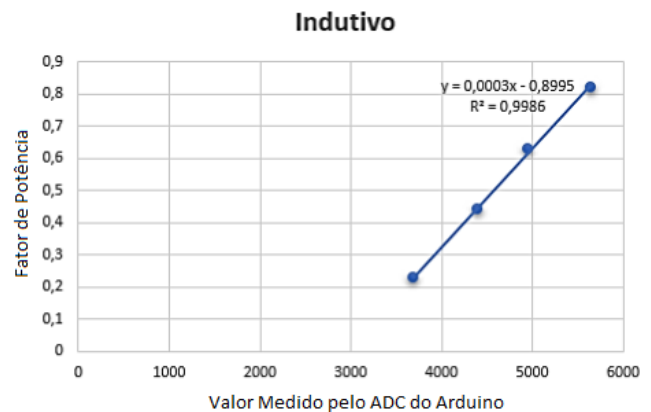


Fig. 6. Calibração de Fator de potência para cargas indutivas.

O uso de rotinas de interrupção para a amostragem da tensão, da corrente e para o cálculo da defasagem entre a tensão e a corrente confere robustez na precisão.

Uma vez obtidos tensão RMS, corrente RMS e fator de potência de cada linha, pode-se então calcular as Potências Ativa, Reativa e Aparente de um determinado circuito.

Observa-se que em todas as curvas de calibração o R-quadrado ficou acima de 0,96, que mostra uma ótima exatidão na medição das grandezas elétricas.

E. Utilização do módulo SD e RTC

O dispositivo proposto é dotado de um módulo capaz de armazenar dados em um cartão de memória (Fig. 7) e de um módulo RTC (*Real Time Clock*), capaz de medir o tempo de forma precisa (Fig. 8). Ambos se comunicam com o Arduino usando a interface de comunicação I2C (*Inter-Integrated Circuits*).



Fig. 7. Módulo SD.

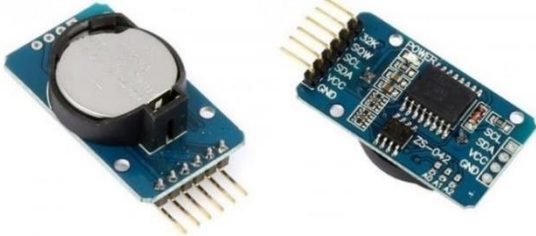


Fig. 8. Módulo RTC.

Os dados medidos pelo sistema são armazenados em um cartão de memória, no formato de planilha, e salvos junto de informações sobre o instante da leitura. Os dados relativos ao instante da leitura são obtidos através do RTC. O arquivo é montado de forma que se facilite a geração de gráficos de potência do sistema elétrico monitorado.

No caso de falha da fonte de energia principal, o RTC mantém uma pequena bateria de *backup*, alimentando seus circuitos internos, para que o relógio não seja reiniciado.

O módulo RTC e de armazenamento no SD são optativos, podendo ser removidos a depender da necessidade da aplicação. Os pinos usados para esse fim também são reprogramáveis, bastando uma pequena alteração no código fonte para que eles sejam utilizados para outros fins.

F. Display LCD

Como a plataforma Arduino MEGA não dispõe de interface com usuário, fez-se uso de um *display* LCD, com protocolo de comunicação serial I2C, para mostrar as grandezas elétricas medidas e outras informações pertinentes. Como o sistema pode prover simultaneamente valores de tensão, corrente e potências ativa, reativa e aparente, além do FP, optou-se por um *display* de 20x4, com espaço suficiente para que várias grandezas possam ser exibidas simultaneamente.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Passada a etapa de calibração, foi possível validar o funcionamento do sistema proposto e a precisão das medidas. Tomando como base a medição do FP, o protótipo desenvolvido foi posto para funcionar em paralelo com um instrumento analisador de qualidade de energia, usado como referência.

Pode-se ver por meio de Fig. 9, que o valor medido pelo analisador de qualidade de energia, marcado por um retângulo vermelho em linha contínua, e o valor medido pela proposta desenvolvida neste trabalho, marcado por um retângulo tracejado amarelo, estão bem próximos, com um erro menor que 1%, o que confirma a boa exatidão do sistema de medição desenvolvido. As medições de tensão e corrente

RMS e potências Ativa, Reativa e Aparente mantiveram a mesma magnitude de erro.

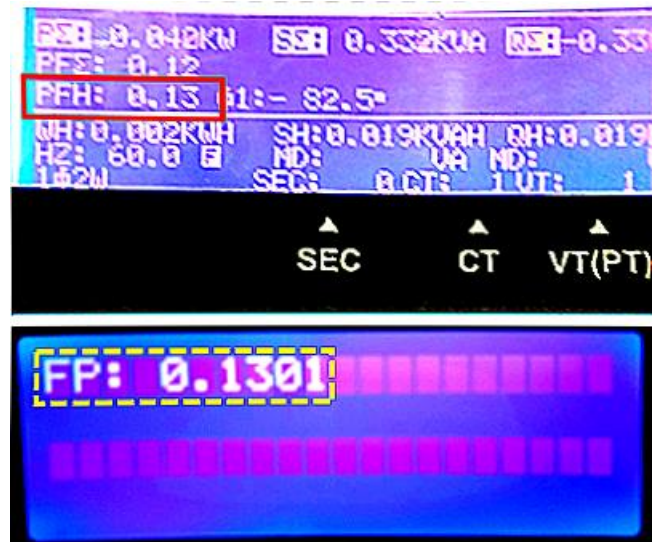


Fig. 9. Leitura do Fator de Potência no Analisador de Energia e LCD.

Verificado o bom funcionamento do sistema e a boa exatidão das medidas, prosseguimos para a etapa de testes, onde o dispositivo deveria controlar o FP de um circuito com carga indutiva, através um banco de capacitores acionados por quatro contatores, K1, K2, K3 e K4, conforme o esquema apresentado em Fig. 10. A carga indutiva é representada por um motor de indução trifásico, carga mais comum em sistemas que exigem o controle de potência Reativa. Para acionar cada um dos contatores fez-se uso de um módulo de relés ligados aos pinos do Arduino.

O controlador do FP proposto e o analisador de qualidade de energia foram conectados no início do circuito de alimentação do motor. A estratégia usada para o acionamento dos contatores e conseqüente correção de FP baseia-se em contagem binária, onde, cada contator é visto com um bit. Inicialmente, K4 é acionado, caso ainda exista excesso de reativos, K4 é desligado e K3 acionado, se necessário mais reativo capacitivo, K4 e K3 são acionados simultaneamente, se o FP ainda estivesse baixo, desliga-se K4 e K3, e aciona-se K2, e assim sucessivamente até atingir o FP desejado. Essa estratégia permite 15 níveis de Reativo Capacitivo injetados na rede.

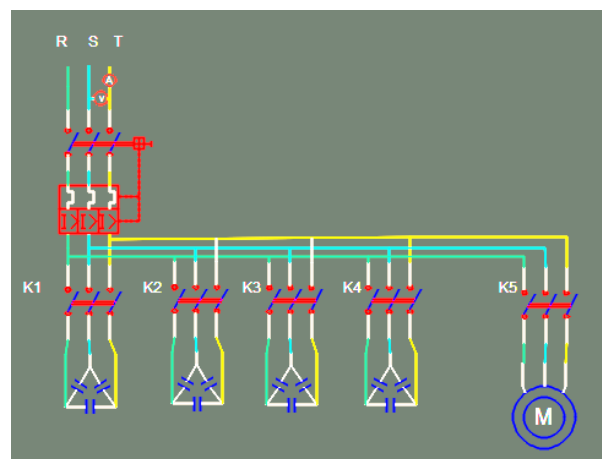


Fig. 10. Esquema de montagem dos capacitores.

A estratégia de acionamento dos contatores baseados em contagem binária foi usada apenas para fins de demonstração, mas ela pode ser uma alternativa quando o sistema não conhece o valor da potência do banco. Outra estratégia é medir a quantidade de Reativo na rede, calcular a potência reativa necessária para chegar ao FP programado e em seguida acionar os contatores necessários, contudo, é necessário que se conheça a potência reativa capacitiva instalada em cada contator.

O cenário de testes montado para os ensaios de validação do protótipo pode ser observado em Fig. 11. É possível ver o banco de capacitores (a), os contatores K1, K2, K3 e K4 (b), o motor usado como carga (c), o analisador de qualidade de energia (d) e o protótipo em análise (e).

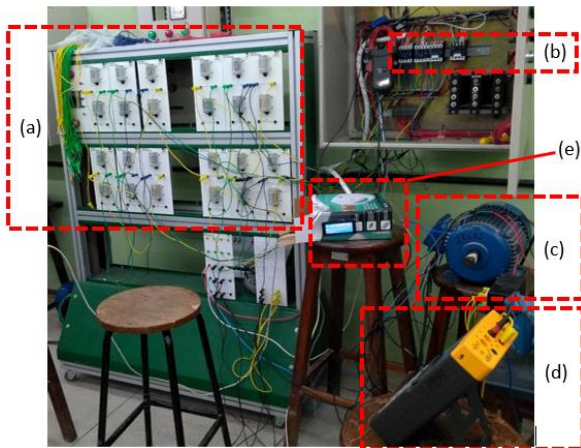


Fig. 11. Cenário de testes para ensaio de validação do protótipo.

Os capacitores em cada contator foram ligados em Δ , e a potência reativa total em cada contator é diferente das demais.

A defasagem entre tensão e corrente, quando apenas o motor de indução está conectado à rede, pode ser vista em Fig. 12. Como o motor não tem carga acoplada ao eixo, a quantidade de Reativo que circula pelo circuito é máxima, e o FP é bem próximo de zero. A partir desse ponto o protótipo irá tentar elevar o FP para no mínimo 0,92 indutivo ou capacitivo, de acordo com a lógica de acionamento de contatores citada anteriormente.

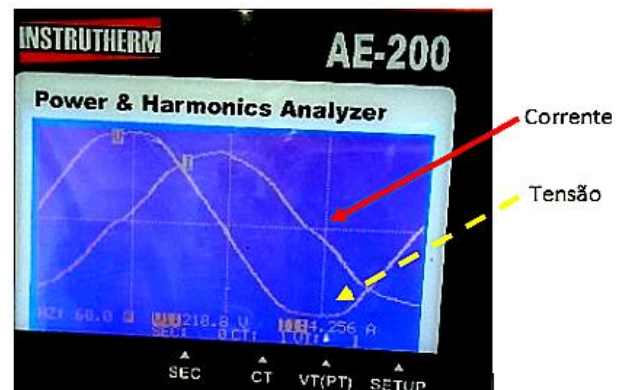


Fig. 12. Defasagem entre tensão e corrente ao ligar o primeiro relé.

Ao acionar K4, verifica-se em Fig. 13 (a), uma menor defasagem entre tensão e corrente, se comparado com Fig. 8. Como o fator de potência ainda está baixo, o protótipo continuou chaveando os contatores até chegar ao FP de 0,92. Pode-se ver em Fig. 13 (b) que a adição de uma carga capacitiva um pouco maior, distorceu a senoide da corrente, porém é possível verificar que a defasagem entre tensão e corrente está praticamente zerada.

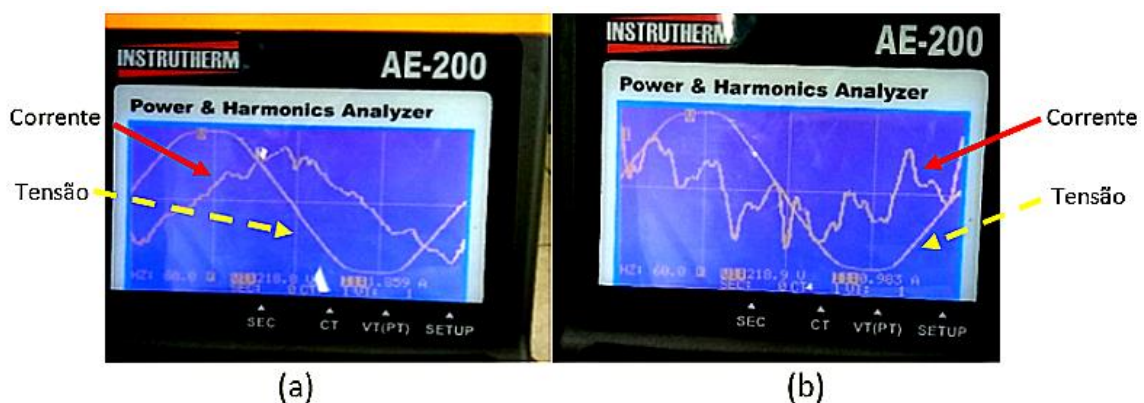


Fig. 13. Defasagem ao ligar apenas K4 (a) e defasagem ao ligar apenas K1 (b).

Apesar da Taxa de Distorção Harmônica (THD) interferir negativamente no valor do FP, nossa abordagem foca apenas na correção do FP por meio de capacitores. A THD é um problema que pode ser atenuado com filtros passivos ou ativos, o que não é foco do nosso trabalho.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de dispositivos baseados em *hardware* aberto, como o Arduino, permite uma maior flexibilidade e menor custo na resolução de problemas rotineiros ou pontuais existentes na indústria. Soluções comerciais que visam a medição das grandezas de tensão e potência, em detrimento a

medição de fator de potência, associado ao fato de que, o controle é geralmente atribuído a controladores já existentes no mercado, trazem consigo o custo da tecnologia empregada.

Dessa forma, soluções baseadas em Arduino podem funcionar tão bem quanto soluções disponíveis no mercado, conforme foi mostrado em nossos testes.

Por fim, o objetivo do projeto foi atingido, com o sistema implementado foi possível realizar a medição de tensão, corrente, defasagem, energias Reativa, Aparente e Ativa e, por fim, a medição e o controle do FP. Devido a sua

flexibilidade, o protótipo desenvolvido pode ter sua performance melhorada através de *updates* no *firmware* e até mesmo ser aplicado paralelamente em outra atividade, uma vez que dispõe de muitos pinos não utilizados e uma boa quantidade de memória interna livre, ações impensáveis de ser aplicadas em produtos comerciais, que são completamente fechados, funcionando como caixas pretas.

Em trabalhos futuros, propõe-se o controle da corrente de *inrush* dos capacitores, a redução da THD, e a transmissão dos dados por meio de rede de comunicação cabeada ou sem fio.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Federal do Sertão Pernambucano pelo apoio dado no projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] MAMEDE FILHO, João. Instalações elétricas industriais. 9ª Edição. Rio de Janeiro: LTC/Grupo Gen, 2017.
- [2] BRASIL, Agência Nacional de Energia Elétrica. *Resolução n. 414, de 9 de setembro de 2010*. Acesso em 10/01/2020. Disponível em <www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>
- [3] Multimetro de grandezas elétricas e controlador automático do fator de potência. WEG. Catálogo digital. 2018. Acesso em 10/01/2020.

Disponível em

<<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h01/hb6/WEG-multimedidor-mmw-e-controlador-pfw-50025399-catalogo-portugues-br.pdf>>

- [4] Gerenciamento de energia reativa. Shneider Electric. Catálogo digital. Acesso em 10/01/2020. Disponível em <https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=Cat%C3%A1logo+Corre%C3%A7%C3%A3o+de+Fatgor+de+Pot%C3%Aancia+-+Completo.pdf&p_Doc_Ref=Catalog_PFC>
- [5] ZMPT101B. Datasheet: Voltage transformer operating guide. Electronic Publication. Acesso em 10/01/2020. Disponível em <<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1131993/ETC2/ZMPT101B.html>>
- [6] M. A. A. Silva et al, Desenvolvimento de um medidor de grandezas elétricas utilizando Arduino. ICCEEg-18, 2018
- [7] K. Nakashima, Valor médio e eficaz. Universidade Federal de Itajubá, 2007.
- [8] T. Ryan, Estatística moderna para engenharia. Elsevier Brasil, 2009.
- [9] YHDC. Datasheet: Split Core Current Transformer SCT-013-030. Electronic Publication. Acesso em 10/01/2020 Disponível em <<https://datasheet4u.com/datasheet-pdf/XiDiTechnology/SCT-013-030/pdf.php?id=1004704>>
- [10] S. Monk, Programação com arduino II: Passos avançados com sketches. Bookman Editora, 2015.
- [11] L. A. Bertolo, Estatística aplicada no Excel: probabilidades e estatística. Matemática, Versão Beta, 2010.