

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE TENSÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO TRIACS E MICROCONTROLADOR

Luis Felipe Pereira Ramos¹, Vitor Magni Hinrichs².

¹UNESP, Ilha Solteira, Brasil (luis.f.ramos@unesp.br)

²UNEMAT, Sinop, Brasil

Resumo: Este artigo relata o desenvolvimento de um protótipo para controle de potência trifásico digital por ângulo de fase, utilizando Arduino Uno e TRIACs. O sistema foi testado em laboratório visando a partida suave de um motor de indução. Os resultados experimentais revelaram instabilidades no sincronismo das três fases devido às limitações de processamento sequencial e à corrente de manutenção dos tiristores utilizados.

Palavras-chave: Eletrônica de potência; Arduino Uno; Controle de fase trifásico.

INTRODUÇÃO

No campo da eletrônica de potência, o controle de energia é reconhecido como um dos aspectos mais complexos e fascinantes. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um projeto prático focado no controle por ângulo de fase, sincronizado pela detecção de passagem por zero (zero-crossing) da tensão da rede. Para isso, utilizou-se uma abordagem simples para realizar o controle de tensão trifásico por meio de componentes como pontes retificadoras, optoacopladores e um Arduino Uno.

A proposta combina teoria e prática, ressaltando os desafios e as vantagens de implementar o controle digital em sistemas de potência. Assim, este trabalho oferece uma introdução útil para estudantes interessados na área. Cabe destacar que o projeto foi baseado em uma atividade desenvolvida na disciplina de Eletrônica de Potência, cujo objetivo era construir um soft-starter para o motor trifásico do laboratório de eletrônica da Unemat (Universidade do Estado de Mato Grosso), no campus de Sinop-MT. Em seu desenvolvimento, foram empregados TRIACs (Triode for Alternating Current), optoacopladores, resistores, LEDs (Light Emitting Diode) e o Arduino Uno como unidade controladora.

O controle de tensão AC convencionalmente é realizado por gradadores, os quais são dispositivos capazes de alterar a tensão eficaz em um equipamento, sendo muito aplicados no controle de temperatura, luminosidade e velocidade de motores. Geralmente, são utilizados TRIACs para esse chaveamento quando a corrente não é muito elevada,

e SCRs em antiparalelo para correntes maiores. (Barbi, 2005)

Esse processo pode ser realizado por dois métodos principais no contexto dos tiristores: o controle por ciclo integral e o controle de fase. O primeiro liga e desliga a fonte por ciclos completos da senoide, sendo eficaz para cargas com grandes constantes de tempo, como aquecedores e fornos. Já o controle de fase ajusta a entrega de potência a cada semiciclo da onda senoidal, bloqueando parte da condução conforme a necessidade, o que o torna mais adequado para lâmpadas, chuveiros e motores (Ahmed, 2000).

Para este trabalho, escolheu-se o método de controle de fase, tradicionalmente conhecido pela aplicação em dimmers para sistemas monofásicos (Figura 1). TRIAC.

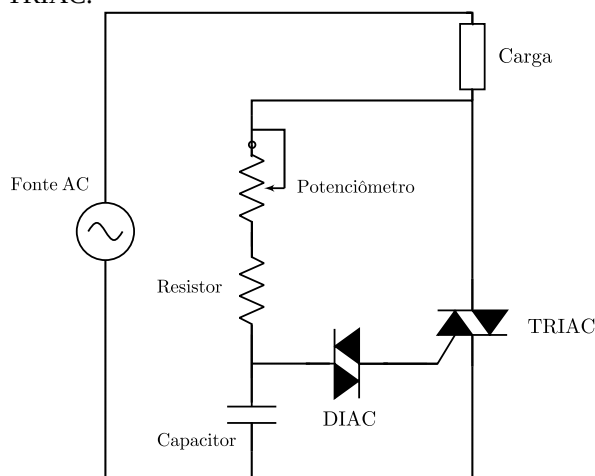


Figura 1: Circuito Dimmer

Nesse circuito, o disparo do TRIAC através do seu terminal Gate (Gatilho) ocorre por meio de um circuito auxiliar composto por um DIAC (Diode for Alternating Current), um capacitor, um resistor e um potenciômetro. O DIAC passa a conduzir após atingir um determinado nível de tensão, o qual é regulado pela constante de tempo da associação RC. Desse modo, ao variar a resistência no potenciômetro, altera-se a defasagem da onda que aciona o DIAC, modificando o instante do pulso de disparo do

A alteração da resistência cria um atraso no disparo devido ao tempo de carga do capacitor. Esse atraso (α) produz um recorte na onda que modifica a tensão eficaz final. É possível observar, na Figura 2, um exemplo de como a tensão na carga da Figura 1 se comportaria ao ser aplicado um ângulo de disparo de $\alpha = 60^\circ$.

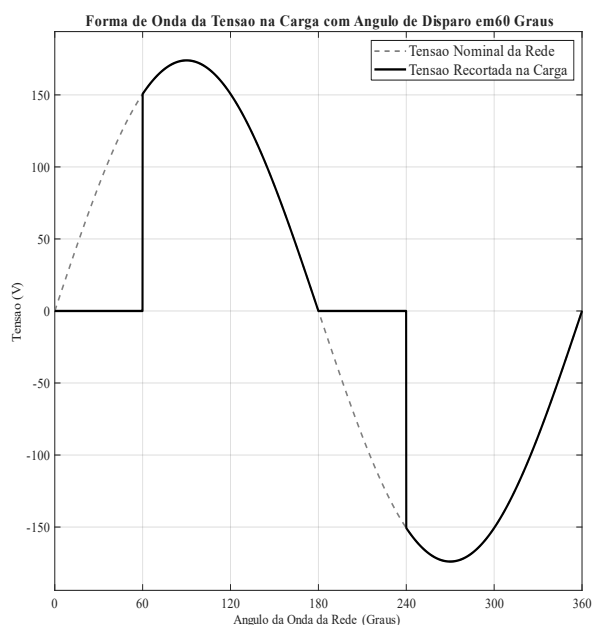


Figura 2: Forma de onda com $\alpha = 60^\circ$

Embora esse circuito seja simples e eficiente para o controle de potência CA monofásico, ele apresenta limitações em aplicações trifásicas. Para controlar as três fases simultaneamente por essa abordagem analógica, seria necessário variar três potenciômetros de forma perfeitamente idêntica e simultânea, o que se torna inviável na prática. Além disso, essa configuração de disparo impede a implementação de um controle digital com micro controlador de forma simples já que variar a resistência de forma digital mantendo uma escala bastante graduada não é uma tarefa trivial.

Diante das limitações do método tradicional, este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um protótipo de controle de potência trifásico digital baseado no microcontrolador Arduino Uno, utilizando a técnica de controle por ângulo de fase. Especificamente, busca-se implementar circuitos

isolados para a detecção de cruzamento por zero (*zero-crossing*) das fases, programar a lógica de temporização dos disparos dos TRIACs e montar o sistema em bancada de forma segura. Por fim, o projeto visa avaliar a viabilidade prática dessa abordagem simples e suas limitações operacionais.

MATERIAL E MÉTODOS

O princípio do controle de tensão implementado neste trabalho baseia-se no disparo do *Gate* do TRIAC a partir da detecção do cruzamento por zero (*zero-crossing*) da onda senoidal de tensão. Após identificar esse ponto, o microcontrolador aguarda um intervalo de tempo previamente definido antes de enviar o pulso de disparo. Quanto maior for esse atraso, maior será o recorte da onda e, consequentemente, menor será a tensão eficaz na saída. Dessa forma, o controle da tensão é realizado pela variação desse tempo, permitindo a criação de rampas de aceleração e desaceleração para o motor.

A detecção do cruzamento por zero foi realizada por meio de optoacopladores 4N35, enquanto o acionamento dos TRIACs utilizou optoacopladores MOC3011/MOC3021. Todo o processo foi gerenciado pelo Arduino Uno. O desenvolvimento do controle trifásico baseou-se no método proposto por Assis (2013), que aplica uma retificação na onda de tensão para viabilizar a identificação do ponto de zero pelo microcontrolador.

Para a montagem física do sistema, utilizou-se uma matriz de contatos (*proto-board*) do laboratório. Por questões de segurança, isolamento e organização, a placa foi dividida estrategicamente em quatro zonas. Os circuitos de baixa tensão CC (corrente contínua) foram posicionados à esquerda, enquanto os de alta tensão CA (corrente alternada) ficaram à direita. A interface de entrada ocupou a parte superior e a de saída, a parte inferior. O Arduino permaneceu externo à estrutura, interligado apenas por *jumpers*, o que reduziu drasticamente os riscos de curto-circuito e acidentes operacionais, conforme ilustrado na Figura 3.

Na zona amarela, é realizada a alimentação CA do circuito, onde são conectadas e derivadas as três fases e o neutro. A utilização do neutro é fundamental para identificar o cruzamento por zero de cada fase individualmente; caso fosse utilizada a tensão de linha (fase-fase), não teria zero e a tensão estaria defasado em 30° , o neutro também foi utilizado na ligação Y dos resistores de teste como mostrado na figura 6.

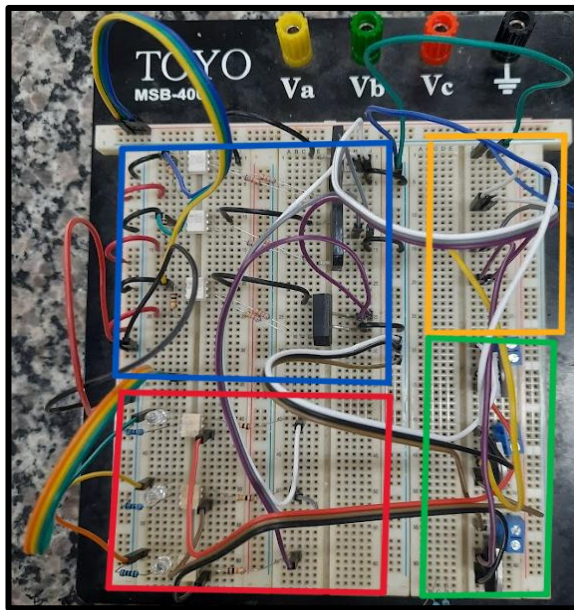


Figura 3: Circuito montado com suas respectivas divisões

A zona azul engloba o circuito de identificação de zero-crossing, composto por três optoacopladores 4N35 e três pontes retificadoras. Cada ponte recebe uma fase e o neutro. Em sua saída positiva, são conectados resistores em paralelo associados ao pino 1 (ânodo do LED interno) do optoacoplador, enquanto o pino 2 (catodo) é ligado ao negativo da ponte. No lado de corrente contínua do circuito, um divisor de tensão com resistor de *pull-up* monitora o estado do canal. Desse modo, quando a tensão CA aproxima-se de zero, o LED interno do optoacoplador apaga e o fototransistor corta, resultando em um pulso de 5 V enviado ao pino do Arduino. A representação monofásica desse trecho do circuito pode ser observada na figura 4.

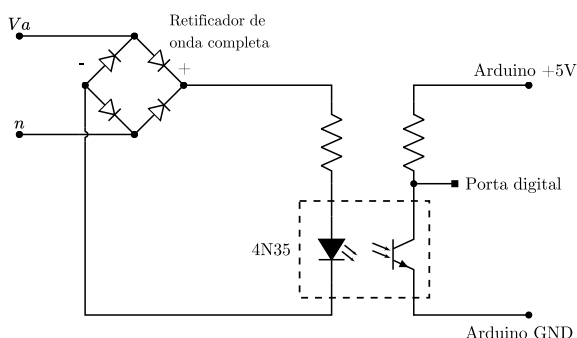


Figura 4: Circuito de detecção da passagem por zero

A zona vermelha é responsável pelo circuito de acionamento do terminal *Gate* dos TRIACs. Essa etapa utiliza três optoacopladores MOC3020, conectados às saídas digitais do Arduino por meio de resistores e LEDs indicadores de estado. Quando o microcontrolador envia um sinal em nível lógico alto (5 V), o LED acende e dispara o fototriac interno do

componente. O pino 6 do MOC3020 é conectado à respectiva fase da rede através de um resistor de $10\text{ k}\Omega$, enquanto o pino 4 é ligado diretamente ao *Gate* do TRIAC para efetuar o controle de disparo. A representação do circuito para uma única fase pode ser vista na figura 5.

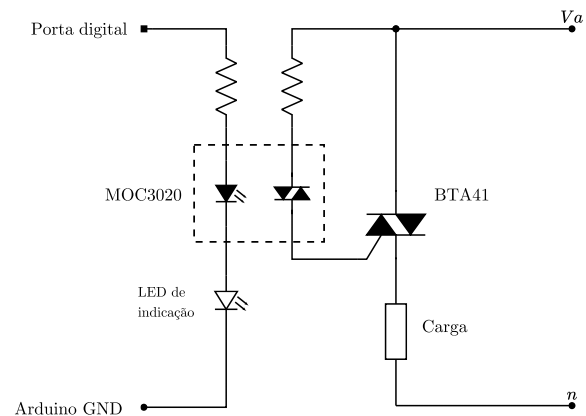


Figura 5: Circuito de acionamento

Na zona verde, encontram-se os TRIACs responsáveis pelo chaveamento da potência para a carga, alimentados pelas fases vindas da zona amarela. Inicialmente, para fins de teste e validação, conectou-se uma associação de resistores totalizando $180\text{ K}\Omega$ na saída de cada TRIAC, permitindo analisar a funcionalidade do circuito com o auxílio de um multímetro, ligando assim 3 cargas resistivas em uma ligação Y com o neutro conectado para garantir a estabilidade como mostrado na figura 6.

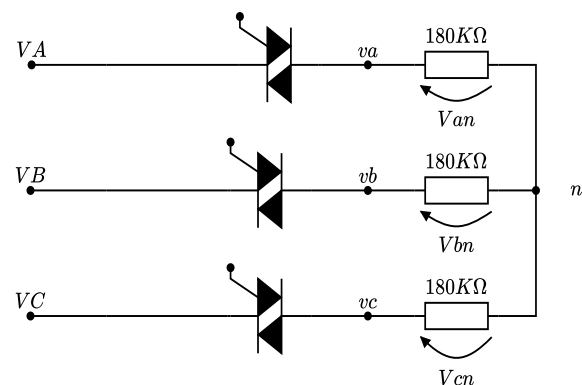


Figura 6: Posicionamento das cargas em Y

Durante a adaptação do código do microcontrolador, surgiram contratempos operacionais, como a limitação da função `attachInterrupt` no Arduino Uno. Essa função, ideal para detectar mudanças de estado nos pinos em tempo real e executar rotinas de interrupção, está disponível em apenas dois pinos (pino 2 e pino 3) nesta placa, o que impossibilitou sua aplicação direta no sistema trifásico, que demanda três entradas independentes.

Para contornar essa limitação, optou-se por uma abordagem de varredura contínua por meio de leitura digital simples (digitalRead), em que o microcontrolador monitora os três pinos sequencialmente. Embora a função attachInterrupt tenha sido a primeira escolha devido ao seu tempo de resposta quase instantâneo, a estratégia de leitura digital contínua mostrou-se eficaz na identificação dos pulsos. Isso foi possível devido à frequência da senoide retificada ser relativamente baixa (120 Hz), permitindo que o laço de varredura do Arduino operasse de forma satisfatória, visto que o ciclo de processamento da placa consegue atuar bem acima de 2 kHz.

Partindo para a validação matemática do circuito, utilizaram-se dois métodos distintos para os cálculos teóricos da tensão eficaz de saída. O primeiro método, apresentado por Ahmed (2000), baseia-se na seguinte equação (Para os cálculos utilizar α em radianos) :

$$V(RMS) = Vp \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Onde podemos calcular o ângulo de disparo a partir do tempo através da seguinte relação:

$$\alpha = 2\pi ft \quad (2)$$

Já a segunda abordagem utiliza diretamente a definição matemática para o cálculo do valor eficaz (RMS) a partir do valor de pico da onda (Vp):

$$V(RMS) = \sqrt{\frac{Vp^2}{T} \int_0^T \frac{1}{2} (1 + \cos(2\omega t)) dt} \quad (3)$$

Nesta ao invés de utilizarmos o ângulo de disparo podemos usar o intervalo de tempo “c” em que o disparo é efetuado, nesta equação também é possível prever a interferência da corrente de manutenção do Triac adicionando um fator de tempo “x” em que o TRIAC desligaria ao final. Realizando as devidas considerações chegamos a seguinte expressão:

$$V = \sqrt{\frac{Vm^2}{T} \left[\int_c^{T-x} \frac{1}{2} (1 + \cos(2\omega t)) dt + \int_{T-x}^{T-x+c} \frac{1}{2} (1 + \cos(2\omega t)) dt \right]} \quad (4)$$

Os testes do sistema foram realizados primeiramente com carga em uma única fase e em seguida com a formatação da figura 6, para as medições utilizamos um multímetro ICEL MD-6199 com medição TRUE-RMS, para a constatação do formato de onda foi utilizado o osciloscópio ATTEN ADS1102CAL

presente no laboratório de eletrônica, as medições do osciloscópio foram feitas em cima de um divisor de tensão para evitar danos ao equipamento devido ao nível de tensão relativamente alto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a montagem do circuito, os disparos do sinal puderam ser confirmados de forma visual pelo led verde de indicação apresentado na figura 5. Com ele foi possível observar o tempo e sequencia de cada pulso emitido pelo micro controlador, assim como constatar quando ocorria algum erro que impedia o disparo. O circuito montado e operando pode ser visualizado na figura 7.

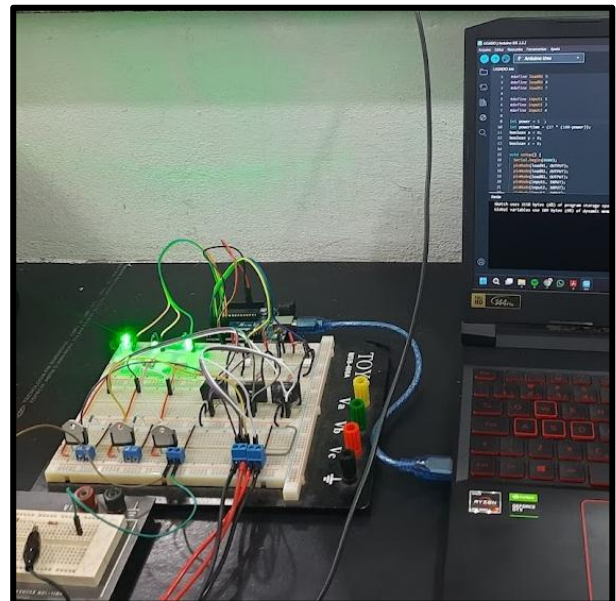


Figura 7: Montagem preliminar de teste

Com os testes iniciais, foi primeiro verificado tensão máxima obtida na carga, que resultou em 116 Vca, valor 7 Vca (5,69%) abaixo da tensão nominal de entrada de 123 Vca. O formato de onda obtido pode ser visto na figura 8.

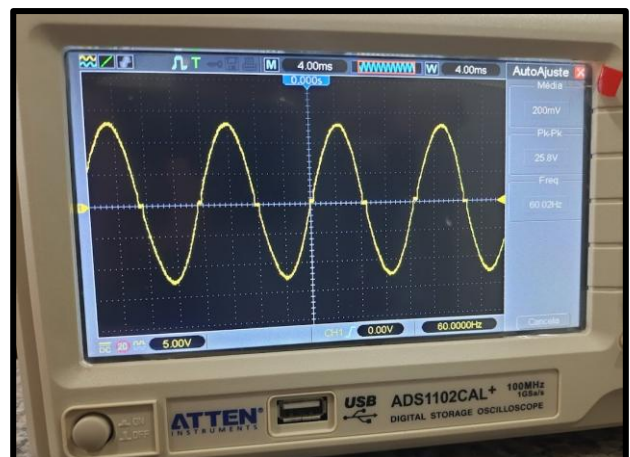


Figura 8: Formato de onda obtido

Por outro lado, a tensão mínima alcançada foi de 103 Vca, o que corresponde a 91,96% da tensão máxima de saída do TRIAC e 83,74% da tensão nominal da rede. A expectativa inicial do projeto era reduzir a tensão a até 80% do valor da rede, atingindo aproximadamente 98,4 Vca. Essa meta baseava-se em um tempo de atraso para o disparo do *Gate* de aproximadamente 2,77 ms (equivalente a 1/6 do período da senoide, ou 60°).



Figura 9: Tensão mínima obtida

No entanto, ao aproximar-se desse ângulo de disparo, o sistema passou a apresentar instabilidades operacionais, culminando na perda de sincronismo e ausência de tensão em uma das fases. A Figura 9 exibe a tensão mínima registrada pelo voltímetro, enquanto a Figura 10 ilustra o seu respectivo formato de onda no osciloscópio. Apesar dessa limitação no limite inferior, observou-se durante os ensaios que, dentro do intervalo operacional estável obtido, a tensão na carga variou de forma proporcional ao tempo de atraso do pulso de disparo.

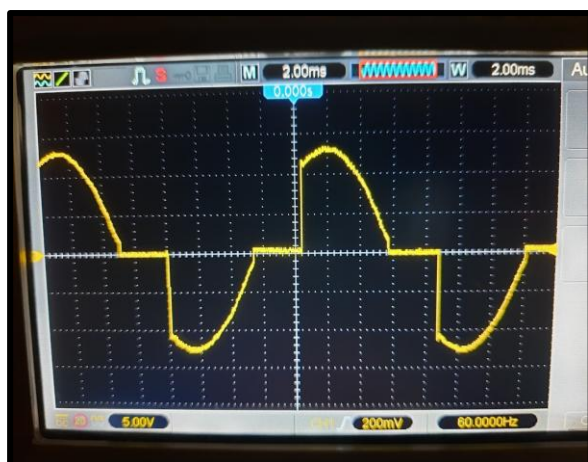


Figura 10: Recorte Máximo obtido

Ao analisar o formato da onda na condição de condução máxima, observou-se que, mesmo configurando o menor atraso possível no software (0 ms), ainda persistia um pequeno atraso residual no disparo do TRIAC, resultando em uma tensão eficaz ligeiramente abaixo do valor nominal da rede devido a um pequeno recorte no começo e no meio de cada semiciclo o qual pode ser visto em mais detalhes na figura 11.

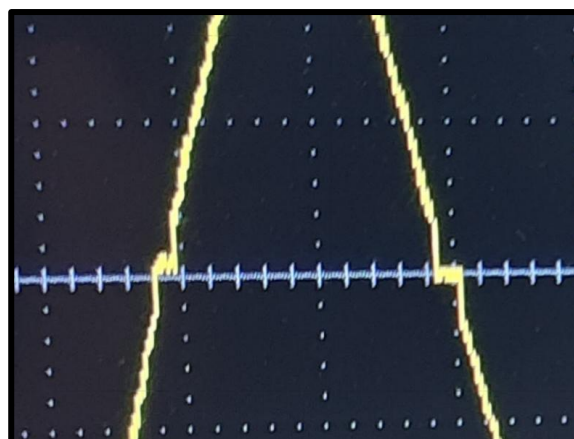


Figura 11: Tensão máxima obtida

Embora não tenha sido possível determinar a causa exata desse desligamento antecipado de forma conclusiva, levantou-se a hipótese de que o fenômeno esteja relacionado à corrente de manutenção do tiristor (I_H). O modelo utilizado (BTA41-600B) possui uma corrente de manutenção relativamente alta, de 500 mA. Como o componente era acionado por meio de um pulso único e de curta duração (em vez de um trem de pulsos contínuo), no instante em que a corrente de carga decrescia abaixo desse limiar próximo ao final do semiciclo, o TRIAC entrava em corte precocemente na ausência de sinal no *Gate*, reduzindo a tensão eficaz final. A utilização de um TRIAC mais simples e com uma corrente de manutenção menor como o BTA16-600B poderia atenuar esse efeito.

Diante das análises preliminares realizadas, iniciou-se os testes com o circuito na configuração trifásica, a primeira observação é que devido aos recortes da senoide a presença do neutro na ligação Y foi necessária, sem ele ocorria uma perda do controle das fases, muito possivelmente atribuído a disposição das cargas em relação a ao triac (com a carga no M2) e a própria configuração em Y.

Com o sistema ligado então foi realizado os testes com a configuração trifásica e para o ângulo de disparo utilizamos $\alpha = 40^\circ$ ao invés de 60° , pois assim tínhamos mais estabilidade. Com isso esperávamos uma tensão fase-neutro de aproximadamente 115,88 Vca e uma tensão fase – fase de aproximadamente 200,7 Vca com um formato de onda como o mostrado na figura 12.

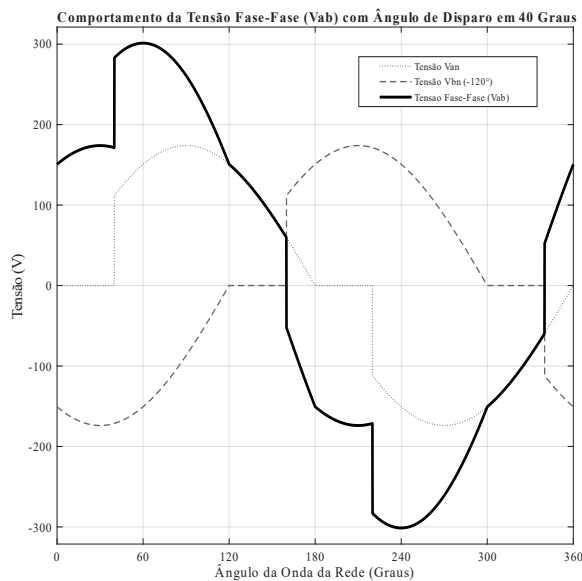


Figura 12: Formato de onda esperado para tensão Fase-Fase

Os resultados se mostraram bastante compatíveis com as expectativas nesse aspecto, com a tensão fase-fase chegando a 200 Vca, como mostrado na Figura 13, e possuindo um formato de onda muito próximo do simulado, conforme ilustrado na Figura 14. Desse modo, os resultados obtidos para um ângulo α de 40° apresentaram-se bastante satisfatórios.



Figura 13: Tensão rms Fase-Fase obtida

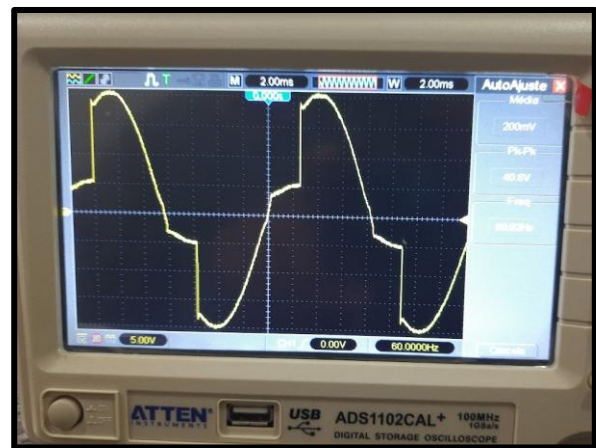


Figura 14: Formato de onda da tensão Fase-Fase obtido

Durante o desenvolvimento e realização dos testes identificou-se uma limitação na forma como o Arduino processava os sinais e gerava os pulsos de disparo. No método de varredura adotado, ao detectar a passagem por zero em uma das portas digitais, o microcontrolador executava uma rotina sequencial temporizada para aplicar o pulso após o atraso predefinido. Todavia, a arquitetura do código impedia que o Arduino processasse novos sinais de sincronismo enquanto estivesse retido na contagem de tempo do pulso anterior.

Como as fases em um sistema trifásico são defasadas em 120° , ocorre um cruzamento por zero a cada 60° (considerando o conjunto das três fases). Isso impôs uma restrição, o pulso de uma fase precisava ser totalmente processado e finalizado antes que o próximo zero de qualquer outra fase fosse detectado. Em uma rede de 60Hz, essa janela de tempo limita o atraso máximo de disparo a aproximadamente 2,667 ms (60°). Durante os ensaios práticos, essa restrição foi confirmada ao tentar estender o atraso para valores maiores, como 4 ms; nessas condições, o sistema perdia o sincronismo, tornando-se instável e provocando a falha parcial ou total no chaveamento de uma ou mais fases. Além disso operar próximo dos 60° com o sistema trifásico se provou um desafio já que pequenos delays no processamento as distorções ou ruídos na onda da rede elétrica causavam a mesma perda de sincronia que utilizar valores maiores, fazendo com que precisássemos operar em regiões mais seguras como 40° .

Os desafios operacionais identificados, tais como o comportamento dinâmico da corrente de manutenção e a otimização dos métodos de temporização digital, não puderam ser aprofundados neste trabalho, constituindo oportunidades para pesquisas futuras. A otimização do código, assim como a aplicação de TRIACs e microcontroladores diferentes, devem ser exploradas em estudos posteriores, visando sanar as limitações aqui constatadas.



CONCLUSÃO

Este artigo relatou o desenvolvimento de um protótipo didático de controle de potência CA por ângulo de fase, permitindo analisar de forma prática as nuances e limitações desse tipo de topologia. Com base nos resultados experimentais e nos problemas de sincronismo documentados, confirmou-se a viabilidade de implementar o sistema em ambiente acadêmico para fins de aprendizado. Contudo, evidenciou-se que a abordagem simplificada por leitura digital direta em um microcontrolador, como o Arduino Uno, é dificultosa para o controle pleno e estável de cargas trifásicas em um amplo alcance do ângulo de corte, demandando o uso de interrupções de hardware externas dedicadas ou registradores de temporização avançados para trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Professora Ma. Maria Helena Vieira Kelles, pelo constante incentivo, apoio à experimentação e apresentação deste conteúdo. Estendem-se os agradecimentos ao Professor Dr. Vlademir de Jesus Silva Oliveira, pelo auxílio no desenvolvimento do projeto e pela cessão de materiais e instrumentos laboratoriais essenciais para a realização dos ensaios práticos.

REFERÊNCIAS

- AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2000.
- ASSIS, M. **Controle PID de Potência em Corrente Alternada - Arduino e TRIAC - Parte III**. Automação BR, 2013. Disponível em: https://automatobr.blogspot.com/2013/05/controle-de-potencia-em-corrente_18.html. Acesso em: 3 jun. 2026.
- BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência**. 5. ed. Florianópolis: Edição do Autor, 2005.