

# REDUÇÃO DA CORRENTE DE *INRUSH* EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

**Abstract**— Inrush current is the current that appears at the moment of energizing the transformer. Although its duration is short, its value is much higher than the rated current value and it can cause undesired effects in the transformer. Due to this, some commonly adopted methods for reducing the peak of the inrush current were studied and presented. After analyzing all the techniques, it was decided to implement a method for controlled switching based on the peak voltage value. Simulations and experimental procedures showed that the inrush has its value reduced when the transformer is energized at the peak of the mains voltage, but in practice the inrush value is not completely eliminated due to the residual flux.

**Keywords**— Inrush Current, Transitory, Controlled Switching, Power Transformer, Power Systems.

**Resumo**— Corrente de *inrush* é a corrente que surge no instante de energização do transformador. Embora seu tempo de duração seja curto, seu valor é muito superior ao valor de corrente nominal e isso pode ocasionar efeitos indesejados no transformador. Devido a isso, foram estudados e apresentados alguns métodos comumente adotados para redução do pico da corrente de *inrush*. Após analisar todas as técnicas, escolheu-se implementar um método para chaveamento controlado com base no valor de pico da tensão. As simulações e os procedimentos experimentais realizados mostraram que, de fato, o *inrush* tem seu valor reduzido quando se energiza o transformador no pico da tensão da rede, porém, na prática, o valor do *inrush* não é completamente eliminado devido à existência do fluxo residual.

**Palavras-chave**— Corrente de *inrush*, Transitórios, Chaveamento Controlado, Transformador de Potência, Sistemas de Energia.

## 1 Introdução

Os transformadores de potência possuem importância fundamental para o funcionamento dos sistemas elétricos de corrente alternada. Devido a isso, é necessário protegê-los dos fenômenos que podem comprometer o seu bom desempenho. A energização dos transformadores costuma gerar altos fluxos dinâmicos em seu núcleo, o que ocasiona a saturação de uma ou mais colunas do núcleo e, por consequência, o surgimento de elevadas correntes de magnetização, também conhecidas como correntes de *inrush* ou correntes de partida dos transformadores (Santilio *et al.*, 2013).

As correntes de *inrush* são transitórias e circulam apenas no enrolamento primário do transformador. Elas possuem vasto espectro harmônico, incluindo as harmônicas pares, e produzem efeitos indesejáveis ao transformador. Alguns desses efeitos são: fadiga mecânica nos enrolamentos, deterioração da isolamento, afundamentos temporários da tensão alimentadora e má operação do relé diferencial de proteção. Os dois primeiros ocasionam diminuição da vida útil do equipamento, enquanto os dois últimos afetam a qualidade da energia elétrica do sistema (Apolônio *et al.*, 2005).

A forma de onda, a duração e o valor da corrente de *inrush* dependem de fatores como: tamanho do transformador, impedância do sistema atrás do transformador, propriedades magnéticas do material do núcleo, fluxo remanescente no núcleo, valor instantâneo da tensão quando o transformador é energizado e maneira como é realizada a energização. No entanto, independente das características que essa corrente assume, seu valor é muitas vezes superior ao da corrente nominal do transformador e, por isso, é frequentemente confundida com correntes de curto-

circuito, o que pode resultar em desligamento indevido na energização (Mardegan, 2010).

Devido ao que foi explicitado, muitos pesquisadores como (Prikler *et al.*, 2003), (Arand *et al.*, 2013), (Mirkalaei e Hashiesh, 2015) e (Agasti *et al.*, 2016) têm se preocupado em estudar maneiras de reduzir a magnitude da corrente de *inrush*. Há, portanto, uma necessidade de se aprofundar nas técnicas de controle da corrente de energização a fim de minimizá-la, para evitar, assim, maiores danos ao sistema elétrico de potência. Por isso, neste trabalho, será abordado o fenômeno da corrente de *inrush* e serão estudados diferentes métodos para a diminuição dos seus valores. Um dos métodos estudados, o do chaveamento controlado no pico da tensão, será submetido a simulações computacionais no ambiente *Simulink* do *software* MATLAB® e, em seguida, será verificado experimentalmente em laboratório.

## 2 O fenômeno da corrente de *inrush*

O fenômeno da corrente de *inrush* pode ser explicado de duas formas: via estudo matemático ou via análise gráfica. Nesta seção, será usada a análise gráfica para que haja maior facilidade de compreensão do fenômeno.

Para fazer uma análise gráfica do aparecimento da corrente de *inrush*, é necessário conhecer as formas de onda assumidas pela tensão, pelo fluxo e pela corrente de magnetização ao longo do tempo em um transformador. Antes de falar sobre as formas de onda propriamente ditas, é importante saber que o valor preciso da tensão senoidal aplicada no instante em que o interruptor é fechado para energização do transformador pode ser qualquer número entre zero e seu pico, dependendo do instante de comutação. Além disso, a tensão pode estar subindo ou caindo e pode ter qualquer polaridade num determinado instante (Sil, 2009).

A taxa de variação de fluxo instantâneo em um núcleo de transformador é proporcional à tensão instantânea aplicada no enrolamento primário (Sil, 2009). A forma de onda de tensão é a derivada do tempo da forma de onda do fluxo  $e$ , em um transformador de operação contínua, essas duas formas de onda são defasadas em  $90^\circ$ . Uma vez que o fluxo é proporcional à força magnetomotriz no núcleo, e a força magnetomotriz é proporcional à corrente de magnetização, a forma de onda da corrente está em fase com a forma de onda do fluxo, e ambos estão atrasados em  $90^\circ$  em relação à forma de onda da tensão. Isso é mostrado na Figura 1.



Figura 1. Defasagem entre formas de onda da tensão, do fluxo e da corrente de magnetização.

Conhecendo essas formas de onda, serão feitas, agora, duas análises distintas, de acordo com o instante de tempo em que a chave é fechada para energização. Supõe-se, inicialmente, que o enrolamento primário do transformador é repentinamente conectado a uma fonte de tensão alternada no exato momento em que a tensão está em seu valor de pico positivo. Para que o transformador gere uma tensão oposta a fim de se equilibrar com a tensão aplicada, um fluxo magnético de valor crescente deve ser gerado (Sil, 2009). O resultado é que a corrente de enrolamento, inicialmente com valor nulo, também aumenta junto com o fluxo. Isso pode ser visto na Figura 2.

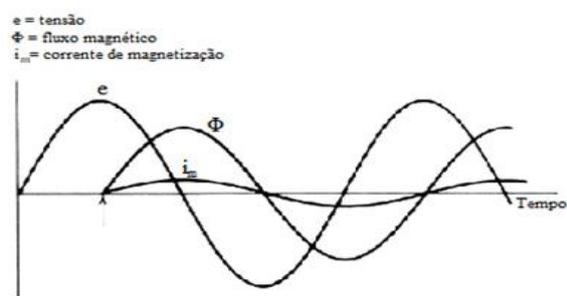


Figura 2. Formas de onda quando o transformador é energizado no pico de tensão positivo.

Nesse caso, tanto o fluxo do núcleo quanto a corrente da bobina começam a partir do zero e apresentam os mesmos valores de pico que possuem durante o funcionamento normal contínuo, ou seja, não há transiente no fluxo e na corrente. Dessa forma, pelo fato de as ondas de fluxo e corrente estarem defasadas em  $90^\circ$  da onda de tensão, quando o transformador é energizado com a tensão no pico, os valores de fluxo e corrente estão em zero; assim, não há surgi-

mento de *inrush* neste cenário e o sistema está em estado estacionário desde o começo (Sil, 2009).

Supõe-se, agora, uma segunda situação em que o enrolamento primário do transformador é repentinamente conectado a uma fonte de tensão alternada no momento em que a tensão está em seu valor zero. Com o passar do tempo, à medida que a tensão começa a aumentar para atingir o pico positivo, o fluxo e a corrente se acumulam a taxas de mudanças positivas e, quando atingem seus picos positivos, a tensão desce para um nível zero (Sil, 2009). Isso pode ser visto na Figura 3.

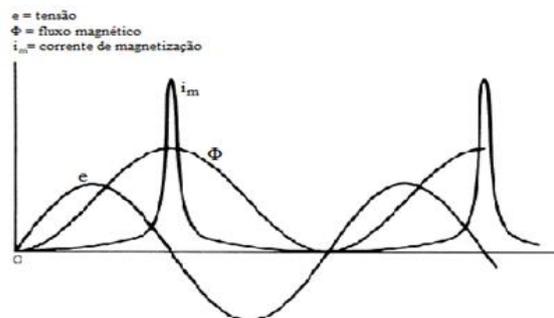


Figura 3. Formas de onda quando o transformador é energizado na tensão zero.

Ao final da primeira metade do ciclo de tensão, o fluxo atinge o dobro do seu valor de pico normal e a corrente de magnetização é muito grande por causa da saturação do núcleo (Sen, 2013). Dessa forma, para essa segunda suposição, os valores de fluxo e corrente são muito altos, surgindo, assim, a corrente de *inrush* nesta situação. Na prática, devido à resistência do enrolamento, a corrente de *inrush* irá decair rapidamente. No entanto, mesmo que ela decaia rapidamente, ela pode provocar danos e comportamentos inesperados no transformador e no sistema elétrico, como, por exemplo, a atuação errônea do dispositivo de proteção. Uma ilustração do seu decaimento pode ser vista na Figura 4.

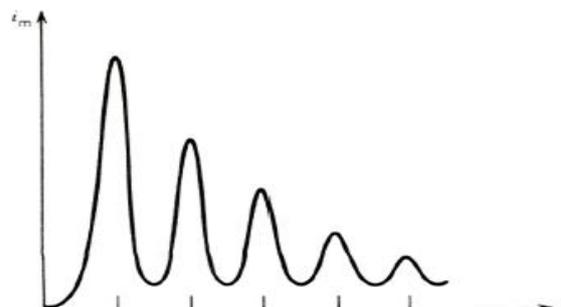


Figura 4. Decaimento da corrente de *inrush* devido à resistência do enrolamento.

Embora decaiam rapidamente na maior parte das vezes, as correntes de *inrush* podem durar dezenas de segundos e, de maneira geral, os responsáveis por instalações que contenham transformadores, especialmente as concessionárias de energia elétrica, estão mais interessados em conhecer o seu valor máximo

(Azevedo, 2007). Aos transformadores monofásicos, pode-se aplicar uma equação que estima a máxima corrente de *inrush* que circula pelo enrolamento energizado. A expressão pode ser visualizada na equação (1).

$$i_{m\_m\acute{a}x} = \frac{H \cdot h_w}{N} \quad (1)$$

Em que:

$i_{m\_m\acute{a}x}$  = Pico da corrente de *inrush*;

$H$  = Intensidade de campo magnético;

$h_w$  = Altura do enrolamento energizado;

$N$  = Número de espiras do enrolamento energizado.

A equação (1) também pode ser utilizada em transformadores trifásicos, mas não para determinar seu pico. Ela deve ser usada como parâmetro para analisar o desempenho das correntes de *inrush* em função do tipo de conexão dos enrolamentos (Kulkarni e Khaparde, 2004).

### 3 Efeitos indesejados provocados pela corrente de *inrush*

A corrente transiente de *inrush* é importante para que se possa estabelecer o campo magnético do transformador, no entanto ela ocasiona muitos efeitos que não são desejáveis a esse equipamento e, consequentemente, ao sistema elétrico. O efeito mais preocupante é a má operação do relé diferencial de proteção. Esse problema será abordado a seguir.

Para grandes transformadores de potência, a proteção diferencial é o principal método de proteção. Ela baseia-se no fato de que, quando se opera em situações normais, as correntes dos lados primário e secundário do transformador serão praticamente iguais após a passagem pelos transformadores de corrente. No entanto, quando ocorre uma falta interna, isso não se verifica, e a diferença entre essas correntes torna-se significativa e sensibiliza o relé, que envia um comando de operação para o disjuntor com o intuito de isolar o transformador do sistema (Bernardes, 2006).

A energização é usualmente realizada com o transformador sem carga, o que indica que a corrente do lado secundário é nula (Bernardes, 2006). Por outro lado, a corrente primária é alta, pois, como já se sabe, as correntes de *inrush* atingem valores muito elevados. Assim, há uma grande diferença entre a corrente do primário e do secundário e esse efeito transitório pode permanecer por vários segundos enquanto a condição de regime permanente não é alcançada. Essa situação é, muitas vezes, confundida com uma condição de falta, o que pode sensibilizar o

relé e causar um acionamento indevido do sistema de proteção do transformador.

Nesse caso, a atuação não é correta porque deve-se entender que a corrente de *inrush* é uma grandeza prevista no transformador. Assim, se a atuação da proteção for indevidamente acionada, não se tem conhecimento se houve ou não falha interna no transformador (Verney, 2012). Será necessário, então, realizar testes e inspeções para localizar o problema e isso pode levar tempo no restabelecimento do transformador no sistema. O isolamento do transformador no sistema pode, assim, proporcionar perda da qualidade de energia e má funcionamento do sistema elétrico.

### 4 Métodos para redução da corrente de *inrush*

Por causa dos efeitos indesejados provocados pela corrente de *inrush*, é necessário que sejam estudados métodos para sua redução. Os métodos mais conhecidos são: utilização de resistores de pré-inserção, uso de termistores NTC, inserção de capacitores em paralelo e realização de chaveamento controlado do transformador.

Os três primeiros métodos citados, embora diminuam o valor da corrente, trazem consigo consequências negativas. O uso de resistores e termistores, por exemplo, provoca a queda na corrente, mas ocasiona também a queda da tensão, o que não é uma característica desejável ao sistema. Já a utilização de capacitores é uma solução cara, é um método que não funciona de maneira isolada e precisa ser usado juntamente com chaveamento controlado.

Devido a esses efeitos negativos, decidiu-se estudar de maneira mais aprofundada o quarto método citado, o método do chaveamento controlado, que, pela teoria do assunto, se mostrou uma solução muito eficaz para mitigar as correntes de *inrush*.

Com o auxílio de chaves estáticas e de controladores, pode-se energizar o transformador no momento adequado para que haja uma corrente de *inrush* praticamente nula (Pedrazoli, 2011). Um dos métodos de chaveamento mais conhecidos é o controle do chaveamento por meio do valor de tensão.

Como já visto anteriormente neste trabalho, se o chaveamento para energização do transformador ocorrer no instante em que a tensão de suprimento estiver passando por 0 V, os valores da corrente de *inrush* serão máximos; por outro lado, se o chaveamento ocorrer no momento em que a tensão de suprimento estiver passando pelo valor de pico, os valores da corrente de *inrush* serão mínimos (Santilio *et al.*, 2013).

Essa teoria é confirmada por (Apolônio, 2005) que garante que, em um transformador monofásico com fluxo residual nulo, o instante ótimo para o fechamento da chave ocorre quando a tensão da fonte de suprimento estiver passando pelo seu valor de pico, uma vez que a corrente está defasada da tensão

em  $90^\circ$  e, portanto, quando a tensão for máxima, a corrente será mínima. Essa condição é suficiente para suprimir todo o transitório de energização, pois, diferentemente dos outros casos, esse método não irá apenas diminuir o valor da corrente; ele irá, também, acabar com a causa do fenômeno.

Para que o chaveamento seja adequado e o transformador seja energizado no valor de pico da tensão, algumas técnicas de controle são comumente estudadas. Uma delas foi proposta por (Pedrazoli, 2011), que realizou um estudo para redução de *inrush* em banco de capacitores e que pode ser adotado de maneira análoga para transformadores. Segundo ele, o circuito de controle do chaveamento pode ser desenvolvido com medidor de tensão, comparador de tensão e tiristores.

O diagrama de blocos da Figura 5 a seguir representa uma simplificação do circuito de controle proposto por (Pedrazoli, 2011). Em resumo, o medidor afere a tensão em tempo real da rede, o comparador, como o próprio nome diz, compara a tensão medida com o pico de tensão da fonte, e os tiristores enviam um sinal de comando aos contatos digitais.

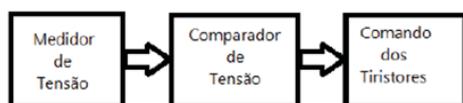


Figura 5. Diagrama de blocos simplificado do circuito de controle.

O medidor de tensão leva a tensão medida a ser comparada com o valor de pico de tensão da fonte, uma vez que, quando o chaveamento ocorre na tensão máxima, a corrente de *inrush* é mínima. Para esta aplicação, não há interesse nos diversos valores instantâneos da tensão, apenas deseja-se identificar se ela está no valor máximo em módulo ou se está passando por zero (Pedrazoli, 2011).

O circuito comparador, que vem após o medidor, é eletrônico e, portanto, não é capaz de suportar tensões e potências muito altas (Pedrazoli, 2011). Devido a isso, utiliza-se um divisor de tensão para o circuito amostrador. No divisor, as formas de onda dos sinais de entrada e saída mudam apenas em amplitude em relação aos originais, mas mantêm a fase e frequência. O circuito medidor com o amostrador pode ser visto na Figura 6.

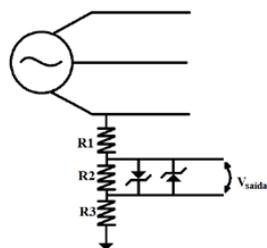


Figura 6. Circuito medidor de tensão com amostrador.

A existência dos 3 resistores permite que qualquer valor de tensão seja encontrado ao mudar a relação entre R1, R2 e R3. Os diodos zener asseguram que a tensão de saída esteja sempre limitada a seus valores de tensão reversa; isso protege o circuito principal, pois evita que os picos de tensão ou a queima de algum dos resistores aumente drasticamente a tensão de saída (Pedrazoli, 2011).

O circuito comparador sinaliza quando a tensão medida da fonte está passando pelo valor de pico, indicando, assim, o melhor momento para a energização do transformador. Esse circuito utiliza como valor de referência o valor de pico, que será referência para a energização do transformador (Pedrazoli, 2011). Ao identificar o valor de pico, o sinal é enviado para o circuito de comando dos tiristores.

O circuito de comando dos tiristores deve enviar pulsos de ativação aos tiristores de potência, ou chaves estáticas. Tal circuito interpretará o sinal de saída do amplificador operacional e irá gerar, no momento ótimo de energização dos transformadores, um pulso que fará com que os tiristores disparem, conectando o transformador à fonte de energização (Pedrazoli, 2011). Assim, energizados no instante correto, isto é, quando a tensão é máxima, não será observada a presença de corrente de *inrush*.

Outros métodos para chaveamento na tensão máxima são estudados e a maioria deles aborda transformadores trifásicos. (Brunke e Fröhlich, 2001), (Prikler *et al.*, 2003), (Oliveira e Bronzeado, 2005), (Arand *et al.*, 2013), (Santilio *et al.*, 2013) e (Mirakalaei e Hashiesh, 2015) realizaram estudos em trifásicos e concluíram que, quando a energização é feita mediante o controle estabelecido, a corrente de energização do transformador resulta na mesma corrente que circula com o transformador operando a vazio, eliminando, assim, o problema de *inrush*.

De todos os estudos citados, percebeu-se que o entendimento para trifásicos e monofásicos segue a mesma linha de raciocínio. A grande diferença é que, nos monofásicos, só há necessidade de verificar o ponto de tensão máxima, enquanto nos trifásicos é preciso analisar, também, os ângulos e a interação de fluxo entre as fases para que cada uma delas seja energizada no instante ótimo.

Este trabalho se propõe a adotar um método de energização para diminuir as correntes de *inrush* em um transformador de potência monofásico, então o estudo sobre a mitigação dessas correntes para transformadores trifásicos não será detalhado. A seguir, será mostrado e explicado o método escolhido para a realização de simulações e experimentos no transformador monofásico. Foi proposto, neste trabalho, um novo circuito para chaveamento controlado do transformador monofásico, baseado na teoria de (Pedrazoli, 2011).

## 5 Método proposto para redução da corrente de *inrush* em transformador monofásico

Após analisar os métodos existentes para redução da corrente de *inrush*, verificou-se que o controle do chaveamento é o procedimento mais eficaz e com menos implicações negativas ao sistema elétrico como um todo. Assim, optou-se por desenvolver um mecanismo de controle para chaveamento na tensão máxima. Na Figura 7, é possível observar o circuito de comando que foi projetado para realizar o chaveamento do transformador.

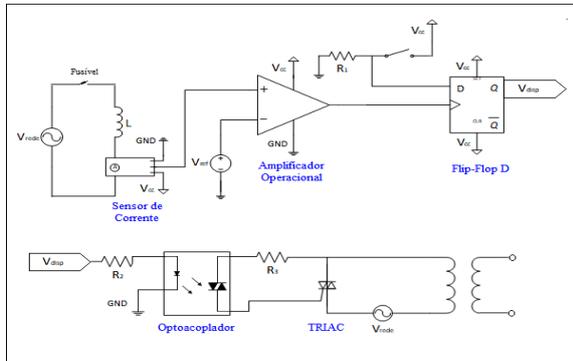


Figura 7. Circuito de comando para chaveamento do transformador na tensão máxima.

No circuito de comando projetado, coloca-se a tensão da rede em série com um fusível de baixa resistência ( $0,04 \Omega$ ) para efeitos de proteção, um indutor de alta indutância (300 mH) e um sensor de corrente (modelo ACS 712). Com essa configuração, a tensão da rede fica praticamente toda no indutor e a corrente do circuito fica defasada de  $90^\circ$  em relação à tensão.

O sensor utilizado realiza a leitura dessa corrente e fornece como saída uma tensão proporcional à essa corrente. A relação entre tensão e corrente é de  $66 \text{ mV/A}$ , e a tensão é fornecida com um *offset* de  $2,5 \text{ V}$ . Como se sabe, deseja-se chavear no momento de tensão máxima, então, como a corrente é defasada de  $90^\circ$  da tensão, almeja-se chavear na corrente mínima.

Como a tensão fornecida é proporcional à corrente lida, porém com *offset* de  $2,5 \text{ V}$ , o  $0 \text{ A}$  da corrente equivale a  $2,5 \text{ V}$  da tensão de saída do sensor. Pretende-se, portanto, realizar o chaveamento no instante em que a tensão de saída do sensor estiver passando pelo valor de  $2,5 \text{ V}$ . Para identificar esse momento, utiliza-se um comparador de tensão (modelo LM324N), em que a tensão de referência é  $V_{ref}$  ( $2,5 \text{ V}$ ). Assim, sempre que a tensão for igual a  $2,5 \text{ V}$ , o comparador irá fornecer saída em nível alto.

Deseja-se, porém, que o transformador dê apenas um pulso e mantenha-se energizado. Para isso, utiliza-se o flip-flop tipo D (modelo 74HCT74N), que, após seu acionamento, identificará o pulso do primeiro do patamar visto da saída do comparador e manterá, a partir desse pulso, o nível alto ( $5 \text{ V}$ ) durante todo o tempo. Em seguida, o sinal que sai do flip-flop é enviado a um optoacoplador (modelo MOC3022).

O optoacoplador é um componente que isola circuitos de controle e de potência e possibilita a transferência de um sinal de controle de um circuito para outro sem a necessidade de acoplamento elétrico. Após essa transferência de sinal, dá-se o gatilho no TRIAC (modelo BTA16), que funcionará como chave e possibilitará a energização do transformador no instante desejado.

## 6 Simulações e Resultados

Nesta seção, serão mostrados, inicialmente, os resultados da simulação realizada sem controle do chaveamento, para que seja possível observar a presença da corrente de *inrush*. Em seguida, serão mostrados os resultados da simulação com controle do chaveamento, para que se visualize a eficácia do método escolhido.

### 6.1 Resultados em simulação sem controle do chaveamento

No ambiente *Simulink* do software *MATLAB*®, realizou-se a energização de um transformador  $500 \text{ VA}$ ,  $220 \text{ V}/50 \text{ V}$ . Inicialmente, a energização foi feita num ponto aleatório de tensão e, por isso, como não houve controle do momento de chaveamento, a corrente de *inrush*, vista no primário do transformador (*ip*), foi bastante aparente. Seu maior pico ficou em torno de  $3,55 \text{ A}$ . Isso pode ser visto na Figura 8. Esse valor de corrente de *inrush* foi, aproximadamente, 14 vezes maior que o da corrente nominal de excitação em regime. O valor atingido pelo *inrush* também foi maior que a corrente nominal do transformador, que é de  $2,27 \text{ A}$ .

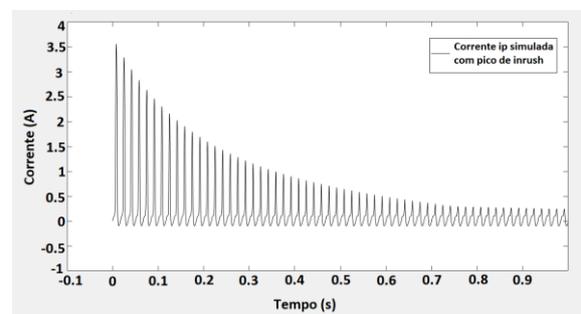


Figura 8. Simulação de *inrush* sem controle do chaveamento.

### 6.2 Resultados em simulação com controle do chaveamento

Realizou-se, então, com o circuito mostrado na Figura 7, o comando do momento de chaveamento do transformador. Energizou-se o equipamento no exato momento em que a tensão passava pelo seu valor de pico. O resultado pode ser visto na Figura 9, de onde se conclui que, com esse método, o alto pico da corrente de *inrush* foi eliminado, assumindo o valor de

excitação em regime desde o primeiro instante de chaveamento.

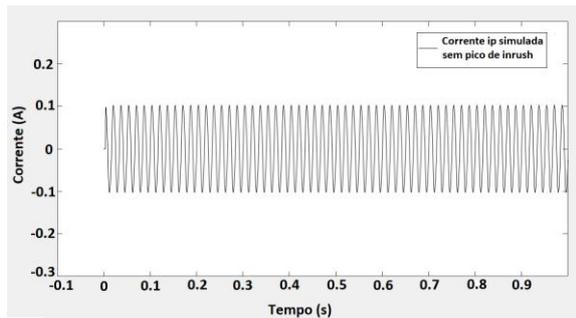


Figura 9. Simulação de *inrush* sem controle do chaveamento.

## 7 Montagem Experimental e Resultados

Agora, serão mostrados a montagem e os resultados experimentais do método de chaveamento proposto neste trabalho. A placa desenvolvida como protótipo do circuito de comando projetado pode ser vista na Figura 10.

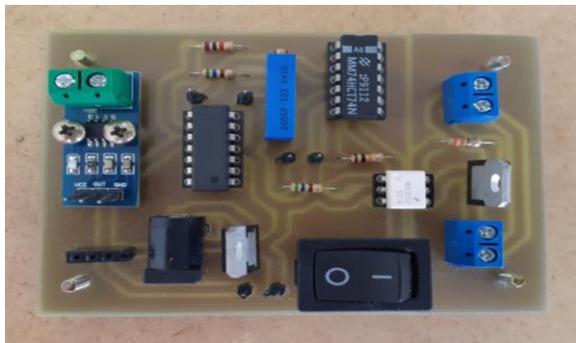


Figura 10. Protótipo desenvolvido para chaveamento controlado.

Em laboratório, montou-se o circuito da Figura 7 para chaveamento controlado do transformador. Essa montagem pode ser vista na Figura 11. Como é possível perceber, embora façam parte do circuito de comando, o fusível e o indutor ficaram fora da placa devido ao tamanho. A placa em si contém apenas os componentes do TRIAC até o fusível.

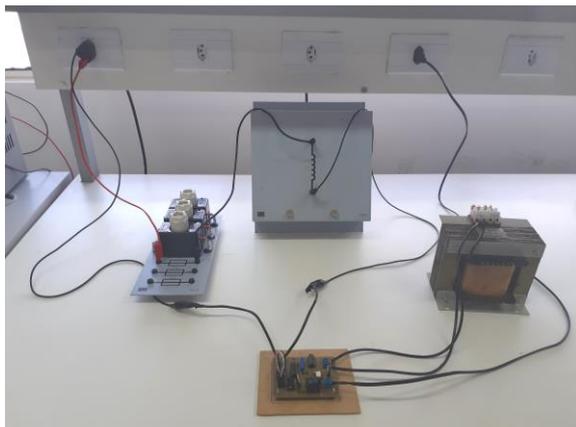


Figura 11. Montagem do circuito com chaveamento controlado.

### 7.1 Resultados experimentais sem controle do chaveamento

Antes de mostrar o circuito da Figura 11 em correto funcionamento, realizou-se, na prática, a energização do transformador em um ponto aleatório de tensão. Na Figura 12, pode-se observar que, nessa situação, o disparo do TRIAC não ocorreu no pico da tensão da rede. A tensão da rede, na Figura 12, está dividida por um fator  $k=60$  para melhor visualização em escala juntamente com a tensão de disparo.

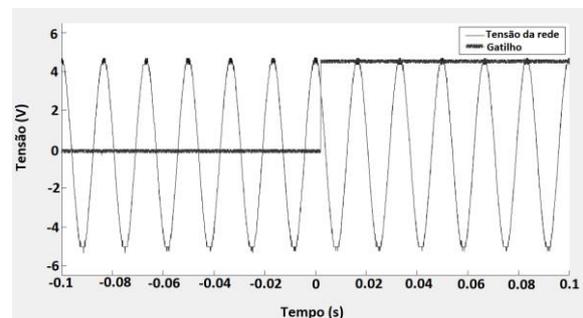


Figura 12. Disparo do triac em valor de tensão aleatório.

Para esse caso, obteve-se o resultado que pode ser visto na Figura 13. Como era de se esperar, a corrente de *inrush* teve um pico elevado, uma vez que o chaveamento não ocorreu no valor máximo da tensão. O pico da corrente ficou em torno de 2,4 A. Apesar de ter sido usado um transformador com os mesmos parâmetros do da simulação, o valor de pico do *inrush* deu diferente na prática porque não se chaveou no mesmo instante da simulação. Viu-se que, no experimento sem controle do chaveamento, a corrente de *inrush* foi muito maior que a de excitação nominal e também ultrapassou o valor da corrente nominal do transformador, que era de 2,27 A.

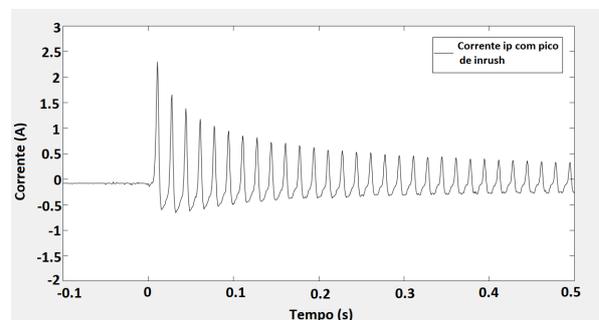


Figura 13. Resultado do *inrush* sem controle do chaveamento em laboratório.

### 7.2 Resultados experimentais com controle do chaveamento

Ajustou-se, então, o controle desenvolvido para chavear no momento de pico da tensão. Na Figura 14, é possível conferir que a energização realmente

se deu no pico da tensão. Aqui, a tensão da rede também está dividida por um fator  $k=60$ .

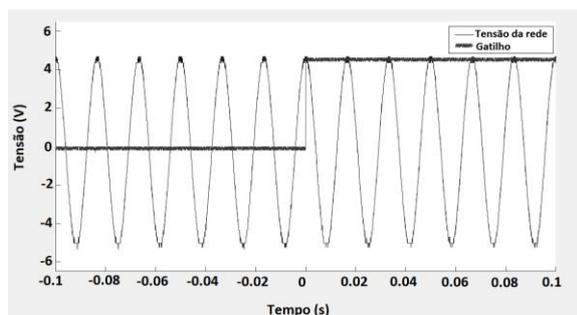


Figura 14. Disparo do triac no valor máximo de tensão.

Para essa situação, visualizou-se a corrente de *inrush* que pode ser observada na Figura 15. Percebe-se que ela não possui mais o pico que havia sido visto quando houve uma energização não-controlada do transformador. Nota-se que os valores iniciais da corrente do primário do transformador foram até menores, mas muito próximos do valor de excitação em regime permanente. Com isso, foi possível perceber que o circuito projetado foi bastante eficiente para o propósito de diminuição da corrente de *inrush* na energização de um transformador de potência monofásico.

Esses resultados foram alcançados para um transformador 500 VA, 220V/50V que nunca havia sido energizado. Então, para efeitos de comprovação, o circuito de comando foi testado com outros transformadores existentes em laboratório. Em alguns casos, quando o transformador havia sido energizado recentemente, notou-se que, apesar de uma diminuição, não houve eliminação completa da corrente de *inrush*.

Para resolver esse problema, é necessário fazer um estudo diferenciado sobre magnetismo residual e tentar eliminá-lo no momento da energização. Só em casos de magnetismo residual nulo é que será possível enxergar a corrente com o valor de regime permanente.

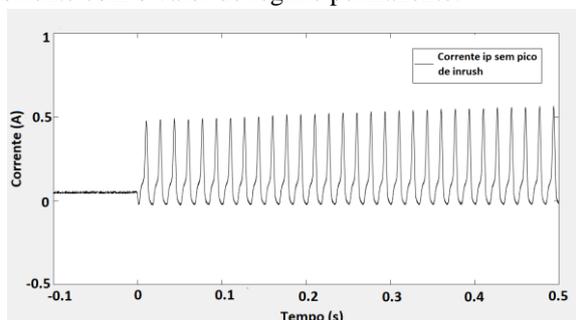


Figura 15. Resultado do *inrush* com controle do chaveamento em laboratório.

## 8 Conclusão

Neste trabalho, foi possível realizar um estudo sobre corrente de *inrush*, conhecer seus malefícios e aprender diferentes métodos para reduzir o seu valor. Escolheu-se desenvolver uma análise mais aprofun-

dada do método de chaveamento controlado do valor de tensão. Implementou-se um circuito de comando para realizar esse controle e reproduziu-se tal circuito tanto em simulação quanto em laboratório.

Percebeu-se, em termos simulacionais e experimentais, que a teoria foi ratificada. Ao controlar o chaveamento com o circuito projetado, notou-se que, de fato, a corrente de *inrush* reduziu drasticamente o seu valor, ficando próxima à corrente de excitação. Para o transformador de 500 VA, 220V/50V utilizado neste trabalho, a corrente perdeu totalmente seu valor de pico elevado, tanto na simulação quanto na prática. Verificou-se, porém, que o alto valor de pico não foi completamente eliminado em todos os transformadores existentes no laboratório.

O elevado valor de pico do *inrush* foi totalmente extinto apenas em transformadores que nunca haviam sido energizados – e, portanto, não possuíam fluxo residual – e em transformadores que tinham sido energizados, mas já haviam perdido o magnetismo residual. Isso ocorreu porque, nos transformadores recentemente energizados, a presença do fluxo residual impede que o fluxo magnético do transformador seja totalmente nulo no momento do chaveamento. No entanto, mesmo nos transformadores previamente energizados, embora não tenha ocorrido a eliminação completa do pico, houve uma redução no valor dele, pois o fluxo original do transformador, no momento do chaveamento, estava nulo e existia, apenas, fluxo residual.

O objetivo deste trabalho foi cumprido, pois pretendia-se criar um mecanismo de energização do transformador no pico máximo de tensão da rede para atestar a veracidade da teoria existente sobre esse assunto. Apesar da limitação causada pela presença do fluxo residual, o circuito desenvolvido atendeu ao que se desejava: realizar o chaveamento no pico da tensão da rede e verificar que, realmente, ocorre uma diminuição do valor de *inrush* com chaveamento no pico, embora, em alguns casos, seja necessário, antes da energização, eliminar o fluxo residual para que o pico seja totalmente extinto.

## Referências Bibliográficas

- Agasti, S. K.; Naresh, R.; Ghosh, N.(2016). Investigation of various affecting factors and reduction technique of transformer magnetizing inrush current. International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication, Himachal Pradesh.
- Apolônio, R.; Oliveira, J. C.; Bronzeado, H. S.; Vasconcellos, A. B.(2005). Energização controlada de transformadores trifásicos: estratégia para redução da corrente de inrush. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba.
- Arand, S. J.; Saedi, m.; MasoudI, S.(2013). Transformer inrush current mitigation using controlled switching and magnetic flux shunts.

International Journal of Energy and Power Engineering, Dehdasht.

Azevedo, A. C.(2007).Estresse eletromecânico em transformadores causado por curtos-circuitos “passantes” e correntes de energização. Tese de Doutorado. Uberlândia.

Bernardes, A. P.(2006). Esquema Completo de Proteção Diferencial de Transformadores para Testes em um Relé Digital. Dissertação de Mestrado. São Carlos.

Brunke, J. H.(1998). Elimination of transiente inrush currents when energizing unloaded power transformers. Tese de Doutorado. Zurich.

Brunke, J.H.; Fröhlich, K. J.(2001). Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 16, n. 2.

Kulkarni, S. V.; Khaparde, S. A.(2004). Transformer Engineering – Design and Practice. 1 ed. New York.

Mardegan, C. (2010). Proteção dos transformadores. O Setor Elétrico, pp. 26-39.

Mirkalaei, S.A. M.; Hashiesh, F. (2015).Controlled Switching to Mitigate PowerTransformers Inrush Current Phenomenon.Power Engineering Conference (UPEC) 50th International Universities, IEEE, Stoke on Trent.

Oliveira, J. C.; Bronzeado, H. S.(2005). Energização Controlada de Transformadores Trifásicos: Estratégia para Redução da Corrente de Inrush. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Curitiba-PR.

Pedrazoli, G. Z.(2011). Banco de Capacitores sem Corrente de Inrush. Trabalho de Conclusão de Curso. Guaratinguetá-SP.

Peterson, H. A.(1951). Transients in Power Systems. Dover Publications, New York, pp 288-296.

Prikler, L.; Bánfai, G.; Bán, G.; Becker, P.(2003). Reducing the magnetizing inrush current by means of controlled energization and de-energization of large power transformers. International Conference on Power System Transients, New Orleans.

Raffo, G. V.(2010). Análise da Corrente de Inrush em Transformadores de Potência. Trabalho de Conclusão de Curso. Porto Alegre-RS

Santilio, F. P.; Velasco, L.N.; Silva, T.V.; Rezende, P. H. O.; Vasconcelos, L. E.; Barbosa Junior, J. A. F.; Souza, A. C.(2013). Verificação dos fatores que influenciama corrente deinrush: Apresentação de uma proposta para a mitigação desse fenômeno e análise do efeito sympathetic.XI CEEL, Uberlândia-MG.

Sen, P. C.(2013). Principles of Electric Machines and Power Electronics. Ontário.

Sil, A. K.(2009). Experimental Study on Inrush Current of a Single Phase Transformer. Tese de Doutorado. Calcutá.

Verney, L. H.C.(2012). Desempenho da proteção diferencial em transformadores de potência

perante condições especiais de operação.  
Dissertação de Mestrado. Florianópolis-SC.