

# Usando Oscilografias de Alta Resolução Para Melhorar o Desempenho do Controle de Chaveamento De Transformadores

Vetti Bala  
*Genesis Energy*

Brett Hampson e Ritwik Chowdhury  
*Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Apresentado na  
EEA Conference  
Auckland, Nova Zelândia  
25-27 de junho de 2019

Traduzido para o português em dezembro de 2019

# Usando Oscilografias de Alta Resolução Para Melhorar o Desempenho do Controle de Chaveamento De Transformadores

Vetti Bala  
*Genesis Energy*

Brett Hampson e Ritwik Chowdhury  
*Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Brett Hampson, Autor e Apresentador

EEA Conference & Exhibition, 25–27 de junho de 2019 em Auckland

## Resumo

A energização de transformadores de potência em um ponto de onda aleatório (energização não controlada) pode resultar em correntes de energização (*inrush*) que excedem em muito a capacidade nominal de carga do transformador. Alta corrente de energização pode resultar em problemas de qualidade de energia e induzir desgastes desnecessários nos equipamentos conectados. Por outro lado, chaveamento controlado na qual o disjuntor é fechado em um ponto de onda escolhido para minimizar a corrente de energização, reduz bastante o valor desta corrente e seus efeitos negativos.

Este artigo técnico descreve o projeto e o comissionamento de um esquema de chaveamento controlado para energizar e desenergizar um transformador de 220/18 kV, 485 MVA. A energização desse transformador frequentemente resultava em um grande consumo de corrente reativa do sistema de potência. A baixa qualidade da energia estava afetando adversamente os equipamentos na usina adjacente e no pátio de transmissão. Não era incomum que eventos de energização causassem cintilações e quedas de energia. Às vezes, ruídos excessivos podiam ser ouvidos por vários minutos a partir deste transformador e de outros transformadores em operação na usina próxima, sinalizando efeitos negativos duradouros causados pela corrente de *inrush* inicial.

O artigo explora vários esquemas de chaveamento controlado e descreve aquele escolhido para esta aplicação. Discute o processo de projeto e comissionamento e destaca o uso de oscilografias de alta resolução para complementar os testes do disjuntor para obter um ajuste crítico do tempo de avanço do disjuntor para o esquema. Os resultados mostram que, usando um dispositivo de chaveamento controlado e ajustando sua configuração de tempo de avanço do disjuntor, as correntes de *inrush* superiores a 3 pu foram reduzidas para menos de 0,2 pu.

# Usando Oscilografias de Alta Resolução Para Melhorar o Desempenho do Controle de Chaveamento De Transformadores

Vetti Bala  
*Genesis Energy*

Brett Hampson e Ritwik Chowdhury  
*Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

## I. INTRODUÇÃO

A Huntly Power Station foi originalmente construída com quatro turbinas a vapor de 250 MVA para produzir ~1.000 MW para o sistema elétrico da Nova Zelândia. Em 2006, a estação foi ampliada através de um gerador de eixo direto com turbina a gás (G5) com capacidade de 475 MVA. Ele foi conectado ao sistema por um transformador delta-estrela 220/18 kV, 485 MVA (T500). Vários arranjos permitiram que o suprimento da estação local derivasse do sistema de 220 kV através do transformador do gerador, do suprimento local da usina adjacente ou ainda do gerador de turbina a gás G5.

A falha do controlador existente exigia a energização do transformador T500 do gerador a partir do sistema de 220 kV, através de um fechamento manual que ignorava o controlador. As grandes correntes de *inrush* devido a essas energizações aleatórias resultaram em quedas de energia e subtensões momentâneas. Uma condição de *sympathetic inrush* (corrente de *inrush* em outros transformadores em paralelo) causada pelo T500 nos transformadores de geradores adjacentes podia ser frequentemente ouvida por muitos minutos após algumas tentativas de fechamento.

Este artigo discute o projeto e o comissionamento para substituição de um sistema para o controle pontual de onda do disjuntor de 220 kV que conecta o T500 ao sistema de 220 kV. Isso mostra que o uso de oscilografias para o ajuste fino dos tempos de abertura e fechamento de cada polo do

disjuntor pode reduzir bastante a corrente magnetizante de *inrush*. Quando um transformador é desenergizado, o fluxo residual permanece devido às características de histerese do material do núcleo. Se o transformador for reenergizado em um instante aleatório de tempo, o núcleo poderá saturar, resultando em uma corrente de *inrush* várias vezes a corrente nominal do transformador. A energização do transformador quando o fluxo da tensão da fonte corresponde ao fluxo residual, praticamente elimina qualquer corrente de *inrush* [1] [2] [3] [4].

Os dispositivos de controle de chaveamentos (CSDs) tem sido aplicados com sucesso para reduzir a corrente de *inrush* de transformadores [1] [2] [3] [4]. A atual tecnologia de CSD usa um dos dois métodos a seguir:

1. A integração de tensão é usada para calcular o fluxo residual no núcleo do transformador. Em seguida, é realizado um fechamento controlado de modo que o fluxo esperado criado pela tensão aplicada seja igual ao fluxo residual no núcleo [1] [2] [4]. O uso deste método requer uma medição precisa das tensões nos enrolamentos do transformador e é difícil de obter usando um transformador de tensão capacitivo (CVT).
2. O transformador é tratado como um reator e aplica-se um comando de fechamento controlado assumindo que

o fluxo residual esteja próximo de zero [2] [3]. Diferentemente do método anterior, as medições de tensão no enrolamento do transformador não são necessárias e o fechamento controlado é realizado na tensão máxima do sistema. Espera-se que o desempenho desse método seja superior ao chaveamento aleatório, mas pode ser inferior ao método de integração de tensão.

## II. CONSIDERAÇÕES DE APLICAÇÃO PARA O ESQUEMA DE CHAVEAMENTO CONTROLADO

O objetivo do projeto do sistema era fornecer um esquema de chaveamento controlado para o disjuntor de 220 kV associado ao T500. A operação normal do sistema é de energizar o lado de 18 kV a partir do sistema de 220 kV através do disjuntor T500 (CB52 na Fig. 1). Às vezes, isso é chamado de “*back livening*”. O gerador é sincronizado com o barramento de 18 kV através do disjuntor do gerador (52G). Um esquema de verificação de sincronismo existente foi mantido para o CB52 para eventual sincronização o sistema.

Muitos controladores aplicam uma técnica de integração de tensão para estimar o nível de fluxo residual e ajustar os tempos de fechamento de cada polo. No entanto, para esta aplicação (como costuma ser o caso de sistemas de alta tensão), apenas CVTs estavam disponíveis para medição de tensão no enrolamento do transformador. Como tal, foi escolhido o método alternativo que assume um fluxo residual mínimo no núcleo antes do fechamento. Se após a desenergização houver fluxo residual, o transformador ainda poderá saturar quando for reenergizado.

Para três transformadores monofásicos, o método pode ser alcançado executando fechamento nos respectivos valores máximos de tensão dos transformadores. Se os transformadores tiverem núcleos magneticamente dependentes [3] [4], a energização do primeiro polo cria um fluxo que aparece nas outras duas fases. Se a

primeira fase for fechada na tensão máxima, as outras duas fases deverão ser fechadas um quarto de um ciclo após (ou em incrementos de meio ciclo após) [3]. A Tabela I mostra os ângulos de chaveamento controlado e os atrasos associados em relação a um cruzamento da tensão pelo zero na fase R para este esquema (sistema de 50 Hz) [3].

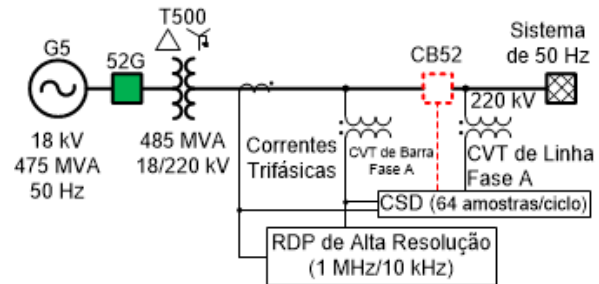


Fig. 1. Diagrama unifilar do sistema para aplicação de transformador com chaveamento controlado

TABELA I  
TEMPOS DE ABERTURA E FECHAMENTO RECOMENDADOS PARA UM TRANSFORMADOR DELTA-ESTRELA ATERRADA APÓS CRUZAMENTO DA TENSÃO DA FASE R PELO ZERO [3]

Polo	Ângulo de Fechamento	Tempo de Fechamento (ms)	Ângulo de Abertura	Tempo de Abertura (ms)
R	90°	5,00	90°	5,00
Y	180°	10,00	210°	11,67
B	180°	10,00	120°	6,67

As configurações finais do tempo de avanço do controlador precisam levar em consideração os atrasos totais na operação do disjuntor, incluindo o tempo de medição e processamento do CSD, tempo de carregamento das bobinas de disparo e fechamento e o tempo dos polos do disjuntor (tempo de operação mecânica). Esses fatores foram considerados durante os testes em que foram medidos os tempos de operação mecânica do disjuntor (aberto e fechado). Os tempos médios de operação foram divididos em semi-ciclos para isolar o restante, que foi subtraído dos temporizadores usados no controlador. Os tempos resultantes foram utilizados para as primeiras operações de fechamento e abertura durante o comissionamento.

Outro fenômeno a considerar, que não pode ser medido diretamente, é o tempo de abertura e fechamento elétrico do disjuntor. À medida que os polos do disjuntor se fecham, o meio dielétrico (por exemplo, vácuo ou SF6) quebra e começa a conduzir. O momento de condução corresponde ao tempo de fechamento elétrico do disjuntor e depende da tensão nos polos, das propriedades dielétricas e da distância entre os polos. Idealmente, a condução deve começar na tensão máxima, correspondendo a um fluxo zero. Isso também é aplicável durante a abertura do disjuntor: a corrente cessa de fluir quando os polos do disjuntor são separados por uma distância suficiente ou ocorre um cruzamento pelo zero. Durante o comissionamento, os autores compensaram esse parâmetro usando oscilografias de um registrador digital de perturbações (DFR) de alta resolução (1 MHz).

O CSD nesta aplicação utiliza uma tensão monofásica como referência para iniciar um comando controlado de abrir ou fechar nos ângulos de ponto de onda fornecidos na Tabela I [3]. Um conjunto de testes de injeção secundária e um controlador conectado a um disjuntor fictício foram utilizados para determinar os tempos do esquema inicial. Os tempos de abertura e fechamento foram programados e testados assumindo atraso zero para a operação de cada polo do disjuntor. Testes de campo forneceram os tempos de operação mecânica para cada polo, que por sua vez forneceu os

ajustes iniciais de tempo de avanço do disjuntor usados no comissionamento.

### III. DESEMPENHO DO FECHAMENTO CONTROLADO

Para auxiliar o processo de comissionamento, um DFR com oscilografia de alta resolução [4] foi usado para ajuste fino dos tempos do controlador de chaveamento. Relatórios de oscilografias de 64 amostras por ciclo do CSD e resoluções de 10 kHz e 1 MHz do DFR foram usadas para confirmar as operações e ajustar o processo de chaveamento, o que de outra forma não seria uma opção.

#### A. Fechamento Controlado I

Os parâmetros do CSD foram ajustados para corresponder aos tempos de abertura e fechamento na Tabela I e foram compensados com os tempos de operação mecânicos do polo do disjuntor medidos durante os testes em campo. A oscilografia capturada desde o primeiro fechamento, mostrado na Fig. 2, possui as características de um evento de energização de transformador: Uma forma de onda com decaimento CC exponencial com uma corrente de pico de 1,3 kA e tempos de permanência perceptíveis (regiões planas).

A Fig. 3 mostra os primeiros milissegundos do fechamento com resoluções de 1 MHz e 10 kHz. Idealmente, o polo A fecharia 5 ms após o cruzamento pelo zero da tensão da fase R (VAS), seguido pelos polos B e C após outros 5 ms.

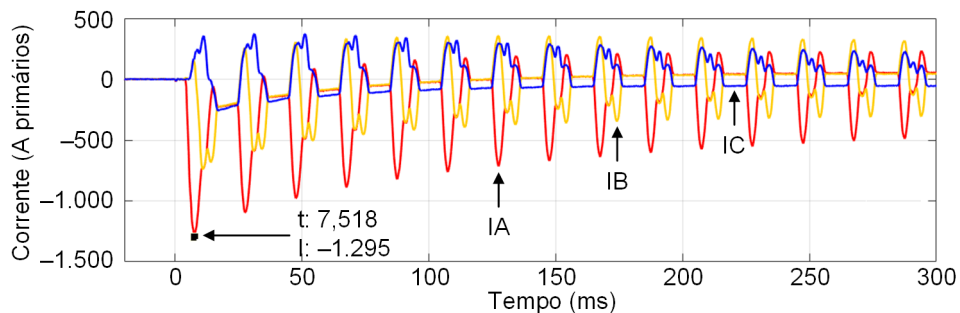


Fig. 2. Correntes de inrush medidas a 64 amostras por ciclo num fechamento inicial controlado

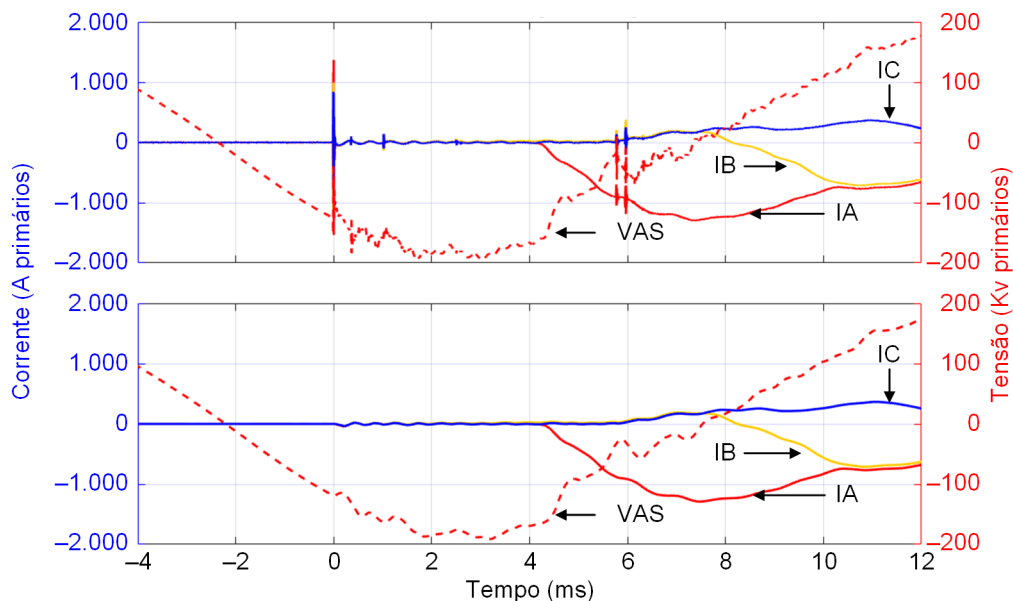


Fig. 3. Fechamento de Polos (correntes e tensões durante inrush) com resoluções de 1 MHz (superior) e 10 kHz (inferior)

As correntes e tensões transitórias do arquivo de resolução de 1 MHz mostram claramente os instantes em que cada polo fechou. Embora 1 pu de inrush seja um bom resultado, é óbvio que o tempo de fechamento do polo poderia ser melhorado. Uma inspeção mais detalhada da oscilografia de 1 MHz na Fig. 4 revelou os ajustes de tempo necessários para os três polos.

O polo A parece ter fechado 2,364 ms após o cruzamento pelo zero da VAS (Fig. 4a). Isso permitiu que os parâmetros do CSD fossem atrasados em  $(5 - 2,364) = 2,636$  ms para o fechamento do polo A. Os polos B e C fecharam ao mesmo tempo, conforme definido pelos ajustes do CSD. Para determinar quando e qual polo fechou primeiro, é necessária uma análise mais detalhada no arquivo de 1 MHz em  $t = 5,77$  ms e  $t = 5,96$  ms, como mostrado nas Fig. 4b e Fig. 4c, respectivamente.

A Fig. 4c mostra a corrente do polo B divergindo um pouco antes e além das correntes dos polos C e A. Isso indica que o polo B pode ter fechado por último (5,947 ms). A Fig. 4b mostra que a corrente do polo C parecem divergir um pouco mais além do que a corrente do polo B, indicando que o polo C pode ter fechado em segundo lugar (5,765 ms). Os polos B e C fecharam

mais lentamente do que o esperado e o polo A foi retardado em 2,636 ms. Isso exigiu que os tempos de fechamento dos polos B e C fossem atrasados em  $(2,636 - 0,947) = 1,669$  ms (Fig. 4c) e  $(2,636 - 0,765) = 1,871$  ms (Fig. 4b), respectivamente.

Observe que a ordem de fechamento do polo não é definitiva. Em retrospectiva, poderia ter sido melhor alternar o fechamento dos polos subsequentes para obter tempos de fechamento elétrico com mais confiança.

As atuais formas de onda nos arquivos de 64 amostras por ciclo (Fig. 2) e 10 kHz (Fig. 3b) não forneceram nenhuma informação para os fechamentos do segundo (Fig. 4b) ou terceiro polo (Fig. 4c), mas forneceram algumas informações para o fechamento do primeiro polo. Isso é mostrado na Fig. 5. Quanto maior a resolução, mais fácil é determinar o tempo de fechamento com precisão. Observe que os arquivos de oscilografias de 10 kHz e 64 amostras por ciclo estão atrasados nas correntes e tensões em comparação com o arquivo de 1 MHz. Isso pode ser explicado pelos atrasos no processamento do sinal, que não devem causar problemas ao comparar correntes e tensões com a mesma taxa de amostragem.

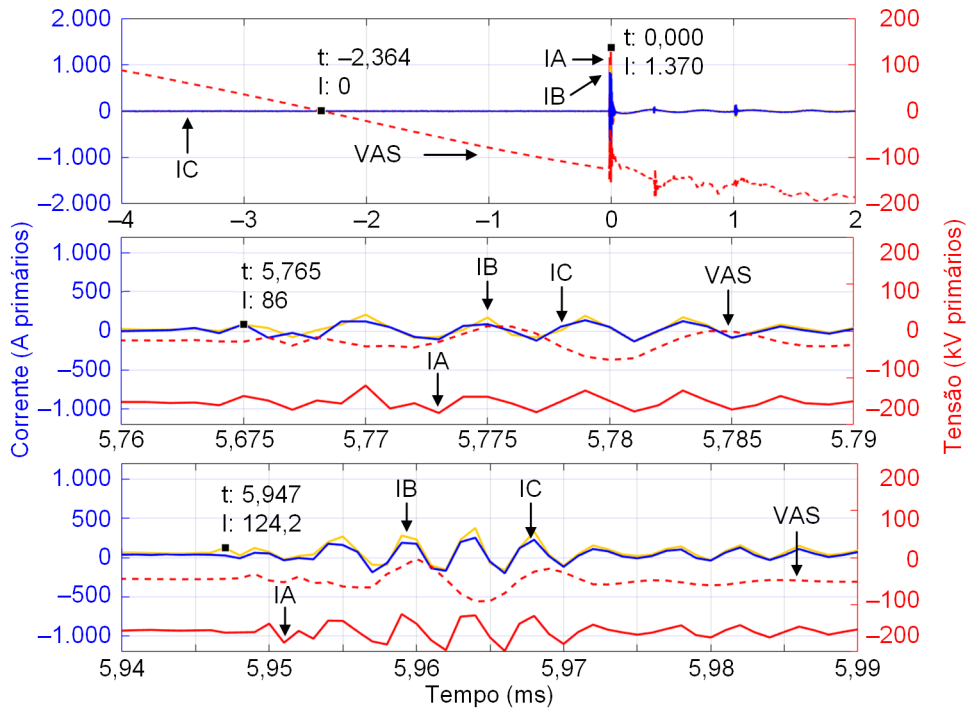


Fig. 4. Detalhes do fechamento do primeiro polo (a), segundo polo (b) e terceiro polo (c)

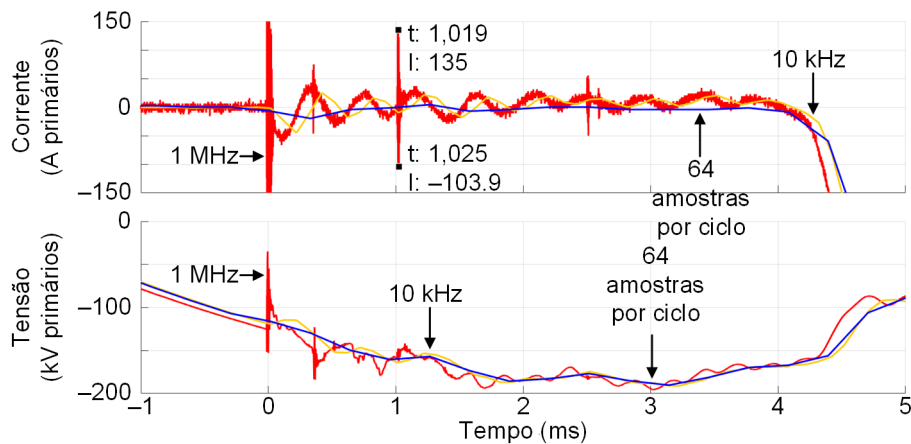


Fig. 5. Correntes e tensões para diferentes taxas de amostragens durante fechamento inicial do polo

Finalmente, a Fig. 5 mostra transitórios de alta frequência 1,025 ms após o fechamento elétrico do polo A. Isso parece ser devido ao fechamento mecânico do polo A, que corresponde aos valores obtidos nos testes dos disjuntores em campo.

### B. Fechamento Controlado 2

A Fig. 6 mostra o resultado das tentativas de fechamento após os ajustes de tempo descritos acima. Embora o tempo de fechamento tenha melhorado, a corrente de *inrush* aumentou inesperadamente. Mesmo sendo surpreendente, o comportamento está

relacionado a desenergização do transformador, conforme descrito na Seção IV.

### C. Fechamentos Controlados 3 e 4

Outro fechamento foi realizado usando os mesmos parâmetros do fechamento 2. Desta vez, a corrente de *inrush* foi significativamente reduzida para um valor de pico de 160 A (ver Fig. 7a). Para confirmar que os resultados foram consistentes, foi realizado um fechamento final (Fig. 7b). No momento da redação deste texto, não houve mais operações de chaveamento.

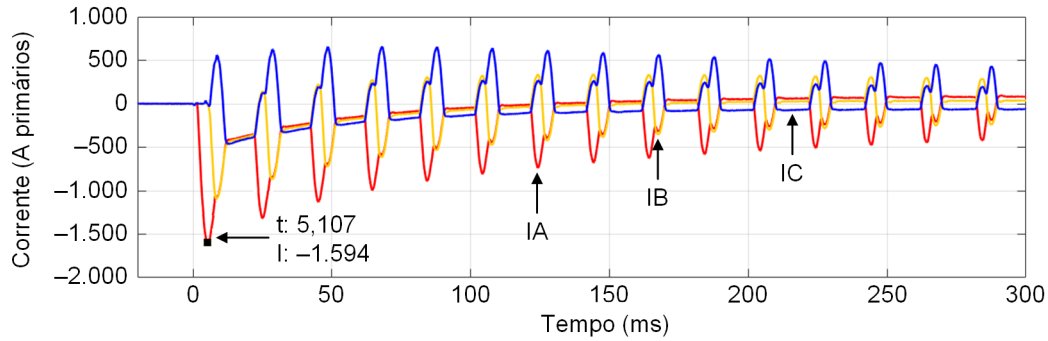


Fig. 6. Fechamento controlado com parâmetros ajustados (sem melhorias)

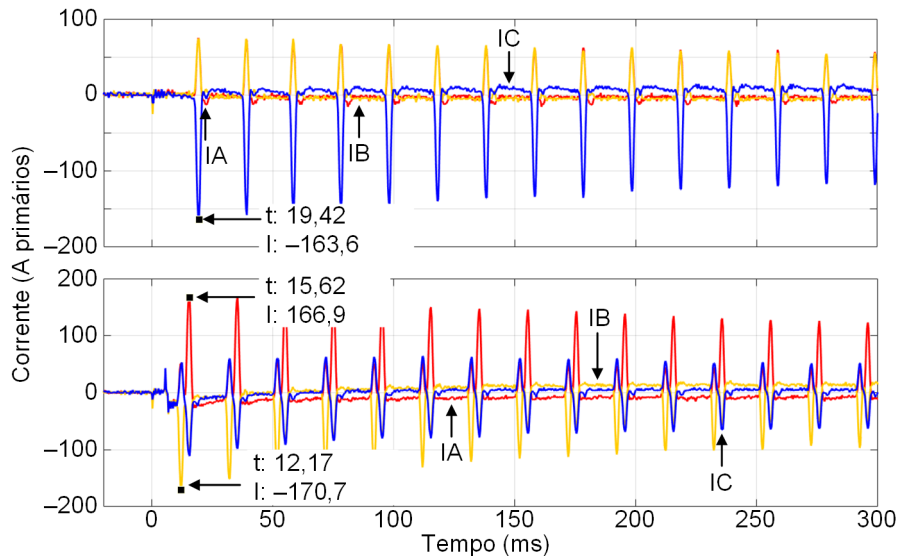


Fig. 7. Tentativa de fechamento controlado com parâmetros do CSD ajustados (melhoria substancial)

#### IV. EFEITO DE ABERTURA CONTROLADA NO DESEMPENHO DE CHAVEAMENTO

Como observado na seção anterior, a segunda tentativa de fechamento controlado (Fig. 6) com parâmetros ajustados resultou em uma corrente de *inrush* de pico de 1,6 kA, ainda maior que a corrente de pico de 1,3 kA na tentativa inicial (Fig. 2). As duas tentativas subsequentes resultaram em reduções substanciais para 160 A (Fig. 7). Explicar esse comportamento requer um exame atento da oscilografia registrada durante a desenergização.

##### A. Abertura Controlada 1

O DFR de alta resolução não gerou oscilografias para o comando de abertura controlada 1 que seguiu ao comando de fechamento controlado 1. No entanto, o CSD foi conectado para medir a tensão do polo A do disjuntor nos lados do transformador e da

linha e gerou a oscilografia mostrada na Fig. 8. Isso permitiu que os parâmetros de abertura do CSD fossem ajustados.

As tensões do polo A começam a divergir em  $t = 7,89$  ms após o cruzamento da tensão pelo zero, indicando uma abertura elétrica do polo A. Um erro de 2,89 ms, comparado aos 5 ms pretendidos, forneceu as informações necessárias para ajustar o CSD. A tensão foi de aproximadamente  $-0,62$  pu em vez do pretendido  $-1$  pu (ou  $+1$  pu).

Um grande transiente de corrente é evidenciado na Fig. 8 no polo C em 12,26 ms, seguido por outro no polo A em 21,01 ms. Normalmente, consideraríamos que essas correntes se deviam à abertura dos polos do disjuntor. No entanto, como estavam tão distantes (16,01 ms) da operação pretendida, eles não puderam ser usados para ajustar os parâmetros de abertura.



Infelizmente, o CSD teve apenas medições de tensão monofásica dos CVTs dos lados da linha e do transformador, o que permitiu o ajuste de apenas um polo. No entanto, dado que os três polos exibiram tempos de operação mecânicos semelhantes, foram ajustados para a mesma duração. O transiente CVT no polo A confirmou a suposição inicial de que o uso de métodos de integração de tensão resultaria em baixo desempenho de chaveamento controlado.

### B. Aberturas Controladas 2 e 3

A abertura controlada 2 ocorreu após o fechamento controlado 2, que ocorreu após a alteração dos parâmetros do CSD. As oscilografias do CSD e do DFR são mostradas na Fig. 9. As tensões na Fig. 9a mostram que o ajuste do polo A funcionou porque a abertura ocorre próxima da máxima tensão negativa ( $-0,98$  pu).

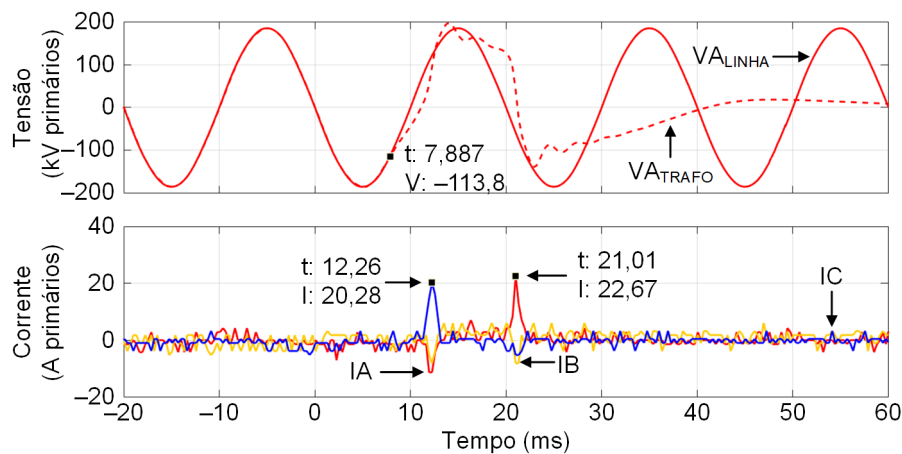


Fig. 8. Correntes e tensões durante abertura controlada sem parâmetros ajustados (64 amostras por ciclo)

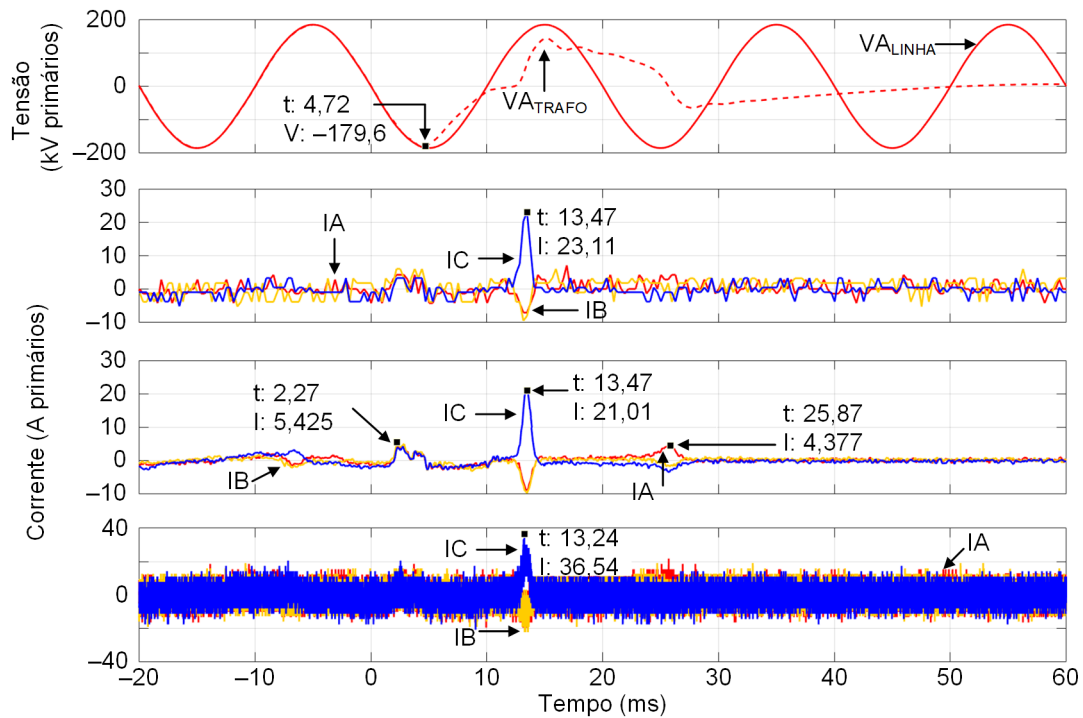


Fig. 9. Abertura controlada ajustada em tensões a 64 amostras por ciclo (a), correntes a 64 amostras por ciclo (b), correntes a 10 kHz (c) e correntes a 1 MHz (d)

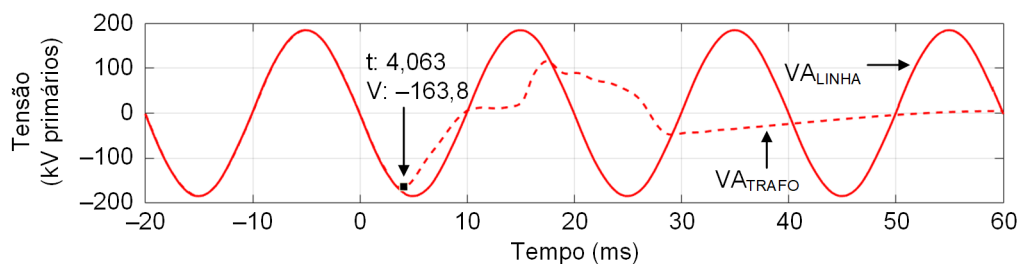


Fig. 10. Tensões (64 amostras por ciclo) para abertura controlada final

As correntes a 10 kHz (Fig. 9c) fornecem informações mais claras do que as outras duas resoluções. A resolução de 64 amostras por ciclo não mostra claramente as três correntes e a oscilografia de 1 MHz tem muito ruído. A corrente em 2,27 ms (Fig. 9c) provavelmente foi causada pela abertura mecânica do polo e a divergência de tensão (Fig. 9a) parece corresponder à abertura elétrica em 4,72 ms, que é aproximadamente o local onde deveria estar (5 ms da Tabela I). As outras correntes estavam significativamente mais distantes do que o esperado e portanto precisavam ser ignoradas.

O desempenho da Abertura Controlada 3 final foi confirmado como próximo das expectativas esperadas (-0,89 pu), conforme mostra a Fig. 10. Desde o comissionamento, não houve mais operações do disjuntor CB52, limitando novas análises.

## V. SUMÁRIO DO DESEMPENHO DO CHAVEAMENTO CONTROLADO

O desempenho do chaveamento controlado está resumido na Tabela II. A corrente de *inrush* foi reduzida de mais de 3 pu para 0,72 pu (pico de 1,3 kA) usando chaveamento controlado sem nenhum ajuste. O ajuste dos parâmetros resultou em uma redução adicional para 0,09 pu (pico de 160 A).

Os seguintes motivos resumem como esse excelente desempenho foi alcançado:

- Os parâmetros de fechamento controlado foram ajustados usando oscilografia de alta resolução. A oscilografia de 1 MHz superou as de 10 kHz e 64 amostras por ciclo, mostrando o fechamento do segundo e

terceiro polos e do tempo de operação elétrica em relação ao tempo de operação mecânica (tempo de pré-reignição).

- A Tabela I foi usada para ajustar o processo de chaveamento controlado, baseando-se nas informações de tensão disponíveis em 64 amostras por ciclo [3].
- O fechamento controlado 2 ainda exibiu uma quantidade substancial de corrente de *inrush*, provavelmente porque a abertura controlada anterior a ele ainda não estava ajustada. Posteriormente, as tentativas de fechamento controladas subsequentes demonstraram uma melhora significativa na quantidade de *inrush*.
- O ajuste da abertura controlada foi realizado usando a única medição de tensão disponível.
- A oscilografia de 10 kHz forneceu uma grande quantidade de informações sobre as correntes durante a abertura. No entanto, essas informações não foram usadas para ajustar o processo de abertura porque os transitórios de correntes estavam longe do tempo de operação pretendido.

Para esta aplicação, nem todas as medições de tensão foram conectadas ao CSD e DFR. Ter todas as medições de tensão conectadas forneceria informações adicionais para permitir um melhor ajuste dos parâmetros do CSD.

Para fazer um uso mais eficaz da oscilografia, seria benéfico intencionalmente revezar o fechamento dos polos. Isso

garantiria que os polos venham a fechar aproximadamente no mesmo ponto na onda e não interferissem no processo de ajuste, como foi o caso na Fig. 4.

TABELA II  
DESEMPENHO GERAL DO CHAVEAMENTO  
CONTROLADO

Evento	Ajuste do CSD	Observação
Fechamento Controlado 1 (Fig. 2–Fig. 5)	Sem Ajustes	1,3 kA pico (0,72 pu), inrush moderado
Abertura Controlada 1 (Fig. 8)	Sem Ajustes	Interrupção na tensão = -0,62 pu
Fechamento Controlado 2 (Fig. 6)	Ajustado	1,6 kA pico (0,89 pu), inrush moderado
Abertura Controlada 2 (Fig. 9)	Ajustado	Interrupção na tensão = -0,98 pu
Fechamento Controlado 3 (Fig. 7a)	Ajustado	160 A pico (0,09 pu), baixo inrush
Abertura Controlada 3 (Fig. 10)	Ajustado	Interrupção na tensão = -0,89 pu
Fechamento Controlado 4 (Fig. 7b)	Ajustado	170 A pico (0,09 pu), baixo inrush

## VI. CONCLUSÃO

Este artigo discute o projeto e o comissionamento para a substituição de um sistema para o controle de ponto de onda de um disjuntor de 220 kV que energiza um transformador de 485 MVA. As falhas do controlador original exigiam que o transformador fosse fechado manualmente, o que resultou em grandes correntes de energização (*inrush*), quedas de energia, subtensões momentâneas e casos de *sympathetic inrush* de transformadores adjacentes que puderam ser ouvidos por muitos minutos após algumas tentativas de fechamento.

Um novo esquema foi projetado e comissionado para controlar os tempos de fechamento e abertura de cada polo do disjuntor. Apenas CVTs estavam disponíveis no sistema de 220 kV e portanto, o novo esquema consistia em pontos fixos nas ondas. Durante o processo de comissionamento, oscilografias de alta resolução (1 MHz, 10 kHz e 64 amostras por ciclo) foram usadas para ajustar os parâmetros do CSD. A oscilografia de 1 MHz forneceu a maior quantidade de informações durante o fechamento controlado. Apesar do ajuste, o registro inicial da energização do transformador demonstrou um aumento na corrente de *inrush*, seguido de uma redução para eventos subsequentes. Alguns comportamentos inesperados nas correntes durante a abertura não puderam ser explicados.

A análise dos registros de eventos após o comissionamento explicou o aumento inicial na corrente de *inrush*, apesar dos ajustes dos parâmetros do controlador. Tanto a abertura quanto o fechamento controlado funcionaram para reduzir significativamente a corrente de *inrush* com base na estratégia de [3].

O ajuste fino dos parâmetros do CSD, observando os registros de oscilografias, reduziu substancialmente as correntes de *inrush* de mais de 3 pu para 0,1 pu. Isso demonstra que um adequado desempenho de chaveamento controlado pode ser obtido combinando os processos de abertura e fechamento controlados e ajustando os parâmetros usando oscilografias de alta resolução sem o uso de técnicas de integração de tensão.

## VII. REFERÊNCIAS

- [1] J. H. Brunke, “Elimination of Transient Inrush Currents When Energizing Unloaded Power Transformers,” Doctoral dissertation No. 12791, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, 1998.

- [2] CIGRE Study Committee A3, “Guidelines and Best Practices for the Commissioning and Operation of Controlled Switching Projects,” CIGRE, February 2019.
- [3] D. Goldsworthy, T. Roseburg, D. Tziouvaras, and J. Pope, “Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Application Examples and Benefits,” proceedings of the 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, April 2008.
- [4] G. Benmouyal, N. Fischer, D. Taylor, M. Talbott-Williams, and R. Chowdhury, “A Unified Approach to Controlled Switching of Power Equipment,” proceedings of the 44th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2017.