



## GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

### ENERGIZAÇÃO SINCRONIZADA DOS TRANSFORMADORES CONVERSORES DO BIPOLO 1 NA SE COLETORA PORTO VELHO – INFLUÊNCIA DO ENROLAMENTO SECUNDÁRIO CONECTADO EM DELTA NAS CORRENTES DE INRUSH

JOÃO PAULO FERNANDES LIMA(1); FILIPE RODRIGUES LOPES(1)  
ELETROBRAS ELETRONORTE(1)

#### RESUMO

Os transformadores conversores do Bipolo 1 da SE Coletora Porto Velho são constituídos por unidades monofásicas, tendo dois enrolamentos secundários, sendo um deles conectado em delta. A presença desse enrolamento conectado em delta faz com que, durante o processo de energização do equipamento, a segunda e a terceira fases sejam fechadas ao mesmo tempo quando do fechamento da segunda fase. Em função disso, o relé sincronizador poderá enfrentar dificuldades para realizar o fechamento controlado da terceira fase. Esse fenômeno é demonstrado por meio da análise de um evento real de energização, bem como por simulações no programa ATP.

#### PALAVRAS-CHAVE

Transformador conversor, energização, sincronização, delta.

#### 1.0 INTRODUÇÃO

A SE Coletora Porto Velho é o terminal emissor do Elo CC do Rio Madeira. Conectadas a esta instalação estão as UHE Santo Antônio e Jirau, por meio de linhas de transmissão curtas em 500 kV. Diante dessa configuração, a Eletronorte adotou um relé sincronizador para os transformadores conversores do Bipolo 1, que consideram o fluxo remanescente no núcleo do transformador para o cálculo do instante ótimo de fechamento das fases.

Na maioria dos eventos de energização, o relé sincronizador possui bom desempenho, minimizando as correntes de *inrush* dos transformadores conversores. Porém, em algumas situações, a operação da instalação tem observado energizações de transformadores com corrente de *inrush* elevadas, o que motivou a investigação do fenômeno e a apresentação desse trabalho.

#### 2.0 DESCRIÇÃO DO FENÔMENO

Os transformadores conversores do Bipolo 1 da SE Coletora Porto Velho são constituídos por três unidades monofásicas, possuindo três enrolamentos, sendo um primário conectado em estrela, um secundário conectado em estrela e um secundário conectado em delta. Cada enrolamento secundário se conecta a uma ponte de 6 pulsos do conversor retificador do respectivo polo, sendo este um retificador de 12 pulsos, conforme mostra a Figura 1(a). As ligações dos enrolamentos em estrela ou delta são realizadas externamente às unidades monofásicas.

Cada uma das três unidades monofásicas do transformador conversor possui o seu próprio núcleo ferromagnético, o que poderia sugerir que não existe acoplamento eletromagnético entre essas unidades. Porém, isso não é verdade, tendo em vista que os enrolamentos secundários conectados externamente em delta proporcionam um acoplamento elétrico entre as três unidades monofásicas, doravante referenciadas simplesmente como “fases”. A Figura 1(b) apresenta o diagrama esquemático que representa as ligações do transformador conversor. Por simplicidade, o enrolamento secundário em estrela foi omitido, uma vez que esse enrolamento não exerce influência durante a energização do transformador conversor.

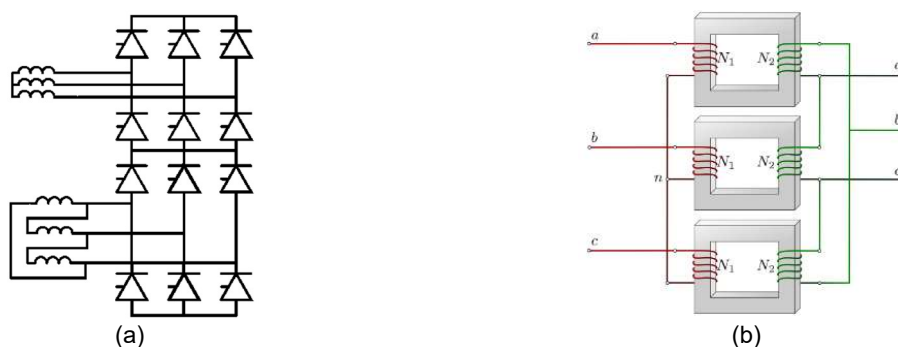


FIGURA 1 – (a) Representação da conexão dos dois enrolamentos secundários no conversor retificador. (b) Diagrama esquemático simplificado das ligações do transformador conversor. Enrolamento secundário ligado em estrela omitido por simplicidade.

Em função desse acoplamento proporcionado pela ligação em delta, o fechamento de cada fase exerce influência sobre as demais fases durante as manobras de energização do transformador conversor. Para melhor entendimento de como ocorre essa influência, considere-se, por exemplo, a seguinte sequência de fechamento das fases do transformador conversor:

- Fase A – primeira a fechar;
- Fase C – segunda a fechar;
- Fase B – última a fechar.

A Figura 2 apresenta a distribuição das tensões no transformador, no instante posterior ao fechamento da fase A (primeira a fechar) e anterior ao fechamento das demais fases. Por convenção, as tensões primárias são designadas com índice maiúsculo e as respectivas tensões secundárias com índice minúsculo. Durante a energização, a razão entre as tensões  $V_A / V_a$  é dada aproximadamente pela relação de transformação do transformador conversor.

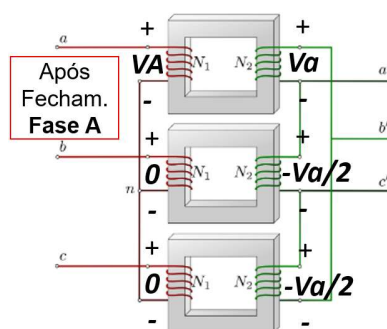


FIGURA 2 – Distribuição das tensões após o fechamento da primeira fase

Conforme a Figura 2, se a tensão induzida no enrolamento secundário da fase A for igual a " $V_a$ ", a tensão nos enrolamentos secundários das fases B e C serão ambas iguais a " $-V_a/2$ ", tendo em vista que a soma das tensões tem que ser zero em função do fechamento em delta. Portanto, o fechamento da primeira fase acarreta o aparecimento de tensões nas demais fases. Consequentemente, o fechamento da primeira fase ocasionará variações nos fluxos magnéticos das três fases. Esse efeito é previamente considerado pelo relé sincronizador, o qual determina o instante de fechamento da segunda fase levando em conta o efeito da energização prévia da primeira fase.

Conforme a sequência pré-estabelecida acima, a segunda fase a fechar é a fase C. A Figura 3 apresenta a distribuição das tensões no transformador, no instante posterior ao fechamento das fases A (primeira a fechar) e C (segunda a fechar) e anterior ao fechamento da fase B.

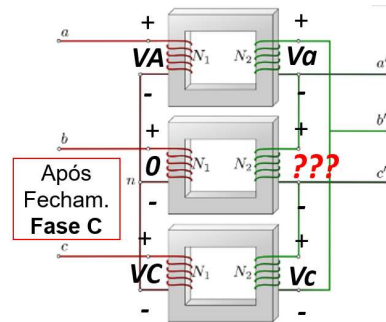


FIGURA 3 – Distribuição das tensões após o fechamento da primeira e segunda fases

Após o fechamento das fases A e C, as tensões secundárias serão respectivamente iguais a  $V_a$  e  $V_c$ . O valor da tensão secundária da fase B, designada como “??” na Figura 3, pode ser obtido da seguinte maneira, tendo em vista que a soma das tensões é igual a zero em função do fechamento em delta:

$$V_a + V_b + V_c = 0$$

$$V_b = -(V_a + V_c)$$

Considerando a magnitude das tensões  $V_a$  e  $V_c$  igual a “V” e os ângulos de  $V_a$  e  $V_c$  respectivamente iguais a 0 graus e 120 graus (sequência ABC), a tensão  $V_b$  será igual a:

$$V_b = -(V < 0 + V < 120) = V < -120^\circ$$

Portanto, após o fechamento das duas primeiras fases, é estabelecida no enrolamento secundário da terceira fase (que ainda não foi fechada) uma tensão de igual magnitude e 120 graus defasada em relação às demais fases. Essa tensão é a própria tensão da fase B que ainda não foi fechada. Dessa forma, quando ocorrer o fechamento da terceira fase (fase B), praticamente não haverá alteração de tensão nessa fase, tendo em vista que a mesma tensão já havia sido estabelecida logo após o fechamento da segunda fase (fase C), em função do acoplamento proporcionado pelo fechamento em delta.

Portanto, sob o aspecto elétrico, tudo se passa como se a segunda e a terceira fases fossem fechadas “virtualmente” ao mesmo tempo quando do fechamento da segunda fase. Esse efeito, decorrente do tipo de conexão do transformador, faz com que a corrente de *inrush* para terceira fase a fechar seja diretamente influenciado pelos fluxos residuais e pelos instantes de fechamento das duas primeiras fases, sendo pouco ou nada influenciado pelo instante de fechamento da terceira fase.

Os diversos aspectos descritos acima podem ser visualizados com o auxílio da Figura 4, a qual apresenta o registro oscilográfico da energização do transformador conversor da SE Coletora no dia 27.12.2019. O primeiro campo mostra as tensões primárias do transformador conversor (medidas no lado de 500 kV). O segundo campo apresenta os fluxos magnéticos (em valores por unidade) calculados por meio da integração das tensões primárias. O terceiro campo contempla os instantes de fechamento de cada uma das três fases do transformador.

Conforme a Figura 4, o fechamento da primeira fase (fase A) provoca o aparecimento de tensões com polaridade oposta e metade da magnitude nas demais fases que ainda não foram fechadas. Essa distribuição de tensões é decorrente da configuração do transformador com enrolamento secundário conectado em delta, conforme apresentado na Figura 2. Adicionalmente, o fechamento da primeira fase provoca alteração de fluxo nas fases B e C que ainda não foram fechadas.

Na sequência, ocorre o fechamento da segunda fase (fase C). Observa-se que, neste instante, surge na fase B (que ainda não foi fechada) uma tensão de igual magnitude e 120 graus defasada em relação às demais fases, havendo inicialmente um sutil transitório decorrente da manobra. Esse efeito também é decorrente da presença do enrolamento secundário conectado em delta, conforme explicação apresentada anteriormente com o auxílio da Figura 3 e das equações subsequentes à essa Figura. Portanto, o fechamento da segunda fase e da terceira fase ocorrem simultaneamente no instante de tempo referente ao fechamento da segunda fase. Nota-se também que o fechamento da segunda fase (fase C) estabelece mudanças nas derivadas dos fluxos da segunda fase e também da fase que ainda não foi fechada (fase B).

Por fim, ocorre o fechamento da terceira fase (fase B), o qual não provoca perturbação perceptível nas variáveis envolvidas, ou seja, não provoca variação brusca (descontinuidade) na tensão e não provoca mudança na derivada

do fluxo da terceira fase. Tanto a tensão quanto o fluxo da terceira fase (fase B) permanecem seguindo a mesma tendência estabelecida após o fechamento da segunda fase (fase C). Por outro lado, tanto o fechamento da primeira fase (fase A) quanto o fechamento da segunda fase (fase C) acarretam alterações nas derivadas dos fluxos, conforme mostra a Figura 4.

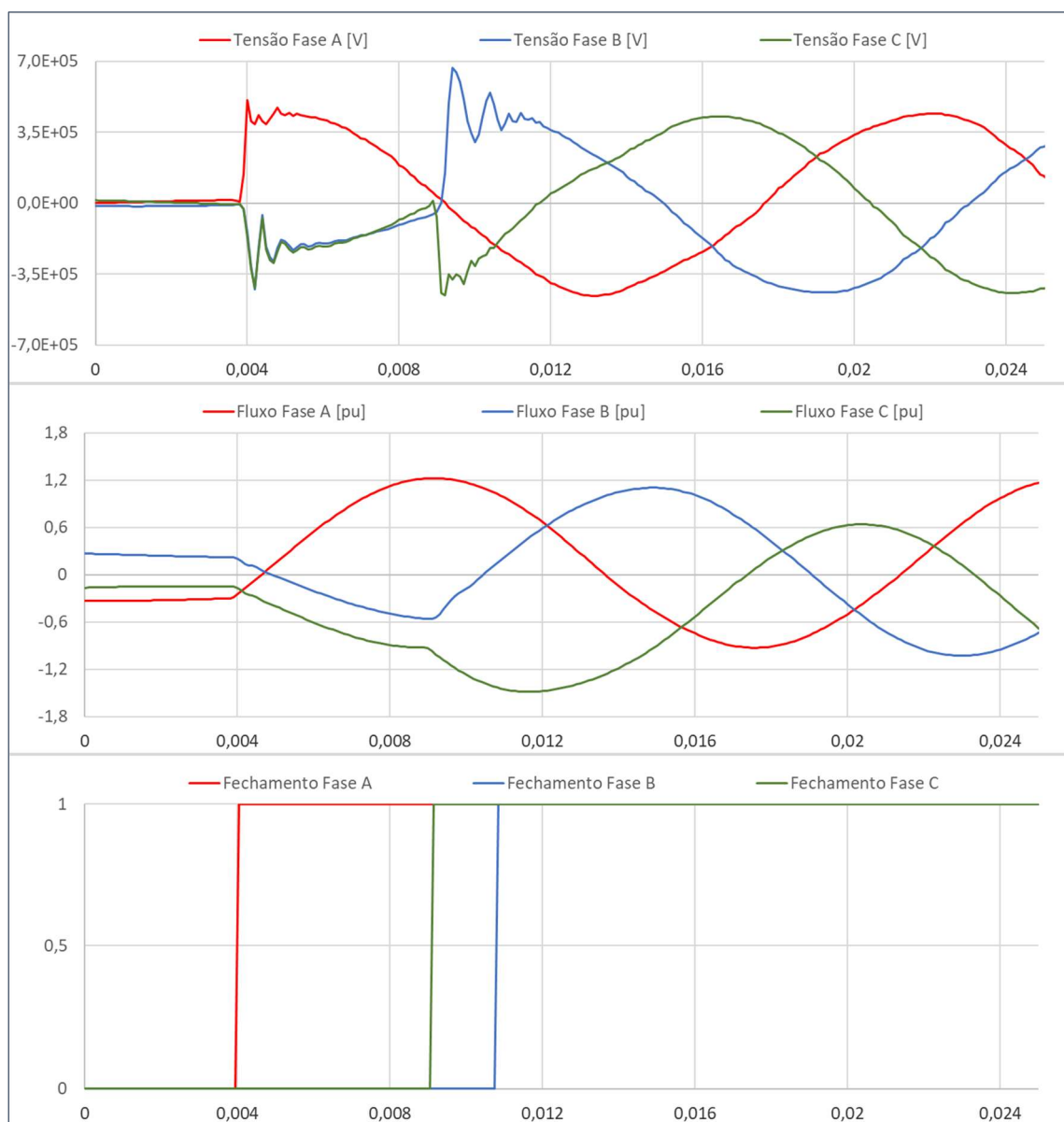


FIGURA 4 – Tensões e fluxos no transformador conversor – energização do dia 27.12.2019

Constata-se, portanto, que o instante de fechamento da terceira fase parece ter pouca ou nenhuma influência sobre a energização, sendo o resultado da energização para terceira fase diretamente influenciado pelos fluxos residuais iniciais e pelos instantes de fechamento das duas primeiras fases, não sendo impactado pelo instante de fechamento da terceira fase.

Consequentemente, sob determinadas condições, o relé sincronizador poderá enfrentar dificuldades para realizar o fechamento perfeitamente controlado da terceira fase, podendo surgir uma corrente de *inrush* elevada nesses casos. A próxima seção apresentará uma energização real com essas características.

### 3.0 ANÁLISE DA ENERGIZAÇÃO DO DIA 23.01.2020

Essa seção apresenta a análise do evento de energização do transformador conversor da SE Coletora referente ao dia 23.01.2020, na qual ocorreu uma corrente de *inrush* da ordem de 2400 Apico para a fase B. A Figura 5 mostra o

registro oscilográfico desse evento, no qual os fluxos residuais das fases A, B e C eram respectivamente -18%, -20% e +18%.

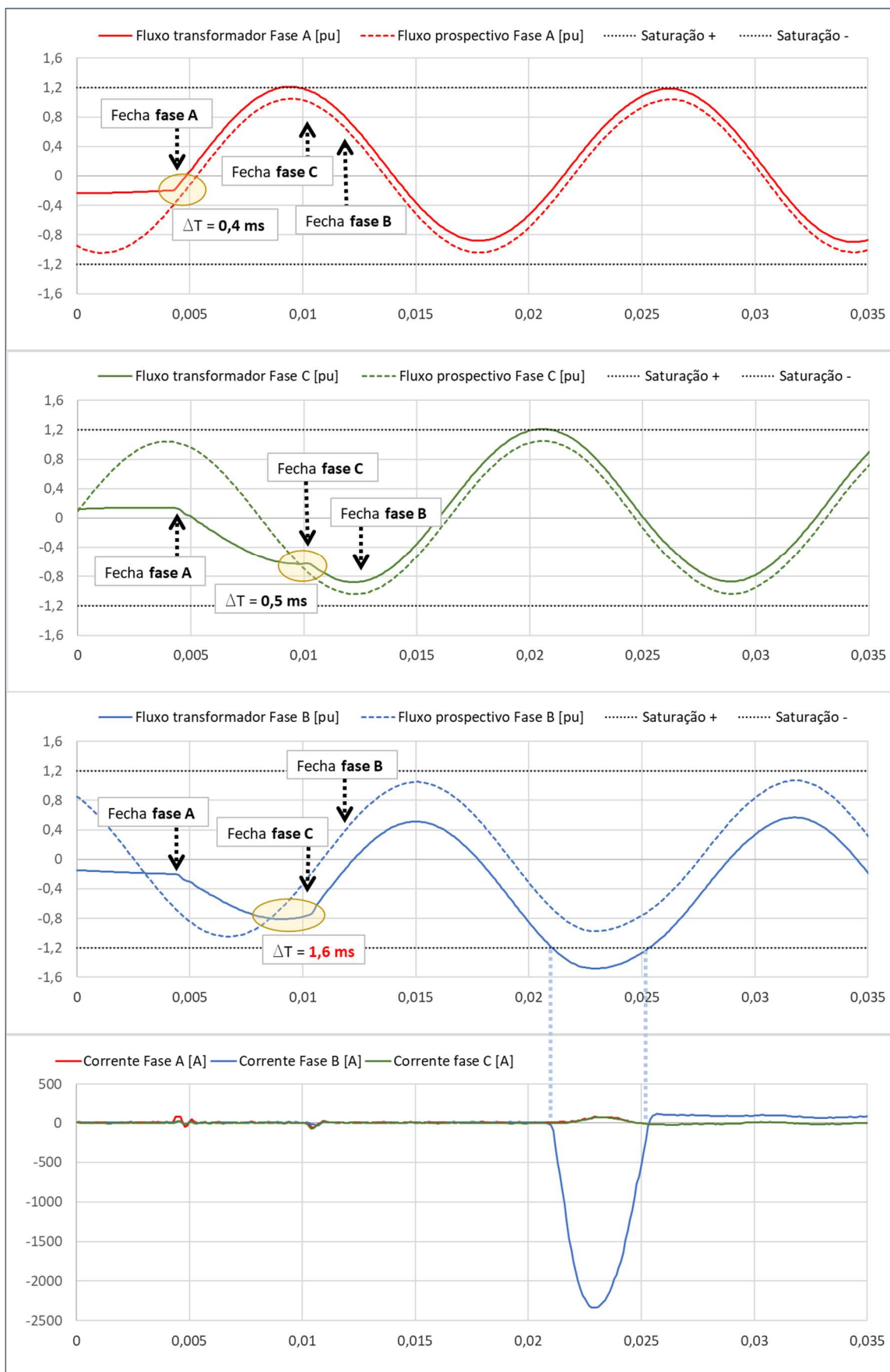


FIGURA 5 – Registro oscilográfico da energização do transformador conversor – dia 23.01.2020

A Figura 5 apresenta, para cada uma das fases, as seguintes grandezas:

- Fluxos do transformador, calculados pela integral das tensões primárias (lado de 500 kV);
- Fluxos prospectivos, calculados pela integral das tensões no barramento de 500 kV;
- Indicação dos instantes de fechamento das fases A, B e C do transformador conversor;
- Correntes de *inrush* do transformador, medidas no lado de 500 kV, onde foi feita a manobra de energização.

Para que a manobra sincronizada seja bem sucedida, ou seja, com mínima corrente de *inrush*, o fluxo do transformador, para cada fase, deve ficar o mais próximo possível do respectivo fluxo prospectivo. Por outro lado, um grande desencontro entre esses fluxos poderá acarretar saturação do transformador e elevada corrente de *inrush* como consequência.

No evento de energização em questão, a sequência de fechamento das fases foi a seguinte: A / C / B. No fechamento da fase A (primeira a fechar), o erro no instante de fechamento em relação ao instante ótimo (diferença de tempo entre o fluxo do transformador e o fluxo prospectivo) foi de 0,4 ms, conforme mostra a Figura 5. Na sequência, ocorreu o fechamento da fase C (segunda a fechar), na qual, o erro no instante de fechamento em relação ao instante ótimo foi de 0,5 ms. Dessa forma, os pequenos erros nos instantes de fechamento para as fases A e C resultaram em corrente de *inrush* desprezível para essas duas fases.

Conforme mostra a Figura 5, o fechamento da terceira fase (fase B) não acarretou alterações de fluxo nessa fase. Existem apenas dois pontos de inflexão na curva de fluxo da fase B, ocasionados pelos fechamentos das fases A e C. Conforme abordado anteriormente, o fechamento da segunda fase (fase C) estabelece o fechamento “virtual” da terceira fase (fase B) no mesmo instante de tempo. Para a condição inicial de fluxos residuais do evento em questão, o fechamento da fase B simultaneamente ao da fase C proporcionou o não cruzamento entre o fluxo prospectivo e o fluxo do transformador na fase B, resultando numa diferença de tempo em relação ao instante ótimo igual a 1,6 ms. Como consequência, ocorreu a saturação da fase B. O fluxo dessa fase atingiu valor da ordem de -1,5 pu e a corrente de *inrush* (pico) na fase B (terceira a fechar) atingiu valor próximo de -2400 A.

Para esse evento, o desempenho do relé sincronizador pode ser considerado satisfatório, tendo em vista que promoveu o fechamento das duas primeiras fases com erros de tempo bastante reduzidos. Porém, como o fechamento da segunda e terceira fases ocorrem no mesmo instante de tempo, não foi possível promover o encontro entre o fluxo do transformador e o fluxo prospectivo para a terceira fase a fechar (fase B).

#### 4.0 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

As simulações computacionais foram realizadas utilizando o programa Alternative Transients Program – ATP. A rede de simulação considerada inclui o modelo do relé sincronizador e o disjuntor associado, bem como o modelo do transformador conversor considerando seus fluxos residuais.

Inicialmente, foi realizada uma simulação no programa ATP buscando reproduzir as condições de energização observadas no evento do dia 23.01.2020 (evento apresentado na seção 3), no qual os fluxos residuais do transformador conversor eram os seguintes: -18% (A), -20% (B) e +18% (C). A sequência de fechamento adotada na simulação foi a mesma do evento real: A / C / B.

A simulação foi feita considerando a premissa de manobra ideal, ou seja, disjuntor e relé sincronizador perfeitamente calibrados, situação essa que não ocorre no mundo real. Para realizar os fechamentos das três fases nos instantes ótimos, o modelo do sincronizador foi parametrizado com desvios e tolerâncias nulas. Dessa forma, o modelo do relé sincronizador busca determinar os instantes de fechamento que resultam no casamento perfeito entre os fluxos do transformador e seus respectivos fluxos prospectivos.

A Figura 6 apresenta o resultado dessa simulação. São apresentadas as curvas de fluxo do transformador (curvas vermelhas) e as curvas de fluxo prospectivo (curvas verdes). Os instantes de fechamento de cada fase também são indicados na Figura.

Observa-se que o fechamento da primeira fase (fase A) e o fechamento da segunda fase (fase C) ocorrem nos respectivos pontos ótimos, resultando em um “sincronismo perfeito”. Porém, o mesmo não ocorre para a terceira fase a fechar (fase B), na qual ocorre um descasamento entre o fluxo do transformador e o respectivo fluxo prospectivo.

Para realizar o sincronismo perfeito de cada uma das fases, é necessário realizar o fechamento de cada uma em instantes de tempo específicos e diferentes. Porém, conforme abordado anteriormente, o fechamento da segunda fase (fase C) provoca o fechamento “virtual” da terceira fase (fase B) no mesmo instante de tempo, em função do

tipo de conexão do transformador. Como consequência, o instante de fechamento da fase B ocorre fora do instante ideal, resultando no descasamento entre o fluxo do transformador e o fluxo prospectivo para essa fase. Observa-se esse resultado mesmo considerando a modelagem parametrizada para realizar o fechamento ótimo das três fases.

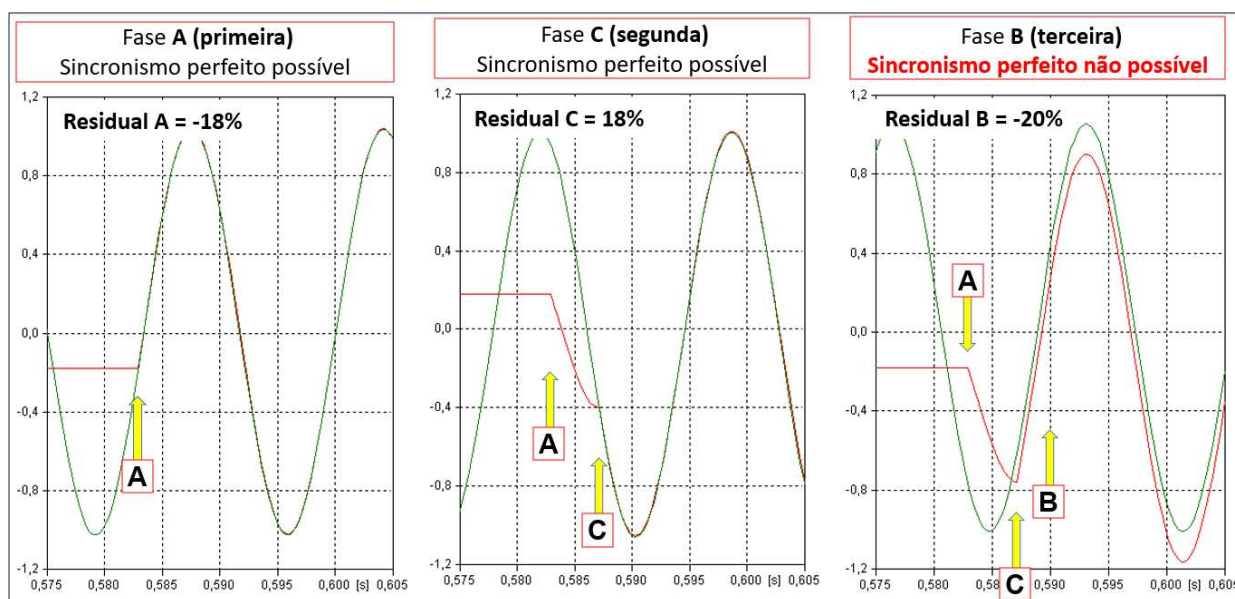


FIGURA 6 – Fluxos do transformador (curva vermelha) e fluxos prospectivos (curva verde) – modelos parametrizados visando o sincronismo perfeito das três fases

## 5.0 CONCLUSÃO

Os transformadores conversores da SE Coletora são constituídos por três unidades monofásicas, tendo dois enrolamentos secundários, sendo um deles conectado em delta. A presença desse enrolamento conectado em delta faz com que a segunda e a terceira fases sejam fechadas “virtualmente” ao mesmo tempo quando do fechamento da segunda fase. Como consequência, a corrente de *inrush* para a terceira fase a fechar é diretamente influenciado pelos fluxos residuais e pelos instantes de fechamento das duas primeiras fases, sendo pouco ou nada influenciado pelo instante de fechamento da terceira fase. Em função disso, o relé sincronizador poderá enfrentar dificuldades para realizar o fechamento perfeitamente controlado da terceira fase, podendo surgir uma corrente de *inrush* elevada em alguns casos, a depender principalmente da combinação dos fluxos residuais iniciais do transformador. Um evento real de energização com essas características foi apresentado.

A simulação no ATP demonstrou o mesmo fenômeno observado no evento real de energização, ou seja, o fechamento da segunda e terceira fases ocorrem no mesmo instante, ocasionando dificuldades no fechamento otimizado da terceira fase.

Portanto, uma elevada corrente de *inrush* na terceira fase a fechar poderá ocorrer em determinadas situações, mesmo havendo um desempenho satisfatório do relé sincronizador. Vale ressaltar que esse fenômeno não estará presente em bancos de transformadores monofásicos que não possuam enrolamentos conectados externamente em delta.



Esse Informe Técnico visa apenas a caracterização do fenômeno. As possíveis medidas mitigatórias para evitar ou minimizar esse problema estão sendo investigadas, sendo objeto de trabalhos futuros.

## 6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) DOMMEL, H., “Electromagnetic Transients Program-Rule Book,” *Oregon, USA*, 1984.
- (2) CIGRE Working Group C4.307, “Transformer energization in power systems: a study guide,” CIGRE, Tech. Bro. TB-568, Feb. 2014.
- (3) DOMMEL, H. W., Electromagnetic Transients Program (EMTP Theory Book), OR, Portland: Bonneville Power Administration, 1986.
- (4) HEVIA, O. P., “HYSTERESIS HEVIA: a new routine to generate input data for inductors with hysteresis”, *EEUG News*, vol. 6, no. 1–2, February–May 2000.
- (5) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS, “Submódulo 23.3 - Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos”, 2016. [Online <http://www.ons.org.br>].



## 7.0 DADOS BIOGRÁFICOS

	<p><b>João Paulo Fernandes Lima</b>, natural de Goiânia-GO, graduou-se em engenharia elétrica em 2003 pela Universidade Federal de Goiás, tendo recebido o título de mestre pela mesma instituição em 2005. É engenheiro de operação da Eletrobras Eletronorte desde 2011, com atuação na área de estudos elétricos da operação de sistemas. Atualmente, desenvolve estudos operacionais e para os sistemas elétricos da empresa, contemplando as análises de fluxo de potência, estabilidade eletromecânica, curto-circuito e transitórios eletromagnéticos, com particular interesse em estudos de energização de transformadores.</p>
	<p><b>Filipe Rodrigues Lopes</b>, Engenheiro Eletricista desde 2006, graduado pela Universidade Federal de Juiz de Fora. Trabalha na Eletrobras Eletronorte desenvolvendo estudos elétricos de operação da transmissão e de desempenho de sistemas elétricos de potência desde 2007. Experiências com estudos de fluxo de potência, transitórios eletromagnéticos e transitórios eletromecânicos, modelagem computacional e análise desempenho da operação de sistemas CA e HVDC.</p>