



**Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS**

**A IMPORTÂNCIA ATUAL DE ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS PARA DEFINIÇÃO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES CONTRA SOBRETENSÕES E AS APLICAÇÕES RECENTES COM A INSTALAÇÃO DE SUPRESSORES DE SURTO**

**Nelson Clodoaldo de Jesus\*; João Roberto Cogo; Luiz Marlus Duarte**

**Luis Fernando Ribeiro Ferreira; Éverson Júnior de Mendonça; Leandro Martins Fernandes**

**GSi - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA**

**RESUMO**

Este Informe Técnico tem como objetivo apresentar uma reflexão quanto à necessidade de aplicação de supressores de surto como proteção de transformadores devido a eventos transitórios em manobras de disjuntores. Após uma série histórica de queimas de transformadores no Brasil e posterior identificação da causa sistêmica, foram estabelecidos critérios de projeto de forma a mitigar tais perturbações, sendo a interação transitória associada aos transformadores um tema altamente relevante e desafiador. Serão apresentados os principais conceitos relacionados às sobretensões de manobras, tipos, formas de mitigação, resultados de medições, simulações e tendências de aplicação de supressores de surto contra eventuais sobretensões transitórias.

**PALAVRAS-CHAVE**

Transitórios Eletromagnéticos, Sobretensões de Manobras, Transformadores, Simulações, Supressores de Surto.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Disjuntores a vácuo apresentam características e capacidades de extinção de arco que resultam em sua viabilidade e eficiência para sistemas elétricos de média tensão. Entretanto, a comutação destes dispositivos durante a realização de manobras pode resultar em sobretensões transitórias e, por consequência, as solicitações impostas aos enrolamentos dos transformadores aumentam os riscos de falhas nesses equipamentos. Serão apresentados os principais conceitos relacionados às sobretensões de manobras durante a operação de disjuntores a vácuo, os quais são amplamente utilizados em diversas aplicações. Atualmente mais de 80% das novas instalações em média tensão empregam disjuntores com meio de extinção do arco à vácuo (1). Sobretensões associadas às manobras com disjuntores têm sido observadas por muitos anos na operação de sistemas elétricos. Recentemente, diversos problemas operacionais estão sendo atribuídos a um número significativo de falhas de transformadores envolvendo manobras de chaveamentos de disjuntores no lado do circuito primário (2),(3). De um modo geral, estas falhas de transformadores apresentam parâmetros e características relativamente comuns, tais como os fatores de aplicação de disjuntores a vácuo ou SF6, cabos curtos ou conexão por barramentos e aplicações envolvendo principalmente tensões de operação em 34,5 kV e transformadores com meio isolante sólido (a seco).

Entre 2012 e 2013 ocorreram no Brasil diversas queimas consecutivas de transformadores. Este foi um marco nacional em termos de aplicação de transformadores a seco em indústrias do ramo de produção de celulose, conforme relatado em (4),(5). Desde então, tem sido recomendada a realização de estudos, análises e simulações de transitórios eletromagnéticos envolvendo manobras de disjuntores para a definição e instalação de protetores de surto. Diferentes tipos de sobretensões podem ocorrer em sistemas elétricos, sendo as

relacionadas às manobras de disjuntores o objetivo principal deste trabalho. Será apresentado como um exemplo ilustrativo da importância atual deste tipo de estudo os resultados da análise do desempenho de um sistema elétrico industrial em 34,5 kV, sendo modelado por meio da utilização do Programa de Transitórios Eletromagnéticos ATP.

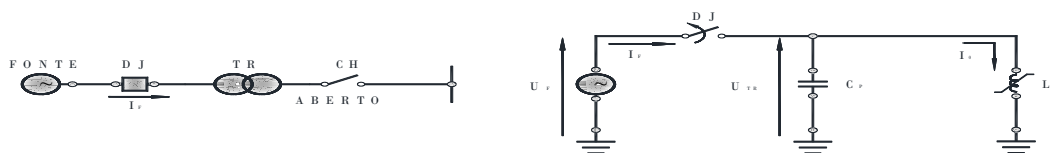
As manobras de chaveamentos de disjuntores podem ser divididas em manobras de circuitos capacitivos (cabos, linhas aéreas, bancos de capacitores, filtros de harmônicos), indutivos (transformadores em vazio, motores, reatores, fornos a arco, sistemas de tração elétrica, bobinas de supressão de arco “Peterson”) e circuitos controlados (geradores e inversores) (1). Foram realizadas simulações de manobras de energização e desenergização, com e sem supressão das correntes (Chopping), analisando-se também eventos de altas frequências para definição do grau de proteção e configuração necessária à redução das sobretensões transitórias. Este tipo de análise é recomendada para sistemas elétricos que possuam transformadores com meio isolante sólido (seco), especialmente com tensões de operação em 34,5 kV, sendo necessária, nestes casos, uma verificação mais detalhada quanto à instalação de supressores de surto, conforme relatado posteriormente.

## 2.0 - SOBRETENSÕES RESULTANTES DE MANOBRAS DE DISJUNTORES

As sobretensões também podem ser classificadas em função de sua forma de onda e duração. No caso desta análise, serão apresentadas sobretensões de manobras relacionadas aos chaveamentos de disjuntores à vácuo em circuitos indutivos, como nas manobras de disjuntores associados a transformadores em vazio (1),(2),(3),(5). Apresentam-se, a seguir, os principais tipos e características de eventos envolvendo as sobretensões de manobras, considerando condições de desenergização e energização de disjuntores a vácuo na alimentação de transformadores.

### 2.1 Supressão de Corrente (“Chopping”)

Em um sistema ideal, os disjuntores interrompem a corrente exatamente na passagem pelo zero natural. Entretanto, quando uma corrente relativamente pequena for interrompida por um disjuntor, a ação dos dispositivos internos de supressão de arco pode fazer com que a corrente seja levada a zero abrupta e prematuramente antes de seu zero normal. Denominado de corte de corrente (“Current Chopping”), este fenômeno é uma forma de supressão da corrente que pode dar origem a sobretensões em virtude da energia magnética armazenada no circuito equivalente, conforme mostra a Figura 1. Esta condição pode ocorrer naturalmente quando a corrente de um reator ou transformador (corrente de magnetização) é interrompida pelo disjuntor. Considerando a corrente  $I_C$  como o valor no instante do corte, a energia magnética armazenada é equivalente a  $(\frac{1}{2} \cdot L_M \cdot I_C^2)$ . Esta energia armazenada é então transferida como forma de energia eletrostática na capacitância, dada por  $(\frac{1}{2} \cdot C_P \cdot U_{TR}^2)$ .



Z:\P\projetos\GSI-2019\ART\ART097-19 - ARTIGO SNPT EE\ART097-19-02R0.dwg

FIGURA 1 - Circuito Equivalente Durante a Condição de Desenergização de Transformador em Vazio

Para o caso monofásico, tem-se a seguinte tensão máxima resultante:

$$U_{TR} = Z_0 \cdot I_0 = \sqrt{\frac{L_M}{C_P}} \cdot I_0 \quad (1)$$

Portanto, a tensão de pico no capacitor, ou a aplicada aos enrolamentos do transformador, é função do produto da corrente instantânea cortada ( $I_0=I_C$ ) pelo valor da impedância de surto do transformador ( $Z_0$ ). Um fato notável é que a tensão máxima resultante ( $U_{TR}$ ) independe da tensão de operação do sistema. A Figura 2 a seguir mostra o conceito de supressão instantânea da corrente de operação (corrente de corte ou corrente cortada) e o respectivo efeito das sobretensões resultantes. Destaca-se que em termos práticos, as próprias perdas a vazio do transformador (histerese e “foucault”) contribuem para um maior ou menor amortecimento das sobretensões.

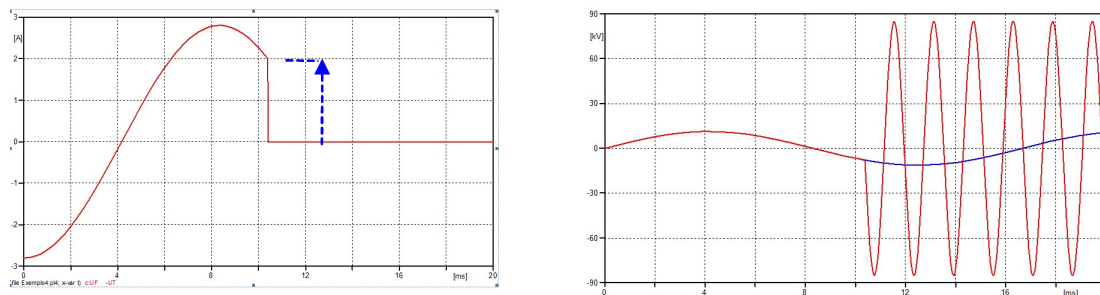


FIGURA 2 - Supressão de Corrente e Sobretensões Durante Manobra de Desligamento.

## 2.2 Múltiplas Reignições ("Restrike")

Na realização de manobras de chaveamentos de pequenas correntes indutivas podem ser geradas sobretensões elevadas se ocorrer a reignição do arco após a primeira interrupção da corrente e se o dispositivo de manobra for capaz de interromper correntes transitórias de altas frequências, as quais se estabelecem após as ocorrências de reignições. Este processo sempre inclui uma relação transitória entre as capacitâncias do sistema e do lado da carga. Se este processo ocorrer repetidamente, será definido como múltiplas reignições. As amplitudes tendem a aumentar a cada reignição e, com o escalonamento de tensão, severas sobretensões elevam o risco da operação e dos equipamentos. A Figura 3 - (a) esclarece o comportamento típico das taxas de rigidez dielétrica de disjuntores e as possíveis ocorrências de múltiplas reignições durante o processo de abertura do mesmo.

## 2.3 Supressão de Correntes Induzidas ("Virtual Current Chopping")

Este fenômeno pode ocorrer durante o processo de interrupção de dispositivos de manobras devido à dispersão entre os pólos do sistema trifásico. Este tipo de evento é fortemente dependente dos parâmetros do sistema e mais raro que os demais eventos apresentados anteriormente (1). Durante uma manobra de abertura com aumento das amplitudes das tensões, causadas por reignições, tem-se como resultado sobrecorrentes de altas frequências. Se este evento transitório das correntes estiver acoplado por meio magnético ou eletrostático, devido às indutâncias e capacitâncias parasitas do sistema, têm-se supressões das correntes induzidas nas demais fases. Após a interrupção do primeiro pólo do disjuntor, as correntes nas demais fases, que ainda conduzem as componentes da frequência fundamental, passam a conter também em sua forma de onda, correntes transitórias superpostas. Se o disjuntor interromper uma dessas componentes de alta frequência, estas serão então denominadas de "Virtual Current Chopping". A interrupção dessas correntes com a carga ainda conduzindo a corrente na frequência fundamental tem similaridade ao mesmo efeito da supressão da corrente. Em decorrência deste conceito e devido ao tipo de comportamento, a tensão máxima e a frequência também serão função dos parâmetros L e C do circuito equivalente. Entretanto, comparado com o fenômeno de supressão de corrente, os cortes das correntes induzidas poderão ser maiores. A Figura 3 - (b) a seguir ilustra o conceito deste tipo de fenômeno. A ação de interrupção das correntes em altas frequências, característica típica de disjuntores a vácuo, pode gerar severas sobretensões sequenciais no sistema. Destaca-se que este tipo de evento tem sido pouco explorado na literatura, sendo mais um motivo que corrobora com a necessidade atual da realização de estudos associados a manobras de disjuntores.

## 2.4 Múltiplas Pré-Iguições ("Pré-Strike")

Os eventos descritos anteriormente estavam relacionados diretamente às sobretensões durante manobras de desligamentos. Diferentemente dos demais, este item aborda as sobretensões transitórias para manobras de energização. Durante o processo da manobra de fechamento dos pólos de um disjuntor, o circuito equivalente está quase completo para os instantes antes do toque mecânico final entre os seus contatos. Nestas condições, a tensão imposta pelo sistema força a redução do "gap", criando um aumento da solitação dielétrica ("stress") entre os contatos. Se a tensão entre os pólos superar a característica fria do disjuntor (tensão de ruptura dielétrica), conforme mostra a Figura 3 - (c), pré-ignições do arco elétrico serão estabelecidas, com possibilidade de sobretensões transitórias repetitivas (1),(2),(3),(4).

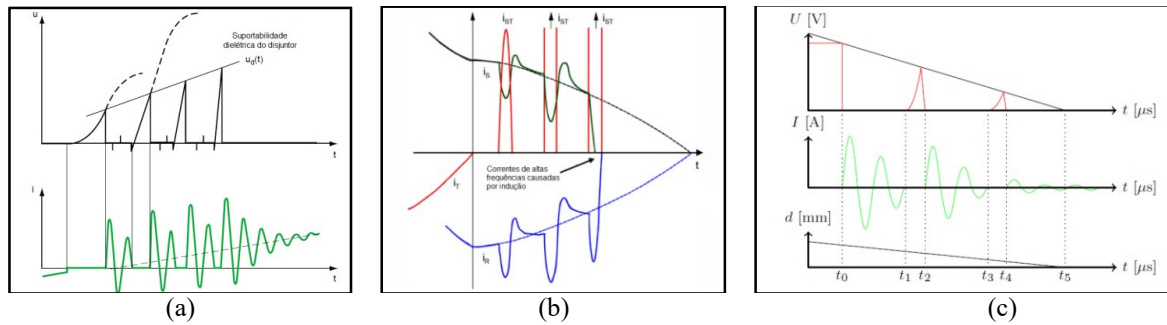


FIGURA 3 - (a) - Múltiplas Reignições ("Restrike").  
FIGURA 3 - (b) - Supressão de Correntes Induzidas ("Virtual Current Chopping").  
FIGURA 3 - (c) - Múltiplas Pré-ignições ("Pré-Strike").

### 3.0 - RESULTADOS DE MEDIÇÕES DE MANOBRAS EM SISTEMAS INDUSTRIAIS

Os resultados apresentados neste item foram obtidos com medições realizadas em campo através de medidores com capacidade de registros de eventos transitórios (1 MHz), instalados nos secundários de TPs. Portanto, apesar de serem considerados como qualitativos, esclarecem e mostram as tendências características de alguns dos tipos de fenômenos relatados (5). A Figura 4 a seguir mostra o resultado de medição das tensões entre fases, obtidas na avaliação do sistema de média tensão em uma instalação industrial, comprovando-se a ocorrência e o comportamento de múltiplas reignições ("Restrike") durante a manobra de abertura do disjuntor.

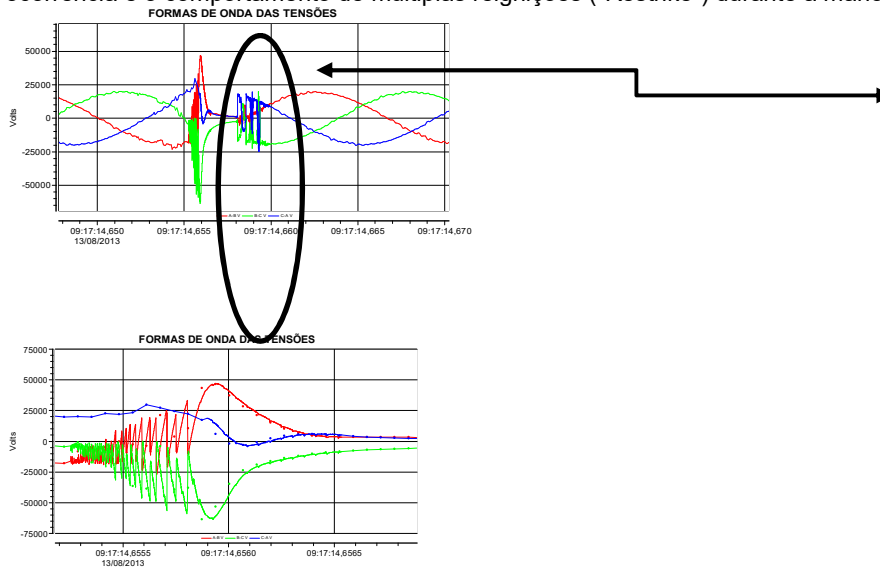


FIGURA 4 - Medição de Sobretensões Devido a Ocorrência de Múltiplas Reignições ("Restrike").

Também com resultados qualitativos, mas, sobretudo, notadamente comprobatórios, a Figura 5 apresenta o tipo de evento que estava ocorrendo durante as manobras de energização de disjuntores a vácuo na alimentação de transformadores, quando as falhas de grande impacto tiveram origem e se manifestaram no referido projeto, com a tomada de decisão de substituição de transformadores em líquido isolante (a óleo) por sistemas de isolamento do tipo sólido (a seco). Os sistemas implantados em indústrias de celulose, com cabos isolados, para distâncias relativamente curtas (inferiores a 80 m), apresentaram causa sistêmica com inúmeras falhas consecutivas nas referidas instalações. A partir desta identificação, com impulsos repetitivos durante as manobras de disjuntores a vácuo, instalados em painéis isolados a gás (SF<sub>6</sub>), foram inicialmente propostas alternativas técnicas envolvendo a aplicação de supressores de surto para a proteção dos transformadores, conforme descrito em (5).

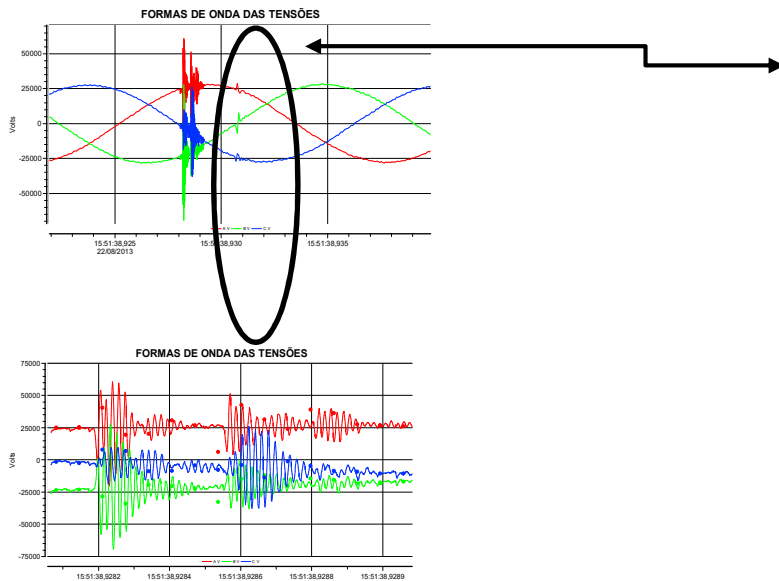
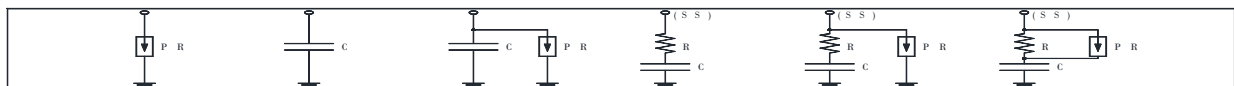


FIGURA 5 - Medição de Sobretensões Devido a Ocorrência de Múltiplas Pré-ignições ("Pre-Strike").

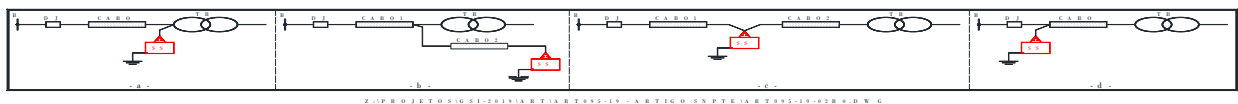
#### 4.0 - PROTEÇÃO CONTRA SOBRETENSÕES

Para a proteção de equipamentos em sistemas elétricos que apresentem riscos de ocorrências de sobretensões devido aos efeitos transitórios, basicamente, de forma tradicional, são normalmente utilizados para-raios (PR), capacitores de surto (CS) e supressores de surto (SS). A Figura 6 ilustra os possíveis tipos de montagens de protetores de surto, sendo, os três últimos exemplos, denominados de supressores de surto. A Figura 7 apresenta os pontos preferenciais para a instalação de supressores contra sobretensões de manobras. Tem-se verificado que na maioria dos casos onde é prudente a inclusão de supressores de surto, a configuração preferencial se refere a do item (a) da Figura 7, ou seja, instalação próxima aos terminais do equipamento a ser protegido.



Z:\P R O J E T O S \G S I - 2 0 1 9 \A R T \A R T 0 9 5 - 1 9 - A R T I G O S N P T E \A R T 0 9 5 - 1 9 - 0 1 R 0 . D W G

FIGURA 6 - Configurações e Tipos de Protetores de Surto.



Z:\P R O J E T O S \G S I - 2 0 1 9 \A R T \A R T 0 9 5 - 1 9 - A R T I G O S N P T E \A R T 0 9 5 - 1 9 - 0 1 R 0 . D W G

FIGURA 7 - Possíveis Locais de Instalação de Supressores de Surto.

Para chaveamentos em circuitos indutivos, onde múltiplas pré-ignições ou reignições podem ocorrer, capacitores puros não são considerados como favoráveis. Supressores de Surto constituídos por circuitos RC formam um caminho de baixa impedância para correntes de altas frequências, desviando os possíveis efeitos transitórios ao equipamento. Deste modo, amortecem ondas viajantes e previnem sua amplificação por reflexões nos cabos que alimentam a carga, reduzindo as solicitações de impulsos repetitivos no sistema de isolamento e possíveis excitações de ressonâncias internas aos enrolamentos dos transformadores, em caso de múltiplas reconduções. Além destes, existem equipamentos comerciais que utilizam varistores em paralelo com o resistor ao invés do conjunto RC, normalmente para tensões inferiores a 34,5 kV. Os capacitores normalmente adotados nestas

aplicações estão na faixa entre 0,1 a 0,5  $\mu\text{F}$ . Para a definição básica do resistor (R) do supressor de surto na proteção de transformadores ou motores, em função da impedância de surto ( $Z_c$ ) dos cabos que alimentam o equipamento a ser protegido, recomenda-se verificar o comportamento e as solicitações impostas, considerando a seguinte faixa:

$$Z_c \leq R \leq 3 Z_c \quad (2)$$

Para eventos de múltiplas reconduções verifica-se a ocorrência de sobretensões de curtíssima duração e elevadas taxas de crescimento das tensões (Very Fast Transient Overvoltage) (2). De acordo com estudos e análises realizadas, observa-se, para manobras de desenergização, que o capacitor de surto (CS) e o supressor de surto (RC) apresentam desempenhos semelhantes, proporcionando amortecimento das sobretensões. Entretanto, para eventos de pré-ignições, o capacitor de surto apresenta desempenho bem inferior ao supressor de surto, composto por um circuito RC. De um modo geral, destaca-se que os para-raios protegem os equipamentos somente frente às altas intensidades como no caso de descargas atmosféricas. Entretanto, não os protegem contra outras sobretensões de manobras, pois os mesmos tem a função de limitar o valor de pico, sendo eficazes na maioria das aplicações, exceto onde as taxas de elevação das sobretensões ( $dv/dt$ ) e a excitação de oscilações ressonantes não ocorrem ou não são críticas (6),(7). Já os capacitores de surto, amplamente empregados em conjunto com para-raios em motores e geradores de grande porte, reduzem as taxas de elevação das sobretensões devido ao aumento da capacitância fase-terra, sendo especialmente aplicados e eficazes para manobras de desligamentos, mesmo com possíveis reignições. A utilização de supressores de surto (RC) reduz as taxas de crescimento das tensões ( $dv/dt$ ), assimetrias (DC offset) e fornecem amortecimento, sendo esta configuração, em conjunto com para-raios, a que vem sendo recomendada e empregada atualmente no Brasil em aplicações para as condições consideradas nesta avaliação (2),(4),(5).

## 5.0 - SIMULAÇÕES DE TRANSITÓRIOS DE MANOBRAS DE DISJUNTORES

Em função das ocorrências de sobretensões transitórias de altas frequências e possíveis impactos no sistema de isolamento de transformadores, são realizadas modelagens e simulações específicas de manobras de disjuntores, incluindo elementos com o objetivo de atenuar tais eventos e, assim, proteger o transformador contra tais sobretensões. Este item apresenta resultados de simulações de manobras de chaveamentos envolvendo a energização e desenergização de disjuntor a vácuo associado ao transformador de um sistema industrial, com potência nominal de 3 MVA em 34,5 kV. A modelagem do sistema foi realizada através do programa de transitórios eletromagnéticos ATP (4). Para tanto, foram representados os dados desde a entrada do sistema até o ponto de conexão ao transformador. Além disso, considerou-se a modelagem detalhada dos cabos e um modelo de disjuntor específico para simulações de pré-ignições ("pre-strike") e reignições ("restrike"), conforme sequência apresentada a seguir. Em função da avaliação dos resultados, torna-se possível verificar os efeitos e o desempenho do sistema durante manobras de disjuntores a vácuo, que são amplamente utilizados tanto em sistemas elétricos industriais, quanto em sistemas de geração de energias renováveis, como em centrais de energia eólica ou fotovoltaica.

### 5.1 Manobras de Energização do Transformador

A Figura 8 apresenta as formas de onda das correntes e tensões transitórias obtidas na simulação de manobra de energização. A corrente de magnetização apresentou um valor máximo de 460 A, ou seja, aproximadamente 6,5 vezes o valor de pico nominal, observando-se também o efeito proveniente dos cabos do sistema, para os instantes anteriores ao estabelecimento das correntes de magnetização do transformador (correntes de "inrush"). O valor máximo da sobretensão fase-terra obtido na simulação foi de 43,20 kV, que corresponde a 1,53 pu em relação ao valor de pico nominal. As oscilações verificadas nas tensões do sistema em vazio estão relacionadas às reflexões dos cabos isolados considerados na modelagem do sistema equivalente.

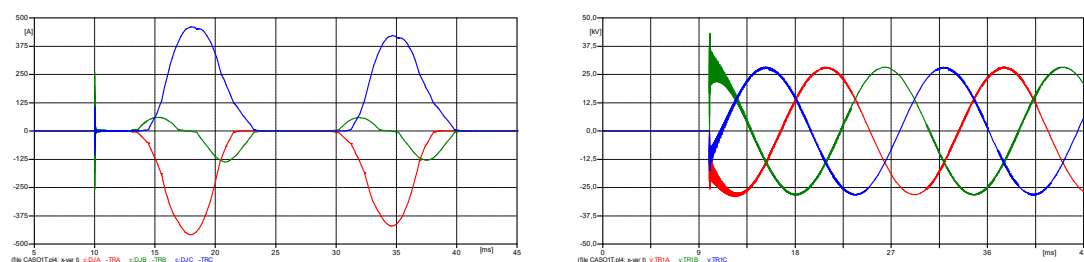


FIGURA 8 - Simulação das Correntes e Tensões Transitórias na Energização do Transformador.

### 5.2 Manobras de Desenergização do Transformador

Este caso mostra os resultados de simulação da manobra de desligamento do disjuntor, estando o transformador operando em vazio. Para esta condição, foram consideradas as respectivas perdas a vazio e a interrupção da corrente em seu valor de pico, como ilustra a Figura 9.

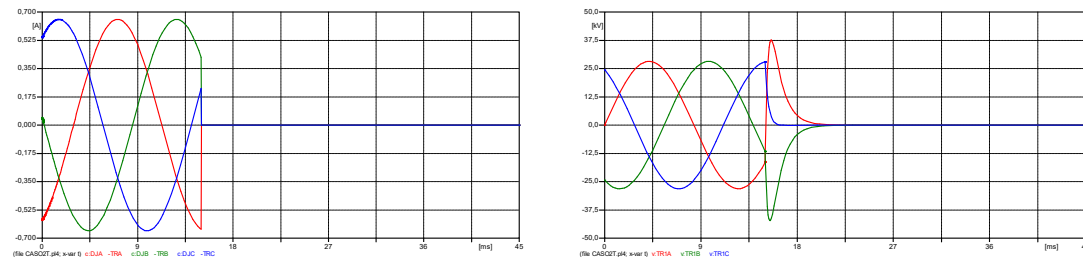


FIGURA 9 - Simulação das Correntes e Tensões Transitórias na Desenergização do Transformador.

### 5.3 Manobras de Energização do Transformador com Pré-Ignições (“Pré-Strike”)

Este item apresenta os resultados obtidos no caso de simulação da manobra de energização do transformador considerando a ocorrência de pré-ignições, onde foram representados os modelos com as características dielétricas do disjuntor e as capacitâncias parasitas equivalentes, informadas por fabricantes. A Figura 10 mostra as correntes e tensões transitórias resultantes de manobra de energização com a ocorrência de pré-ignições e múltiplas interrupções do disjuntor a vácuo.

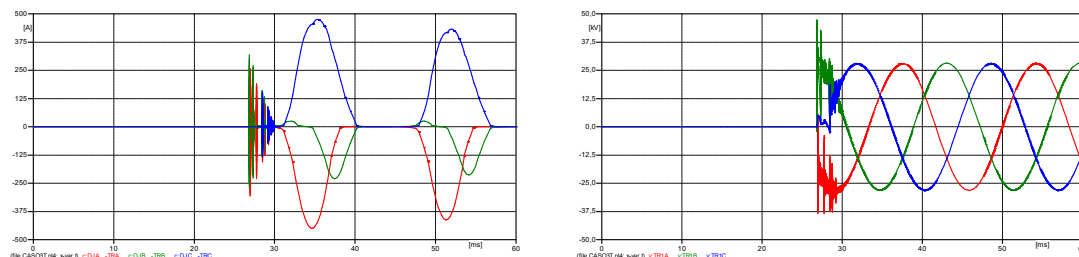


FIGURA 10 - Simulação das Correntes e Tensões Transitórias com Pré-Ignições do Disjuntor na Manobra de Energização do Transformador.

### 5.4 Manobras de Desenergização do Transformador com Reignições (“Restrike”)

A Figura 11 mostra as correntes e tensões transitórias obtidas durante a simulação da manobra de desenergização, com a ocorrência de reignições, cujos resultados são típicos do comportamento de sobretensões impulsivas e repetitivas, relacionadas a ocorrências de múltiplas reconduções após a abertura do disjuntor.

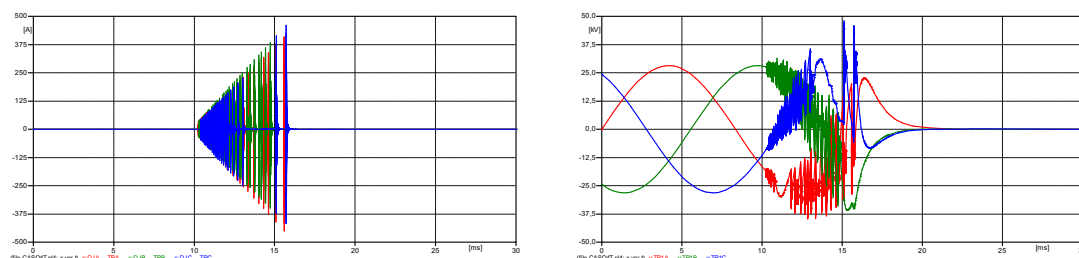


FIGURA 11 - Simulação das Correntes e Tensões Transitórias com Reignições do Disjuntor na Manobra de Desenergização do Transformador.

### 5.5 Manobras com Supressores de Surto

A partir da modelagem do sistema para as manobras de energização e desenergização, considerando as ocorrências de pré-ignições e reignições, foram inseridos Supressores de Surto (SS) do tipo RC, em conjunto com Para-Raios. Para este caso específico, foram adotados supressores de surto com resistores de 60  $\Omega$ , capacitores de 0,2  $\mu\text{F}$ , além de para-raios complementares com tensão nominal de 36 kV. As Figuras 12 e 13 a seguir mostram as correntes e tensões obtidas nestas condições, observando-se melhorias significativas em relação ao comportamento transitório, comparando-se com os casos anteriores, destacando-se o amortecimento



das tensões e reduções dos eventos transitórios repetitivos nas tensões e correntes, cujos resultados foram obtidos tanto nas simulações das manobras de energização, quanto nas manobras de desenergização do transformador.

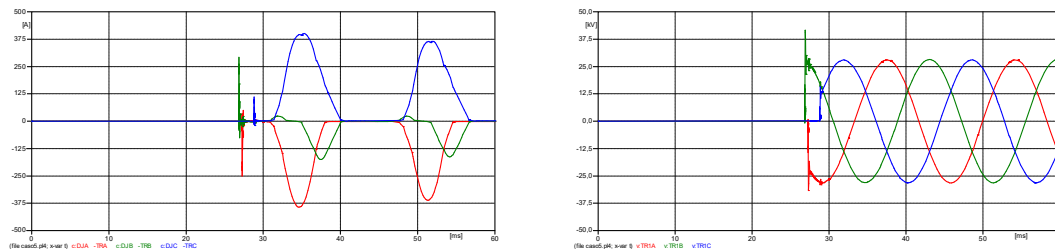


FIGURA 12 - Simulação das Correntes e Tensões Transitórias com Pré-Iguições do Disjuntor na Manobra de Energização do Transformador com a Inclusão de Supressores de Surto e Para-Raios

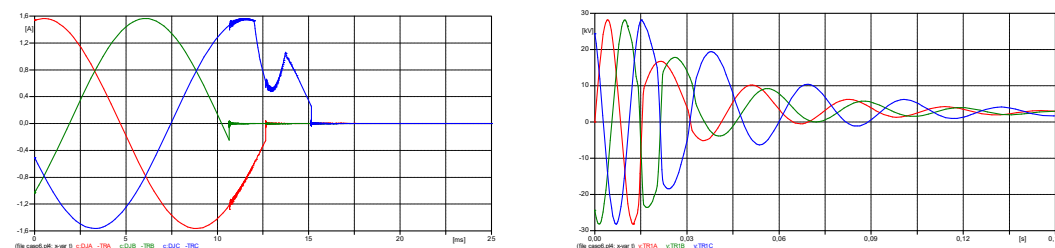


FIGURA 13 - Simulação das Correntes e Tensões Transitórias com Reignições do Disjuntor na Manobra de Desenergização do Transformador com a Inclusão de Supressores de Surto e Para-Raios

## 6.0 - EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DE SUPRESSORES DE SURTO

Apesar das dificuldades e incertezas nas medições de transitórios em instalações já operacionais, os resultados mostram o efeito pertinente à operação de supressores de surto, do tipo RC, em conjunto com para-raios (5). Os comportamentos obtidos nessas medições retratam os resultados de uma instalação com a utilização de protetores de surto, desde a concepção de seu projeto, relacionado a uma linha de produção de celulose, com a utilização de supressores de surto em todos os transformadores de distribuição, conectados junto aos terminais dos transformadores a seco, com tensão de operação em 34,5 kV. Nos casos anteriores, os sistemas de proteção foram instalados em caráter emergencial após as respectivas falhas. Ficou comprovada a efetiva mitigação dos problemas com transformadores a seco devido aos eventos transitórios, pois nenhum tipo de avaria foi identificada desde a energização do primeiro transformador. A Figura 14 mostra resultados de medições de manobras com supressores de surto e para-raios conectados aos terminais dos transformadores (5), sendo verificadas reduções com amortecimentos das sobretensões a cada entrada em operação dos conjuntos de supressores de surto.

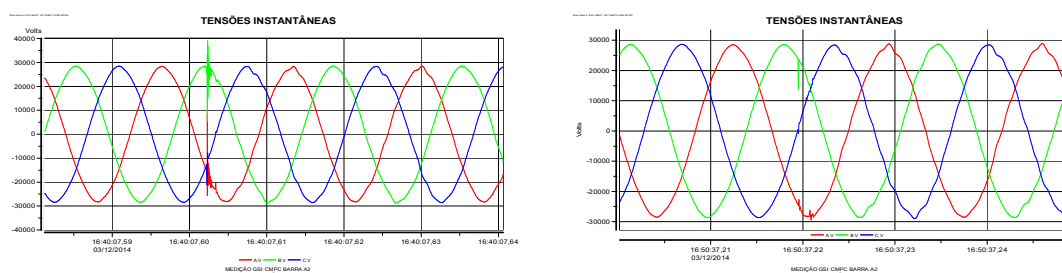


FIGURA 14 - Medição de Tensões em Manobras de Energização de Transformadores com Supressores de Surto.

A Figura 15 a seguir ilustra alguns exemplos práticos recentes que demonstram os modos de instalação de supressores de surto (RC) para proteção de transformadores a seco em 34,5 kV, frente as sobretensões transitórias resultantes de manobras de disjuntores a vácuo, instalados em sistemas elétricos industriais (4),(5).



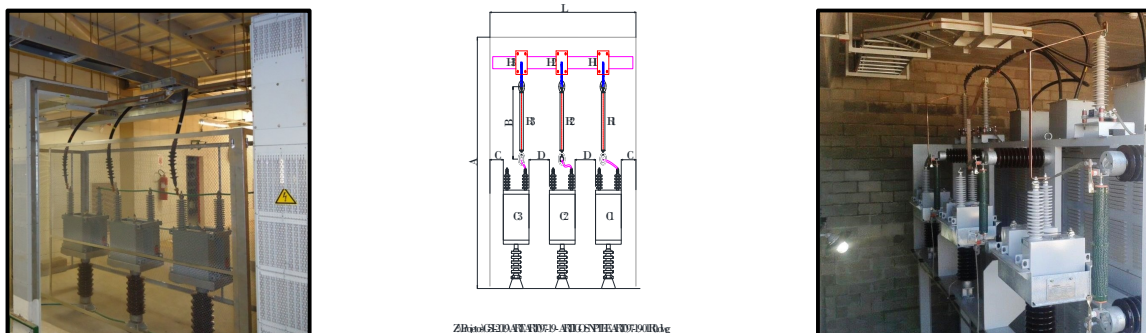


FIGURA 15 - Exemplos de Supressores de Surto Instalados na Proteção de Transformadores em 34,5 kV.

## 1.0 - CONCLUSÕES

As manobras de disjuntores em determinadas condições do sistema podem contribuir para ocorrências de sobretensões transitórias, podendo resultar em problemas operacionais e o comprometimento do desempenho de sistemas elétricos. A modelagem detalhada dos disjuntores, com a inclusão de suas características dielétricas e capacidades de interrupção de correntes em altas frequências, bem como a representação adequada do sistema, é de fundamental importância para análise dos possíveis impactos de transitórios de manobras. Neste sentido, atenção especial deve ser dada à representação dos modelos de transformadores e cabos isolados que compõem os sistemas elétricos em relação às suas respostas em frequência. Foram apresentados os conceitos relacionados às sobretensões resultantes de manobras de chaveamentos de disjuntores, medições durante a ocorrência de fenômenos transitórios, resultados de simulações e exemplos de aplicações com a utilização de supressores de surto. Para eventos de múltiplas reconduções verificam-se a presença de sobretensões repetitivas e de curtíssima duração (Very Fast Transient Overvoltage - VFTO), relacionadas a determinadas condições do sistema, ou seja, eventos de múltiplos pré-arcos durante as manobras de energização (Pré-Strike) e reignições durante as manobras de desenergização (Restrike). Foi devidamente verificado que os supressores de surto do tipo (RC) em conjunto com para-raios reduzem a possibilidade de ocorrências de sobretensões prejudiciais aos transformadores.

Este tema ainda requer muita dedicação e pesquisas aplicadas, pois, sob o aspecto do impacto em equipamentos, existem muitas dúvidas a serem esclarecidas, tais como se as falhas de campo seriam meramente aleatórias, quais as características e configurações do sistema que causam os maiores impactos aos transformadores, como melhorar a representação para avaliação e previsão de possíveis falhas, além de sua efetiva proteção. Diversas pesquisas e estudos correlacionados aos tipos de eventos analisados estão em pleno desenvolvimento, inclusive para sistemas de geração de energias renováveis, como nos casos de centrais de energia fotovoltaicas e eólicas (8),(9). Pode-se citar como exemplo desta tendência a análise e aplicação de indutores de bloqueio em série com o lado primário dos transformadores, visando reduzir as respectivas taxas de crescimento das tensões (10). Portanto, à medida que as análises estão sendo apuradas nos estudos de casos, proposição e validação de novos modelos, alguns desenvolvimentos estão sendo propostos por fabricantes, como forma de contramedida em relação às possíveis solicitações impostas aos equipamentos, como no caso do aumento de suas suportabilidades para sobretensões transitórias ou a inclusão de um novo conceito, com para-raios localizados em pontos estratégicos nos enrolamentos. De qualquer forma, conclui-se que tanto o desenvolvimento das proteções, seja de ordem interna ou externa, quanto os estudos dedicados apresentam fortes desafios, sendo que um dos principais objetivos é a busca em se determinar quando os dispositivos de proteção são realmente necessários, devido às características probabilísticas da interação transitória com transformadores durante as manobras de disjuntores.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) A. Mueller; D. Saemann, "Switching Phenomena in Medium Voltage Systems - Good Engineering Practice on the Application of Vacuum Circuit-Breakers and Contactors", PCIC EUROPE - Petroleum and Chemical Industry Conference Europe Conference Proceedings, 2011.
- (2) IEEE Std C57.142-2010. IEEE Guide to Describe the Occurrence and Mitigation of Switching Transients Induced by Transformers, Switching Device, and System Interaction. New York, IEEE.
- (3) Shipp, D.D., Dionese, T.J., Lorch, V., and MacFarlane, B.G., "Transformer Failure Due to Circuit-Breaker-Induced Switching Transients", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, No. 2, March/April 2011.

- (4) N. C. Jesus; J. R. Cogo, L.M. Duarte; L.F.R. Ferreira, "Modelagem, Simulação e Análise de Transitórios de Manobras para Definição de Supressores de Surto Como Proteção de Transformadores", XII CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Curitiba (PR), 2017.
- (5) N. C. Jesus; J. R. Cogo, L.M. Duarte; L.F.R. Ferreira, et al, "Medições de Manobras de Energização de Transformadores Considerando a Instalação de Supressores de Surto", XI CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Campina Grande (PB), 2015.
- (6) Peter E. Sutherland, Marcelo Valdes, Gary H. Fox, PE, "Snubber Design For Transformer Protection", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 52, 2016.
- (7) E. P. Sutherland, "Analysis of Integral Snubber Circuit Design for Transformers in Urban High Rise Office Building", reference 978-1-4673-0651-5/12, 2012.
- (8) J. Glasdam; C.L. Bak; J. Hjerrild, "Transient Studies in Large Offshore Wind Farms Employing Detailed Circuit Breaker Representation", Energy, 2012.
- (9) Cappai, G.; Heinrich, B.; Simioli, G.; Trevisan, L.; "Transformers Fault Analysis - A Multidisciplinary Approach", Trafotech Workshop, New Delhi, 2016.
- (10) D. Smugala, W. Piasecki, M. Ostrogorska, M. Florkowski, M. Fulczyk; "Distribution Transformers Protection Against High Frequency Switching Transients", Przegląd Elektrotechniczny, reference R. 88 NR 5a/2012.

#### 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Nelson Clodoaldo de Jesus**

Nasceu em Pindamonhangaba (SP) em 1970. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade de Taubaté (UNITAU) em 1992 e grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 1995. Trabalhou como professor e pesquisador na Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ) e como Coordenador de Engenharia da AES Sul. Desde 2009, atua como sócio consultor na empresa GSI - Engenharia e Consultoria Ltda. É sócio fundador da Sociedade Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica (SBQEE). Possui mais de 150 artigos técnicos, publicados em revistas, conferências e congressos nacionais e internacionais. As principais áreas de interesse referem-se à Qualidade da Energia Elétrica, Sistemas Elétricos Industriais, Sistemas de Geração de Energias Renováveis e Transitórios Eletromagnéticos.



**João Roberto Cogo**

Nasceu em Dois Córregos (SP) em 1951. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 1974, grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 1977, Doutor em Engenharia Elétrica na Área de Automação pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) em 1987, e Pós-Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) em 1998. Trabalhou como Professor da EFEI e na Fundação Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL). É sócio fundador e Diretor da empresa GSI - Engenharia e Consultoria Ltda. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Automação Eletrônica de Potência, Sistemas Elétricos Industriais, atuando principalmente nos temas de Proteção, Estabilidade, Rejeição de Cargas, Transitórios Eletromagnéticos e Fluxo Harmônico.



**Luiz Marlus Duarte**

Nasceu em Taubaté (SP) em 1983. Possui graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica pela Universidade de Taubaté (UNITAU) em 2009. Atualmente trabalha como sócio consultor na empresa GSI - Engenharia e Consultoria Ltda. Áreas de interesse: Análise e Simulações de Sistemas Elétricos para Avaliação de Transitórios Eletromagnéticos, Curto-Circuito, Fluxo de Potência, Proteção e Seletividade.



**Luis Fernando Ribeiro Ferreira**

Nasceu em Jacutinga (MG) em 1991. Possui graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 2014. Foi bolsista pelo Programa Ciências sem Fronteiras na University of British Columbia (UBC). Atualmente trabalha como sócio consultor na empresa GSI - Engenharia e Consultoria Ltda, no desenvolvimento de estudos elétricos, com interesse nas áreas de Simulações de Estabilidade Eletromecânica e Transitórios Eletromagnéticos.



**Éverson Júnior de Mendonça**

Nasceu em Itajubá (MG) em 1995. Possui graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 2018, onde participou como aluno bolsista do Programa de Educação Tutorial de Engenharia Elétrica - PET. Atualmente trabalha na área de estudos elétricos na empresa GSI - Engenharia e Consultoria Ltda. Áreas de interesse: Estudos de Transitórios Eletromagnéticos, Qualidade de Energia, Proteção e Análise de Sistemas Elétricos.



**Leandro Martins Fernandes**

Nasceu em Pedralva (MG) em 1990. Possui graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 2019. Atualmente trabalha na área de estudos elétricos na empresa GSI - Engenharia e Consultoria Ltda. Áreas de interesse: Estudos de Sistemas Elétricos, Qualidade de Energia, Proteção e Transitórios Eletromagnéticos.