

**Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Graduação em Engenharia Elétrica**

PEDRO HENRIQUE DE MOURA NEVES

**Estudo de caso dos efeitos de mitigação do snubber nos
transientes de tensão em um ramal de distribuição.**

Uberlândia

2021

PEDRO HENRIQUE DE MOURA NEVES

**Estudo de caso dos efeitos de mitigação do snubber nos
transientes de tensão em um ramal de distribuição.**

**Trabalho apresentado como requisito
parcial de avaliação na disciplina Trabalho
de Conclusão de Curso do Curso de
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Uberlândia.**

Orientador: Isaque Nogueira Gondim

Assinatura do orientador

Uberlândia

2021

PEDRO HENRIQUE DE MOURA NEVES

**Estudo de caso dos efeitos de mitigação do snubber nos
transientes de tensão em um ramal de distribuição.**

**Trabalho apresentado como requisito
parcial de avaliação na disciplina Trabalho
de Conclusão de Curso do Curso de
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Uberlândia.**

Banca examinadora

Prof. Dr. Isaque Nogueira Gondim

Prof. Dr. Carlos Eduardo Tavares

Prof. Dr. Paulo Henrique Oliveira Rezende

Uberlândia

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pela formação garantida, pelo carinho e pelo apoio incondicionais.

Agradeço à toda FEELT, por sua seriedade e compromisso com o aprendizado dos alunos.

Agradeço à CONSELT, por todas as experiências proporcionadas e por todas as amizades que fiz trabalhando na Empresa Júnior.

Agradeço à Fundação Estudar, que teve papel primordial na abertura de portas em minha carreira profissional e pela possibilidade de ser voluntário na causa da educação.

Agradeço ao professor orientador Isaque, por toda a paciência em minhas ausências e pela disposição em me ajudar.

Agradeço a todos os meus amigos, por todas as horas de diversão, conselhos e bons momentos juntos. Um agradecimento especial a meu amigo Diogo, por nossa amizade fundada em apoio um ao outro.

Agradeço à minha namorada, Eliane, por toda a compreensão, carinho, sabedoria e apoio que vem me dando.

Resumo

O objetivo deste trabalho é abordar as características e funcionalidades dos diferentes tipos de dispositivos utilizados para mitigar os distúrbios de tensão, com ênfase no snubber. Por fim, será realizado um estudo de caso do efeito de um *snubber* em uma rede de distribuição com a presença do dispositivo snubber para melhor entendimento de suas aplicações.

Palavras chave: Transientes elétricos, snubber, mitigação de surtos, ATP e suportabilidade dielétrica.

Abstract

The objective of this paper is to address the characteristics and functionalities of the different types of devices used to mitigate voltage disorders, with an emphasis on the snubber. Lastly, a case study of the effect of a snubber on a distribution network will be carried out with the presence of the snubber device for a better understanding of its applications.

Keywords: Electrical transients, snubber, surge mitigation, ATP and dielectric strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação visual de surto causado por descarga elétrica.....	15
Figura 2 - Representação visual de surto causado por conexão de banco de capacitores à rede.....	16
Figura 3 - Representação visual de transiente causado por chaveamento eletrônico.....	16
Figura 4 - Representação visual de transiente causado por um chaveamento que insere carga indutiva na rede.....	17
Figura 5 - Curva de operação de um TVS bipolar.....	20
Figura 6 - Representação de um snubber protegendo o primário de um transformador....	23
Figura 7 - Comparação de snubber comercial de baixa e de alta potência.....	23
Figura 8 - Representação de um circuito snubber RCD protegendo um transformador.....	26
Figura 9 - Representação de um circuito snubber RCD protegendo uma chave.....	27
Figura 10 - Representação do sistema que será modelado.....	28
Figura 11 - Forma de da tensão onda no barramento de 230kV em regime permanente....	36
Figura 12 - Forma de onda da tensão para o primário do transformador 2.....	37
Figura 13 - Forma de onda da tensão para o secundário do transformador 2.....	37
Figura 14 - Forma de onda da tensão para o primário do transformador 4.....	37
Figura 15 - Forma de onda da tensão para o secundário do transformador 4.....	38
Figura 16 - Forma de onda da corrente fornecida ao sistema em regime permanente.....	38
Figura 17 - Forma de onda da corrente para o primário do transformador 2.....	39
Figura 18 - Forma de onda da corrente para o secundário do transformador 2.....	39
Figura 19 - Forma de onda da corrente para o primário do transformador 4.....	39
Figura 20 - Forma de onda da corrente para o secundário do transformador 4.....	40
Figura 21 - Forma de onda tensão onda no barramento de 230kV em regime permanente com snubber.....	41
Figura 22 - Forma de onda da tensão para o primário do transformador 2 em regime permanente com snubber.....	41
Figura 23 - Forma de onda da tensão para o secundário do transformador 2 em regime permanente com snubber.....	41
Figura 24 - Forma de onda da tensão para o primário do transformador 4 em regime permanente com snubber.....	42
Figura 25 - Forma de onda da tensão para o secundário do transformador 4 em regime permanente com snubber.....	42
Figura 26 - Forma de onda da corrente fornecida ao sistema em regime permanente com snubber.....	43
Figura 27 - Forma de onda da corrente para o primário do transformador 2 em regime permanente com snubber.....	43
Figura 28 - Forma de onda da corrente para o secundário do transformador 2 em regime permanente com snubber.....	43
Figura 29 - Forma de onda da corrente para o primário do transformador 4 em regime permanente com snubber.....	44
Figura 30 - Forma de onda da corrente para o secundário do transformador 4 em regime permanente com snubber.....	44
Figura 31 - Transitório de alta frequência no secundário do transformador 2.....	46

Figura 32 - Transitório causado pelo chaveamento do transformador 2 na tensão do primário do transformador 4.	47
Figura 33 - Transitório causado pelo chaveamento do transformador 2 na tensão do secundário do transformador 2.	48
Figura 34 - Transitório causado pelo chaveamento do transformador 2 na tensão do secundário do transformador 4.	48
Figura 35 - Transitório de alta frequência no secundário do transformador 4.	49
Figura 36 - Transitório causado pelo chaveamento do transformador 2 na tensão do primário do transformador 4.	50
Figura 37 - Transitório causado pelo chaveamento do transformador 4 na tensão do secundário do transformador 4.	51
Figura 38 - Transitório causado pelo chaveamento do transformador 4 na tensão do secundário do transformador 2.	51
Figura 39 - Transitório atenuado no secundário do transformador 2.	52
Figura 40 - Transitório atenuado causado pelo chaveamento do transformador 2 na tensão do secundário do transformador 4.	53
Figura 41 - Transitório no secundário do transformador 2 para a situação 1 atenuada.	54
Figura 42 - Transitório no secundário do transformador 4 para a situação 1 atenuada.	54
Figura 43 - Transitório atenuado no secundário do transformador 2.	55
Figura 44 - Transitório atenuado causado pelo chaveamento do transformador 2 na tensão do secundário do transformador 4.	56
Figura 45 - Transitório no secundário do transformador 4 para a situação 2 atenuada.	57
Figura 46 - Transitório no secundário do transformador 2 para a situação 2 atenuada.	57
Figura 47 - Onda de tensão antes e depois no primário do transformador 2, na situação 1.	58
Figura 48 - Onda de tensão antes e depois no primário do transformador 4, na situação 4.	58
Figura 49 - Onda de tensão antes e depois no primário do transformador 4, para a situação 1.	59
Figura 50 - Onda de tensão antes e depois no primário do transformador 2, para a situação 2.	60
Figura 51 - Antes e depois das tensões no secundário do transformador 2 para cada situação.	61
Figura 52 - Antes e depois das tensões no secundário do transformador 2 para cada situação.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados das linhas de distribuição da planta industrial.	29
Tabela 2 - Dados dos transformadores 1 e 3.	31
Tabela 3 - Dados da impedância dos transformadores 1 e 3.	31
Tabela 4 - Dados dos transformadores 2 e 4.	32
Tabela 5 - Curva de magnetização do transformador 2.	32
Tabela 6 - Curva de magnetização do transformador 4.	33
Tabela 7 - Dados dos para-raios ZnO para o trecho de 230kV.	33
Tabela 8 - Dados dos para-raios ZnO para os trechos de 34,5kV.	34
Tabela 9 - Dados dos para-raios ZnO para os trechos de 4,16kV.	34
Tabela 10 - Dados de Vref dos para-raios ZnO.	34
Tabela 11 - Equivalentes elétricos nível de curto máximo.	35
Tabela 12 - Valores de resistência e indutância das cargas.	35
Tabela 13 - Valores de tensão no sistema em regime permanente.	38
Tabela 14 - Valores de corrente do sistema em regime permanente.	40
Tabela 15 - Valores de tensão no sistema em regime permanente com snubber.	42
Tabela 16 - Valores de corrente do sistema em regime permanente com snubber.	44
Tabela 17 - Comparação de valores de tensão da operação do sistema com e sem snubber.	45
.....	45
Tabela 18 - Valores de tensão pico na onda de transitório do transformador 4.	47
Tabela 19 - Valores de tensão pico na onda de transitório do transformador 4.	50
Tabela 20 - Valores de tensão pico na onda de transitório do transformador 4.	53
Tabela 21 - Valores de tensão pico na onda de transitório do transformador 4.	56
Tabela 22 - Comparação entre os valores de tensão de pico antes e depois.	59
Tabela 23 - Valores da onda de tensão antes e depois no primário do transformador 4, para a situação 1.	60
Tabela 24 - Valores da onda de tensão antes e depois no primário do transformador 2, para a situação 2.	60

ABREVIATURAS E SIGLAS

UFU (Universidade Federal de Uberlândia)

EELT (Falculdade de Engenharia Elétrica)

IEEE (*The Institute of Electrical and Electronics Engineers*)

HD (*Hard Drive*)

TVS (*Transient Voltage Supressor*)

LED (*Light Emitting Diode*)

TRIAC (*Triode for Alternating Current*)

MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*)

ATP (*Alternative Transient Program*)

ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico)

ANAFAS (Análise de faltas simultâneas)

CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica)

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica)

PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional)

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	13
1.1 - OBJETIVOS.....	14
1.2 - ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2 - REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1- ORIGENS DO TRANSIENTE DE TENSÃO	15
2.1.1- Descargas elétricas	15
2.1.2- Chaveamento de bancos de capacitores	15
2.1.3- Chaveamento Eletrônico (notching).....	16
2.1.4- Chaveamento de carga indutiva	17
2.1.5- Chaveamento de transformador	17
2.2- EFEITOS DO TRANSIENTE DE TENSÃO	18
2.2.1- Efeito dos transientes em aparelho de potência constante	18
2.2.2- Efeito dos transientes em aparelho de impedância constante	18
2.2.3- Efeito dos transientes no dielétrico de aparelhos	19
2.3- FORMAS DE SE MITIGAR TRANSIENTES.....	20
2.3.1- TVS	20
2.3.2- Filtro de linha residencial	21
2.3.3- Snubber	21
3- DETALHAMENTO SOBRE O <i>SNUBBER</i>	23
3.1- COMPOSIÇÃO DO <i>SNUBBER</i>	23
3.1.1- Capacitor de surto	24
3.1.2- Resistência	25
3.2- FORMAS DE UTILIZAÇÃO	26
3.2.1- Proteção de Transformador	26
3.2.2- Proteção de relé eletromecânico	27
4-SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	27
4.1- ATP	29
4.2- MODELAGEM DO SISTEMA	29
4.2.1- Linhas de Distribuição	29
4.2.2- Transformadores	30

4.2.3- Para-raios	33
4.2.4- Chave representativa de disjuntor	34
4.2.5- Equivalente elétrico.	35
4.2.6- Dimensionamento da carga	35
4.2.7- Dimensionamento do snubber	35
4.3- COMPORTAMENTO DO SISTEMA EM REGIME PERMANENTE.....	36
4.3.1- Operação do sistema sem snubber	36
4.3.2- Operação do sistema com snubber	40
4.3.3- Influência do snubber no regime permanente	44
4.4- COMPORTAMENTO DO SISTEMA APÓS A ABERTURA DA CHAVE.....	45
4.4.1- Situação de abertura da chave a montante do transformador 2 sem snubber	46
4.4.2- Situação de abertura da chave a montante do transformador 4 sem snubber	48
4.5- COMPORTAMENTO DO SISTEMA COM A PROTEÇÃO SNUBBER	51
4.5.1- Situação de abertura da chave a montante do transformador 2 com snubber	51
4.5.2- Situação de abertura da chave a montante do transformador 4 com snubber	55
4.6- RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.6.1- Transitórios no primário do transformador a jusante das chaves.	58
4.6.2- Transitórios gerados pela abertura da chave no primário do transformador do ramal em paralelo.	59
4.6.3- Transitórios gerados pela abertura das chaves no secundário dos transformadores 2 e 4	60
5- CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS.....	64

1- INTRODUÇÃO

É certo dizer que, para aumentar a produtividade em fábricas, são necessários cada vez mais processos ágeis, precisos e ininterruptos. Para isso, são utilizadas também máquinas mais precisas. Para garantir a estabilidade de uma planta elétrica, é necessário que a energia consumida da rede tenha um bom índice de qualidade, cujo qual depende diretamente das condições previsíveis e estáveis de tensão e corrente.

Inversores de frequência, soft-starters e no-breaks tem seu funcionamento pautado no formato da onda da tensão e pontos de cruzamento da tensão com zero da linha se tornam referências, logo até mesmo pequenos distúrbios na onda de tensão podem acarretar em consequências.

Segundo o IEEE, transientes são rápidas alterações no estado estacionário da rede elétrica, classificados como oscilatórios ou impulsivos. São súbitas variações de tensão e frequência na condição de tensão nominal, com período inferior a um ciclo de onda, que podem ter polaridade positiva ou negativa. [1]

Apesar da curta duração de tempo, os transientes oferecem riscos à integridade dos sistemas elétricos, especialmente a equipamentos eletrônicos de potência, pois podem acarretar no mal funcionamento (em casos leves) até a danos nos dispositivos.

Transientes também podem trazer consequências prejudiciais à rede devido a sua interação com o relé, fazendo com que o dispositivo detecte um nível de tensão mais alto ou mais baixo que o aceitável.

Além de serem prejudiciais a equipamentos utilizados em indústrias, os transientes também podem provocar a queima de equipamentos domésticos como telefones, modems, HDs e placas de computador, conforme [12].

Para mitigar os transientes, podem ser utilizados diversos equipamentos e dentre eles está o snubber, que será objeto de estudo deste trabalho.

1.1 - OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar os efeitos advindos de transientes de tensão na rede elétrica e nas diversas cargas conectadas, compreender a origem destes surtos.

Conhecendo os transientes, é necessário entender quais os dispositivos estão disponíveis para mitigar os transientes de tensão e compreender o funcionamento dos snubber em redes de distribuição

Por fim, será realizado um estudo de caso de uma rede elétrica de distribuição típica onde serão comparadas as ondas de tensão após a abertura de uma chave a qual causa transientes, com e sem a presença do dispositivo snubber.

1.2 - ESTRUTURA DO TRABALHO

Para abordar a temática do snubber, é necessário levantar alguns conceitos básicos antes, por isto, o trabalho será dividido em 3 partes principais. Inicialmente, será feita uma introdução sobre os transientes, fenômenos atenuados pelo snubber, em seguida uma explicação teórica sobre o funcionamento do snubber e suas aplicações.

A última parte do trabalho é focada em mostrar por meio de simulações o funcionamento do snubber. Por meio de gráficos de tensão e corrente o funcionamento de um sistema em regime permanente com e sem a utilização de um snubber será mostrado. Em seguida, será introduzido um evento de abertura de chave, que mostrará o surgimento de um fenômeno transitório, para então mostrar a atuação do snubber e a atenuação causada nos transientes presentes no sistema.

2 - REFERENCIAL TEÓRICO

Transiente de tensão é o nome dado ao evento elétrico caracterizado por uma oscilação breve (que dure menos de um ciclo de onda) na onda de tensão.

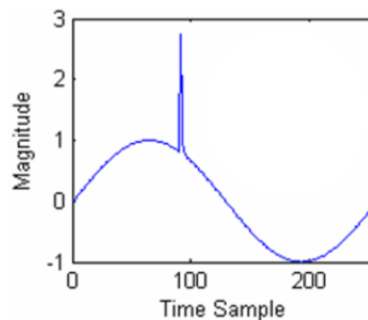
2.1- ORIGENS DO TRANSIENTE DE TENSÃO

Estes fenômenos podem ser causados por diversos eventos no sistema, os principais estão contidos nos próximos tópicos.

2.1.1- Descargas elétricas

A figura 1 ilustra o efeito transiente causado por uma descarga elétrica, tipicamente de curta duração, mas com uma intensidade muito alta. Essa sobretensão pode, eventualmente, levar à queima de equipamentos eletrodomésticos ou eletrônicos, como televisões, computadores e geladeiras.

Figura 1 - Representação visual de surto causado por descarga elétrica.

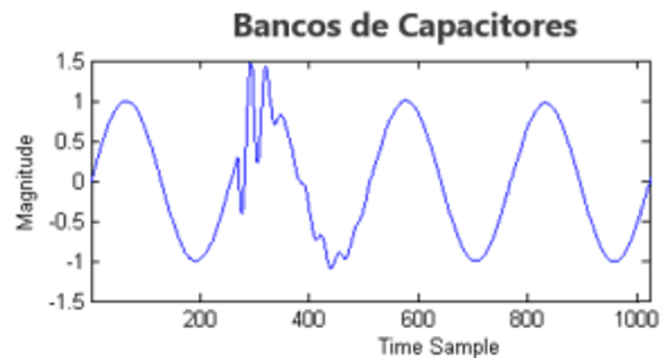


Fonte: AS3 Engenharia [2].

2.1.2- Chaveamento de bancos de capacitores

A figura 2 ilustra o efeito transiente causado pelo chaveamento de um banco de capacitores. Apesar de menor intensidade, comparado a uma descarga elétrica, este transitório perdura por mais tempo até o sistema se estabilizar. Este efeito peculiar, a despeito de raramente ocasionar a queima de dispositivos, prejudica o correto funcionamento de equipamentos que se “norteiam” pelo formato de onda, ou pelo cruzamento do ponto zero de tensão, tais quais Inversores de frequência, no-breaks e soft starters.

Figura 2 - Representação visual de surto causado por conexão de banco de capacitores à rede.

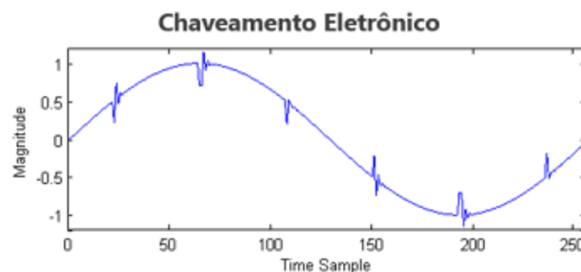


Fonte: A3S Engenharia [2].

2.1.3- Chaveamento Eletrônico (notching)

A figura 3 ilustra o efeito transiente causado pelo chaveamento eletrônico, apesar de ter uma baixa intensidade ele é recorrente, o que pode causar uma diminuição no tempo de vida de outros equipamentos.

Figura 3 - Representação visual de transiente causado por chaveamento eletrônico.



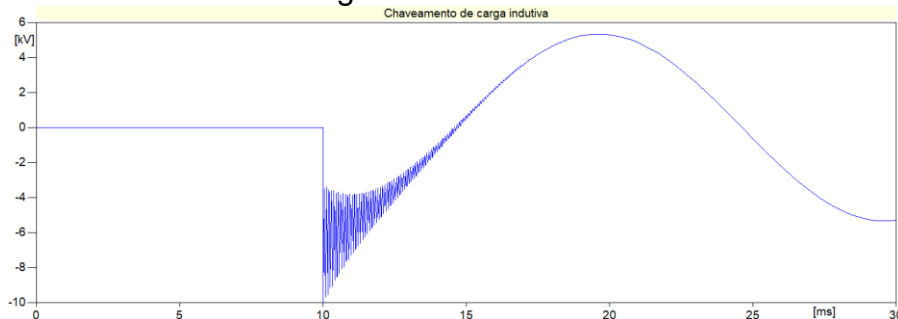
Fonte: A3S Engenharia [2].

Operar em tensões diferentes da esperada, ocasiona o sobreaquecimento de dispositivos, o que causa um maior desgaste nos componentes de cada aparelho, por isso, o constante chaveamento eletrônico e as constantes variações na tensão causam ao longo do tempo uma diminuição da vida útil de equipamentos elétricos.

2.1.4- Chaveamento de carga indutiva

A figura 4 ilustra o efeito transiente causado pelo chaveamento de uma carga indutiva. É possível perceber que o transiente eleva o módulo da tensão a um valor acima do valor de referência. O transiente chega a um pico de -10kV, sendo que o valor máximo que era esperado era de aproximadamente -5kV.

Figura 4 - Representação visual de transiente causado por um chaveamento que insere carga indutiva na rede.



Fonte: o autor, 2021.

Ao fazer o chaveamento desligando equipamentos indutivos, o transiente de tensão gerado pode chegar a tais níveis que gera centelhamentos nas chaves de contato, o que pode tanto gerar problemas de manter equipamentos ligados por tempo indevido, quanto desgastar a chave a ponto de danificar o equipamento, sendo necessário então uma troca.

2.1.5- Chaveamento de transformador

Apesar de não ser uma carga propriamente dita, um transformador é construído utilizando bobinas de fios, e sua presença em circuitos elétricos eleva a reatância indutiva de um circuito. Devido a suas características construtivas e resposta que gera nos sistemas, o transformador se comporta de forma muito semelhante a um indutor.

Conforme explicado no capítulo 2.1.4, o chaveamento de cargas indutivas gera transientes no sistema elétrico, o que ainda é especialmente perigoso para transformadores, conforme será demonstrado no tópico 2.2.3. Analogamente ao chaveamento de cargas indutivas, o chaveamento de capacitores também gera transientes no sistema.

2.2- EFEITOS DO TRANSIENTE DE TENSÃO

Como visto, esses eventos, apesar de terem curta duração, podem ter impactos muito severos nos equipamentos elétricos e no sistema de energia.

Dentre os principais efeitos, pode-se citar a queima de equipamentos, mau funcionamento de dispositivos cuja performance depende do formato de onda e diminuição do tempo de vida de aparelhos.

2.2.1- Efeito dos transientes em aparelho de potência constante

Cada tipo de equipamento associado a um transiente pode ter um efeito diferente, neste tópico será abordado o efeito em geral de um transiente em equipamentos de potência constante.

Sabe-se que, para aparelhos de potência constante:

$$|S| = V_{rms} * I_{rms} [1]$$

Onde:

S= Potência aparente (VA);

V_{rms} = Tensão quadrática média (V);

I_{rms} = Corrente quadrática média (A).

Como o efeito de um transiente altera a onda de tensão e o valor de P é uma constante no exemplo dado, teremos:

$$V_{rms} = |S|/I_{rms} [2]$$

Como o valor de V e de I são inversamente proporcionais e o valor de S é uma constante, o aumento de V implica em uma diminuição de I_{rms} .

Este aumento de tensão pode ser muito prejudicial ao verniz isolador utilizado na bobina de equipamentos como transformadores e motores.

2.2.2- Efeito dos transientes em aparelho de impedância constante

Para aparelhos de impedância constante, temos a seguinte equação de tensão:

$$V = Z * I [3]$$

Onde:

Z= Impedância (Ω).

Tendo Z como uma constante, V e Z são variáveis diretamente proporcionais, o que faz com que um aumento de tensão também implica num aumento de corrente.

Pelo efeito Joule, com o aumento de corrente circulando pelo aparelho, haverá também uma maior dissipação de calor, o que em alguns casos pode ser fatal, causando a queima do aparelho.

2.2.3- Efeito dos transientes no dielétrico de aparelhos

Equipamentos como motores e transformadores são equipamentos muito conhecidos por possuírem bobinas elétricas, que são enrolamentos de fios isolados em volta de um núcleo magnético.

O funcionamento das bobinas depende do isolamento dos fios, já que caso o mesmo não existisse a corrente não iria percorrer todas as bobinas por completo, diminuindo drasticamente o fluxo magnético no núcleo dos dispositivos.

O isolamento dos fios é feito por um verniz, que possui uma capacidade limitada de proteção contra sobretensões, conhecida como rigidez dielétrica. Quando esta rigidez dielétrica é rompida, o material passa a se tornar um condutor, e além de isto ser um risco imediato de queima do dispositivo, após o rompimento do dielétrico, o mesmo não volta a ser um material isolante, danificando de forma definitiva o aparelho.

Outros exemplos, além de transformadores e motores, de equipamentos que dependem da rigidez dielétrica são capacitores, sensores de pressão, temperatura e luz e telas touchscreen.

2.3- FORMAS DE SE MITIGAR TRANSIENTES

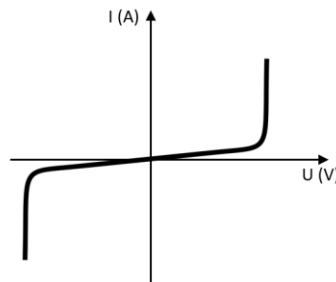
Por ser um problema tão prejudicial aos equipamentos elétricos e eletrônicos, foram desenvolvidas diversas formas de se proteger um sistema de surtos de transientes, como chaveamentos inteligentes, dispositivos que criam um caminho alternativo para a corrente em momentos de surto ou então equipamentos que atuam como um supressor de transientes, absorvendo a energia extra fornecida ao sistema.

2.3.1- TVS

O TVS, Supressor de Tensões Transientes (Transient Voltage Suppressor) é um dispositivo eletrônico utilizado na mitigação dos transientes. Ele é um tipo especial de Diodo Zener, apesar de ter o mesmo funcionamento, o TVS possui características específicas que o tornam uma melhor opção na supressão de surtos de tensão.

As principais diferenças entre o TVS e o Diodo Zener estão na maior velocidade de reação valor de potência suportada.

Figura 5 - Curva de operação de um TVS bipolar.



Fonte: o autor, 2021.

Conforme a curva de operação do TVS, é possível perceber que na faixa de tensão central, ele funciona de forma semelhante a uma resistência muito alta, permitindo que pouca corrente passe pelo circuito, já quando o módulo de tensão ultrapassa o valor limite aceitável, ele funciona como um curto.

O TVS é ligado em paralelo ao circuito que será protegido, logo, em condições normais ele será invisível para o circuito, funcionando como circuito aberto permitindo que a carga receba normalmente a tensão desejada, já para condições anormais de tensão, ele funcionará como um curto circuito, isolando a carga da alta tensão.

Por ser um dispositivo muito simples e não possuir nenhum componente que absorve a energia extra do transiente em relação à onda de tensão normal, o TVS, diferente de equipamentos como o snubber, possui uma capacidade de direcionamento de energia de até 5000W na maioria dos casos, conforme a referência [3].

2.3.2- Filtro de linha residencial

Apesar de ser muito utilizado com a finalidade de aumentar a quantidade de pontos de conexão, aumentando a quantidade de aparelhos elétricos conectados a uma tomada, alguns filtros de linha possuem um circuito elétrico desenhado especificamente para reduzir ruídos, surtos ou variações de tensão, incluindo transientes.

É necessário ter uma observação, entretanto, pois para diminuir custos, muitos fabricantes retiram esta parte protetiva do circuito, e projetam o “filtro de linha” como uma extensão, apenas replicando as saídas de tensão.

É necessário também ter cuidado com a quantidade de dispositivos conectados em cada equipamento. Os filtros de linha possuem uma capacidade limitada de poder de proteção aos equipamentos e além de ser uma ação arriscada, a conexão de vários dispositivos sob a alimentação de uma única tomada prejudica o sistema elétrico residencial, que não foi projetado para fornecer uma quantidade ilimitada de energia por tomada.

2.3.3- Snubber

O snubber é um dispositivo elétrico de baixo custo, focado em mitigar transientes composto por um resistor e um capacitor. Devido a sua composição não possuir dispositivos de controle eletrônico, seu tempo de resposta é baixo e por isto

é ideal para ser utilizado em eventos de curta duração, como os transientes elétricos.

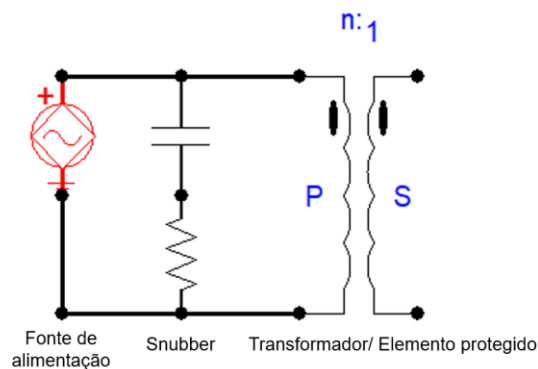
No capítulo 3 será detalhado o funcionamento e as aplicações de um snubber.

3- DETALHAMENTO SOBRE O *SNUBBER*

3.1- COMPOSIÇÃO DO *SNUBBER*

Snubber é o nome dado ao dispositivo de característica RC (composto por um capacitor e um resistor em série) utilizado como caminho alternativo de circulação de corrente, suprimindo assim os eventos de transiente de tensão.

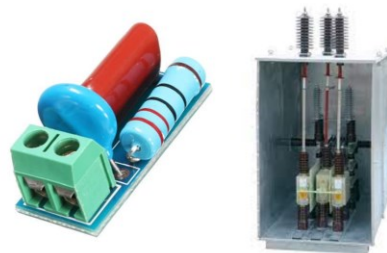
Figura 6 - Representação de um snubber protegendo o primário de um transformador.



Fonte: o autor, 2021.

Na figura 6 é apresentado um modelo simples de snubber protegendo o lado primário de um transformador, vale ressaltar que além da configuração mostrada, o snubber também pode ser projetado com um diodo, para circuitos específicos de tensão contínua.

Figura 7 - Comparação de snubber comercial de baixa e de alta potência.



Fonte: internet.

Na figura 7, estão comparados dois tipos de snubber, o primeiro é utilizado em proteção de um relé em equipamentos de eletrônica, já o segundo snubber é de potência e é utilizado para proteger transformadores.

3.1.1- Capacitor de surto

O capacitor é um elemento elétrico utilizado por sua capacidade de armazenar cargas elétricas em forma de campos elétricos e devolver a energia armazenada ao circuito, retardando as variações de tensão.

O princípio de funcionamento de um capacitor se baseia na lei de Coulomb, que é uma lei da física que define a força eletrostática entre duas cargas elétricas. Havendo uma diferença de potencial entre os dois terminais de um capacitor, é fornecida energia ao capacitor em forma de campo elétrico.

Apesar das diferentes formas e tamanhos, a construção básica de um capacitor pode ser descrita basicamente como dois terminais condutores separados por um material dielétrico.

Para se dimensionar um capacitor a ser utilizado em um circuito, é importante saber sua Impedância (Z_c), que é calculada através da fórmula [4]:

$$Z_c = X_c \angle \theta_c \text{ [4]}$$

Sendo:

X_c = reatância capacitiva

$\theta_c = 90^\circ$ (ângulo da carga representada em fasor)

Para calcular o valor da Reatância (X_c) do capacitor, utilizamos a fórmula [5]:

$$X_c = 1/(2 * \pi * f * C) \text{ [5]}$$

Sendo:

f = frequência do sistema (Hz)

C = capacitância (F)

Para calcular a capacitância, utilizamos a fórmula [6] ou [7]:

$$C = (\epsilon_0 * A)/d \text{ [6]}$$

$$C = \frac{Q}{U} \quad [7]$$

Sendo:

ϵ_0 = permissividade dielétrica do material dielétrico (F/m)

A = área das placas (m²)

d = distância entre as placas (m)

Q = carga elétrica (C)

U = tensão (V)

O capacitor é um dispositivo cuja atuação pode ser descrita como um dispositivo que armazena e descarrega energia para o sistema como forma de se opor às mudanças de tensão. A quantidade de energia que um capacitor fornece pode ser determinada através da seguinte fórmula:

$$E_{pot} = W = (QU)/2 \quad [8]$$

E_{pot} ou W = Energia armazenada no Capacitor em (J)

Isolando U da fórmula [7] e substituindo em [8], obtém-se:

$$E_{pot} = (CU^2)/2 \quad [9]$$

Um aumento abrupto na tensão pode ser interpretado como uma quantidade excedente de energia sendo inserida no sistema, o capacitor é utilizado como uma forma de absorver esta energia imediatamente, atenuando o surto transiente.

3.1.2- Resistência

A resistência é utilizada no circuito snubber como uma assistência ao capacitor, tendo como principal papel o de dissipar a energia armazenada no capacitor.

O fato de a resistência dissipar energia é explicado pela lei de Joule, que estabelece a relação entre a corrente elétrica que passa por um elemento e o calor gerado por ele.

É sabido que a tensão sobre uma resistência, pode ser determinada através da fórmula [10]:

$$U = R * i \text{ [10]}$$

Onde:

R= Resistência (Ω);

i= Corrente (A).

Além disso, pode-se definir a potência dissipada por uma resistência através da fórmula [11]:

$$Pd = U * i \text{ [11]}$$

Sendo:

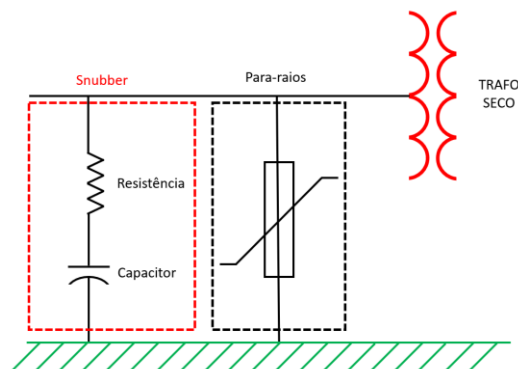
Pd= Potência dissipada.

3.2- FORMAS DE UTILIZAÇÃO

3.2.1- Proteção de Transformador

Um snubber pode ser utilizado para proteger transformadores, que sofrem muito com problemas de transientes por chaveamentos ou descargas elétricas. Conforme [4], historicamente o número de transformadores que estão queimando vem numa crescente, especialmente transformadores a seco.

Figura 8 - Representação de um circuito snubber RCD protegendo um transformador.

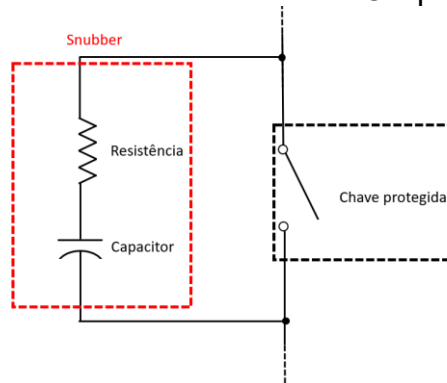


Fonte: o autor, 2021.

Na figura 8, é possível observar além do snubber, um para-raios, que é utilizado pois apesar de conseguir reduzir os transientes, a alta potência de um raio pode danificar o snubber.

3.2.2- Proteção de relé eletromecânico

Figura 9 - Representação de um circuito snubber RCD protegendo uma chave.



Fonte: o autor, 2021.

Na figura 9, é possível observar uma chave sendo protegida, mas vale ressaltar que essa chave representa diversos tipos de circuitos que tem o funcionamento parecido com o de uma chave, como pode exemplo, dispositivos TRIAC (tiristores para corrente alternada), MOSFET ou até mesmo chaves.

4-SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

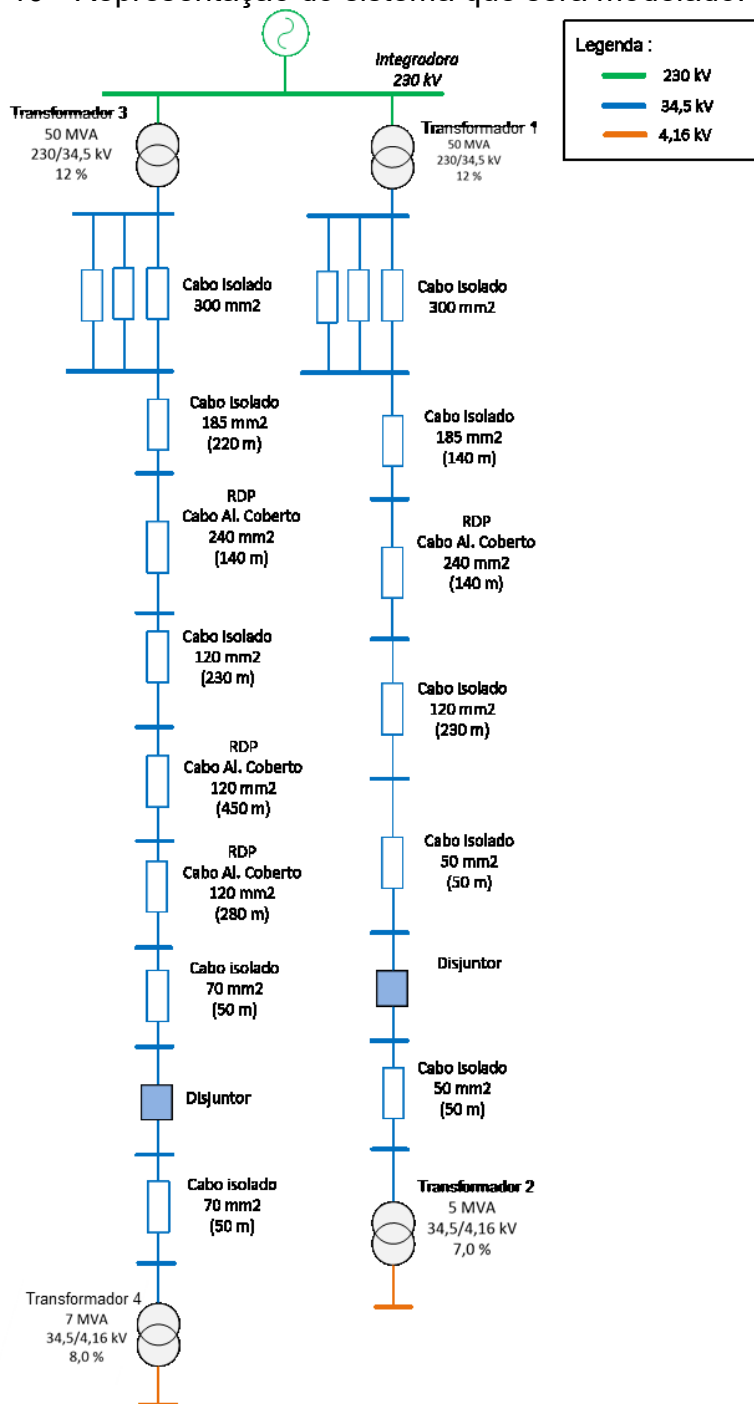
O sistema ilustrado na figura 10 foi obtido a partir dos arquivos da ONS e os equivalentes elétricos calculados a partir do programa ANAFAS, desenvolvido pelo CEPEL.

A figura 10 representa o diagrama unifilar do sistema que será modelado no ATP. O sistema é composto por um barramento de 230kV que é dividido em dois ramais que passam por transformadores abaixadores, chegando a 34,5kV. No final de cada ramal existem disjuntores, que serão abertos para simular o efeito transiente de um chaveamento de transformador.

A fonte foi modelada se baseando no componente "ACSOURCE.sup", configurada com 230kV de tensão entre linhas, aterrada e a 60Hz.

Ambos os transformadores 2 e 4 possuem também uma carga em seu secundário de sua potência nominal (5MVA e 7MVA) com fator de potência de 0,8 indutivo.

Figura 10 - Representação do sistema que será modelado.



Fonte: o autor, 2021.

4.1- ATP

O *Alternative Transient Program* (ATP) é um programa utilizado para a simulação de fenômenos transientes de natureza eletromecânica ou eletromagnética em redes complexas. O ATP consegue simular com precisão os efeitos de faltas, descargas elétricas ou chaveamentos em redes além de também simular distúrbios não lineares, como arcos ou o efeito corona.

O ATP utiliza como método de cálculo a regra de integração trapezoidal, resolvendo as equações diferenciais dos elementos do sistema no domínio do tempo.

Na configuração do ATP, foram utilizados os seguintes parâmetros para simulação:

Delta-T: 10^{-6} s.

Tmax: 0.2s.

4.2- MODELAGEM DO SISTEMA

4.2.1- Linhas de Distribuição

Para realizar a modelagem das linhas de distribuição, foram utilizados os componentes "LINEPI_3.sup", que são a representação em pi de linhas de distribuição trifásicas com parâmetros concentrados. A tabela 1 apresenta os dados das linhas, sendo que L, C e R denotam, respectivamente, a resistência, indutância e capacitância.

Tabela 1 - Dados das linhas de distribuição da planta industrial.

Cabo	Localização da linha	Seção (mm ²)	Tensão nominal (kV)	Extensão (km)	L	C	R
					(mH/m)	C (uF/m)	R (Ω/m)
Cabo isolado EPR 105	Saída da subestação principal	300	34,5	0,5	0,0003316	0,00034196	0,000084
Cabo isolado EPR 105	Circuito do transformador de 5 MVA	185	34,5	0,22	0,0003554	0,00028686	0,000135
Cabo isolado EPR 105	Circuito do transformador de 7 MVA	185	34,5	0,22	0,0003554	0,00028686	0,000135

Cabo Alumínio coberto	Circuito do transformador de 5 MVA	240	34,5	0,14	0,0003422	0	0,000104
Cabo Alumínio coberto	Circuito do transformador de 7 MVA	240	34,5	0,14	0,0003422	0	0,000104
Cabo isolado EPR 105	Circuito do transformador de 5 MVA	120	34,5	0,23	0,0003926	0,00022421	0,000206
Cabo isolado EPR 105	Circuito do transformador de 7 MVA	120	34,5	0,23	0,0003926	0,00022421	0,000206
Cabo Alumínio coberto	Circuito do transformador de 7 MVA	120	34,5	0,45	0,0003926	0	0,000206
Cabo Alumínio coberto	Circuito do transformador de 7 MVA	120	34,5	0,28	0,0003926	0	0,000206
Cabo isolado EPR 105	Circuito do transformador de 5 MVA	50	34,5	0,05	0,0004615	0,00016346	0,000495
Cabo isolado EPR 105	Circuito do transformador de 7 MVA	70	34,5	0,05	0,0004297	0,00018902	0,000343
Cabo Alumínio coberto	Circuito do transformador de 5 MVA	120	4,16	0,05	0,0003183	0,00053233	0,000207
Cabo isolado EPR 105	Circuito do transformador de 7 MVA	240	4,16	0,05	0,0002944	0,00063626	0,000105

Fonte: o autor, 2021.

4.2.2- Transformadores

Para a representação dos transformadores, foram utilizados os componentes “SATTRAFO.sup”, que são transformadores trifásicos, saturáveis.

Todos os transformadores possuíram suas ligações estrela aterradas utilizando um resistor de 5 ohms. Além disso, visando evitar erros numéricos no ATP, foram inseridos entre os nós do primário e secundário, e entre estes mesmos nós e o aterramento, um capacitor e um resistor de 0.002uF e 1MΩ em série.

Também foram incluídos medidores de tensão e corrente para ambos os lados de cada transformador.

4.3.2.1- Transformadores 1 e 3 (230kV-34,5kV)

A tabela 2 apresenta os parâmetros dos transformadores do barramento de 230kV.

Tabela 2 - Dados dos transformadores 1 e 3.

Local	# do trafo	Potência (MVA)	Tensões (kV)		Ligações	Impedância do primário para secundário (%)	Resistências dos enrolamentos primários e secundários (Ω)
			Primário	Secundário			
Barramento 230kV	1	50	230000	34500	Yt-Yt	12	2% da reatância
Barramento 230kV	3	50	230000	34500	Yt-Yt	12	2% da reatância

Fonte: o autor, 2021.

A característica de saturação foi mantida com o padrão do ATP.

No ATP, o valor inserido nas tensões de primário e secundário de um transformador são por fase, logo, foi necessário realizar o ajuste seguindo a fórmula [12].

$$U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}} [12]$$

Onde:

U_f = Tensão de fase;

U_l = Tensão de linha.

Os valores de resistência e impedância utilizados para os transformadores estão na tabela 3.

Tabela 3 - Dados da impedância dos transformadores 1 e 3.

Impedância	Primário	Secundário
Resistência (ohm)	1,2696	0,0286
Indutância (mH)	168,3859	3,7887

Fonte: o autor, 2021.

4.2.2.2- Transformadores 2 e 4 (34,5kV-4,16kV)

A representação computacional dos transformadores localizados no fim de cada ramal foi modelada seguindo as características na tabela 4.

Tabela 4 - Dados dos transformadores 2 e 4.

Localização	Potência (MVA)	Tensões (kV)		Ligações	Impedância do primário para secundário (%)	Resistência dos enrolamentos (Ω)	
		Primário	Secundário			Primário	Secundário
Barrament o 34,5kV (Ramal de 5MVA)	5	34500	4160	D-Yt	7	2,2353	0,0108
Barrament o 34,5kV (Ramal de 7MVA)	7	34500	4160	D-Yt	8	1,3951	0,0068

Fonte: o autor, 2021.

Além disso, também foram inseridas as curvas de magnetização dos transformadores, seguindo as Tabelas 5 e Tabela 6.

Tabela 5 - Curva de magnetização do transformador 2.

Corrente (A)	Fluxo (Wb.T)
0,0039428233	25,884094089
0,0087694257	38,826141134
0,0125566729	51,768188179
0,0301005023	64,710235224
0,0483386147	77,652282269
0,0870181433	90,594329313
0,1603972644	103,53637636
0,3066439341	116,4784234
0,6876676943	129,42047045
2,2401920589	142,36251749
13,270115797	155,30456454
114,05245697	168,24661158
1108,9091362	181,18865863
11108,165232	194,13070567

Fonte: o autor, 2021.

Tabela 6 - Curva de magnetização do transformador 4.

Corrente (A)	Fluxo (Wb.T)
0,0039428233	25,884094089
0,0087694257	38,826141134
0,0125566729	51,768188179
0,0301005023	64,710235224
0,0483386147	77,652282269
0,0870181433	90,594329313
0,1603972644	103,53637636
0,3066439341	116,4784234
0,6876676943	129,42047045
2,2401920589	142,36251749
13,270115797	155,30456454
114,05245697	168,24661158
1108,9091362	181,18865863
11108,165232	194,13070567

Fonte: o autor, 2021.

4.2.3- Para-raios

Para a modelagem dos para-raios, utilizou-se os dados fornecidos em catálogos de fabricantes. Assim, as tabelas 7, 8 e 9 apresentam os dados, respectivamente, para os para-raios do setor do setor de 230 kV, 34,5 kV e 4,16kV. O componente “MOV – Type 92” foi utilizado para representação computacional no ATP, a partir da utilização de uma curva 30x60 μ s.

Tabela 7 - Dados dos para-raios ZnO para o trecho de 230kV.

Corrente (A)	Tensão (kV)
500	369
1000	381
2000	396

Fonte: o autor, 2021.

Tabela 8 - Dados dos para-raios ZnO para os trechos de 34,5kV.

Corrente (A)	Tensão (kV)
125	77,3
250	80,4
500	83,6

Fonte: o autor, 2021.

Tabela 9 - Dados dos para-raios ZnO para os trechos de 4,16kV.

Corrente (A)	Tensão (kV)
125	81,9
250	85,2
500	88,5

Fonte: o autor, 2021.

Além disso, para os valores de Vref foram utilizados os dados da tabela 10.

Tabela 10 - Dados de Vref dos para-raios ZnO.

Nível de tensão (kV)	Vref(V)
230	380000
34,5	80000
4,16	12000

Fonte: o autor, 2021.

4.2.4- Chave representativa de disjuntor

Para representar o fenômeno de abertura de disjuntor, foram utilizados os componentes "SWIT_3XT.sup", que são chaves trifásicas controladas por tempo. Ao abrir as chaves, é esperado que haja um fenômeno de transiente no sistema, gerando uma variação na tensão.

Para emular o efeito capacitivo da chave, foram utilizados capacitores trifásicos entre os polos da chave e a terra, e entre os polos da chave. Os capacitores escolhidos tem o valor de 0.0005uF por padrão, para representar este fenômeno.

4.2.5- Equivalente elétrico.

O circuito equivalente da rede de transmissão, a montante da subestação Integradora 230 kV, foi modelado a partir do componente "LINESY_3.sup", representando uma LT com acoplamento de fases, simétrica e com parâmetros concentrados. Os dados representativos do modelo estão identificados na Tabela 11. Nesta tabela, R+, L+, R0 e L0 denotam, respectivamente, a resistência de sequência positiva, indutância de sequência positiva, resistência de sequência zero e indutância de sequência zero.

Tabela 11 - Equivalentes elétricos nível de curto máximo.

Subestação	Tensão (kV)	R0 (Ω)	R+ (Ω)	L0 (mH)	L+ (mH)
Integradora	230	24,2	24,12	640,13	639,71

Fonte: o autor, 2021.

4.2.6- Dimensionamento da carga

A carga foi dimensionada para consumir 100% da capacidade dos transformadores 2 e 4, colocando-os em condição de operação de carga nominal. Para tal, foram modeladas duas cargas de perfil RL com fator de potência de 0,8.

As informações de R e L para cada carga foram inseridas conforme a tabela 12:

Tabela 12 - Valores de resistência e indutância das cargas.

Impedância	5MVA	7MVA
R (ohm)	2,7689	1,9778
L (mH)	5,5085	3,9347

Fonte: o autor, 2021.

4.2.7- Dimensionamento do snubber

Os snubber a serem utilizados foram inseridos imediatamente antes dos transformadores de 2 e 4, de forma a proteger o ramo em que está a chave.

Os valores da resistência e do capacitor de cada snubber foram respectivamente 40 ohms e 0,25uF, e calculados conforme [13].

4.3- COMPORTAMENTO DO SISTEMA EM REGIME PERMANENTE

Neste tópico serão realizadas comparações entre o sistema operando em regime permanente sem a presença do snubber e com a presença do snubber, afim de observar a diferença nas condições de operação do sistema.

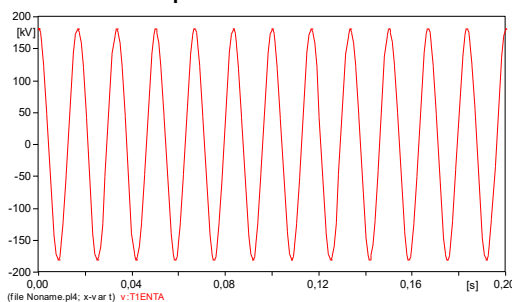
Para verificar as variações, serão utilizados como parâmetros os valores de pico de tensão e de corrente.

4.3.1- Operação do sistema sem snubber

Para verificar a operação do sistema, será necessário observar níveis de tensão em pontos chave do sistema. Estes pontos serão: barramento de 230kV, primário do transformador 2, primário do transformador 4, secundário do transformador 2 e secundário do transformador de 4. As correntes analisadas serão: corrente fornecida ao sistema, corrente no primário do transformador 2, no primário do transformador 4, no secundário do transformador 2 e no secundário do transformador de 4.

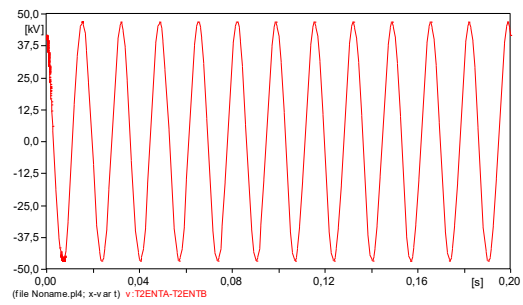
Nas imagens 12, 13, 14, 15 e 16 é possível observar que o comportamento das ondas de tensão analisadas é uniforme, e os valores de tensão eficaz, de pico e referência estão na tabela 13.

Figura 11 - Forma de da tensão onda no barramento de 230kV em regime permanente.



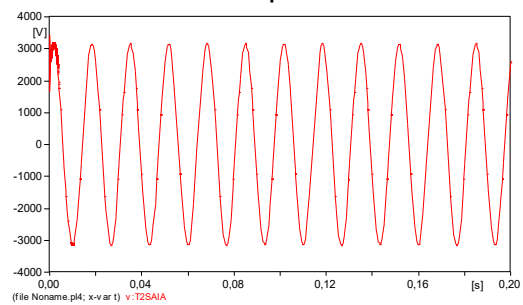
Fonte: o autor, 2021.

Figura 12 - Forma de onda da tensão para o primário do transformador 2



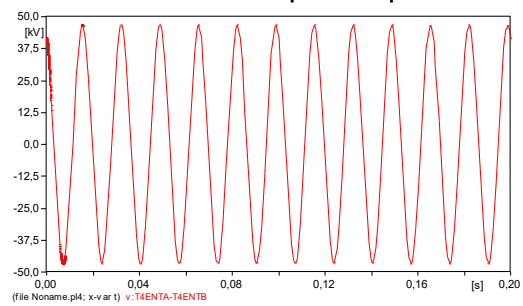
Fonte: o autor, 2021.

Figura 13 - Forma de onda da tensão para o secundário do transformador 2



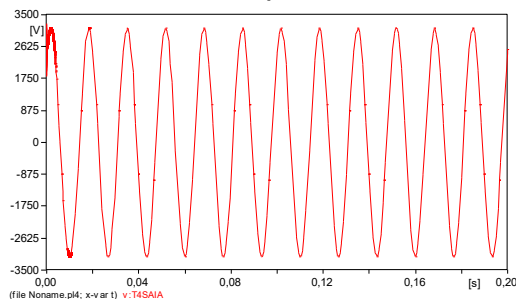
Fonte: o autor, 2021.

Figura 14 - Forma de onda da tensão para o primário do transformador 4



Fonte: o autor, 2021.

Figura 15 - Forma de onda da tensão para o secundário do transformador 4



Fonte: o autor, 2021.

Tabela 13 - Valores de tensão no sistema em regime permanente.

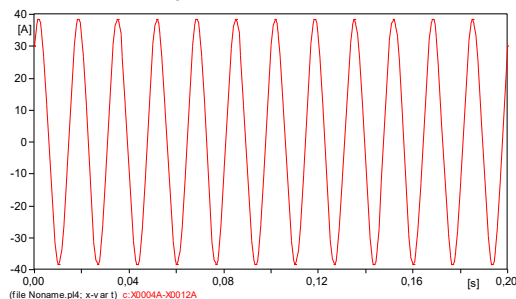
Pontos observados	Vrms (kV)	Vpico (kV)	Vref (kV)
Barramento 230kV	222,7	181,8	230
Primário do transformador 2	34,5	48,8	34,5
Secundário do transformador 2	3,9	3,2	4,16
Primário do transformador 4	33,0	46,6	34,5
Secundário do transformador 4	3,8	3,1	4,16

Fonte: o autor, 2021.

É possível observar, devido às perdas nas linhas, que os valores de tensão no primário e secundário dos transformadores 2 e 4 são abaixo do valor de referência.

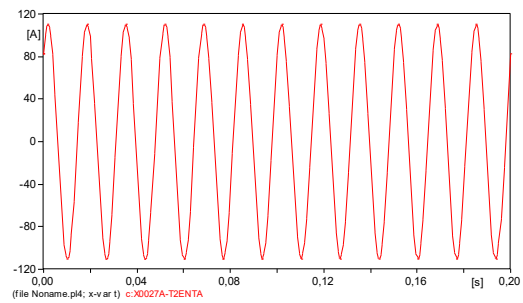
Nas imagens 16, 17, 18, 19 e 20 serão observados os valores de corrente fornecida ao sistema, no primário e secundário dos transformadores 2 e 4. Na tabela 14 estão compilados os valores de corrente rms e pico.

Figura 16 - Forma de onda da corrente fornecida ao sistema em regime permanente.



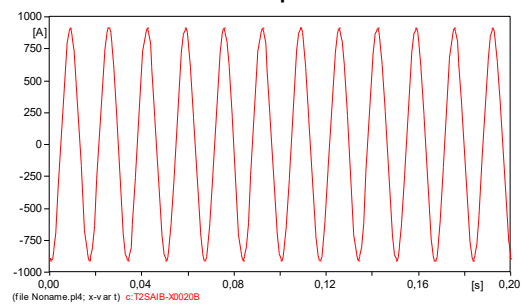
Fonte: o autor, 2021.

Figura 17 - Forma de onda da corrente para o primário do transformador 2



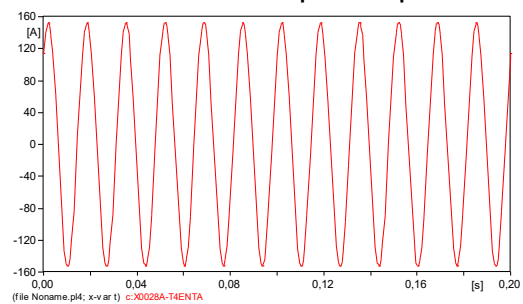
Fonte: o autor, 2021.

Figura 18 - Forma de onda da corrente para o secundário do transformador 2



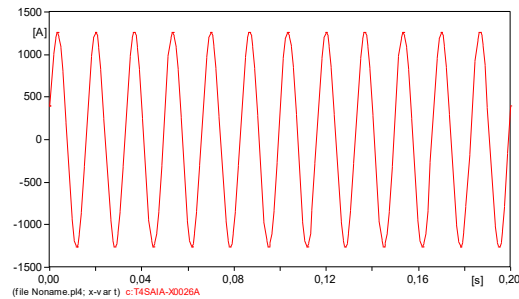
Fonte: o autor, 2021.

Figura 19 - Forma de onda da corrente para o primário do transformador 4



Fonte: o autor, 2021.

Figura 20 - Forma de onda da corrente para o secundário do transformador 4



Fonte: o autor, 2021.

Tabela 14 - Valores de corrente do sistema em regime permanente.

Pontos observados	I _{rms} (A)	I _{pico} (A)
Corrente total do sistema	27,2	38,5
Primário do transformador 2	77,9	110,2
Secundário do transformador 2	644,0	910,7
Primário do transformador 4	108,1	152,9
Secundário do transformador 4	894,6	1265,1

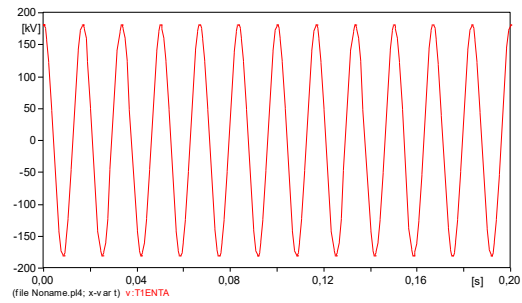
Fonte: o autor, 2021.

4.3.2- Operação do sistema com snubber

Para entender o efeito do snubber na rede em regime permanente, serão verificados os valores de tensão e corrente assim como no tópico 4.4.1, para ao final serem comparados aos valores de regime permanente sem o snubber.

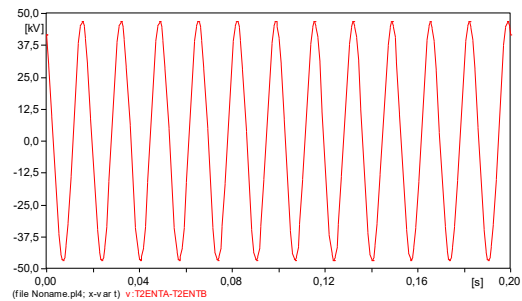
As imagens 21, 22, 23, 24 e 25 são referentes às curvas de tensão referente ao Barramento de 230kV, primário e secundário do transformador 2 e primário e secundário do transformador 4, respectivamente. Já a tabela 15 contém as informações dos valores de tensão eficaz (V_{rms}), tensão de pico (V_{pico}) e tensão esperada do barramento (V_{ref}).

Figura 21 - Forma de onda tensão onda no barramento de 230kV em regime permanente com snubber.



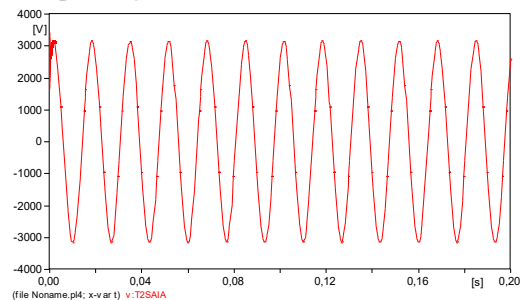
Fonte: o autor, 2021.

Figura 22 - Forma de onda da tensão para o primário do transformador 2 em regime permanente com snubber.



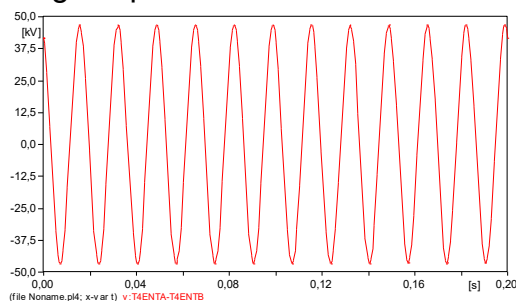
Fonte: o autor, 2021.

Figura 23 - Forma de onda da tensão para o secundário do transformador 2 em regime permanente com snubber.



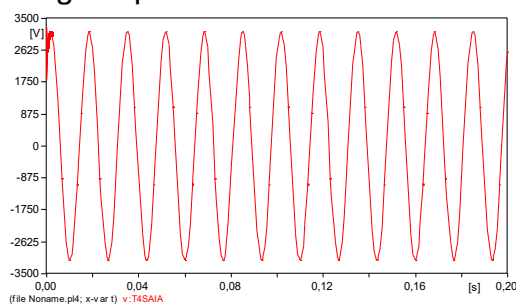
Fonte: o autor, 2021.

Figura 24 - Forma de onda da tensão para o primário do transformador 4 em regime permanente com snubber.



Fonte: o autor, 2021.

Figura 25 - Forma de onda da tensão para o secundário do transformador 4 em regime permanente com snubber



Fonte: o autor, 2021.

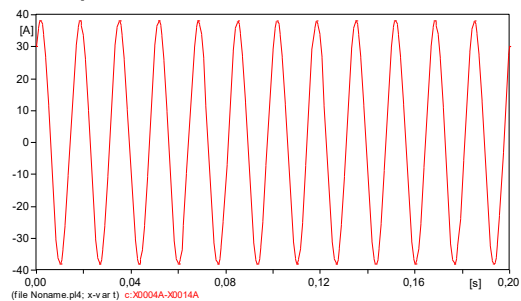
Tabela 15 - Valores de tensão no sistema em regime permanente com snubber.

Pontos observados	Vrms (kV)	Vpico (kV)	Vref (kV)
Barramento 230kV	222,4	181,6	230
Primário do transformador 2	33,1	46,9	34,5
Secundário do transformador 2	3,9	3,2	4,16
Primário do transformador 4	33,0	46,7	34,5
Secundário do transformador 4	3,8	3,1	4,16

Fonte: o autor, 2021.

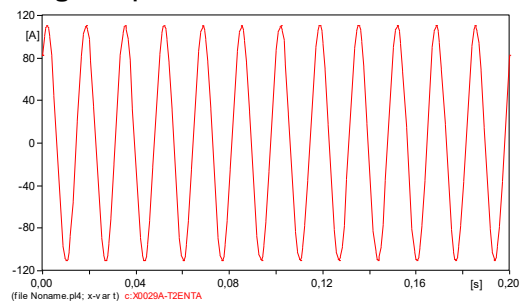
As figuras 26, 27, 28, 29 e 30 são referentes às curvas de corrente fornecidas pela rede ao sistema estudado, as correntes do primário e secundário do transformador 2 e do transformador 4, respectivamente. Já a tabela 16 contém os valores de corrente de pico (I_{pico}) e eficaz (I_{rms}) em cada um dos pontos analisados.

Figura 26 - Forma de onda da corrente fornecida ao sistema em regime permanente com snubber.



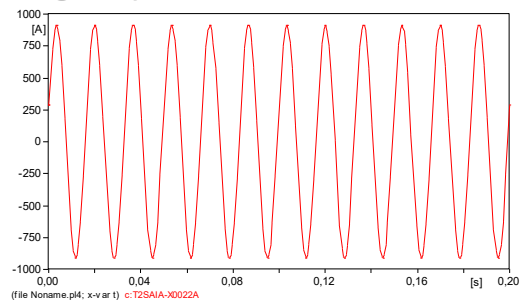
Fonte: o autor, 2021.

Figura 27 - Forma de onda da corrente para o primário do transformador 2 em regime permanente com snubber.



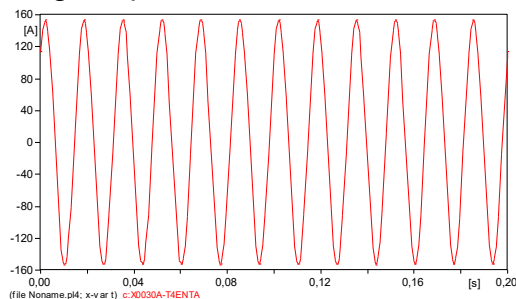
Fonte: o autor, 2021.

Figura 28 - Forma de onda da corrente para o secundário do transformador 2 em regime permanente com snubber.



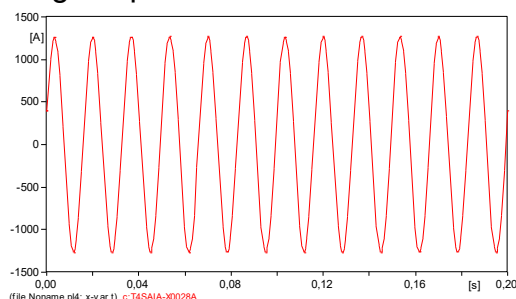
Fonte: o autor, 2021.

Figura 29 - Forma de onda da corrente para o primário do transformador 4 em regime permanente com snubber.



Fonte: o autor, 2021.

Figura 30 - Forma de onda da corrente para o secundário do transformador 4 em regime permanente com snubber.



Fonte: o autor, 2021.

Tabela 16 - Valores de corrente do sistema em regime permanente com snubber.

Pontos observados	I _{rms} (A)	I _{pico} (A)
Corrente total do sistema	27,0	38,1
Primário do transformador 2	78,0	110,3
Secundário do transformador 2	644,8	911,8
Primário do transformador 4	108,3	153,1
Secundário do transformador 4	895,7	1266,7

Fonte: o autor, 2021.

4.3.3- Influência do snubber no regime permanente

A tabela 17 apresenta um compilado dos dados referentes à tensão encontrada em cada ponto observado já coletados, mas com os valores em pu e com uma coluna informando a variação percentual da tensão, permitindo assim que sejam observadas as magnitudes das variações.

Tabela 17 - Comparação de valores de tensão da operação do sistema com e sem snubber.

Pontos observados	Vrms (pu)			Vref (kV)	Vpico (kV)		
	Sem snubber	Com snubber	%var		Sem snubber	Com snubber	%var
Barramento 230kV	0,968	0,967	-0,13%	230	181,600	181,837	0,13%
Primário do transformador 2	1,001	0,960	-4,03%	34,5	46,850	48,816	4,20%
Secundário do transformador 2	0,928	0,929	0,06%	4,16	3,155	3,153	-0,06%
Primário do transformador 4	0,955	0,956	0,08%	34,5	46,651	46,615	-0,08%
Secundário do transformador 4	0,921	0,922	0,11%	4,16	3,131	3,128	-0,11%

Fonte: o autor, 2021.

Dentre as variações de tensão constatadas, é possível observar que apesar de os níveis de tensão no secundário dos transformadores 2 e 4 estarem em níveis precários, conforme dita o Módulo 8 do PRODIST [11], a interferência do snubber foi mínima.

O único caso em que o snubber influenciou em uma mudança significativa foi no transformador 2, que mesmo assim continuou em uma faixa adequada de tensão.

4.4- COMPORTAMENTO DO SISTEMA APÓS A ABERTURA DA CHAVE

Para a análise do comportamento do sistema após a abertura das chaves, serão analisadas 2 situações. Na primeira, a chave do transformador 2 será aberta no instante $t=0.082s$ e o transformador 4 continuará conectado à rede. Já na situação 2, a chave que será desacoplada será a do transformador 4, deixando o transformador 2 conectado à rede.

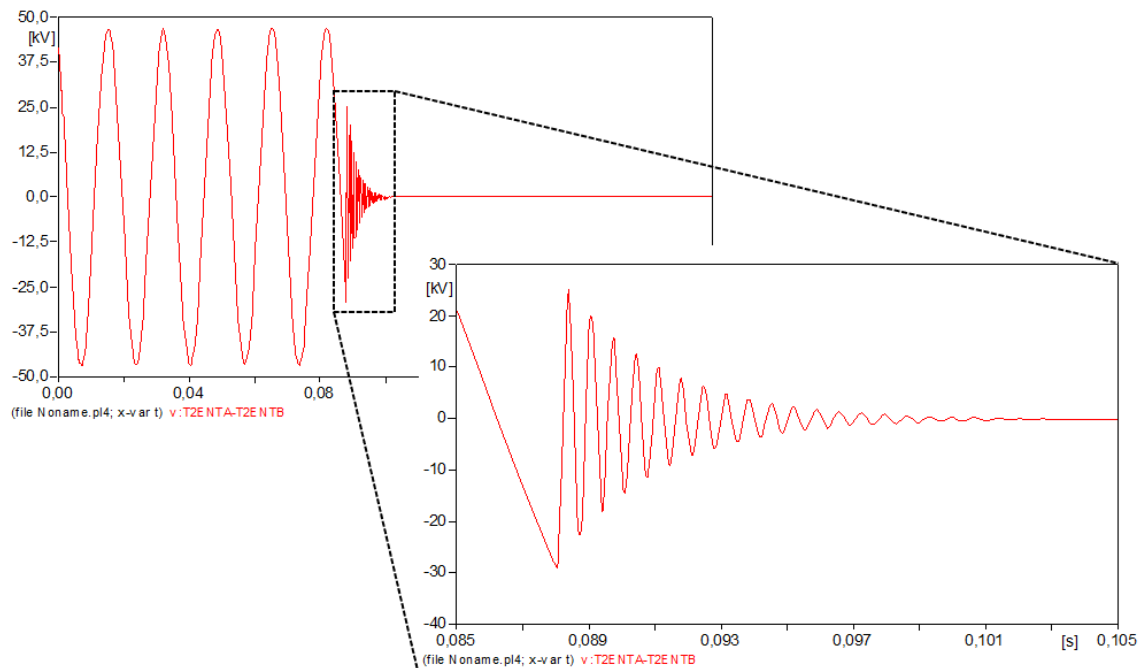
A estrutura de análise de cada uma das situações se guiará pelos seguintes tópicos:

- Transitório gerado pela abertura da chave no primário do transformador à jusante;
- Transitório gerado pela abertura da chave no primário do transformador do ramal paralelo;
- Transitório gerado pela abertura da chave no secundário dos transformadores 2 e 4.

4.4.1- Situação de abertura da chave a montante do transformador 2 sem snubber

Após a execução da simulação, é possível observar na figura 31 o surgimento de um transitório de alta frequência.

Figura 31 - Transitório de alta frequência no secundário do transformador 2.

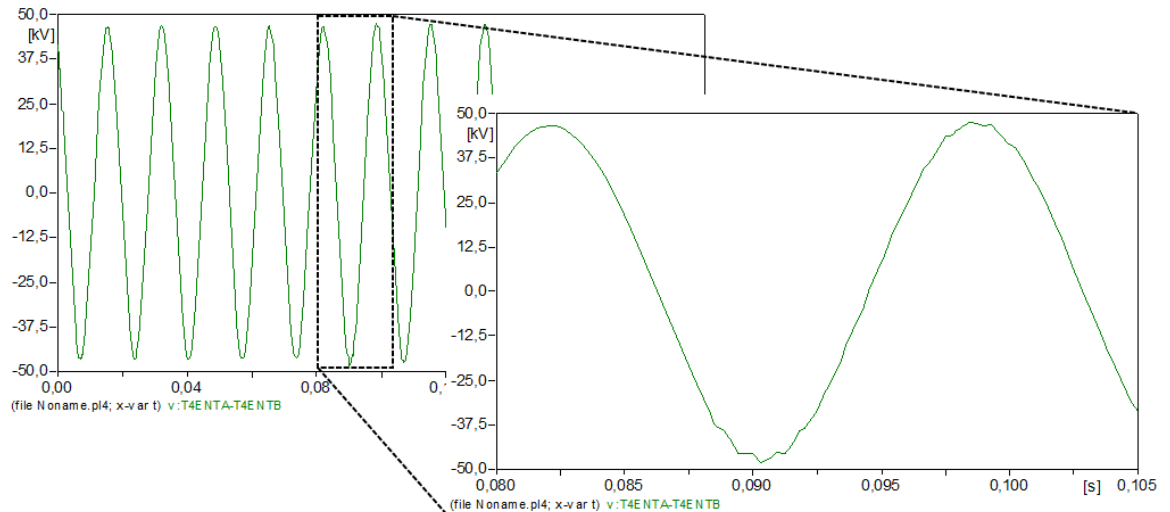


Fonte: o autor, 2021.

O valor de pico atingido pelo transitório é de 25,37kV e apesar de não atingir um valor acima do nominal, pode-se em determinadas situações este nível chegar a duas vezes do nível nominal. Além disso, a alta frequência do transitório pode ser responsável pelo mal funcionamento de equipamentos.

Além disso, é possível observar também que o chaveamento do transformador 2 causa um transitório na tensão do primário do transformador 4. Este efeito pode ser observado na figura 32.

Figura 32 - Transitório causado pelo chaveamento do transformador 2 na tensão do primário do transformador 4.



Fonte: o autor, 2021.

Os valores atingidos por estes transitórios no primário do transformador 4 podem ser analisados na tabela 18.

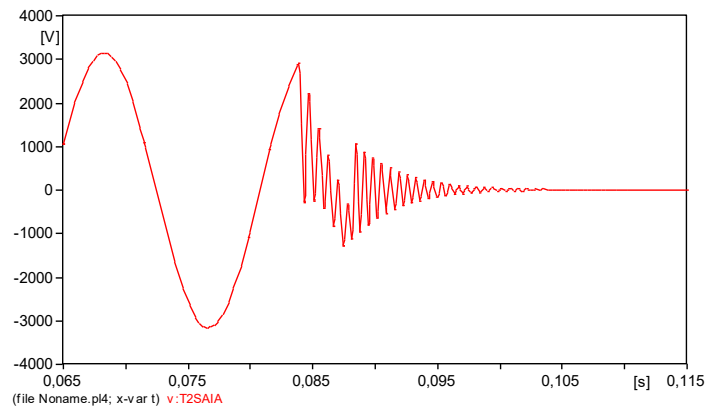
Tabela 18 - Valores de tensão pico na onda de transitório do transformador 4.

Ponto da onda	Vp (kV)	Vpref (kV)
Pico negativo	-48223	-46614
Pico positivo	47734	46618

Fonte: o autor, 2021.

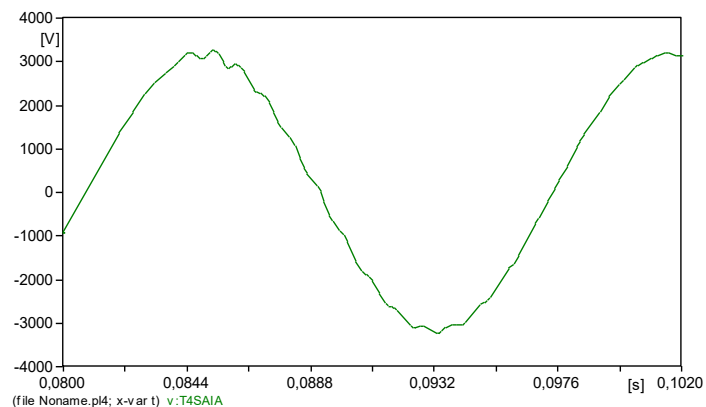
Devido ao transitório no primário dos transformadores 2 e 4, é esperado que também haja o fenômeno de transiente também no secundário. Tal fenômeno é observado nas figuras 33 e 34 que mostram a tensão no secundário dos transformadores 2 e 4, respectivamente, para o instante de chaveamento.

Figura 33 - Transitório causado pelo chaveamento do transformador 2 na tensão do secundário do transformador 2.



Fonte: o autor, 2021.

Figura 34 - Transitório causado pelo chaveamento do transformador 2 na tensão do secundário do transformador 4.

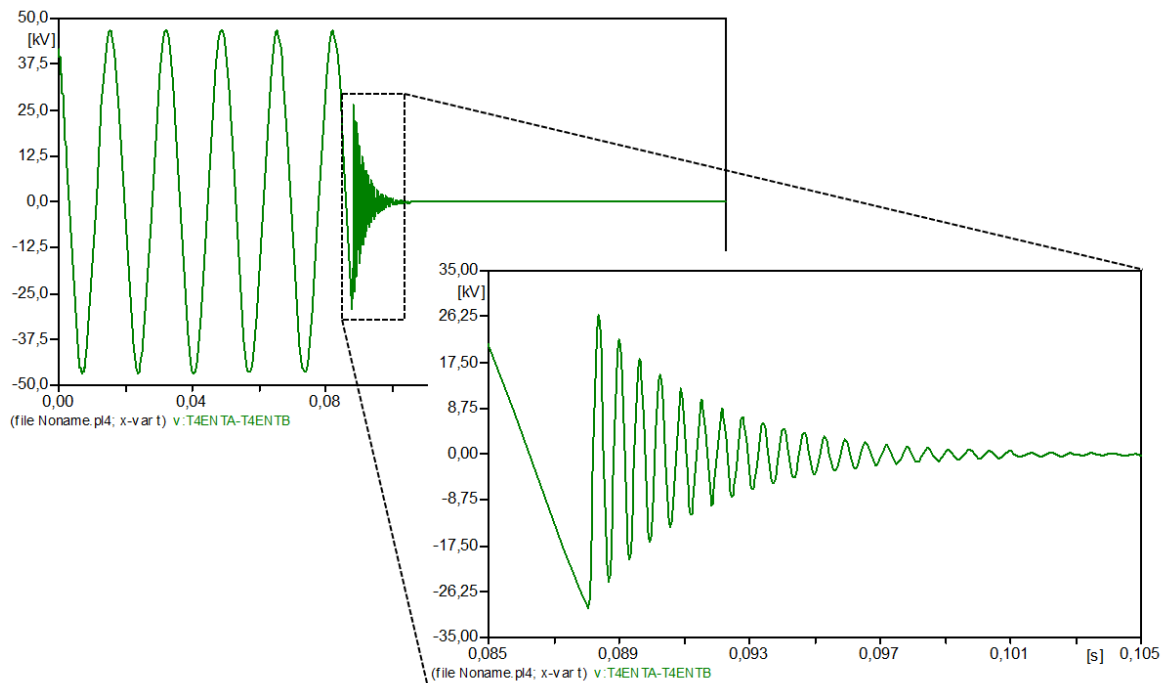


Fonte: o autor, 2021.

4.4.2- Situação de abertura da chave a montante do transformador 4 sem snubber

A situação 2 é focada na resposta transitória da abertura da chave do transformador 4, que é esperada que seja maior devido à maior potência tanto do transformador quanto da carga. Após a execução da simulação, é possível observar no gráfico de tensão do primário do transformador 4 o surgimento de um transitório de alta frequência muito parecido com o da Figura 31, no tópico 4.4.1.

Figura 35 - Transitório de alta frequência no secundário do transformador 4.

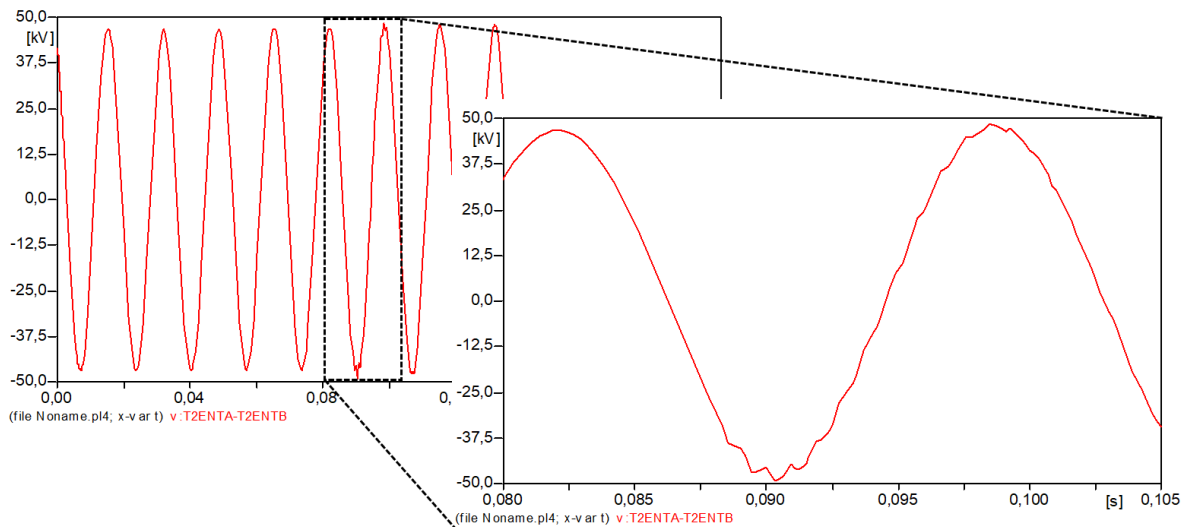


Fonte: o autor, 2021.

O valor de pico atingido pelo transitório é de 26,46kV e como era esperado, o valor de pico atingido foi maior que o valor observado para o primário do transformador 2 no tópico 4.4.1.

Além disso, a reação da tensão no primário do transformador 2 observada após a abertura da chave do transformador 4 é apresentada na figura 36 e também possui valores de pico maiores, conforme pode ser observado na tabela 19.

Figura 36 - Transitório causado pelo chaveamento do transformador 2 na tensão do primário do transformador 4.



Fonte: o autor, 2021.

Os valores atingidos por estes transitórios no primário do transformador 4 podem ser analisados na tabela 19.

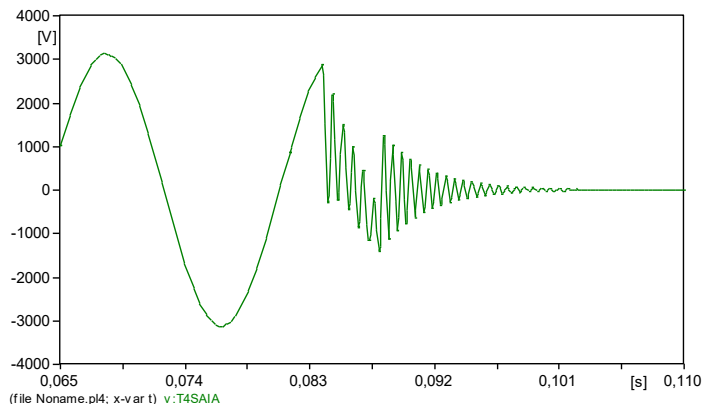
Tabela 19 - Valores de tensão pico na onda de transitório do transformador 4.

Ponto da onda	Vp (kV)	Vpref (kV)
Pico negativo	-49135	-46815
Pico positivo	48568	46818

Fonte: o autor, 2021.

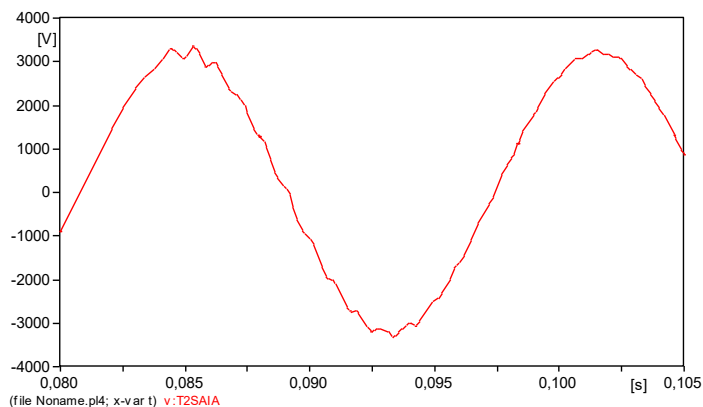
Assim como no tópico 4.4.1, é possível observar o fenômeno de transiente também no secundário dos transformadores. Tal fenômeno é observado nas figuras 37 e 38 que mostram a tensão no secundário dos transformadores 4 e 2, respectivamente, para o instante de chaveamento.

Figura 37 - Transitório causado pelo chaveamento do transformador 4 na tensão do secundário do transformador 4.



Fonte: o autor, 2021.

Figura 38 - Transitório causado pelo chaveamento do transformador 4 na tensão do secundário do transformador 2.



Fonte: o autor, 2021.

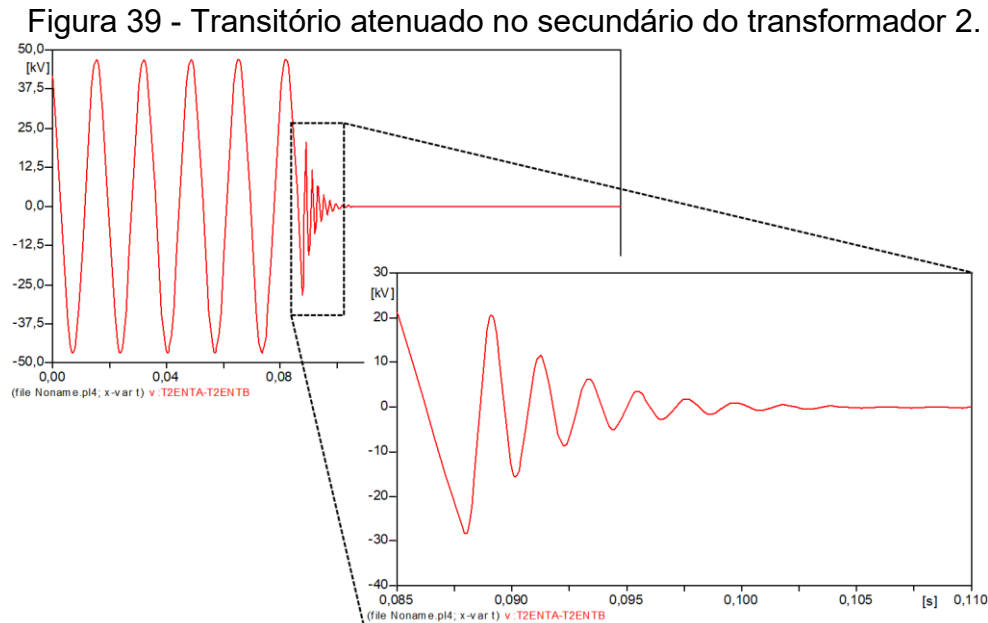
4.5- COMPORTAMENTO DO SISTEMA COM A PROTEÇÃO SNUBBER

Para entender a efetividade do snubber, os tópicos 4.5.1 e 4.5.2 vão conter uma análise seguindo os mesmos pontos observados nos tópicos 4.4.1 e 4.4.2, de forma a permitir uma comparação entre os efeitos gerados pela abertura das chaves do sistema.

4.5.1- Situação de abertura da chave a montante do transformador 2 com snubber

Observando o resultado da simulação para o sistema com os snubbers incluídos do sistema, é possível perceber já no primeiro caso uma mudança muito

grande no perfil da onda. Na figura 39 podemos observar um transitório no secundário do transformador 2 muito mais atenuado, tanto em valor de tensão de pico quanto na frequência, quando comparado à figura 31.

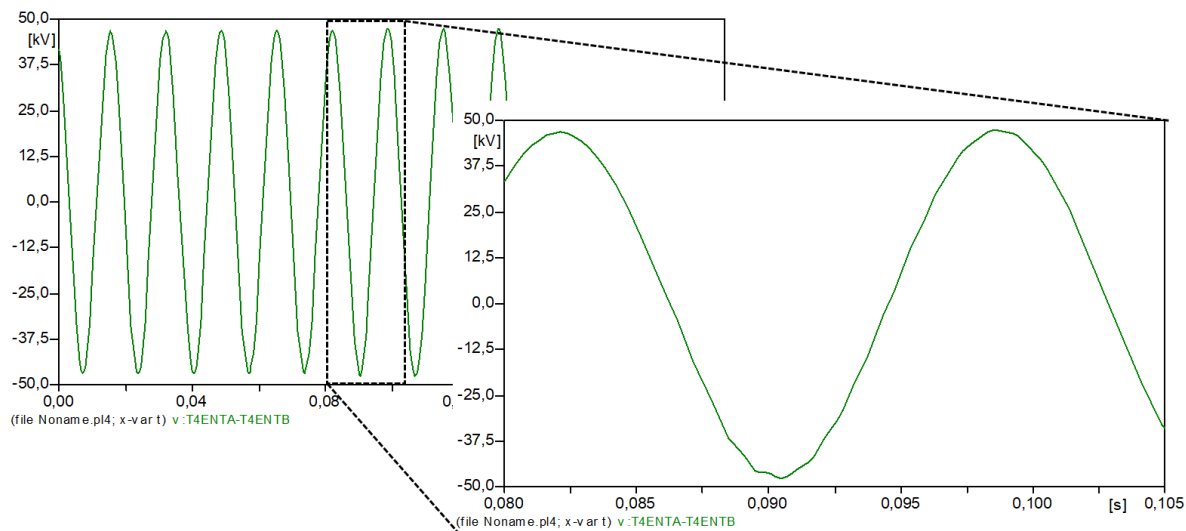


Fonte: o autor, 2021.

Além de ser possível notar uma diminuição na frequência do transitório, o valor de pico atingido pelo transitório é menor que o observado no sistema sem snubber, atingindo um valor de 20,5kV.

Além disso, é possível observar também que o transitório causado no primário do transformador 4, quando ocorre o chaveamento do transformador 2 é praticamente imperceptível, conforme mostra a figura 40.

Figura 40 - Transitório atenuado causado pelo chaveamento do transformador 2 na tensão do secundário do transformador 4.



Fonte: o autor, 2021.

Os valores atingidos por estes transitórios no primário do transformador 4, podem ser verificados na tabela 20.

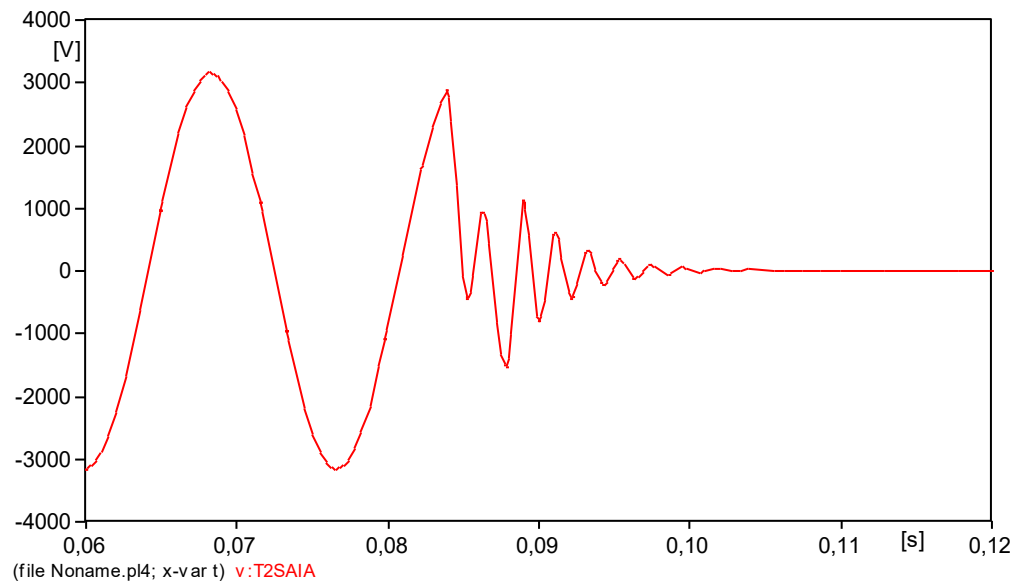
Tabela 20 - Valores de tensão pico na onda de transitório do transformador 4.

Ponto da curva	Com snubber	Tensões ideais
	Vp (kV)	Vpref (kV)
Pico positivo	47271	46618
Pico negativo	-47794	-46614

Fonte: o autor, 2021.

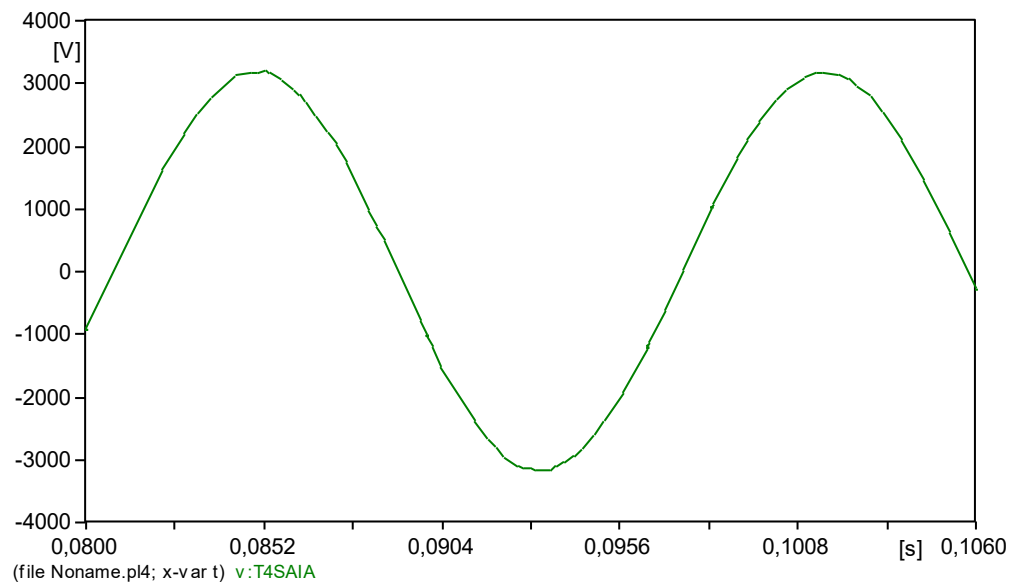
O último ponto a ser observado são as tensões no secundário de cada transformador, de forma a verificar se a proteção do snubber também foi eficaz nestes pontos da rede. Nas imagens 41 e 42 estão contidos os formatos de onda da tensão do secundário dos transformadores 2 e 4 respectivamente.

Figura 41 - Transitório no secundário do transformador 2 para a situação 1 atenuada.



Fonte: o autor, 2021.

Figura 42 - Transitório no secundário do transformador 4 para a situação 1 atenuada.

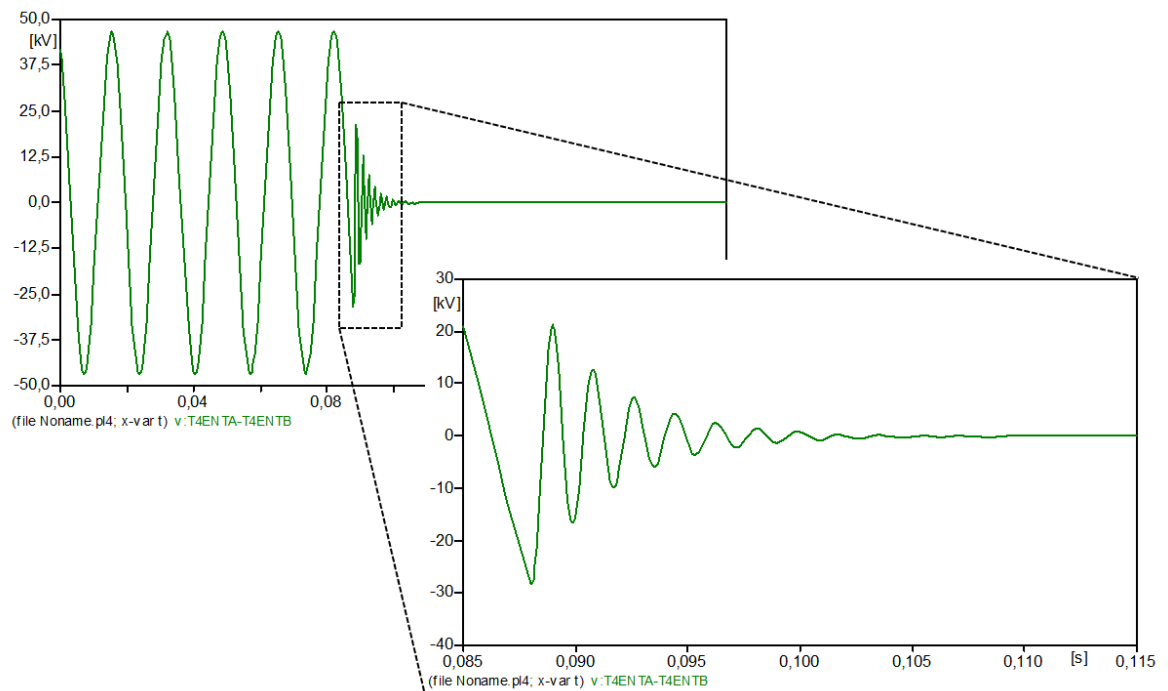


Fonte: o autor, 2021.

4.5.2- Situação de abertura da chave a montante do transformador 4 com snubber

Na figura 43 é possível observar, com um enfoque no instante de abertura da chave, o formato de onda da tensão no primário do transformador 4, que semelhante ao ocorrido no tópico 4.5.1, também possui uma frequência de transitório mais baixa que a situação não atenuada.

Figura 43 - Transitório atenuado no secundário do transformador 2.

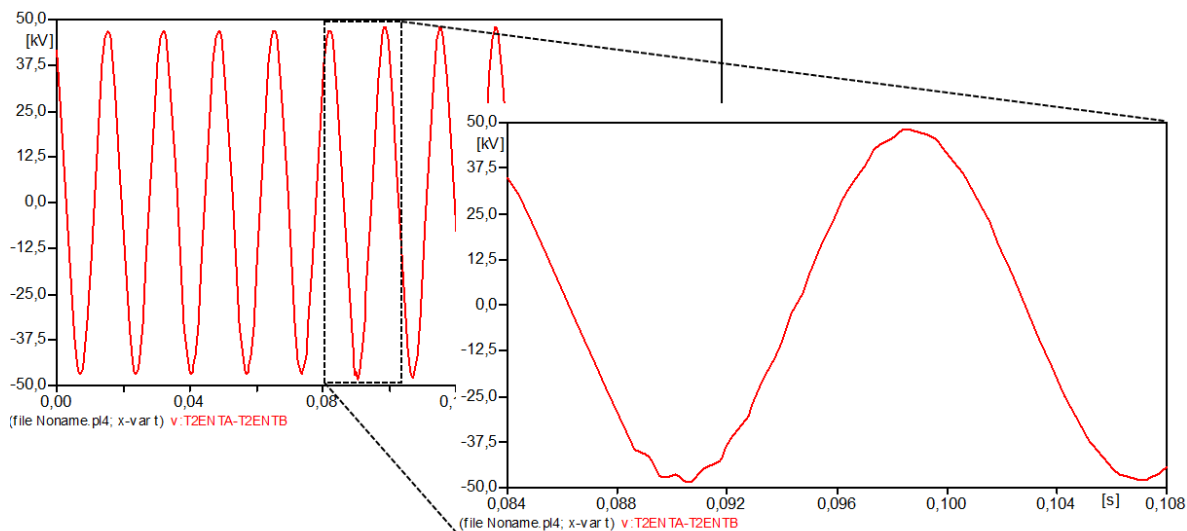


Fonte: o autor, 2021.

Além de ser possível notar uma diminuição na frequência do transitório, o valor de pico atingido pelo transitório é menor que o observado no sistema sem snubber, atingindo um valor de 21,2kV.

Assim como no tópico 4.5.1, na figura 44 é possível observar um leve transitório na onda de tensão do transformador paralelo à chave aberta, mas mais atenuado no momento de chaveamento, quando comparado à situação sem snubber.

Figura 44 - Transitório atenuado causado pelo chaveamento do transformador 2 na tensão do secundário do transformador 4.



Fonte: o autor, 2021.

Os valores atingidos por estes transitórios no primário do transformador 4, podem ser verificados na tabela 21.

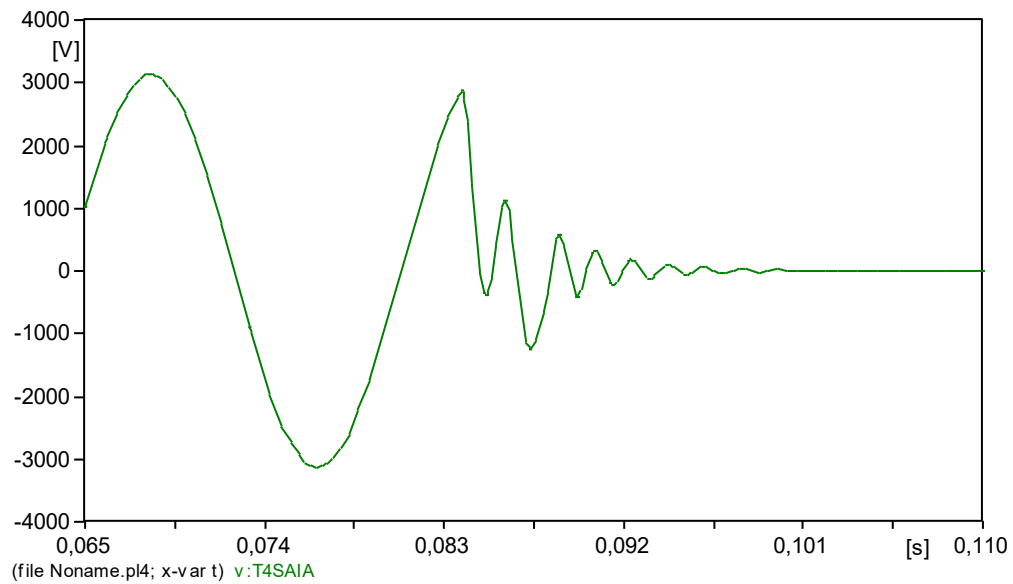
Tabela 21 - Valores de tensão pico na onda de transitório do transformador 4.

Ponto da curva	Com snubber	Tensões ideais
	Vp (kV)	Vpref (kV)
Pico positivo	48118	46818
Pico negativo	-48559	-46815

Fonte: o autor, 2021.

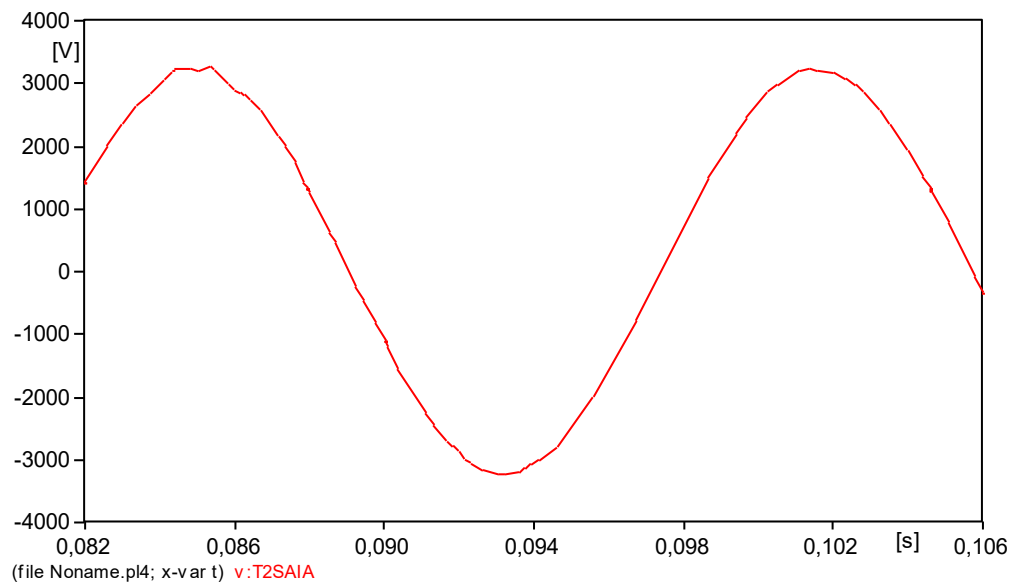
Os últimos pontos observados são as tensões no secundário de cada transformador. Nas imagens 45 e 46 estão contidos os formatos de onda da tensão do secundário dos transformadores 4 e 2 respectivamente.

Figura 45 - Transitório no secundário do transformador 4 para a situação 2 atenuada.



Fonte: o autor, 2021.

Figura 46 - Transitório no secundário do transformador 2 para a situação 2 atenuada.



Fonte: o autor, 2021.

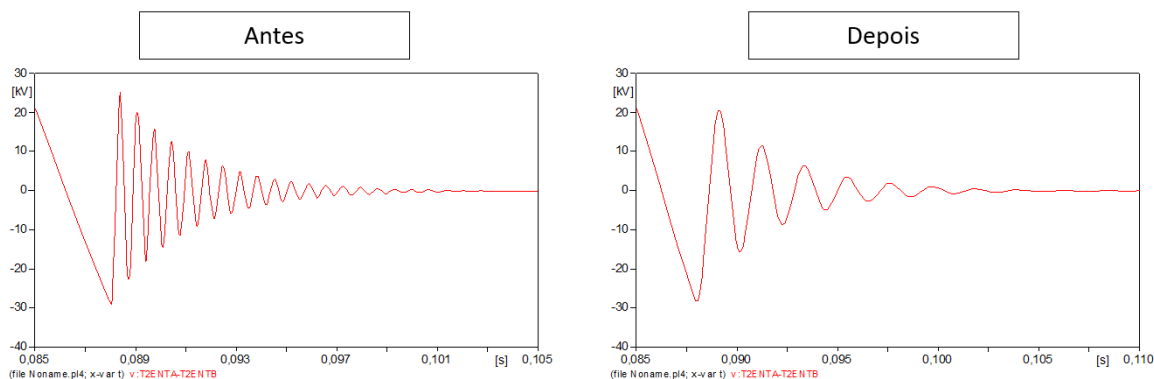
4.6- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para verificar a eficácia do snubber, é necessário comparar as ondas de tensão em cada situação, antes e depois da conexão do snubber.

4.6.1- Transitórios no primário do transformador a jusante das chaves.

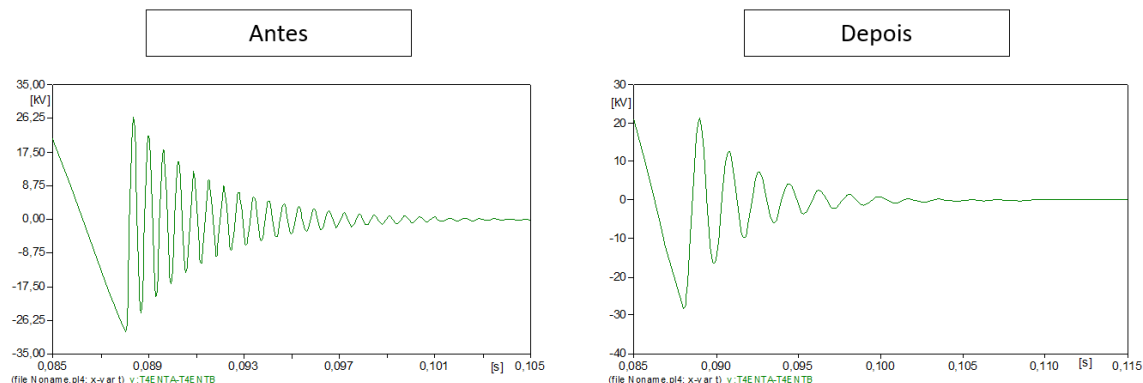
As figuras 47 e 48 comparam as ondas de tensão no primário de cada transformador a jusante das chaves no momento em que são abertos. Na tabela 22 é possível comparar as diferenças numéricas entre as duas condições de operação.

Figura 47 - Onda de tensão antes e depois no primário do transformador 2, na situação 1.



Fonte: o autor, 2021.

Figura 48 - Onda de tensão antes e depois no primário do transformador 4, na situação 4.



Fonte: o autor, 2021.

Tabela 22 - Comparação entre os valores de tensão de pico antes e depois.

Transformador	Tensão de pico (kV)		Diferença
	Antes	Depois	
2	25,37	20,5	19%
4	26,46	21,2	20%

Fonte: o autor, 2021.

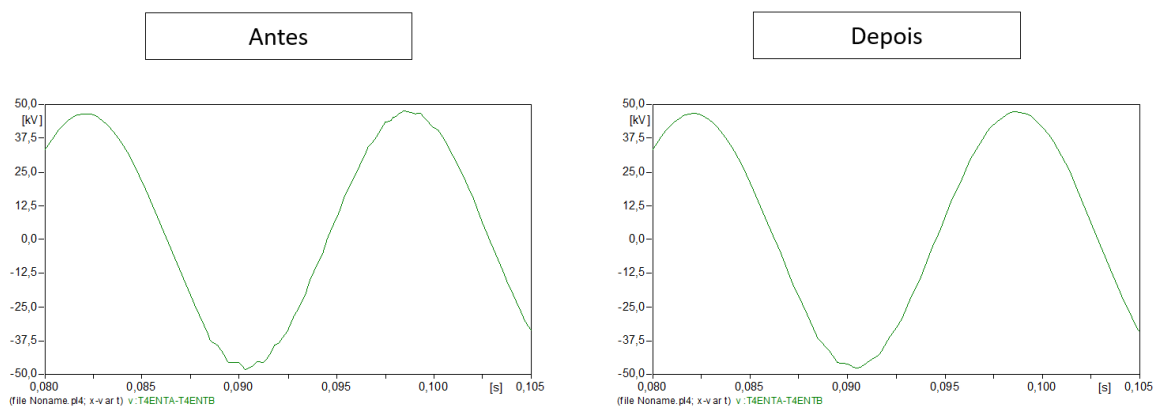
Após a comparação, é possível perceber que para este caso além de o valor de pico da tensão cair até 20%, a frequência do transiente abaixa muito, e este fato por si só já é uma vantagem ao sistema, visto que os aparelhos podem ser danificados devido à alimentação de frequência não natural ao sistema.

4.6.2- Transitórios gerados pela abertura da chave no primário do transformador do ramal em paralelo.

É válido ressaltar que quando a chave abre, o snubber é responsável por proteger o ramo isolado, a atenuação que acontece no ramal em paralelo é advinda do snubber do ramal em questão.

É possível observar essa atenuação nas imagens 49 e 50 que mostram as ondas de tensão no primário dos transformadores 4 e 2 respectivamente. Além disso, nas tabelas 23 e 24 também é possível comparar em valores a diferença que o snubber proporcionou na rede.

Figura 49 - Onda de tensão antes e depois no primário do transformador 4, para a situação 1.



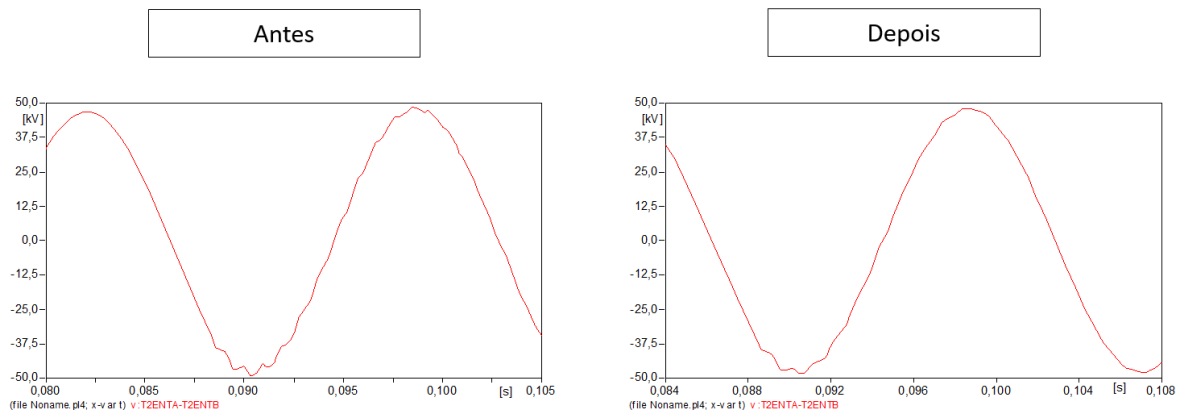
Fonte: o autor, 2021.

Tabela 23 - Valores da onda de tensão antes e depois no primário do transformador 4, para a situação 1.

Ponto da curva	Com snubber	Com snubber	Tensões ideais
	V _p (kV)	V _p (kV)	V _{pref} (kV)
Pico positivo	47734	47271	46618
Pico negativo	-48223	-47794	-46614

Fonte: o autor, 2021.

Figura 50 - Onda de tensão antes e depois no primário do transformador 2, para a situação 2.



Fonte: o autor, 2021.

Tabela 24 - Valores da onda de tensão antes e depois no primário do transformador 2, para a situação 2.

Ponto da curva	Sem snubber	Com snubber	Tensões ideais
	V _p (kV)	V _p (kV)	V _{pref} (kV)
Pico positivo	48568	48118	46818
Pico negativo	-49135	-48559	-46815

Fonte: o autor, 2021.

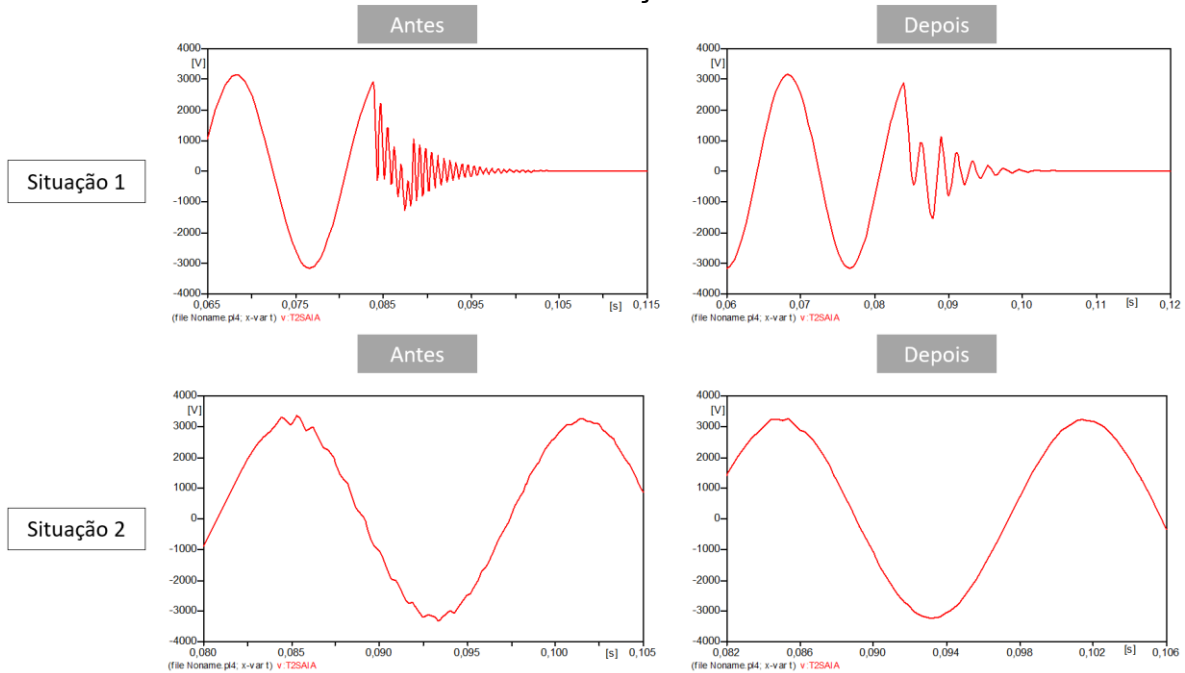
Assim como no tópico 4.6.1, é possível observar as diferenças que a instalação no snubber trouxeram para a rede, em especial na aproximação dos valores do transiente aos valores que eram esperados da tensão. A forma de onda mais próxima de uma senoide também é algo importante para a qualidade da rede, por isto, no módulo 8 do PRODIST são tão enfatizados os harmônicos na rede [11].

4.6.3- Transitórios gerados pela abertura das chaves no secundário dos transformadores 2 e 4

Apesar de a principal diferença acontecer no primário do transformador, cargas no secundário também podem sofrer com os transientes gerados pelo desacoplamento do

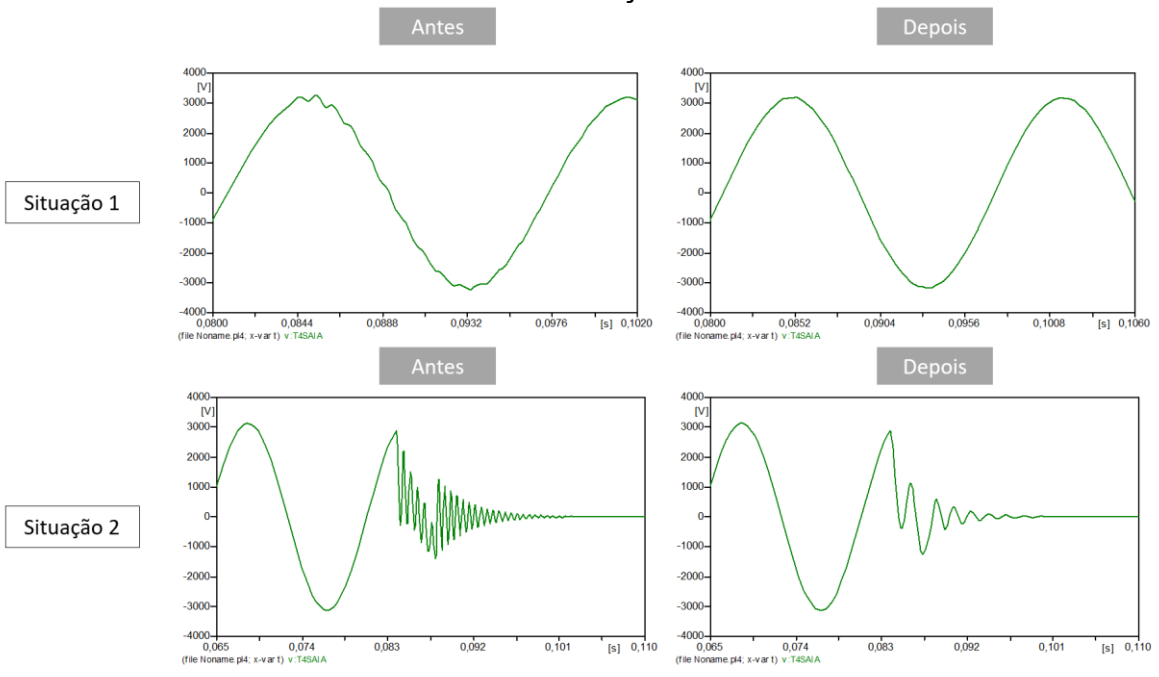
ramal à rede. Nas imagens 51 e 52 é possível ver a diferença nas ondas de tensão de dos transformadores 2 e 4, respectivamente, antes e depois da inserção do snubber na rede e para as duas situações.

Figura 51 - Antes e depois das tensões no secundário do transformador 2 para cada situação.



Fonte: o autor, 2021.

Figura 52 - Antes e depois das tensões no secundário do transformador 2 para cada situação.



Fonte: o autor, 2021.

5- CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos, foi possível observar com sucesso a efetividade da aplicação do snubber em um ramal de distribuição, mas o snubber também se mostra como uma solução viável para outros casos, como o chaveamento de cargas indutivas (que tem um perfil de resposta muito parecido ao de um transformador), descargas elétricas, chaveamentos de bancos de capacitores e chaveamentos eletrônicos.

Dependendo do valor de capacitância escolhido para o capacitor, um fenômeno muito preocupante em qualquer sistema elétrico, chamado de ressonância elétrica pode acontecer. Dependendo da configuração do sistema e dos valores que tivermos no equivalente elétrico a ressonância pode causar efeitos semelhantes aos de um curto circuito, ou aumentos muito bruscos de tensão. Para se evitar este efeito, é necessário calcular um valor de capacitor que não entre em ressonância no circuito.

Como o snubber é composto apenas por uma resistência e um capacitor, a complexidade da solução aplicada ao se instalar o elemento numa rede é muito baixo, o que gera robustez à rede, que além de ser protegida contra transientes elétricos, agora possui mais um elemento que tende a manter mais estáveis os níveis de tensão. Além disso, a simplicidade de um snubber faz com que sua instalação e manutenção sejam muito baratos, já que além de ser um elemento em paralelo à rede, que pode ser facilmente desacoplado, adquirir capacitores e resistências é relativamente simples, se comparado a obter outros dispositivos protetores contra transientes.

Conforme exposto no tópico 4.4.2, uma das possíveis desvantagens do snubber seria um abaixamento na tensão, visto que os novos elementos adicionados podem ser enxergados como carga pela fonte do sistema. Entretanto, apesar de realmente abaixar o nível de tensão, o valor não é significativo, considerando que redes de distribuição possuem métodos muito simples de aumentar a tensão em uma rede para atingir valores adequados, como a regulagem do tap de um transformador.

REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Std C62.41-1995. IEEE Recommended Practice on Characterization of Surges in Low-Voltage (1000 V and less) AC Power Circuits. New York, NY: IEEE.
- [2] AS3 ENGENHARIA. “Qualidade de Energia: o que são Surtos e Transientes?”. Disponível em: <https://as3engenharia.com.br/surtos-e-transientes/>. Acesso em: 23 mai. 2021.
- [3] INSTITUTO NEWTON C. BRAGA. Conheça o TVS (Transient Voltage Suppressor) (ART253). Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/novos-componentes/52-artigos-tecnicos/artigos-diversos/10745-conheca-o-tvs-transient-voltage-suppressor-art253#:~:text=Usando%20TVS%20t%C3%ADpicos%20%C3%A9%20poss%C3%ADvel,vem%20pela%20linha%20de%20alimenta%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 23 mai. 2021.
- [4] C. S. Mardegan, “A importância dos protetores de surto (snubbers) para a proteção dos transformadores – Parte II”, O Setor Elétrico, Ed. 110, Março 2015.
- [5] P. E. Sutherland, M. Valdes, G. H. Fox, “Snubber Design for Transformer Protection”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 52, no 1, Jan/Fev 2016.
- [6] EEUG. ATP – Alternative Transient Program - Rule Book. Bruxelas, Belgica: Leuven EMTP Center, 1987.
- [7] 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, NY: IEEE.
- [8] Sutherland, P.E. & Valdes, Marcelo. (2014). Snubber design for transformer protection. Record of Conference Papers - Annual Petroleum and Chemical Industry Conference. 52. 343-351. 10.1109/PCIcon.2014.6961900.
- [9] HELERBROCK, Rafael. "Capacitores"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/capacitores.htm>. Acesso em 02 de maio de 2021.
- [10] HELERBROCK, Rafael. "Lei de Coulomb"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/lei-coulomb.htm>. Acesso em 02 de maio de 2021.
- [11] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL: “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica”.
- [12] INSTITUTO NEWTON C. BRAGA. A proteção de componentes das placas (ART684). Disponível em:

<https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/microcontrolador/52-artigos-tecnicos/artigos-diversos/5146-art684>. Acesso em: 23 mai. 2021.

[13] CORNELL DUBILIER ELECTRONICS. Designing RC Snubber Networks. Disponível em: <https://www.cde.com/resources/catalogs/igbtAPPguide.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2021.