

INTERAÇÃO ENTRE TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE ALTA TENSÃO E MANOBRAS DO SISTEMA

Rômulo dos Santos Delgado

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

Rio de Janeiro
Setembro de 2018

INTERAÇÃO ENTRE TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE ALTA TENSÃO
E MANOBRAS DO SISTEMA

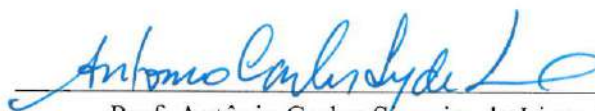
Rômulo dos Santos Delgado

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:



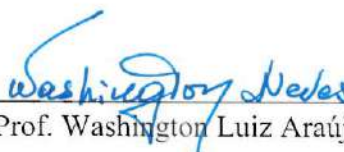
Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.



Prof. Antônio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.



Dr. Helvio Jailson Azevedo Martins, D.Sc.



Prof. Washington Luiz Araújo Neves, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2018

Delgado, Rômulo dos Santos

Interação entre Transformadores de Corrente de Alta Tensão e Manobras do Sistema/ Rômulo dos Santos Delgado – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

VIII, 90 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 78-80.

1. Transformadores de Corrente. 2. Medição de Transitórios. 3. Avaliação do Dielétrico. I. Ferreira, Antônio Carlos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

A Deus por ter me concedido saúde e sabedoria durante todo este trabalho e permitido mais esta conquista.

A minha amada esposa Juliana, pelo amor, carinho e compreensão durante estes anos, por ter colaborado com minha escolha e me ajudado a superar mais este desafio.

A minha mãe Rosângela, eterna guardiã, fonte de inspiração e referência como profissional e pessoa.

A meu irmão Gabriel, que me acompanha como um grande amigo, fornecendo apoio em todos os momentos que necessitei.

À memória de meu pai José Carlos, por tudo que representou em minha formação e os ensinamentos passados ao longo dos anos.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde e energia para seguir em frente e concluir mais uma etapa importante em minha vida e carreira profissional.

A minha mãe, irmão e familiares, por todo o apoio e compreensão durante esses últimos anos.

A minha esposa, pelo carinho e compreensão nos momentos difíceis.

Agradeço ao professor Antônio C. Ferreira, por todo o tempo dedicado e paciência durante a orientação deste trabalho.

Agradeço ao Helvio J. A. Martins, com quem tive a oportunidade de trabalhar durante alguns anos, por toda ajuda e incentivo durante a elaboração deste trabalho.

Aos amigos do Cepel, Roberto C. Menezes, Luiz E. D. Santos, Carlos M. R. Vasques, Dickson S. Souza, por todo empenho e ajuda durante as medições realizadas, quem sem suas colaborações certamente não conseguiria concluir este trabalho.

Aos amigos do Cepel, Rogério M. de Azevedo e Gabriela S. Rema, por todo o apoio durante as simulações realizadas, esclarecimentos de dúvidas e paciência para tal, durante este trabalho.

Aos amigos do Cepel, Leonardo T. B. dos Santos e Hélio A. de Paiva Jr., pela ajuda e esclarecimentos durante os anos.

Aos colegas do setor elétrico, Euro P. Almeida e Gabriel D. Pomar, assim como suas respectivas equipes, pela ajuda e apoio durante as medições.

Aos meus amigos, que forneceram apoio e incentivo durante os últimos anos.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

INTERAÇÃO ENTRE TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE ALTA TENSÃO E MANOBRAS DO SISTEMA

Rômulo dos Santos Delgado

Setembro/2018

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

Programa: Engenharia Elétrica

Nos últimos anos, um grande número de falhas em transformadores de corrente tem sido registrado no setor elétrico Brasileiro. Existe a suspeita de que transitórios eletromagnéticos estejam contribuindo para estas falhas, principalmente quando ocorrem em equipamentos com poucos anos e operação. Para estes equipamentos um grande causador destes transitórios são as manobras realizadas no sistema.

Desta forma, iniciou-se este trabalho buscando identificar um método de avaliar estas solicitações elétricas de alta frequência impostas aos transformadores de corrente durante as manobras de chaves seccionadoras e disjuntores na subestação. Para tal, foram realizadas medições em laboratório para a caracterização no domínio da frequência neste equipamento. Esta caracterização é necessária para o método utilizado na subestação para as medições de transitórios. Trata-se de um método inovador e prático que busca facilitar este tipo de medição.

Com base nas medições realizadas, busca-se uma maneira de avaliar o efeito destes sinais ao sistema de isolamento interno do transformador de corrente, e desta forma identificar se estes sinais podem contribuir para a perda de vida útil destes equipamentos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

INTERACTION BETWEEN HIGH VOLTAGE CURRENT TRANSFORMERS AND SWITCHING OF ELECTRIC POWER SYSTEM

Rômulo dos Santos Delgado

September/2018

Advisor: Antônio Carlos Ferreira

Department: Electrical Engineering

In recent years, a great number of failures on current transformers have been recorded on the Brazilian power system. Such has led to the suspicion in which the electromagnetic transient is contributing for said failures, mainly when running on equipment that are fairly new in operation. For such equipment a great originator for these transients are the switching performed on the power system.

Therefore, the aim of this work was develop a method to evaluate the effect of these high frequency transient imposed on the dielectric insulation of current transformers during circuit breaker and disconnect switch operation in the substation. For such, measurements were performed in laboratory to characterize the frequency domain on this equipment. This characterization is necessary for the method that will be used in the substation for the transient measurements. This is a practical and innovating method, developed during this work, that aims at facilitating this type of measurement.

Based on the performed measurements, a procedure to evaluate the effect of these signals to the internal current transformer isolating system is investigate, in order identify if these signals can contribute to the loss of lifetime for these equipments.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Objetivo.....	2
1.2. Estrutura da dissertação.....	3
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. Transformadores de Corrente.....	5
2.1.1. Materiais Isolantes.....	8
2.1.2. Vida Útil.....	12
2.1.3. Modos de falha	15
2.2. Sobretensões Durante Manobras em Subestações Isoladas a Ar	17
3. Metodologia Utilizada na Execução do Estudo	20
3.1. Medições em Alta Tensão	20
3.2. Caracterização do objeto de estudo no domínio da frequência	23
3.3. Metodologia de medição de sobretensão.....	29
4. Medições Realizadas	37
4.1. Detalhe das Instalações	37
4.2. Medições Realizadas.....	39
4.3. Sobretensões Calculadas	51
4.4. Simulação.....	55
4.5. Resultados	62
4.5.1. Análise no domínio da frequência.....	63
4.5.2. Análise de múltiplos transitórios sucessivos	71
4.5.3. Análise do tempo de subida dos sinais transitórios	73
5. Conclusão.....	75
5.1. Trabalhos Futuros.....	76
6. Bibliografia	78
APÊNDICE A	81

1. Introdução

O Brasil possui um sistema de potência denominado SIN (Sistema Interligado Nacional) robusto e complexo de grandes dimensões responsável por interligar todo o território nacional. Mesmo com tais dimensões, o sistema apresenta reduzido número de falhas em seus componentes e baixos índices de desligamento, sendo, dessa forma, altamente confiável. Característica comum aos equipamentos de alta tensão que são, em geral, componentes com alto índice de confiabilidade, ainda que passíveis de apresentar defeitos e falhas.

O SIN é composto, principalmente, por transformadores de potência e de instrumentos, chaves seccionadoras, disjuntores e linhas de transmissão cujos defeitos e falhas impactam diretamente no sistema e, uma vez que podem causar desligamentos e cortes de carga, são indesejados. Outro efeito relevante é a consequência financeira desses, podendo acarretar em prejuízos desde o valor do ativo até quantias superiores, quando há comprometimento de equipamentos próximos e corte de carga temporário.

A realização de manutenção preventiva e preditiva nos ativos é bastante difundida e realizada tornando-se eficaz, visto que permite identificar defeitos antes de sua evolução para a falha evitando, dessa forma, danos operacionais e financeiros mais severos. No entanto, por haver uma parcela de defeitos que não sensibilizam técnicas preditivas, ainda pode haver falhas, caracterizando as denominadas falhas súbitas. Além disso, o ciclo de manutenções realizado pode não ser suficiente para evitar o surgimento de um defeito e sua evolução para uma falha; e, embora esse modo de falha represente uma parcela pequena em relação às falhas evitáveis, não pode ser desconsiderado para as análises, haja vista a importância de que este modo de falha não se repita.

Esta pesquisa pretende explorar uma série de falhas que tem ocorrido em transformadores de corrente ligados à rede básica do SIN e identificar as possíveis causas para tais ocorrências. Como evidenciam MARTINS *et al.* [1], no intervalo de 2012 a 2017, ocorreram 117 perturbações envolvendo tais equipamentos, sendo que, em 30 destas falhas, houve corte de carga, ou seja, um dano ainda maior foi ocasionado no sistema. Vale ressaltar que parte dos equipamentos sinistrados tinha elevada expectativa

de vida útil, devido aos poucos anos de utilização, e que, a princípio, as recomendações dos fabricantes dos equipamentos foram seguidas não sendo, portanto, identificado nenhum tipo de anormalidade.

Em outros países, registraram-se um grande número de falhas em transformadores de corrente (doravante denominados TC) e ocasionaram danos operacionais e econômicos severos ao sistema de potência, conforme salienta REYES *et al.* [2]; entretanto, em sua maioria, as falhas apresentadas em outros trabalhos identificaram o defeito através de técnicas preditivas de Análise de Gases Dissolvidos (AGD) no óleo isolante. Ensaio deste tipo em TCs podem ser realizados em um intervalo de tempo, a depender da orientação do fabricante, que pode ser entendido como elevado propiciando o surgimento do defeito e a evolução para a falha. Cabe ressaltar que a causa fundamental dessas falhas, muitas vezes, não pode ser identificada devido ao dano causado ao próprio TC durante o evento, impossibilitando análises posteriores.

O efeito de transitórios eletromagnéticos, apesar de citado em diversas referências como uma fonte de estresse em sistemas de isolamento de equipamentos de alta tensão e uma possível causa de falhas destes sistemas, ainda representa um desafio para a comunidade científica no que concerne à avaliação e quantificação desse estresse.

1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho é investigar e avaliar as solicitações elétricas de alta frequência - os transitórios eletromagnéticos - impostas aos TCs e oriundas da manobra de chaves seccionadoras em subestações de alta tensão. Solicitações que, muitas vezes, são citadas como agressoras ao sistema de isolamento, ainda que não seja possível quantificar o dano.

A fim de identificar essas solicitações elétricas, são realizadas investigações baseadas em informações colhidas em campo através de medições em TCs instalados em sistemas de 550 kV. As medições são efetuadas utilizando metodologia proposta neste trabalho com vistas à simplificação do método para que o mesmo possa ser

utilizado sem que haja necessidade de grandes intervenções e a perda de muito tempo para preparação. Trata-se de uma metodologia inovadora em detrimento das convencionais que tornariam essa medição inviável, onde se realiza uma medição indireta com sensores especiais como, por exemplo, um sensor de corrente, ao invés de se utilizar divisores capacitivos para medir os valores de tensão.

Com vistas à aplicação da metodologia proposta, faz-se necessária compreensão prévia do comportamento do TC submetido à medição no domínio da frequência. Para atingir este objetivo é realizado ensaios em laboratório com o intuito de caracterizar o TC no domínio da frequência. Uma vez que a caracterização seja realizada, fazem-se medições em TCs em diferentes posições dentro da SE durante a manobra das chaves seccionadoras em torno destes equipamentos.

Outro fator explorado neste trabalho é o efeito que as manobras do sistema de potência causam ao isolamento sólido do TC. Segundo FREIRE *et al.* [3], manobras em subestações podem gerar sobretensões elevadas nos terminais de alta tensão de equipamentos mais próximos e, devido a sua utilização, os TCs são geralmente instalados próximos a disjuntores e seccionadores em arranjos mais típicos de Subestações (SE) de alta tensão isoladas a ar, sendo, portanto, passíveis das consequências.

1.2. Estrutura da dissertação

No capítulo 2, apresenta-se uma breve revisão bibliográfica cujas referências fornecem conceitos sobre o sistema de isolamento dos TCs, assim como informações sobre falhas. Salientam-se, ainda, noções sobre manobras de chaves seccionadoras e o efeito dessas sobre os equipamentos.

No capítulo 3, desenvolve-se a metodologia de medição a ser aplicada em campo, além de apresentar o método utilizado para a caracterização do TC no domínio da frequência.

No capítulo 4, discute-se e são evidenciados os resultados das medições dos transitórios eletromagnéticos realizados em campo. Busca-se, ainda, apresentar métodos utilizados para avaliar o efeito desses sinais transitórios em isolamentos de equipamentos de potência.

Por fim, no capítulo 5, discorre-se acerca da conclusão deste trabalho e as propostas de trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, são expostos dados referentes ao objeto de estudo deste trabalho - o transformador de corrente - bem como informações relevantes quanto às características construtivas e o isolamento comumente utilizado nestes equipamentos quando voltados para sistemas de alta tensão. Tais informações servem de base para a proposta desta pesquisa e para os resultados obtidos com medições em campo, que serão apresentados posteriormente. São evidenciados os principais meios de agressão que o isolamento do TC pode sofrer e os modos de falha já registrados por outros grupos de trabalho. Por fim, são abordadas informações sobre o fenômeno causador dos sinais de alta frequência, o arco elétrico tendo como referências trabalhos anteriores cuja abordagem se faz pertinente à discussão proposta.

2.1. Transformadores de Corrente

O Transformador de Corrente é um equipamento essencial para o funcionamento do sistema elétrico de potência que, em conjunto com o transformador de potencial, são os principais responsáveis pela operação dos sistemas de medição e proteção de uma subestação de alta tensão e pela proteção das linhas de transmissão. Para isso, esses equipamentos suprem medidores, relés de proteção e dispositivos de controle com valores de tensão e corrente proporcionais aos de alta tensão como mencionado por CARVALHO [4]. Esses transformadores são denominados transformadores de instrumentos devido ao fato de seus conectores primários estarem ligados diretamente ao circuito de alta tensão e os secundários ligados aos medidores. Pode-se dizer, portanto, que esses equipamentos acumulam duas funções principais: a primeira, relacionada à medição dos valores no lado de baixa tensão e; a segunda, ao isolamento entre os circuitos de alta e baixa tensão.

Além disso, possuem seu enrolamento primário ligado em série com o circuito de alta tensão, ou circuito de potência, representando uma baixa impedância vista do lado desse enrolamento se comparado com a impedância do sistema de potência em que o equipamento fica instalado. Soma-se a isso, o fato de funcionarem de forma similar aos transformadores de potência, tendo como função principal apresentar, em seu secundário, a corrente nominal do circuito de potência imposta ao seu primário, com valores reduzidos e mantendo as características vetoriais do sinal. Geralmente, para valores nominais, a corrente do enrolamento secundário é de 5 A podendo, em alguns casos especiais (como quando medidores e relés estão instalados muito distante do TC), ser de 1 A, a fim de reduzir o efeito de queda de tensão nos cabos de ligação, conforme conclui FILHO [5].

De acordo com a NBR 6856 [6], num TC, podem ser construídos vários enrolamentos, tanto primários como secundários, o que representa um benefício para o fabricante e para o usuário final, pois permite uma maior flexibilidade de utilização como, por exemplo, ligar dois ou mais enrolamentos em série ou em paralelo. A Figura 2.1 mostra um esquema de ligação de um TC com relação 150 x 300 x 600 – 5 A.

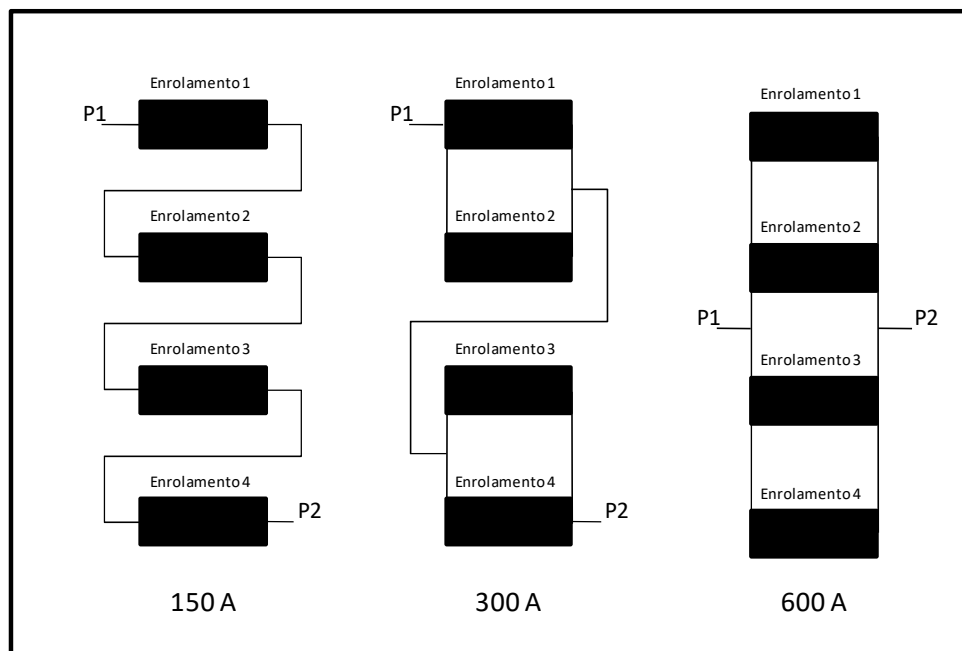


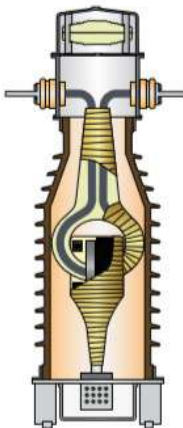


Figura 2.1 - Exemplo de ligação das bobinas de um TC^[5]

Os enrolamentos desses equipamentos ainda podem ser classificados quanto sua finalidade, podendo ser destinado para medição, com classe de exatidão entre 0,3 e 0,6, ou para proteção, com classe de exatidão mais elevada e suportando valores 20 vezes

maiores que os nominais. Conforme a Tabela 2.1, os TCs de alta tensão podem ser classificados¹ quanto sua forma construtiva, segundo ABB [7], em Top core (ou tipo invertido), Hair-pin (tanque morto) ou Cascata (Eye-bolt).

Tabela 2.1 - Formas construtivas de TCs^[7]

 <p>Top Core ou Tipo Invertido</p>	 <p>Hair-pin ou tanque morto</p>	 <p>Cascata ou Eye-bolt</p>
<p>As partes ativas estão localizadas na parte superior e são envoltas por uma caixa metálica para blindagem de baixa tensão. Os condutores secundários são dispostos no interior de um tubo que está no interior de uma bucha capacitiva isolada.</p>	<p>As partes ativas estão localizadas na parte inferior. O condutor primário é disposto em um formato de grampo e possui um isolamento principal de papel-óleo, assim como outras blindagens capacitivas para distribuição do campo elétrico.</p>	<p>Modelo híbrido entre o tipo invertido e o tanque morto tradicional, seguindo parcialmente a característica construtiva desses modelos.</p>

Diferentes formas construtivas de TC podem ter características que podem ser mais indicadas para determinado tipo de instalação, como por exemplo, o TC do tipo “top core” suporta maior corrente de curto circuito e o TC do tipo “hair-pin” possui maior estabilidade contra sismos. A seguir, na Figura 2.2, evidenciam-se algumas

¹A depender do fabricante, a nomenclatura pode sofrer alteração.

diferenças construtivas entre dois dos TCs mais comuns encontrados em instalações de alta tensão, o tipo invertido (top core) e o tipo tanque morto (hair-pin ou eye-bolt).

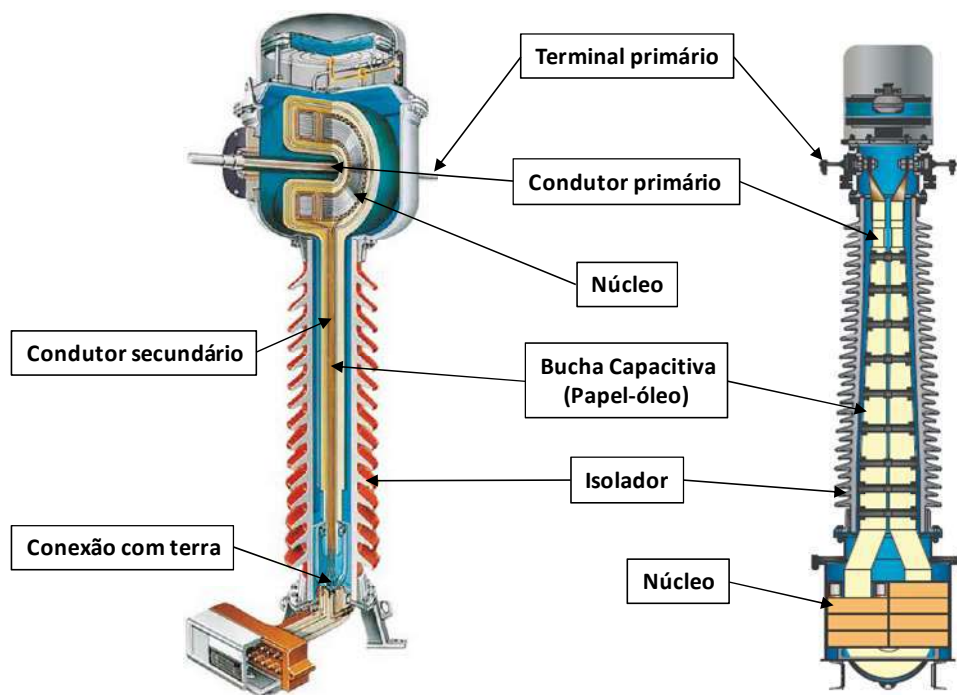


Figura 2.2 - Diferenças entre o tipo Top Core (esquerda) e o Tipo Hair-pin (direita)

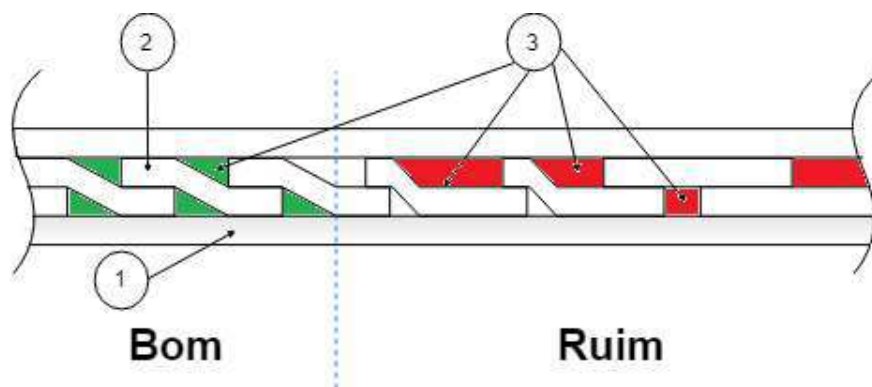
2.1.1. Materiais Isolantes

Conforme o que fora supracitado, transformadores de instrumentos, inclusive o TC, possuem duas finalidades, a primeira é referente à medição do sinal nos terminais de baixa tensão e a segunda visa garantir o isolamento entre os terminais de alta tensão e os sistemas ligados ao secundário (baixa tensão). A fim de cumprir a segunda finalidade, é necessário que o sistema de isolamento interno e o externo destes equipamentos funcionem corretamente para cada nível de tensão.

O isolamento externo é responsável por isolar o meio externo do interno e também garantir a sustentação mecânica do TC, permitindo que a operação não seja impactada por poluição, pela contaminação na atmosfera ou pelo efeito de chuva. Em geral, o material utilizado para tal é a porcelana, principalmente em equipamentos cujo isolamento interno é à base de papel-óleo, visto que funcionam com baixa pressão

interna e possuem resistência mecânica, mas outros materiais sintéticos podem ser utilizados para esta finalidade, como por exemplo, materiais poliméricos.

Por outro lado, o isolamento interno de transformadores de instrumento é composto basicamente de papel (paper Kraft) impregnado de óleo isolante, mais comumente o mineral, assim como a associação destes dois, há interação direta com as partes ativas, sendo que ficam situados entre o enrolamento de alta tensão com o núcleo e enrolamentos do secundário, como pode ser visto na Figura 2.2. O papel é utilizado no formato de fitas e colocado de forma sobrepostas, a fim de não deixar espaços livres entre as camadas. SPRESSOLA [8] diz que a rigidez dielétrica no sentido perpendicular a estas camadas é muito alta, todavia, ao se existir canais de óleo entre as camadas, a mesma rigidez no sentido longitudinal nesta região é muito inferior. A existência destes espaços entre as camadas pode facilitar o surgimento de descargas parciais, vindo a danificar camadas próximas e o isolamento interno, podendo, posteriormente, ocasionar falha do equipamento, o que faz com que o processo de isolamento interno seja bastante crítico durante a fabricação de um TC. Um exemplo desta técnica de isolamento é evidenciado em CIGRÉ A3 [9] e pode ser vista na Figura 2.3.



*Figura 2.3 - Exemplo de aplicação de fitas de papel impregnado com óleo no isolamento interno – condição ideal (verde) – condição irregular (vermelho)
Fonte: Adaptado pelo autor^[9]*

Com relação à Figura 2.3, o número 1 representa o tubo metálico por onde passam os condutores do secundário no caso do tipo “top core”, o número 2 são as fitas de papel impregnadas com óleo e o 3 representa os caminhos deixados para o óleo. Percebe-se ainda a condição ideal à esquerda, com áreas reduzidas e homogêneas (verde) para a passagem do óleo isolante entre as camadas e papel, e a condição indesejada à direita,

com áreas irregulares (vermelha) que podem ocasionar concentrações de campos elétricos e originar defeitos no isolamento interno.

Entre as camadas de isolamento, são inseridas camadas condutoras (ou papel semicondutor), similares às utilizadas na montagem da parte ativa de buchas de alta tensão. Essas últimas são denominadas camadas de equipotencialização e responsáveis por distribuir o campo elétrico de maneira uniforme. No caso do tipo “top core”, a distribuição é realizada no topo (cabeça) do TC e no restante do corpo condensivo (formato de uma bucha).

Consoante CIGRÉ A3 [9], existem duas soluções para realizar essa distribuição do campo elétrico. A primeira utiliza um menor número de camadas condutoras cuja terminação é interligada por anéis toroidais, como mostrado por SPRESSOLA [7], o que busca evitar a formação de elevados valores de potenciais elétricos nestas terminações.

A Figura 2.4 ilustra o modo como é feita a montagem seguindo esta primeira solução.

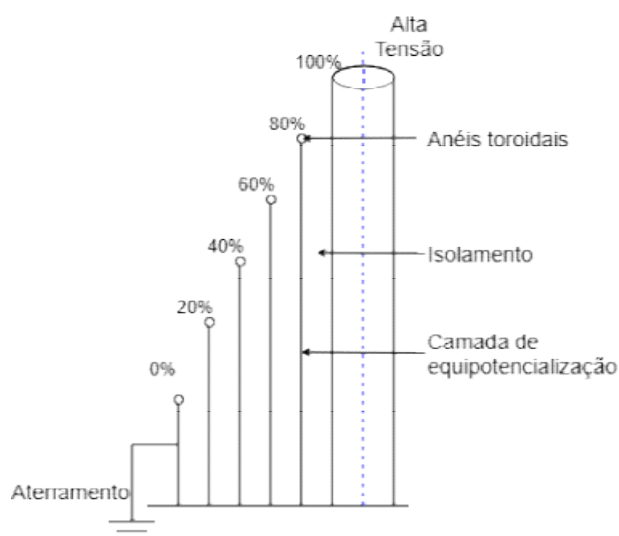


Figura 2.4 - Conceito de distribuição de campo elétrico com toróide

Fonte: Adaptado pelo autor^[9]

Já o segundo modo, mostrado na Figura 2.5, utiliza um número maior de camadas para equipotencialização, não sendo necessária a utilização de anéis no final nas camadas porque a diferença de potencial que aparece entre as camadas é pequena, com valores de poucos kV.

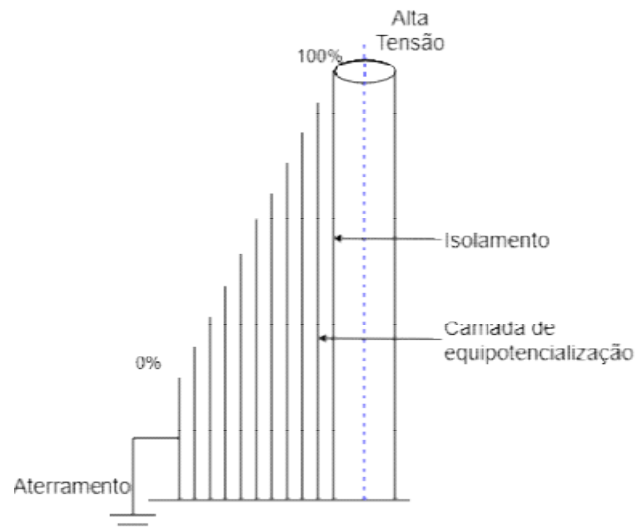


Figura 2.5 - Conceito de distribuição de campo elétrico com várias camadas de equipotencialização

Fonte: Adaptado pelo autor^[9]

Nota-se que, no que tange ao TC do tipo “top core”, o lado de alta tensão e o aterramento são invertidos, já que o tubo interno por onde passam os condutores dos enrolamentos secundários até a caixa de ligação fica conectado ao potencial terra na base do TC, (cf. Figura 2.2). Outro ponto relevante nesse modelo é a existência de uma conexão elétrica entre o lado de alta tensão e a camada mais externa do isolamento, a cordoalha e a camada de equipotencialização, respectivamente.

Consoante SPRESSOLA [7], o óleo isolante, por sua vez, desempenha quatro funções no sistema de isolamento, a saber:

- Resfriamento – O aquecimento interno de equipamentos de potência faz com que haja circulação de óleo e, por meio da troca de calor, o óleo contribui para o resfriamento;
- Isolação elétrica – Devido às propriedades dielétricas do óleo;
- Portador de informação – A análise química do óleo e seus subprodutos podem indicar defeitos no sistema isolante, dessa forma, a AGD (Análise cromatográfica de gases dissolvidos no óleo isolante) é uma técnica de diagnóstico aplicada a todos os equipamentos de potência que utilizam esse material como meio isolante.

- Proteção do material sólido isolante – O óleo isolante pode ser substituído e tratado a fim de preservar o isolamento sólido (papel impregnado de óleo). Isso ocorre à medida em que há a necessidade de remover umidade interna, sendo possível com etapas sucessivas de tratamento do óleo.

Para tais finalidades, os óleos isolantes utilizados podem ser de origem natural (mineral) ou sintética. Os primeiros possuem custo inferior e maior utilização em equipamentos de potência; são derivados do petróleo e constituídos, principalmente, por carbono e hidrogênio, além do enxofre, do oxigênio e de alguns metais. Além disso, podem possuir aditivos não presentes em sua composição primária, a fim de melhorar seu desempenho como isolante. Baseado nessa mistura da composição, os óleos podem ser classificados como de base parafínica ou naftênica.

2.1.2. Vida Útil

A vida útil de um equipamento de alta tensão corresponde ao tempo que este equipamento estará apto a desenvolver sua função dentro de parâmetros preestabelecidos por norma e é necessária a realização de manutenções periódicas de acordo com instruções fornecidas pelo fabricante para que essa durabilidade seja possível. Mesmo respeitadas essas condições (tensão máxima, corrente máxima, temperatura de operação, etc.), espera-se que o equipamento sofra um envelhecimento natural e apresente um número maior de defeitos no decorrer dos anos de utilização. Segundo ANEEL [10], a vida útil esperada para TC com tensão superior a 69 kV é de 25 a 30 anos de utilização, quando esse completa sua depreciação estabelecida.

Situação semelhante ocorre com o TC, uma vez que - para equipamentos com sistema de isolamento papel-óleo - o principal indicativo de fim de vida útil é o envelhecimento do papel. Nesse ponto, a manutenção não se torna uma forma atrativa devido ao alto custo envolvido.

O grupo de trabalho do CIGRÉ A3.06. [11] sugere que o envelhecimento pode se dar de duas formas: natural ou acelerada. A primeira é compreendida pelo efeito cumulativo de estresses que o TC sofre desde o início de seu funcionamento, efeito esse que pode ser visto no isolamento interno do TC, conforme essas pequenas variações agredem o papel-óleo. Além disso, o funcionamento normal do TC também é uma causa, já que a celulose do papel sofre degradação mesmo em temperaturas mais baixas. O envelhecimento acelerado, por sua vez, é causado por estresses mais acentuados ou pontuais e até mesmo pela não execução de ações de manutenção corretamente.

Segundo CIGRÉ [9], os modos de estresse que o isolamento do equipamento sofre durante sua operação são:

- Estresse térmico – O aquecimento interno é, em sua maioria, devido às perdas nos enrolamentos e no núcleo. Espera-se que em unidades novas essas perdas sejam muito baixas e, à medida em que envelhecem, se tornem mais significativas. Esse tipo causa várias alterações químicas na isolação, no papel-óleo o aquecimento causa quebra das moléculas de celulose e decomposições nas moléculas do óleo, resultando na redução do grau de polimerização e rigidez do papel e também no surgimento de subprodutos do óleo como gases e moléculas de água.
- Estresse elétrico – O sistema de isolação do equipamento deve suportar os estresses elétricos produzidos pela operação normal do sistema e também os transitórios de curta duração com amplitudes de tensão superiores aos valores de operação normal. Este tipo de estresse pode produzir descargas parciais no sistema de isolação uma vez que supere a rigidez dielétrica do local (possivelmente onde já tenha havido outro tipo de estresse como um aquecimento elevado). Esse estresse local pode ser elevado ainda por meios como a presença de pontas nos condutores, pequenas bolhas na isolação ou bolhas de gás e ainda por sobretensões transitórias que podem ser produzidas por descargas atmosféricas, sobretensões no sistema, manobra de equipamentos próximos (disjuntores e seccionadoras) e ainda por falhas de outros equipamentos próximos ou ligados à mesma barra. Uma vez iniciada durante um evento de curta duração, o evento de descarga parcial pode

continuar mesmo com valores normais de operação, causando uma degradação acentuada na isolação interna do equipamento.

- Estresses mecânicos – Os principais agentes desse tipo de estresse são forças magnéticas e variação de temperatura interna e do ambiente onde está instalado, causando diferentes dilatações (expansão e contração) em materiais distintos o que resulta em forças mecânicas entre esses. Curtos-circuitos próximos ao equipamento também podem causar um alto estresse mecânico, afetando sua estrutura interna. Há, ainda, a possibilidade de pequenos esforços causarem vazamentos de óleo, tornando-se ponto alarmante para entrada de umidade.
- Estresses ambientais – Degradações por exposição ao meio ambiente ocorrem tanto no sistema de isolamento quanto em outros componentes dos TCs. Umidade, poluição, agentes orgânicos, oxigênio, óxidos distintos, etc., são agentes agressores para equipamentos elétricos e podem acelerar o envelhecimento, como por exemplo, causar corrosões em partes metálicas e em anéis de vedação permitindo a entrada de umidade no sistema de isolamento que, quando em excesso, aumenta de forma drástica a degradação no papel.

Esses agentes agressores podem agir de forma separada, mas é comum que estes equipamentos sofram estresses combinados durante sua operação. Quando em funcionamento normal, o isolamento de um TC sofre um envelhecimento de forma natural e lenta, demorando muitos anos para que comece a apresentar algum tipo de defeito. Uma vez que haja degradação acentuada, ocorre uma aceleração no envelhecimento e a velocidade entre o surgimento de um defeito para sua evolução para falha ocorre de forma bem mais ágil do que em equipamentos sem degradação.

Entretanto, é possível que falhas prematuras em algum destes equipamentos sejam observadas em diversos locais do mundo, inclusive no Brasil, podendo ser causadas por uma degradação acentuada em um ponto crítico da isolação, conforme é citado pelos grupos de trabalho do CIGRÉ [9] [11]. Essas falhas podem ser causadas

por defeitos de fabricação no sistema de isolamento, algum ponto de fragilidade do isolamento em fase inicial ou ainda por sinais de tensão transitória de alta frequência.

Embora seja conhecido o fato de possíveis degradações ocorrerem durante a vida útil de um TC, é uma tarefa difícil identificar através de ensaios realizados em campo, visto que muitas vezes é necessário realizar testes off-line (com o circuito desligado). Técnicas que buscam identificar defeitos de forma on-line estão sendo desenvolvidas e aplicadas em diversas partes do mundo, mas, devido ao grande número de equipamentos instalados, tais técnicas só são aplicadas após surgir alguma suspeita e apontamentos do setor responsável pela manutenção, como por exemplo a falha de um equipamento semelhante (modelo e ano de fabricação) ou através de alguma informação apontada pela manutenção preventiva ou preditiva.

2.1.3. Modos de falha

Segundo [9] e [11] os modos de falha de TCs podem ser divididos em falhas maiores e falhas menores. Enquanto as primeiras são eventos que causam a saída do equipamento de funcionamento ou até mesmo explosões e incêndios, sendo o evento mais comum a falha do isolamento interno; as outras são compreendidas como eventos observados em que há a necessidade de intervenção urgente no equipamento, sendo o vazamento o evento de maior ocorrência. Uma vez conhecido o modo, é possível investigar a causa da falha (causa fundamental). Por exemplo, a falha do isolamento interno pode ter como causa fundamental uma agressão por descargas parciais ou por aquecimento elevado.

Dessa forma, o grupo de trabalho do CIGRÉ [9] define como causa primária de falhas os seguintes itens: erro de projeto, fabricação com qualidade inadequada, envelhecimento, operação fora da especificação, descargas atmosféricas e sobretensões, manutenção inadequada e, por fim, causa desconhecida. Para o TC, o erro de projeto é mostrado como causa mais comum, sendo incluídos nesta causa erros de projetos elétricos ou mecânicos e até a escolha dos materiais para construção. Outro ponto importante citado pelo grupo é um grande número de falhas nas quais não é possível

identificar uma causa primária, isso, possivelmente, devido aos danos causados pela falha no próprio equipamento (até mesmo explosões), tornando qualquer tipo de análise de falha ineficaz.

A seguir estão ilustrados, nas Figuras 2.6 e 2.7, exemplos de efeito da falha em TCs do tipo “Top Core”.



Figura 2.6 - Exemplo do efeito de uma falha interna em um TC de alta tensão
Fonte: Acervo do CEPEL



Figura 2.7 - Exemplo do efeito de uma falha interna em um TC de alta tensão
Fonte: Acervo do CEPEL

Um fato relevante para falhas de TCs é que, de acordo com a severidade dessa falha, equipamentos adjacentes podem ser danificados ou até mesmo inutilizados devido aos danos causados. A falha em um TC pode fazer com que haja dano ao isolamento externo e ocasionar a perda de sua sustentação mecânica, assim todo o peso do

barramento primário e do núcleo com os enrolamentos secundários sejam sustentados somente pelo barramento ou cabos conectados ao TC, levando grande tensão mecânica aos equipamentos próximos, muitas vezes chaves seccionadoras e disjuntores, principalmente em TCs do tipo “Top Core” como mostrado na Figura 2.7, podendo causar um dano ainda maior, tanto operacional quanto econômico, se afetar estes equipamento adjacentes.

2.2. Sobreensões Durante Manobras em Subestações Isoladas a Ar

Manobras em SEs são realizadas por diversos motivos, desde manobras programadas para manutenção e controle de fluxo de potência até por causas emergenciais como falha de um equipamento fazendo-se necessário isolar o circuito para normalização. Tais manobras, principalmente as de chaves seccionadoras, causam sobreensões de alta frequência no circuito (transitórios eletromagnéticos), oriundos do arco elétrico formado entre os polos da chave seccionadora ou disjuntor.

Este tipo de sobreensão, por muitos anos, foi estudado somente em aplicações em que havia conexões com subestações isoladas a SF₆(GIS), nas quais manobras internas geram sinais de frequência muito elevados, conforme RASHKES & ZILES [12]. Falhas de buchas de alta tensão com isolamento a base de papel-óleo já foram registradas neste tipo de subestação (Ar-GIS) com causa fundamental sendo atribuída a fenômenos transitórios advindos de manobras realizadas no gás (SF₆). Tal fenômeno é de grande importância até mesmo para SEs externas isoladas somente a ar, sem nenhum tipo de conexão com uma GIS. Nesse caso, embora a frequência destas sobreensões geradas, concentradas entre 100 kHz e 1 MHz, seja inferior a encontrada em uma GIS, as amplitudes são relevantes podendo atingir valores próximos a 2 p.u. [12].

Outro ponto importante é a duração do arco elétrico e o número de impulsos sucessivos que uma única manobra pode conter. Ao comparar esse dado com o estresse elétrico, apresentado no item 2.1.2., pode-se supor que um elevado número de manobras

pode interferir na vida útil de equipamentos mais próximos. Devido a sua função e às topologias utilizadas em SEs de alta tensão, a maioria dos TCs instalados em campo se encontra entre o disjuntor e a chave seccionadora, ou seja, próximo aos equipamentos de manobra da SE. Esse fato leva a perceber que o TCs e encontra sob impulsos rápidos de sobretensões durante sua operação normal, desde o momento de sua primeira energização.

A Figura 2.8 ilustra a formação de um arco elétrico entre os polos da chave seccionadora durante uma manobra.



Figura 2.8 - Arco elétrico formado entre os polos de uma chave seccionadora durante uma manobra^[17]

O arco elétrico formado, embora possua duração bastante reduzida, pode causar valores elevados de tensão e frequência nos terminais de equipamentos próximos. Além disso, é verificado um número bastante elevado de impulsos sucessivos (reignições do arco elétrico) durante uma única manobra.

Em CARSIMAMOVIC *et. al.* [13] são apresentados os resultados de medições realizadas em campo a fim de avaliar valores de sobretensões durante uma manobra, assim como a duração e o número de impulsos sucessivos. Foram apresentados valores próximos a 1,6 p.u., com frequência dominante próximo a 550 kHz. A duração observada nesse experimento foi de até 1,4 segundos durante o fechamento da seccionadora e de até 2 segundos durante a abertura.

Em RASHKES & ZILES [12] vê-se que, em manobras em sistemas de alta tensão, o número de reignições do arco elétrico pode ser maior do que 140, quando analisado somente sobretensões que ultrapassem valores de 0,5 p.u., demonstrando

assim solicitações severas aos equipamentos próximos a manobra, que na maioria dos casos é o próprio TC.

Taxas de falhas anormais para TCs registradas nos Estados Unidos da América e no México são apresentadas por BOYLE & CUMMINGS [14] e REYES *et. al.* [2], respectivamente. Nesses trabalhos é apresentado um grande número de falhas de TCs que ocorrem em um curto período de tempo. Embora se mencione a suspeita de efeitos transitórios ocasionarem estresses ao isolamento interno, os trabalhos não abrangeram a comprovação dessa hipótese. O método utilizado para mitigar as falhas foi medições de fator de potência do isolamento (tangente δ).

DEL POZO *et. al.* [15], por sua vez, evidenciam o resultado de medições de sobretensões transitórias aplicadas diretamente sobre um TC instalado em uma SE de 500 kV. Têm-se valores próximos a 1,3 p.u. para as sobretensões medidas e, além disso, é registrado o tempo de frente de onda para os sinais medidos, entre 0,5 e 0,8 μ s, assim como o tempo de duração dos arcos elétricos entre os polos da chave seccionadora, entre 1,2 e 1,8 s, para as manobras de fechamento e abertura. Na mesma fonte, identifica-se um defeito no isolamento interno do TC através da análise de óleo isolante e após é realizado a desmontagem do mesmo, e identificado o dano interno, esse, atribuído aos transitórios de alta frequência.

Cabe salientar que, nos resultados discutidos em [15], as medições foram realizadas utilizando um método indireto, tendo como elemento de medição um sensor de campo elétrico, mas com pouca exposição acerca do método em si.

3. Metodologia Utilizada na Execução do Estudo

Para o presente estudo, que busca identificar o comportamento de Transformadores de Corrente de Alta Tensão com as solicitações do sistema, realizar medições em campo é fundamental para corroborar com cálculos e simulações. Como já fora descrito, o equipamento em estudo pode sofrer com elevado valor de sobretensão ao ocorrer alguma manobra de seccionador próximo ou até mesmo um disjuntor entrando em operação. Dependendo da origem desta perturbação, os valores de sobretensão podem ser diferentes. A existência do mecanismo de extinção do arco em disjuntores de alta tensão e também o fato de sua grande maioria operar com sincronismo (operação quando o valor de tensão é mínimo), os efeitos do arco elétrico que se forma durante o chaveamento são minimizados e evita-se a ocorrência de reignições, minimizando o efeito desta manobra para equipamentos próximos.

Outro fato relevante sobre estas sobretensões é a frequência elevada em que ocorrem, podendo ser de centenas de quilohertz até ordem de alguns mega-hertz. Adicionando esse elemento de alta frequência com valores elevados de tensão, o problema se torna cada vez mais complexo de se entender e analisar, assim como aumenta a dificuldade de medição com instrumentos convencionais. Apresenta-se a seguir, uma alternativa para realizar a medição, buscando uma maneira mais simples que possa ser utilizada sem que haja a necessidade de grandes intervenções e a perda de muito tempo para preparação. A fim de compreender melhor a metodologia proposta, é necessário conhecer previamente o comportamento do TC a ser medido no domínio da frequência.

3.1. Medições em Alta Tensão

Os atuais sistemas de alta tensão são resultados de uma evolução de décadas de estudos e testes, saindo de linhas de transmissão de 10 kV para os 1200 kV já atingidos.

Durante este caminho ocorreu um grande desenvolvimento, passando pela evolução das técnicas de cálculos aplicados (campos eletromagnéticos) e também pela investigação de novos materiais aplicados para estes sistemas, como novos materiais isolantes, por exemplo, a utilização de materiais sintéticos. Esta evolução levou também a um melhor entendimento sobre os fenômenos elétricos que ocorrem ao se tratar de valores muito elevados de tensão, como mostrado em HAUSCHIED & LEMKE [16]. A Figura 3.1 ilustra tal evolução ao longo dos anos.

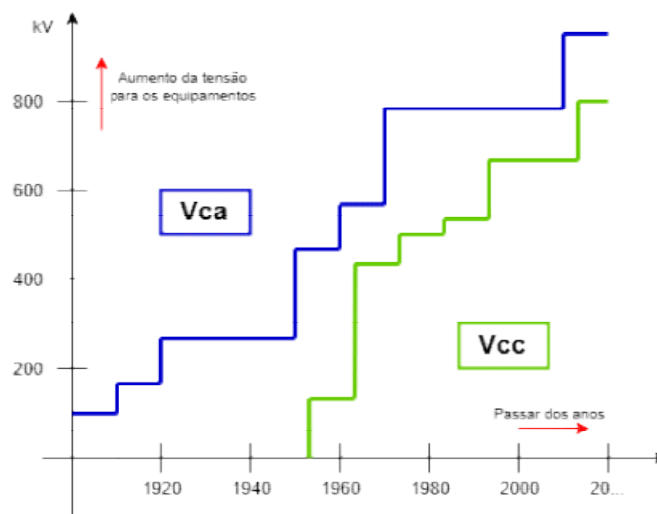


Figura 3.1 - Evolução dos níveis de tensão em sistemas de potência^[16]
Fonte: Adaptado pelo autor

Para acompanhar esse desenvolvimento, as técnicas de medição e ensaios em alta tensão também evoluíram, mas, ao se tratar de alta tensão, muitos estudos necessitam de comprovação com valores reais para tal. Assim, houve a criação de diversos ensaios a fim de validar essa evolução tecnológica e muitos são aplicados atualmente.

Com valores de tensão encontrados no Sistema de Potência, tem se tornado cada vez mais complicado efetuar medições e ensaios diretamente no sistema em si, ou seja, realizar essas medições em campo, isso se dá porque a maioria dos sistemas de medição são projetados para utilização em ambientes controlados como laboratórios ou fábricas. Para o campo, foi desenvolvida uma série de técnicas de medição com a finalidade de diagnóstico por meio do uso de acopladores ou transdutores que não ficam expostos aos valores nominais do sistema. O modo de medição de alta tensão mais comum é através da utilização de divisores de tensão capacitivos ou mistos, nos quais é possível atenuar um valor de centenas de quilovolts para valores menores na ordem de dezenas de volts -

valor este que pode ser utilizado com instrumentação comumente encontrada em laboratórios e com equipes de manutenção. Como já mencionado, esta prática é extremamente comum em laboratórios ou fábricas, no entanto ao considerar o dimensionamento necessário para tal divisor é perceptível a dificuldade de instalação e utilização diretamente no sistema e em subestações, reforçando que, para tornar isso factível, é necessário realizar a conexão com os terminais de alta tensão do equipamento bem como o suporte necessário para a tarefa.

Nas Tabelas 3.1 e 3.2 é possível perceber exemplos destes dimensionais comparando com os valores de alta tensão relacionados de um fabricante já consolidado nesse tipo de equipamento [17].

Tabela 3.1 - Valores encontrados de divisores de tensão industriais^[17]

Tipo	Impulso Atmosférico 1.2/50 μ s kV	Impulso de Manobra 250/2500 μ s kV	Tensão C.A. RMS 50/60 Hz cont. kV	Distância de segurança para paredes m
A	1200	850	300	4,3
B	1600	1300	400	5,8
C	2000	1650	500	6,8
D	2400	2000	600	8,1
E	2800	2300	700	8,9

Tabela 3.2 - Dimensões de divisores de tensão industriais^[17]

Tipo	Altura m	Diâmetro da base m	Peso kg	Volume para transporte m ³	Número de unidades de Alta Tensão
A	4,3	1,5	400	2,0	1
B	5,8	2,0	700	4,0	2
C	6,8	3,1	900	6,5	2
D	8,2	3,1	1000	7,0	2
E	8,9	3,0	1200	7,5	3

Ainda em referência aos divisores de tensão, é necessário garantir sua resposta para frequências elevadas dos sinais a serem medidos, uma vez que cada sistema de medição é voltado para determinado tipo e banda de sinais.

Com vistas à discussão proposta acima, é possível entender que muitos dos valores utilizados para estudos e simulações são levantados através de cálculos

matemáticos e não através de medições propriamente ditas, no entanto, ao se tratar de fenômenos envolvendo arcos elétricos, as simulações se tornam mais complexas, dado a natureza do fenômeno ser extremamente dinâmica e de difícil controle.

Sendo assim uma maneira de realizar a medição deste efeito é importante para um melhor entendimento e até um melhor dimensionamento de equipamentos para suportar estas solicitações durante sua operação normal e desta forma, sem impactar em sua vida útil.

3.2. Caracterização do objeto de estudo no domínio da frequência

Como o fenômeno que se busca entender ocorre em uma faixa de frequência mais elevada (kHz e MHz), é necessário entender o comportamento dos equipamentos expostos (TC) a este fenômeno também nesta mesma faixa de frequência. Para tal, faz-se necessário realizar a caracterização deste tipo de equipamento no domínio da frequência e, uma vez concluída, essa caracterização é utilizada tanto para o método de medição de sobretensão proposto quanto para simulações computacionais do sistema.

A caracterização na frequência é compreendida por meio de técnicas de impedância terminal e da transferência de tensão, por varreduras em frequências previamente estabelecidas pelo usuário. Embora não seja comum realizar este tipo de medição em transformadores de instrumentos, a técnica já é largamente utilizada em transformadores de potência, com a finalidade de diagnóstico desses equipamentos. Desta forma, é perfeitamente possível aplicar no objeto deste estudo.

YU *et. al.* [18] afirmam que, para calcular a impedância terminal e a transferência de tensão entre os terminais, não é necessário obter a distribuição de corrente ou de tensão nos enrolamentos, mas sim nos seus pontos terminais. No ensaio de impedância na frequência – resistências e reatâncias – do equipamento vista pelo terminal, mede-se a impedância do terminal para o referencial de terra. As reatâncias de indutores, X_L , e

de capacitores, X_C , são variantes na frequência como se verifica nas equações 1 e 2, em que L e C representam, respectivamente, a indutância e capacitância desses elementos.

$$X_L = 2\pi fL \quad (1)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2)$$

Analisando as equações acima, é possível compreender o comportamento dessas reatâncias na frequência, assim, quanto maior a frequência, maior a reatância indutiva e menor a reatância capacitiva. A ressonância é tida como o momento em que as parcelas reativas dos elementos se igualam, ou seja, neste momento existe a troca máxima de energia entre os elementos capacitivos e indutivos e o valor da impedância total se dá pela parcela resistiva.

Para o objeto de estudo, um TC do tipo “top core”, o circuito equivalente é um circuito RLC série, com uma única ressonância, o mesmo tipo que também é apresentado por DEL POZO *et. al.* [15]. Tal modelo de circuito busca representar o comportamento do TC, principalmente do dielétrico, entre os conectores de alta tensão e a base aterrada – composto, essencialmente, por isolamento papel-óleo e bastante similar a uma bucha capacitiva – visto que, no equipamento estudado neste trabalho, o condutor primário não interfere na medição e os condutores do secundário estão blindados dentro do tubo que interliga os enrolamentos secundários e a caixa de ligação. Esse circuito é mostrado na Figura 3.2.

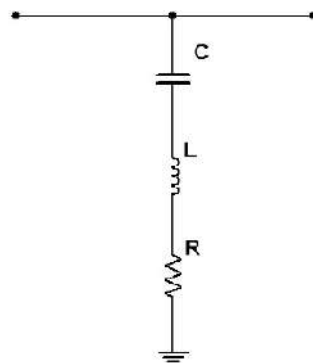


Figura 3.2 - Circuito RLC Série

Uma maneira de realizar a caracterização no domínio da frequência é com medições de varredura de frequência utilizando medidores de impedância RLC, com

frequência mínima de 20 Hz e máxima de 2 MHz (definições do usuário), seguindo o arranjo da Figura 3.3. Os valores utilizados de frequência mínimos e máximos são baseados em resultados de trabalhos anteriores, como os de DEL POZO *et. al.* [15]. e FREIRE *et. al.* [3].

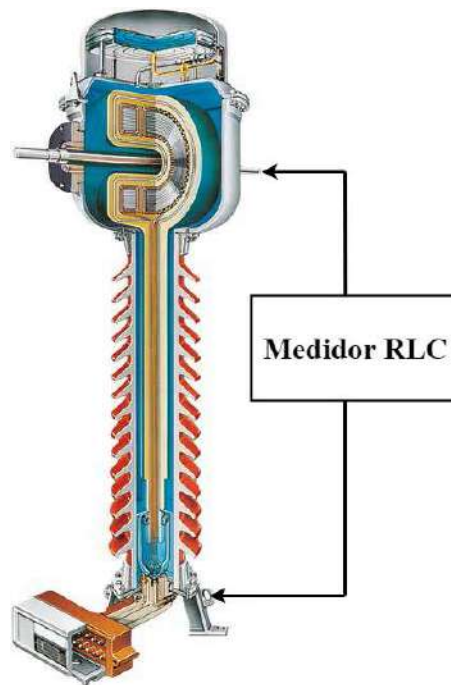


Figura 3.3 - Arranjo físico para medição da Impedância Terminal do TC

Para o método de medição proposto, realizado em laboratório, a caracterização deve se dar dos terminais de alta tensão para o terminal aterrado; entretanto, devido à geometria construtiva e as características elétricas (entre os pontos de medição) do objeto estudado, foi verificada uma considerável variação dos resultados a depender do arranjo utilizado para realizar a caracterização ou medição da impedância (distância entre os cabos e o corpo do TC, comprimento dos cabos, utilização de fitas de cobre, etc.). Isso ocorre, principalmente, pelo fato do comportamento do dielétrico ser próximo a uma bucha capacitiva (valores muito reduzidos de resistência e indutância). Logo, quaisquer alterações nas conexões e/ou cabos utilizados causa um desvio considerável na medição.

Considerando tais constatações, optou-se por utilizar o método impulsivo, também em laboratório, para realizar a caracterização da impedância na frequência, mostrada na Figura 3.4. Esse método consiste na aplicação de um impulso rápido de tensão nos terminais de alta tensão e medição da resposta do objeto a esse impulso.

Desta forma é possível determinar, através da medição de corrente, o comportamento da impedância do objeto na frequência, como constata *SOUZA et. al.* [19].

No método impulsivo, existe a desvantagem de que o valor máximo e mínimo de frequência é dependente da forma de onda aplicada - pelos parâmetros de tempo de frente de onda e frequência de oscilação do sinal, por exemplo - e não de valores definidos pelo usuário como no método de varredura, mas é possível utilizar valores elevados de tensão para determinar o comportamento do objeto frente a solicitações de alta frequência e alta tensão. Neste trabalho o valor utilizado é de aproximadamente 200 kV para um impulso atmosférico com corte na cauda. Utiliza-se o corte para atingir maiores frequências durante o ensaio.

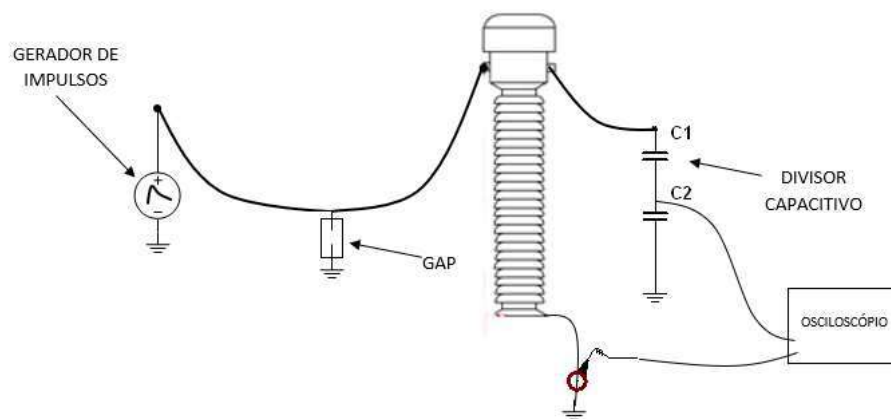


Figura 3.4 - Arranjo para caracterização utilizando o método impulsivo^[18]

O método impulsivo mostrou-se mais adequado para este estudo, visto que representa, de maneira mais próxima, o modo como o TC fica instalado no campo e nota-se pouca influência do arranjo sobre os resultados. Além disso, com esse método, é possível excitar a faixa de frequência dos eventos transitórios oriundos das manobras do sistema, que são compreendidas na faixa de 100 kHz a 1 MHz, como fora demonstrado por RASHKES & ZILES [12]. O resultado da caracterização é uma curva da Impedância Harmônica (Impedância x Frequência), em que, através da análise dos valores de ressonância e o comportamento da fase, pode-se calcular os valores do circuito RLC. O resultado de uma medição segundo essa metodologia é evidenciado na Figura 3.5 a seguir.

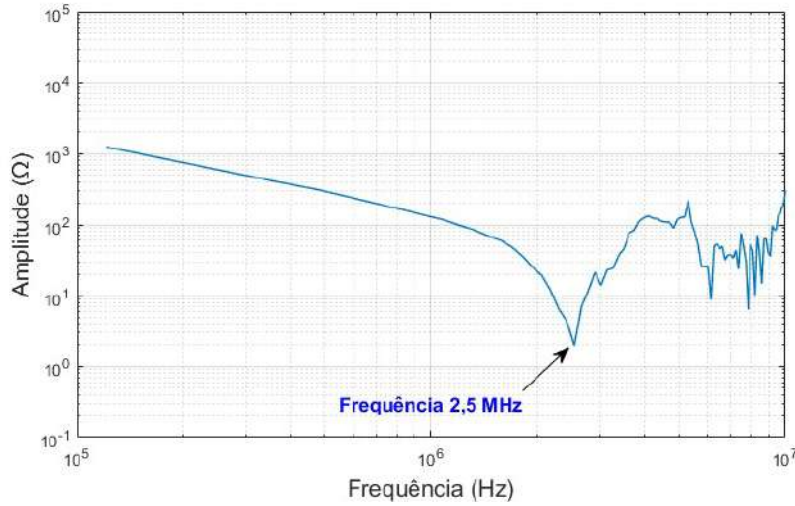


Figura 3.5 – Medição da impedância do TC pelo método impulsivo

Com vistas à curva apontada na imagem acima, nota-se uma única antirressonância com frequência aproximada de 2,5 MHz, comportamento característico de um circuito RLC série, circuito este que é utilizado para o modelo do TC. Em AZEVEDO *et. al.* [20] mostra-se um método prático e simplificado que pode ser utilizado a fim de encontrar os valores para as componentes do circuito RLC série utilizando duas informações contidas na curva de impedância: a frequência de ressonância e a amplitude da impedância nessa frequência (parcela resistiva).

O cálculo dos valores do capacitor e indutor abrangem duas definições de fator de qualidade “ Q ”, descritas nas equações 3 e 4.

$$Q = \frac{2\pi f_0 L_0}{R_0} \quad (3)$$

$$Q = \frac{f_0}{df} \quad (4)$$

Na equação 3, f_0 representa o valor da frequência de antirressonância; R_0 , o valor da resistência medido nessa frequência (parcelas indutivas e capacitivas se anulam) e L_0 , o valor do indutor do circuito. A componente df , presente na equação 4, é medida em Hertz e se refere ao valor da faixa de frequência situada a 3 dB em relação à frequência central f_0 , como descrito na equação 5 e exemplificado na Figura 3.6.

$$Z_{dB} = 20 \log_{10}(Z_{df}/R_0) \rightarrow Z_{df} = 1,414 R_0 \quad (5)$$

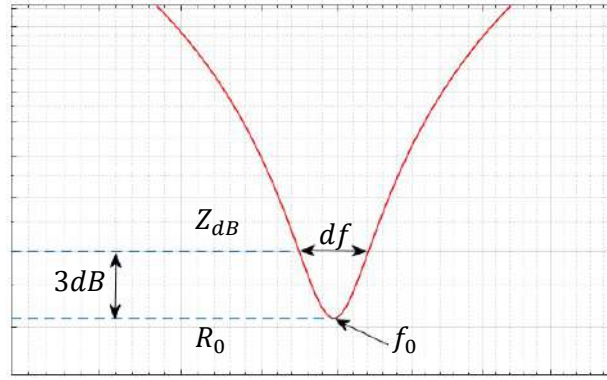


Figura 3.6 – Demonstração do método de calculo do circuito RLC ^[19]

Ao combinar as equações 3 e 4, tem-se como resultado a equação 6.

$$L_0 = \frac{R_0}{2\pi df} \quad (6)$$

O valor do capacitor, C_0 , por outro lado, é determinado pela equação 7.

$$C_0 = \frac{1}{L_0 \cdot (2\pi f_0)^2} \quad (7)$$

Ao utilizar as equações supracitadas, os valores calculados são de 1100 pF para o capacitor, 3,7 μ H para o indutor e 2,1 Ω para o resistor do circuito RLC representando o TC 550 kV, com ressonância em aproximadamente 2,5 MHz. Esses valores de componentes são próximos aos citados em outras referências e aos tipicamente utilizados em simulações. A comparação entre a curva medida pelo método impulsivo e a síntese da impedância do modelo RLC é evidenciada na Figura 3.7.

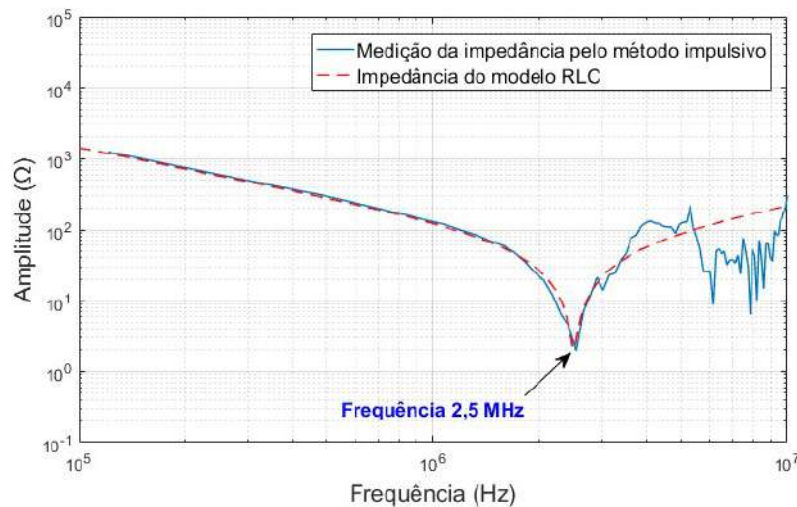


Figura 3.7 - Curva Impedância x Frequência da medição impulsiva e o modelo RLC

O comportamento do ângulo na frequência também é importante para avaliar o modelo do circuito. A comparação dos valores medidos com os do modelo é mostrada na Figura 3.8.

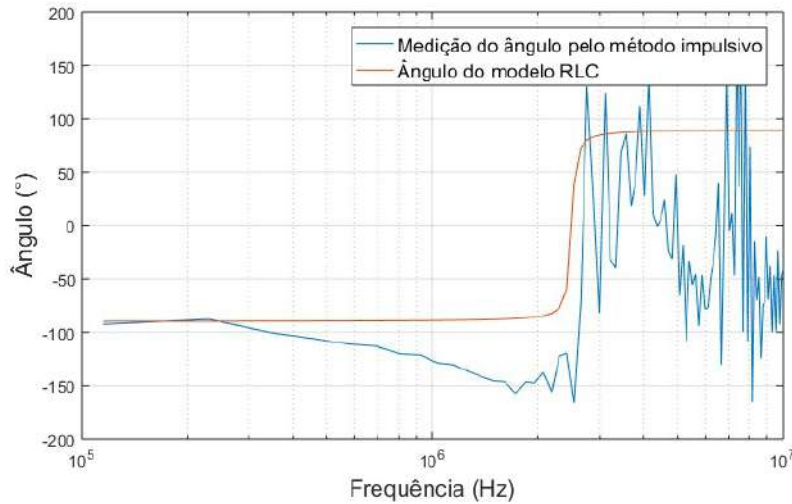


Figura 3.8 – Curva Ângulo x Frequência da medição impulsiva e modelo RLC

Nota-se uma diferença significativa entre os sinais, que ocorre principalmente pela presença de ruído durante a medição. Ressalta-se que estes resultados somente se tornam válidos para análises em frequências de até 3 MHz.

Para a metodologia proposta neste trabalho, o ensaio de transferência de tensão do objeto não é tão impactante, uma vez que, dadas as características construtivas do TC e o ponto de medição, tal técnica não apresenta resultados diferentes da medição de impedância. Toda a análise realizada utiliza os valores encontrados na caracterização no domínio da frequência.

3.3. Metodologia de medição de sobretensão

Durante as manobras de chaves seccionadoras em subestações, ocorrem arcos elétricos que, por sua vez, acarretam o surgimento de sinais de tensão e corrente de

elevada frequência, os transitórios eletromagnéticos. Espera-se que esses sinais encontrem, no isolamento papel-óleo do TC, um caminho com baixa impedância para frequências elevadas, devido ao fato de ser um corpo predominantemente capacitivo. Esse comportamento é a base para aplicação dos dois métodos propostos a seguir, ambos foram testados em laboratório e, ao fim deste item, são apresentados os resultados atingidos a fim de selecionar o método mais adequado para realizar a medição.

Tais métodos são apresentados pela primeira vez por MARTINS *et al.* [1], onde é mostrado que a diferença fundamental entre eles é o elemento sensor. Ambos utilizam informações sobre a impedância no domínio da frequência do objeto sob medição e o valor da corrente que atravessa o objeto até o potencial terra para estimar o valor de sobretensão nos terminais de alta tensão.

O primeiro a ser apresentado, utiliza como elemento sensor uma cinta capacitiva, composta por duas fitas de cobre sobrepostas e isoladas entre si por um dielétrico, buscando inserir uma capacitância conhecida em torno da estrutura isolante externa que sustenta o TC (porcelana ou polimérica). Com essa cinta, cria-se uma capacitância entre a parte da cinta mais próxima ao isolador externo e a parte interna do objeto sob ensaio (parte do corpo condensivo), e, com a capacitância conhecida entre as fitas da cinta capacitiva, cria-se um tipo de divisor capacitivo como se observa na Figura 3.9.

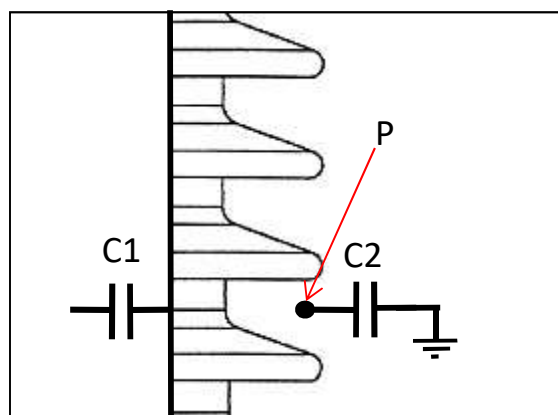


Figura 3.9 - Montagem da Cinta Capacitiva

Na imagem, $C1$ representa a capacitância entre o tubo aterrado no qual, internamente, passam os cabos dos enrolamentos secundários e a estrutura isolante do objeto (isolamento externo); $C2$ representa a capacitância da cinta instalada e o ponto P é o local de medição.

Esse processo é utilizado para medições de descargas parciais, sinais de alta frequência, em subestações isoladas a SF₆, utilizando a capacitância entre o condutor e a blindagem como *CI*, sendo eficiente para mensurar os eventos de alta frequência. Entretanto, nesse caso, o valor da tensão muitas vezes não é relevante, já que a medição busca somente identificar sinais característicos de descargas parciais (ondas rápidas e de baixas amplitudes) e o método normalizado para quantificar o sinal de descargas parciais utiliza como unidade de medida o pC, algo que somente é possível medir com um sistema de calibração sendo geralmente realizado em laboratório.

Devido à necessidade de instalar o elemento sensor diretamente na porcelana do objeto, deve-se atentar para cuidados com a segurança, considerando o fato de a medição ser realizada em campo com o equipamento energizado. Isso porque é preciso acessar um ponto do equipamento acima do aterramento (ponto neutro) e se aproximar dos terminais de alta tensão. A proposta dessa modalidade de medição é mensurar as sobretensões sem que haja desligamentos, visto que esses, quando em sistemas de alta tensão, podem causar grandes impactos operativos e econômicos. A Figura 3.10 mostra o modo como o sistema de medição é instalado no equipamento.

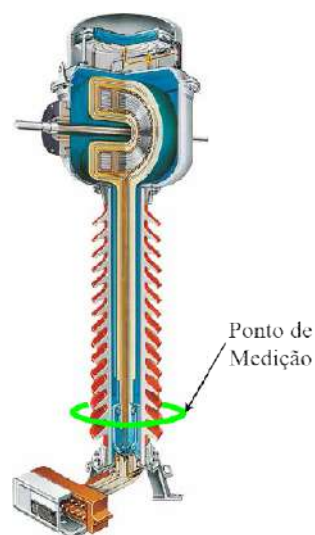


Figura 3.10 - Instalação da Cinta Capacitiva no TC

A outra metodologia proposta utiliza como elemento sensor um transformador de corrente de alta frequência (HFCT), ilustrado na Figura 3.11. Nessa, a medição é realizada com a instalação do sensor no cabo do aterramento do TC e busca medir a corrente que passa através de toda a isolamento do TC (papel-óleo) até o tubo de potencial nulo (instalado no interior do TC).

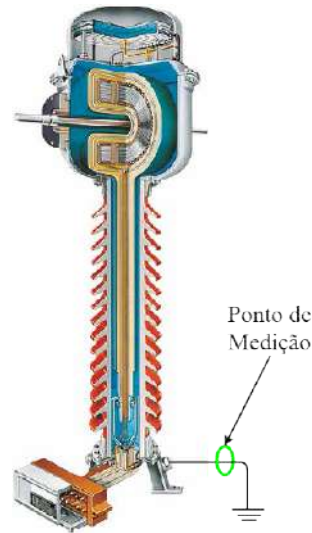


Figura 3.11 – Instalação do HFCT no TC

A partir da medição do valor de corrente e do conhecimento das características da impedância no domínio da frequência do objeto, é possível estimar o valor da tensão do evento. Essa previsão pode ser feita através de cálculo do domínio da frequência, representado na equação 8, por meio do conhecimento dos valores da impedância nesse domínio ou utilizando o sinal no tempo, conhecendo os valores das componentes resistivas, capacitivas e indutivas do circuito, equação 9.

$$V_f = I_f \cdot Z_f \quad (8)$$

$$V_t = \frac{1}{C} \int_0^t I_t dt + L \frac{di}{dt} + R I_t \quad (9)$$

Na equação 8, V_f , I_f e Z_f são valores de tensão, corrente e impedância, respectivamente, com um valor de frequência associado. A fim de obter o valor de corrente na frequência, faz-se necessário calcular a transformada rápida de Fourier do sinal medido. O valor de impedância já é mensurado no domínio da frequência quando utilizado equipamentos especializados, como pontes RLC, para realizar a varredura. Como o resultado que se busca é o valor da tensão no domínio do tempo, é necessário utilizar a transformada inversa de Fourier no valor da tensão no domínio da frequência para transformar para o domínio do tempo.

Na equação 9, V_t e I_t são valores de tensão e corrente no domínio do tempo, e R , L e C , são valores do circuito equivalente do isolamento do TC (circuito RLC)

supracitado no item 3.2. Com essa equação, é possível calcular a tensão diretamente com o sinal medido em campo.

A fim de garantir uma medição correta e minimizar os possíveis erros é necessário que haja alguns cuidados. Em primeiro lugar, visto que os sinais a serem mensurados ocorrem em uma ampla faixa de frequência, a partir de centenas de quilohertz até alguns mega-hertz, faz-se necessário garantir que todo o sistema de aquisição e sensores esteja adequado para responder às faixas de frequência desses sinais. Nesse sentido, o ideal é que a resposta do sistema seja plana na faixa de frequência investigada, sem que haja amplificações ou atenuações. Outro ponto importante é a adequação do sinal de maneira satisfatória para possibilitar a medição, por meio do uso do sistema de transmissão de dados e atenuadores adequados para cada tipo de sensor (fonte do sinal).

A seguir, são mostrados os resultados de medição realizada em laboratório dos métodos propostos e, em seguida, a avaliação de cada um deles. O arranjo utilizado para o método utilizando o HFCT como sensor é mostrado na Figura 3.12. Os sinais aplicados foram ondas padronizadas de impulso atmosférico e impulso atmosférico com corte na cauda.

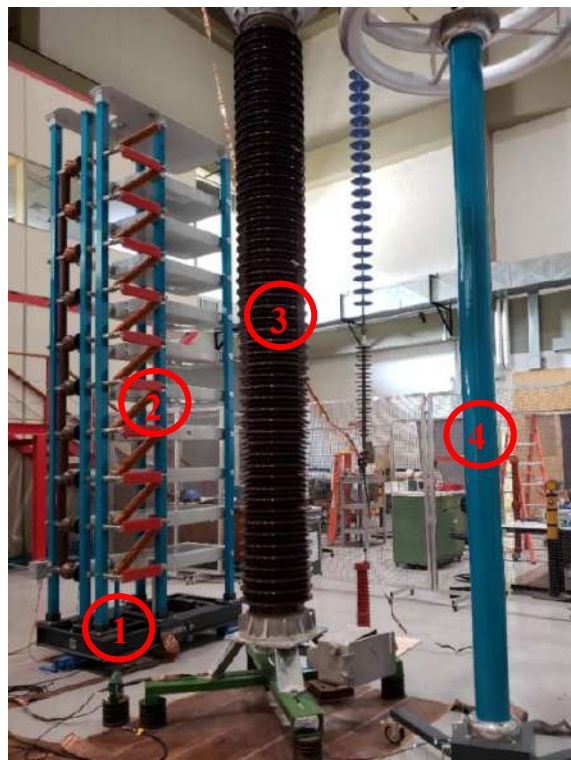


Figura 3.12 – Arranjo utilizado nos testes dos sistemas de medição – (1) Sensor, (2) Gerador de impulso, (3) TC sob ensaio, (4) Divisor de tensão

Como mostrado anteriormente, a diferença entre os métodos é o sensor utilizado e o modo de instalação no TC, sendo o restante do arranjo de medição o mesmo.

Na Figura 3.13 é apresentado o resultado de medição com a cinta capacitiva de um impulso atmosférico pleno de 50 kV e tempo de frente de aproximadamente 1 μ s e meia cauda de 48 μ s.

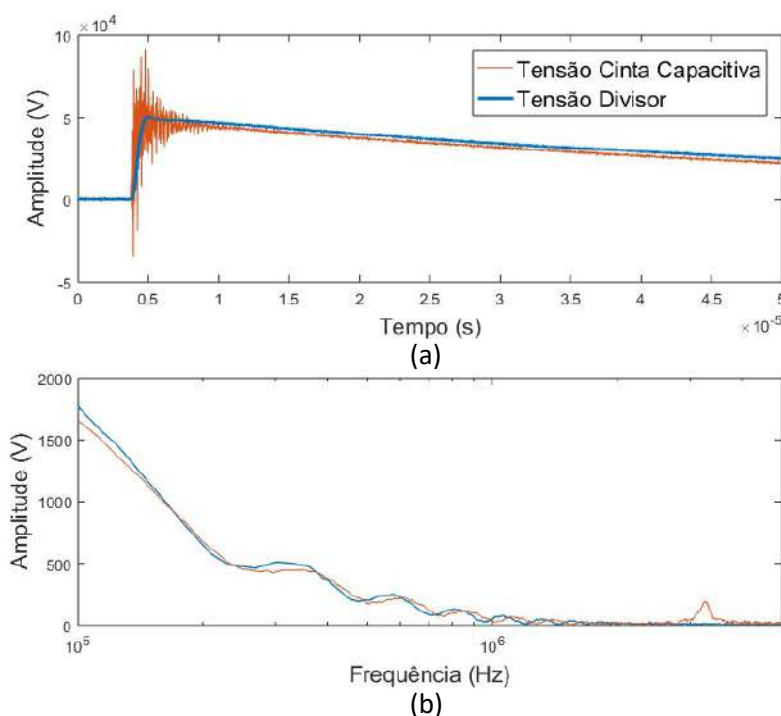


Figura 3.13 - Impulso atmosférico pleno medido pelo sistema com Cinta Capacitiva (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

Não obstante o resultado da medição no domínio da frequência (Figura 3.13-b) ser relativamente similar ao sinal aplicado, o sinal no domínio do tempo (Figura 3.13-a) apresentou elevada sensibilidade a ruídos externos, mostrado no momento de subida do sinal onde ocorre o disparo (pequeno arco elétrico) do gerador de impulso utilizado em laboratório. Assim, a utilização deste método em campo se torna inviável devido ao interesse de realizar medições durante a manobra de chaves seccionadoras no sistema no qual haveria grande interferência. Uma alternativa para minimizar esse efeito seria a utilização de blindagens eletromagnéticas para as interferências externas ou até a utilização de sensores de fabricação industriais já blindados, entretanto, para o presente trabalho não foi possível concluir tais melhorias neste sistema de medição.

Nas Figuras 3.14 e 3.15, mostram-se os resultados obtidos com o método utilizando o HFCT para a medição.

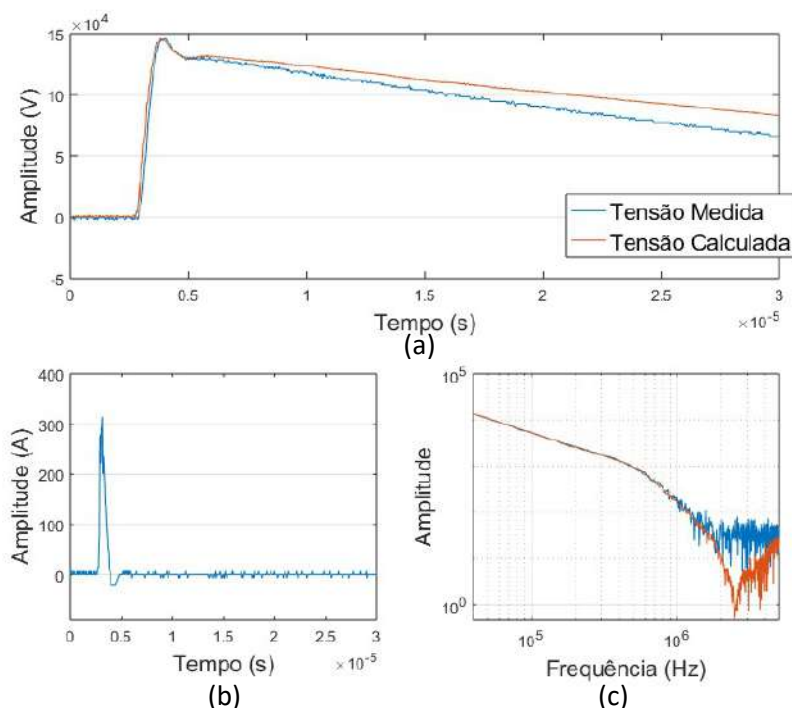


Figura 3.14 - Impulso atmosférico pleno medido pelo sistema com HFCT: (a) sinal de tensão medido e calculado, (b) sinal de corrente medido e (c) sinal da tensão medido e calculado no domínio da frequência

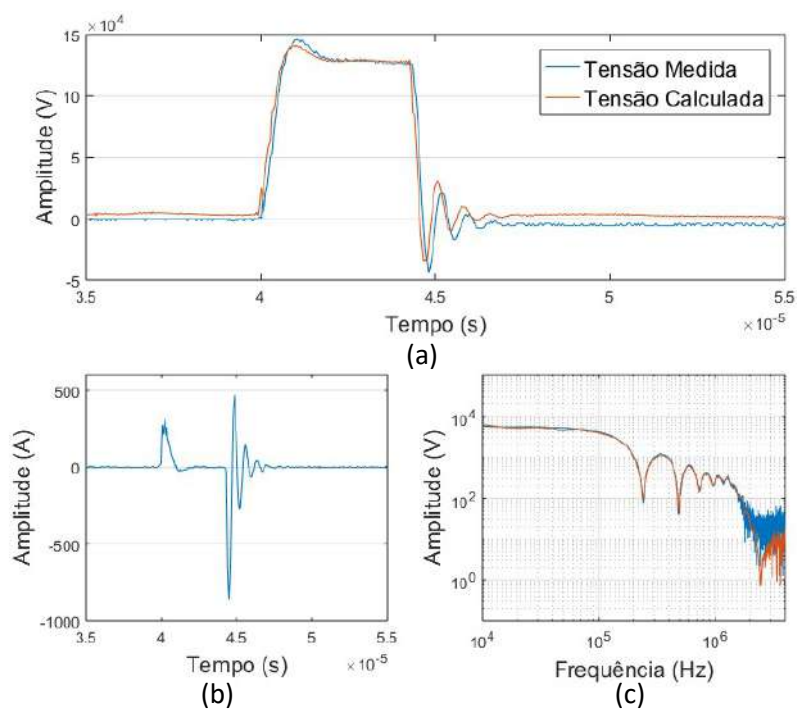


Figura 3.15 – Impulso atmosférico com corte na cauda medido pelo sistema com HFCT: (a) sinal de tensão medido e calculado, (b) sinal de corrente medido e (c) sinal da tensão e calculado no domínio da frequência

Para o impulso de tensão atmosférico pleno é aplicado 150 kV com tempo de frente de aproximadamente 1 μ s e meia cauda de 40 μ s. As características do impulso cortado são similares, porém com o corte ocorre em 4,3 μ s e com tempo de colapso de 0,3 μ s.

Percebe-se que, a partir dos sinais de tensão medidos no domínio do tempo e do resultado do tratamento para recomposição das formas de onda para os exemplos aplicados (Figuras 3.14-a e 3.15-a), por se tratar de um sensor confeccionado industrialmente, o HFCT se torna consideravelmente menos suscetível a interferências externas como no caso da cinta capacitiva. O resultado do método se mostra satisfatório em ambos os casos testados em laboratório, tanto com impulso pleno, quanto com corte na cauda – como se pôde perceber nas imagens acima, obtendo bastante semelhança tanto nos sinais no domínio do tempo (Figuras 3.14-a e 3.15-a) quanto no domínio da frequência (Figuras 3.14-c e 3.15-c). Desta forma, tal método foi selecionado com a finalidade de realizar as medições em campo.

Cabe citar que os métodos propostos neste trabalho são formas inovadoras de realizar esse tipo de medição e, a partir da pesquisa realizada não se encontrou, na literatura contemplada, referências a resultados utilizando esses métodos ou outros similares ao mesmo. O maior objetivo da aplicação desses métodos é criar um ambiente simples para realizar as medições em campo, sem que haja a necessidade de grandes intervenções de logística, como normalmente ocorre ao se tratar de SEs de alta tensão.

Somente o fato de evitar desligamentos no sistema para instalação de sensores é um ganho considerável para os envolvidos na atividade de medição (equipe técnica e operação), tanto economicamente, quanto operativamente.

4. Medições Realizadas

Neste capítulo são apresentados arranjos típicos de SEs de 500 kV, bem como a posição dos TCs em relação aos disjuntores e às chaves seccionadoras. São apresentados, ainda, os resultados de medições de corrente realizadas em uma SE nessa classe de tensão utilizando o sensor HFCT – método proposto no capítulo anterior. Por fim, são evidenciados os valores de sobretensões calculadas através das medições de corrente realizadas, bem como a análise comparativa dos dados iniciais com valores medidos e calculados com simulações e, posteriormente, a realização de avaliações dos resultados obtidos.

4.1. Detalhe das Instalações

Ao se tratar de SEs ligadas à rede básica, ou seja, de valores mais elevados de tensão, existem diversos tipos de arranjos físicos que podem ser empregados, de modo que cada um apresente vantagens e desvantagens se comparados. Segundo VIOLIN *et. al.* [21], em SEs com classe acima de 345 kV, o arranjo mais encontrado é o chamado “Barra Dupla com Disjuntor e Meio”, capaz de prover boa flexibilidade além de ser altamente estável. Este arranjo é ilustrado na Figura 4.1.

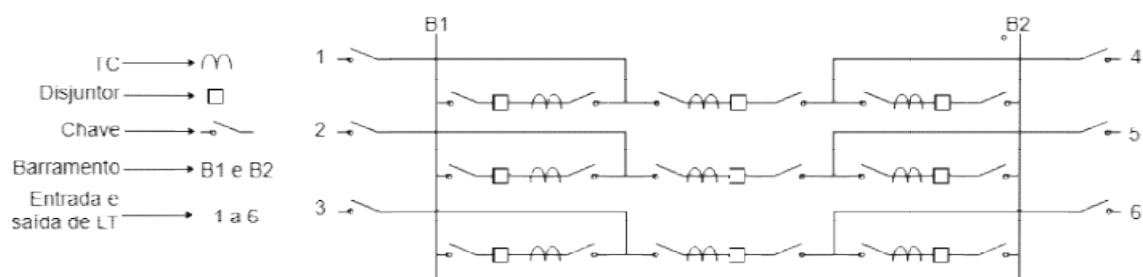


Figura 4.1 - Configuração em barra dupla com disjuntor e meio ^[20]

Fonte: Adaptado pelo autor

Apesar de essa configuração apresentar um custo mais elevado, devido à necessidade de um maior número de elementos – disjuntores, TCs e seccionadores –, na

Figura 4.1, por exemplo, são necessários para seis circuitos, 9 disjuntores, 9 TCs e 24 seccionadores; a posição do TC em relação aos equipamentos de manobra adjacentes é pertinente a este trabalho. Além disso, é interessante à pesquisa a configuração dos demais equipamentos de manobra da SE no momento de realização de manobras, principalmente os que são localizados no mesmo vão onde se realiza a medição e/ou simulação.

A fim de simplificar a representação desse arranjo, utiliza-se uma parcela de um único vão para as manobras, como é possível perceber na Figura 4.2 (na qual os seccionadores são representados por “S”; os disjuntores, por “D”; as barras do arranjo, por “B”, as conexões com as linhas de transmissão, por “LT” e, por fim, os TCs de alta tensão, por “TC”).

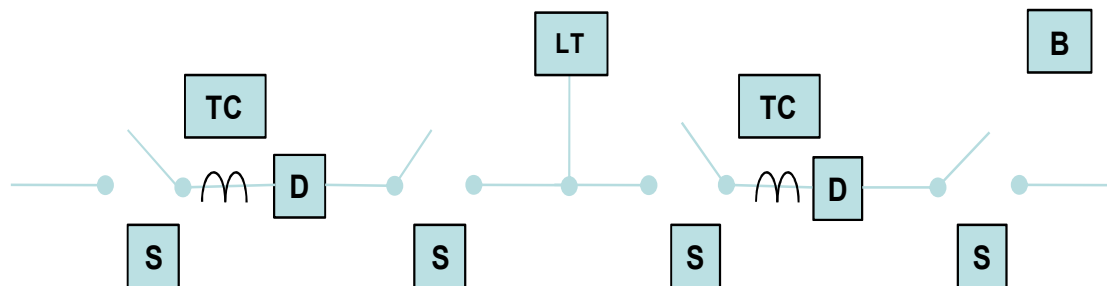


Figura 4.2 – Arranjo disjuntor e meio simplificado

A instalação do sistema de medição, assim como apresentado no capítulo 3, é realizada no cabo de aterramento do TC sob medição. O arranjo completo do sistema de medição é constituído de: 1 – Atenuador misto (capacitivo e resistivo), 2 – Transmissor de fibra óptica, 3 – Blindagem eletromagnética aterrada, 4 – Fibra óptica, 5 – Receptor do sistema óptico, 6 – Osciloscópio USB e 7 – Notebook para controle e aquisição de dados, como pode ser compreendido na Figura 4.3.

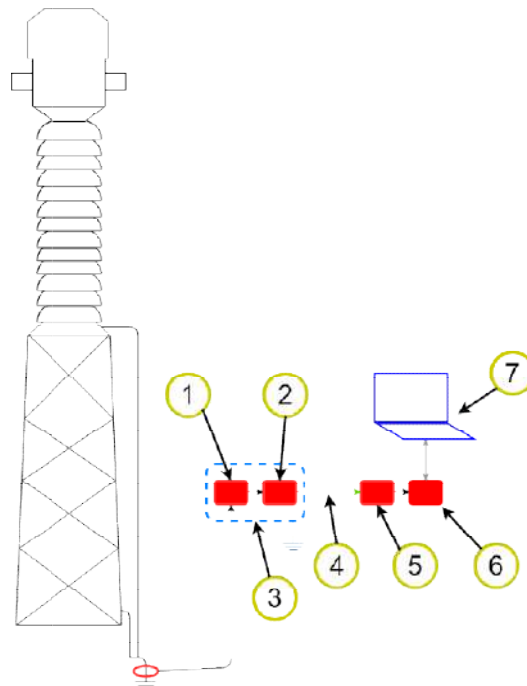


Figura 4.3 - Arranjo do sistema de medição

A utilização de sistemas de fibra óptica é típica nesses tipos de medições em campo, principalmente em sistemas de alta tensão, haja vista que, por questões de segurança, é necessário que os profissionais envolvidos nas manobras estejam distantes dos locais onde essas serão realizadas. Além disso, as características do sistema óptico são de extrema relevância para medições de transitórios, principalmente a imunidade a ruídos irradiados nos condutores (transmissão de dados por feixes de luz).

Conforme a afirmação de [3], somente o HFCT em conjunto com o sistema de fibra óptica não são suficientes para condicionar o sinal esperado devido seu valor elevado de amplitude, logo, faz-se necessária a utilização de um sistema atenuador marcado, como 1 na Figura 4.3.

4.2. Medições Realizadas

Nesta seção são evidenciados os resultados de medições realizadas de forma independente em um sistema trifásico (fases A, B e C), sem que houvesse sincronismo entre elas, em um grupo de equipamentos instalados em uma SE de 500 kV. Visto que a

inserção de mais elementos poderia introduzir maiores ruídos, não foi possível contornar essa condição.

Apresenta-se, ainda, uma série de medições dos eventos oriundos de chaveamentos, com diferentes estados do sistema, a fim de avaliar o efeito de cada situação individualmente sendo possível, portanto, a identificação da manobra cujo potencial seja gerar o maior valor de sobretensão nos terminais de alta tensão do TC. Além da análise da frequência em que esses eventos ocorrem, com objetivo de relacioná-los com a região de ressonância natural do TC.

As manobras são apresentadas conforme orientação mostrada na Figura 4.4, em que o disjuntor é marcado por “F”, para fechado, e “A”, para aberto; as chaves seccionadoras seguem a simbologia padrão para aberto e fechado e a seta curva representa qual manobra está sendo realizada.

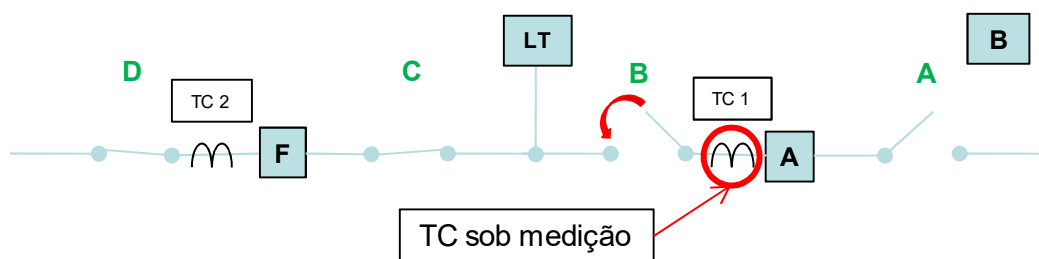


Figura 4.4 - Diagrama do estado do sistema, posição da medição e manobra efetuada

Na Tabela 4.1 é mostrada a condição operativa da chave manobrando e a chave oposta, por exemplo, a Figura 4.4 representa a “Medição 01”.

Tabela 4.1 – Resumo das condições operativas durante as manobras

Medição	TC	Manobra
01	1	Fechamento B com A Aberta
02	1	Abertura B com A Aberta
03	1	Fechamento A com B Aberta
04	1	Fechamento B com A Fechada
05	1	Abertura B com A Fechada
06	1	Fechamento A com B Aberta
07	1	Abertura A com B Aberta
08	1	Fechamento B com A Aberta
09	1	Abertura B com A Aberta
10	2	Fechamento D com C Aberta
11	2	Fechamento C com D Fechada
12	2	Abertura D com C Fechada
13	2	Abertura C com D Aberta
14	2	Fechamento D com C Aberta

Na Tabela 4.1 é mostrada somente a condição operativa das chaves seccionadoras, mas, devido à restrição de operação, o disjuntor entre as chaves deve estar aberto neste momento.

A “Medição 01”, primeiro caso evidenciado, segue a manobra da Figura anterior e corresponde ao fechamento da chave seccionadora “B”. A seguir, as Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 mostram os sinais medidos (a) e uma aproximação com tempo de 50 μ s (b) nas fases A, B e C, respectivamente.

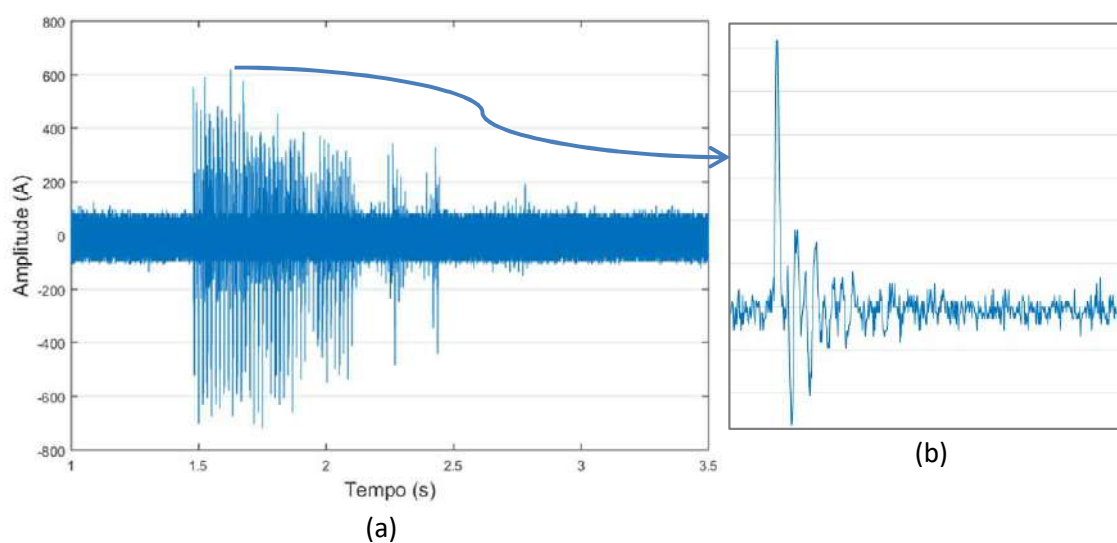


Figura 4.5 -Medição 01 - Manobra de fechamento da chave seccionadora Fase A – (a) Sinal completo e (b) Detalhe de um impulso em 1,6 s com pico de 600 A

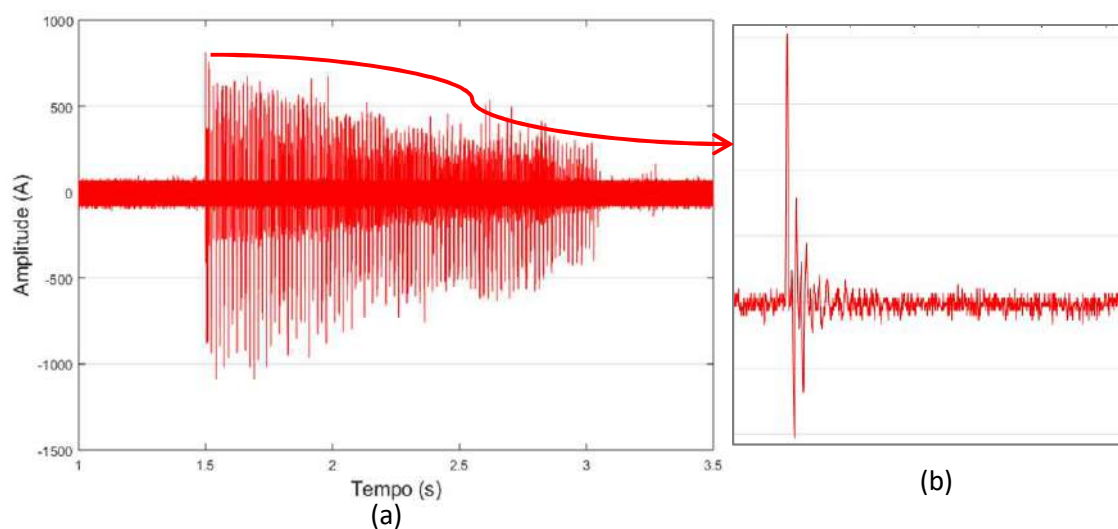


Figura 4.6 - Medição 01 - Manobra de fechamento da chave seccionadora Fase B – (a) Sinal completo e (b) Detalhe de um impulso em 1,5 s com pico de 800 A

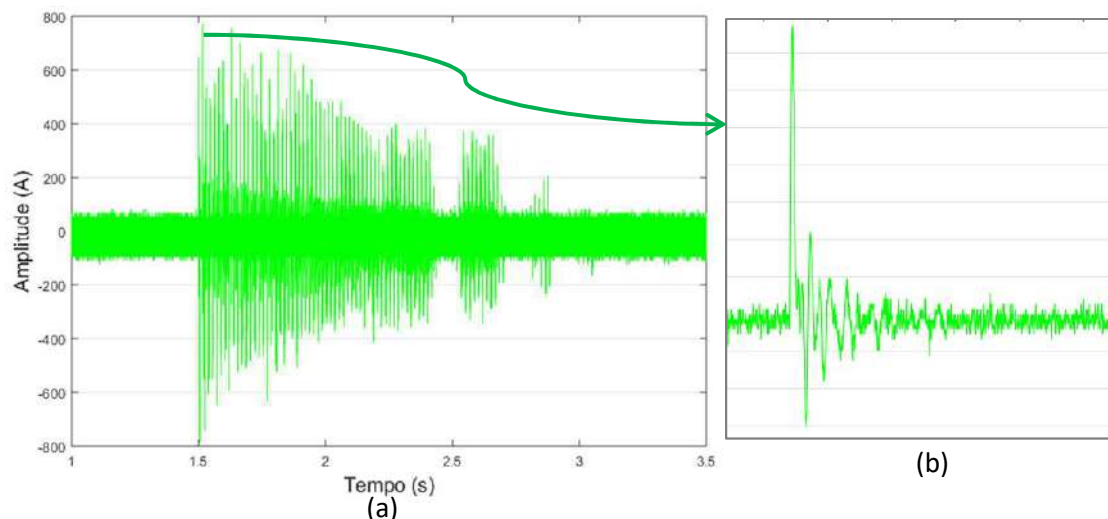


Figura 4.7 - Medição 01 - Manobra de fechamento da chave seccionadora Fase C – (a) Sinal completo e (b) Detalhe de um impulso em 1,5 s com pico de 750 A

Por meio das figuras acima, percebe-se que o valor máximo de corrente medida para essa manobra é de aproximadamente 1000 A na fase B e o tempo do arco elétrico é de aproximadamente 1,5 segundos.

A seguir, na Figura 4.8, apresenta-se a manobra de abertura da chave seccionadora “B”.

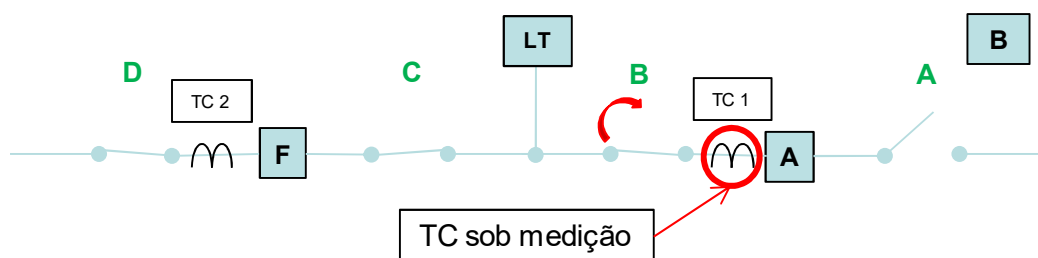


Figura 4.8 - Diagrama do estado do sistema, posição da medição e manobra efetuada

As Figuras 4.9, 4.10 e 4.11, mostram os sinais medidos (a) e uma aproximação com tempo de 50 μ s (b) durante a manobra supracitada nas fases A, B e C, respectivamente.

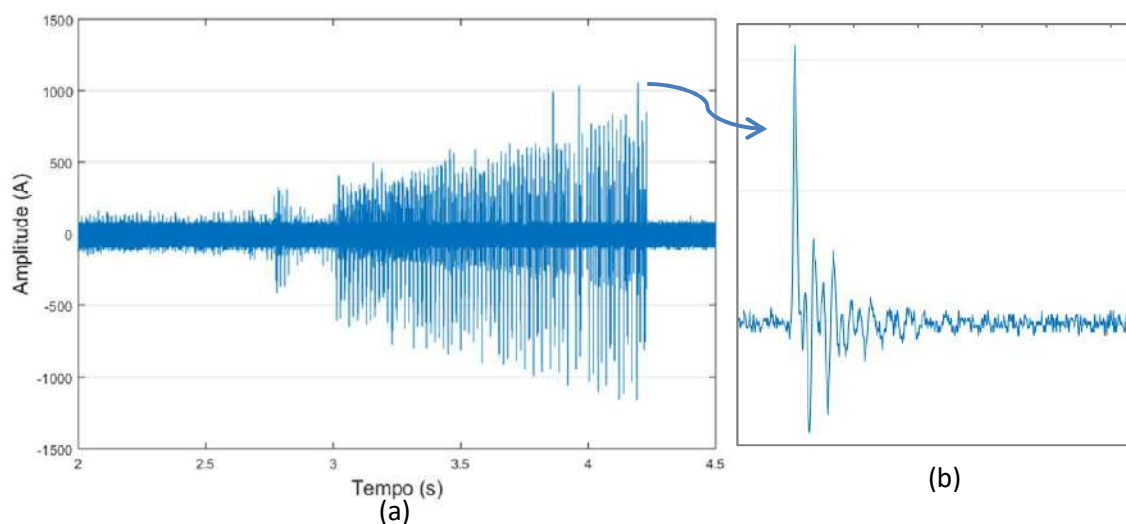


Figura 4.9 - Manobra de fechamento da chave seccionadora Fase A – (a) Sinal completo e (b) Detalhe de um impulso em 4,2 s com pico de 1100A

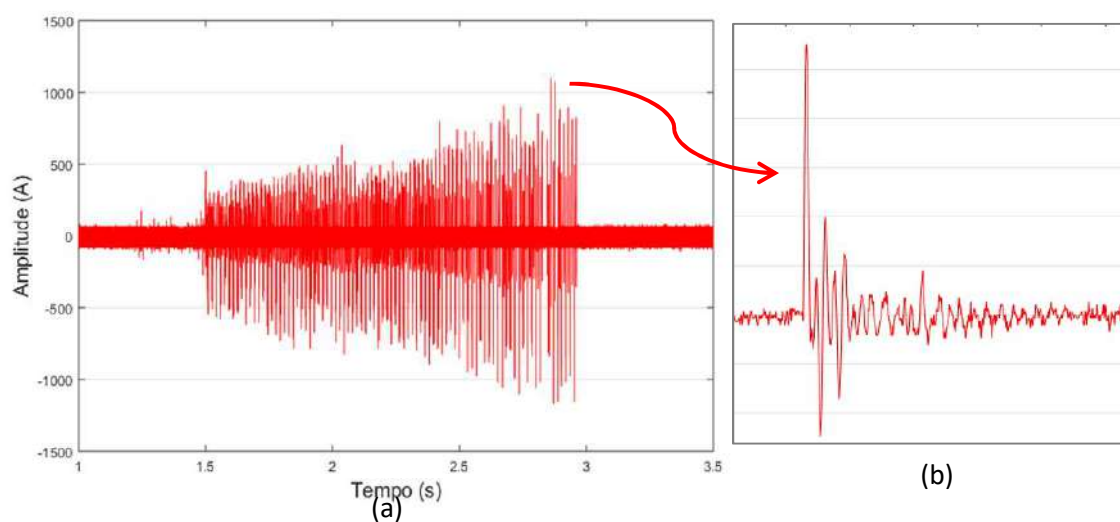


Figura 4.10 - Manobra de fechamento da chave seccionadora Fase B – (a) Sinal completo e (b) Detalhe de um impulso em 2,85 s com pico de 1100A

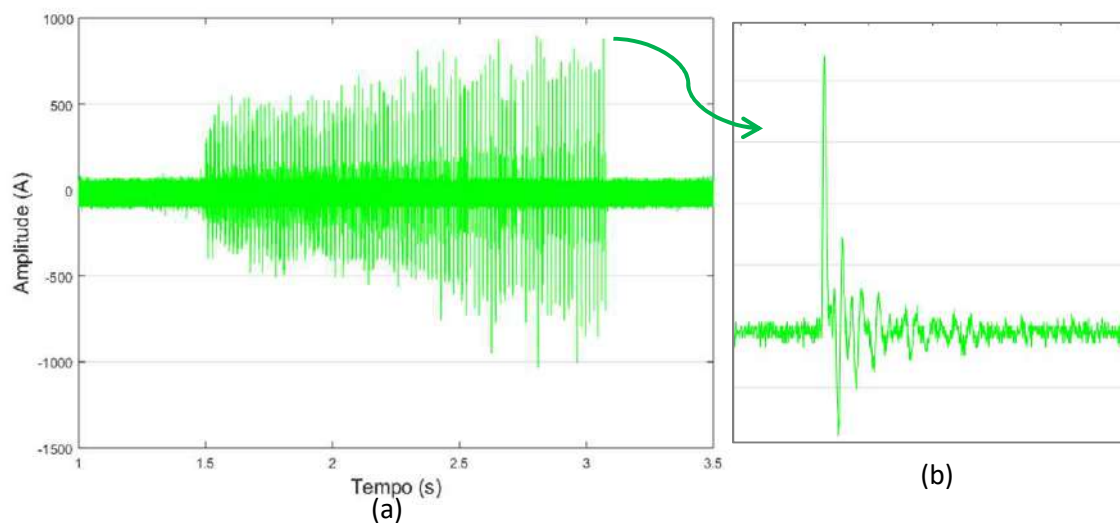


Figura 4.11 - Manobra de fechamento da chave seccionadora Fase C – (a) Sinal completo e (b) Detalhe de um impulso em 3,05 s com pico de 900A

Nota-se que, para a manobra de abertura, os sinais de corrente são mais intensos, quando comparados nas mesmas condições, com fechamento da mesma chave e mesma topologia do restante do circuito. Além disso, as manobras dos disjuntores não apresentaram valores relevantes e não sensibilizaram o sistema, não sendo possível realizar a medição das mesmas – o que fora esperado, visto que, em SEs com essa classe de tensão, os disjuntores instalados possuem elementos de sincronismo e mecanismos de extinção de arco, minimizando o efeito destes eventos visto nos terminais do TC.

Para as demais manobras realizadas, devido à semelhança entre os sinais medidos, são elencados os valores máximos de corrente medidos durante cada manobra, como se pode perceber na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Resumo dos valores de corrente encontrados nas medições realizadas

Medição	TC	Chave	Manobra	Fase A	Fase B	Fase C
01	1	B	Fechamento	-720 A	-1080 A	-785 A
02	1	B	Abertura	-1160 A	-1170 A	-1030 A
03	1	A	Fechamento	-350 A	-400 A	320 A
04	1	B	Fechamento	-610 A	-800 A	510 A
05	1	B	Abertura	-790 A	-750 A	580 A
06	1	A	Fechamento	-385 A	-420 A	330 A
07	1	A	Abertura	-510 A	-415 A	330 A
08	1	B	Fechamento	-880 A	-1160 A	-870 A
09	1	B	Abertura	-1240 A	-1080 A	-990 A
10	2	C	Abertura	-745 A	-erro	-745 A
11	2	D	Fechamento	-165 A	-330 A	-165 A
12	2	D	Abertura	-525 A	-385 A	-610 A
13	2	C	Abertura	-440 A	-440 A	-470 A
14	2	D	Fechamento	-760 A	-630 A	-770 A

A coluna indicada como “Medição” enumera as operações das seccionadoras, a coluna “TC” apresenta o TC que estava sob medição no momento e as colunas nomeadas como “chave” e “manobra” revelam a chave e o tipo de manobra que ocorrerá, respectivamente. Devido ao sistema de medição possuir um alto valor de atenuação, não foi possível registrar todas as manobras, pois, a depender das circunstâncias, os sinais gerados durante a manobra são de baixa amplitude. Os valores de amplitude da corrente mostram o maior valor para cada manobra em cada fase. A nomenclatura “erro” na manobra 10 foi utilizado para os casos nos quais houve erro durante a aquisição e armazenagem do sinal pelo controlador.

Percebe-se, com base nos valores listados na Tabela 4.2, que as maiores amplitudes de correntes medidas estão concentradas no TC 1, posicionado junto à barra, oriundos da manobra da chave que está acoplada diretamente ao TC, ou seja, com menor distância entre o arco elétrico e o objeto. Essa característica vai ao encontro das constatações de FREIRE *et. al.* [3] que observara, em seu estudo e simulação, o mesmo aspecto.

Nota-se, ao avaliar as Tabelas 4.1 e 4.2, que as manobras listadas como 02 e 05 são referentes à mesma chave seccionadora, sendo a única diferença entre elas a condição operativa da chave oposta, e ainda é mostrada uma redução do valor da corrente durante a manobra. É observada uma redução de 36% do valor da corrente para a Fase B (1170 A para 750 A). O mesmo é observado para as manobras 01 e 04, com redução de 26% para a Fase B.

Durante uma única manobra, ocorrem sucessivos impulsos de corrente, conforme observado nas Figuras 4.5 a 4.7 e 4.9 a 4.11. Uma aproximação da Figura 4.10, já ao final da manobra, é mostrada na Figura 4.12.

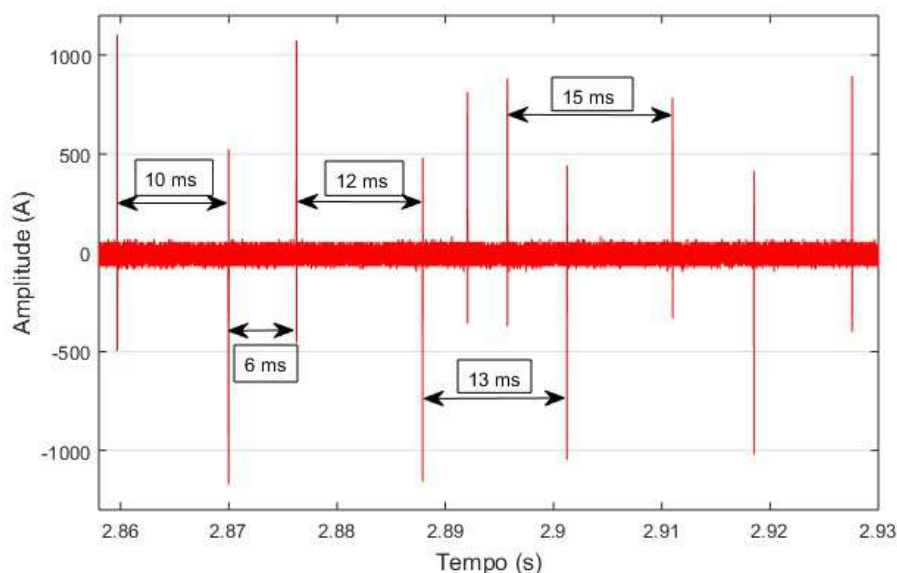


Figura 4.12 - Impulsos de corrente registrados durante a manobra 02 Fase B

Para os impulsos de maior intensidade registrados, o intervalo de tempo entre os impulsos positivos e negativos medidos é de 6 a 10 ms, e entre pulsos de mesma polaridade é de 13 a 18 ms. Tal fato está em consonância com o mencionado em fontes literárias já apresentadas e evidencia uma correlação com os semiciclos de um sinal de 60 Hz (período de 16,66 ms). A diferença no tempo se justifica devido à ausência de

referência de tensão nesse momento da manobra, quando um polo da chave seccionadora está alimentado pelo barramento enquanto o outro está sem alimentação, isolado pelos já abertos disjuntor e chave seccionadora oposta. No início da manobra de fechamento e no fim da manobra de abertura, registraram-se os maiores valores de correntes transitórias.

Outra característica relevante dos impulsos de corrente medidos é o tempo de frente da onda, com valores próximos a $0,5 \mu\text{s}$ de zero até o valor máximo de corrente para cada impulso de uma manobra, o que revela um fenômeno rápido com frequências maiores do que impulsos padronizados aplicados em ensaios na fábrica. Tais assertivas podem ser comprovadas na Figura 4.13 que também evidencia que a duração de cada impulso de corrente é bem reduzida, próximo a $25 \mu\text{s}$.

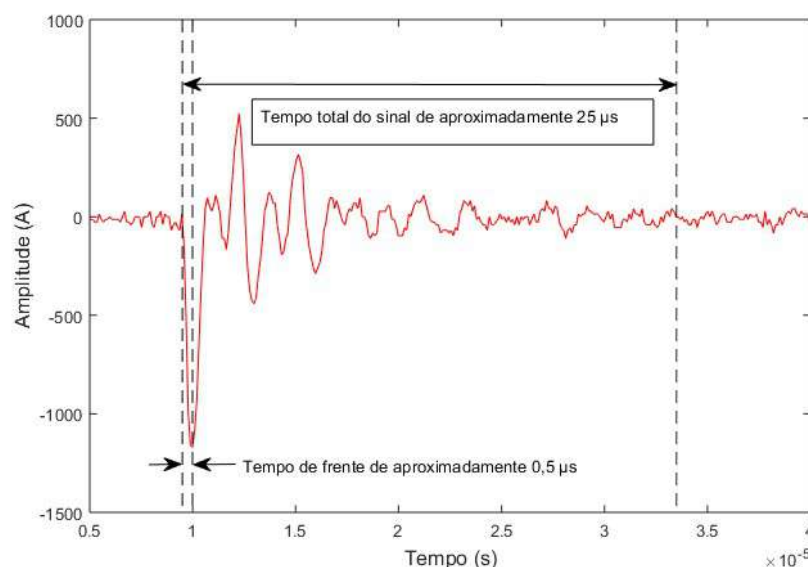


Figura 4.13 - Impulso de corrente registrado na manobra 02 Fase B

A seguir são apresentados os sinais de corrente decompostos no domínio da frequência, para tal, escolheu-se um valor médio de 50% do valor de maior corrente para selecionar quais sinais seriam tratados, por meio da utilização do software MATLAB para o tratamento matemático. A análise dos principais componentes de frequência existentes nos eventos transitórios busca identificar sinais cuja frequência coincida com a da ressonância natural do TC. Outro ponto a ser verificado, é se os sinais transitórios, independente da amplitude, possuem o mesmo comportamento no domínio da frequência. Este passo pode identificar sinais de origem distinta durante a medição, como por exemplo, sinal e ruído. Também são mostrados os números de impulsos

sucessivos de corrente para cada manobra. Primeiro, ilustram-se os sinais referentes à manobra mostrada na Figura 4.4, sendo as Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 referentes às fases A, B e C, respectivamente.

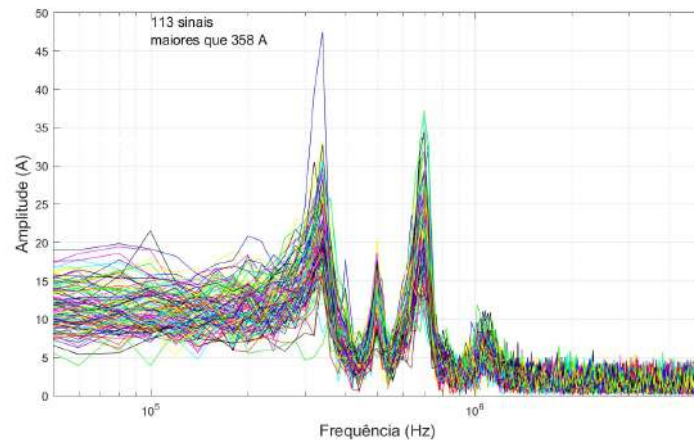


Figura 4.14 - Sinais no domínio da frequência Fase A

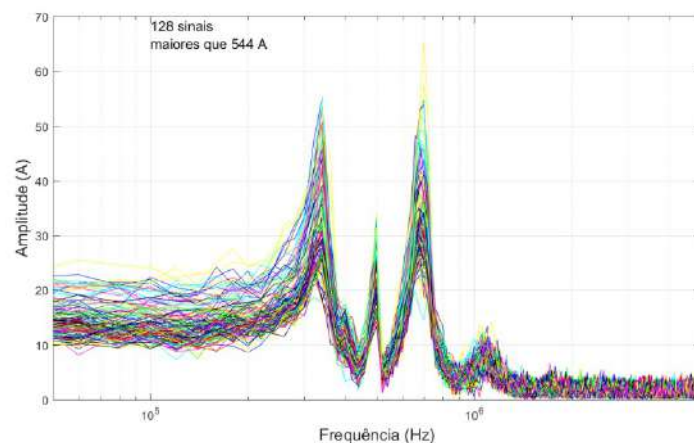


Figura 4.15 - Sinais no domínio da frequência Fase B

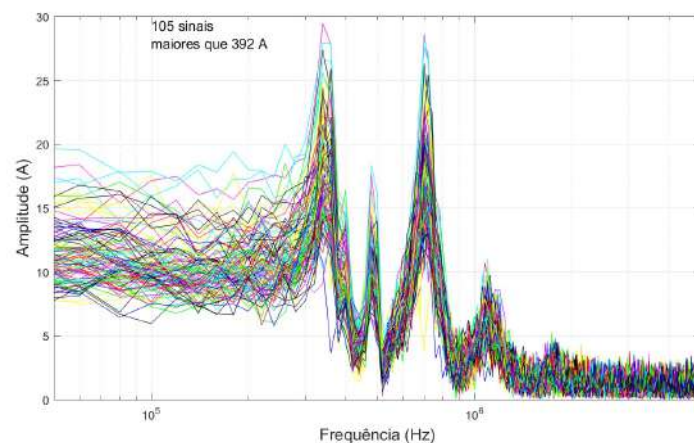


Figura 4.16 - Sinais no domínio da frequência Fase C

Nota-se uma grande semelhança entre os sinais medidos durante a manobra e em todas as fases, embora mantenham entre si diferenças em suas amplitudes. Os principais componentes de frequência observados nesses sinais estão em torno de 350 kHz,

500 kHz e 700 kHz. Da mesma forma, os sinais referentes à manobra representada na Figura 4.8 estão ilustrados nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19.

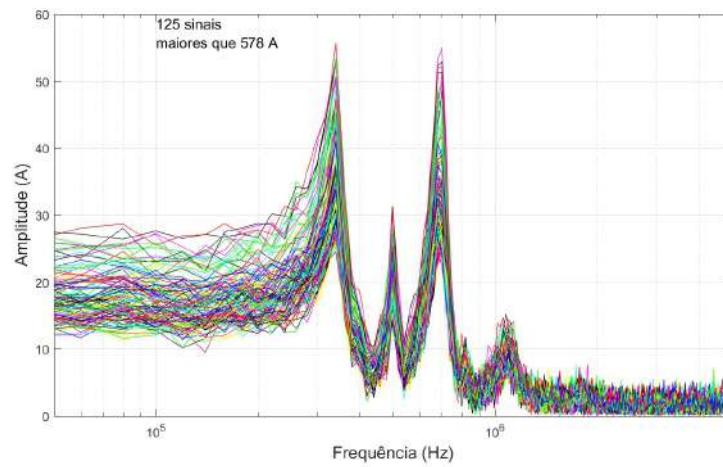


Figura 4.17 - Sinais no domínio da frequência Fase A

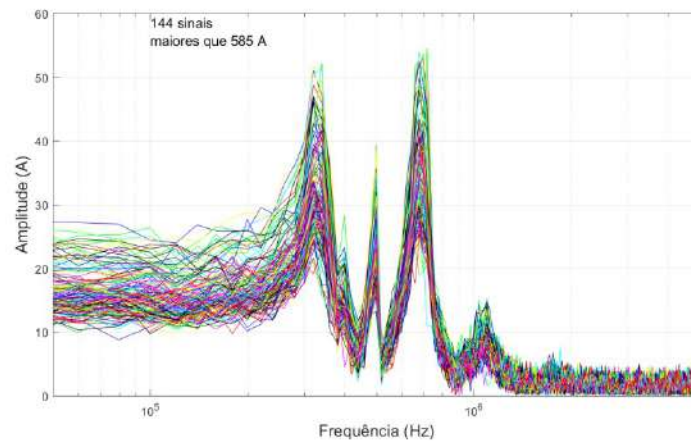


Figura 4.18 - Sinais no domínio da frequência Fase B

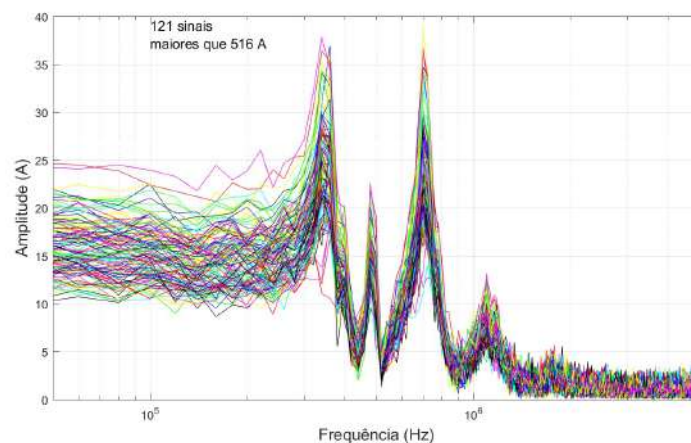


Figura 4.19 - Sinais no domínio da frequência Fase C

A observação anterior sobre as características dos sinais é válida, ou seja, todos os sinais referentes à mesma manobra possuem semelhança em suas componentes de

frequência, sendo as principais em torno de 350 kHz, 500 kHz e 700 kHz. Devido a essa similaridade, o resultado dos demais sinais medidos apresenta-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Resumo das componentes de frequência encontrados nas medições realizadas

Medição	TC	Chave	Manobra	Frequências (kHz)		
01	1	B	Fechamento	350	500	700
02	1	B	Abertura	350	500	700
03	1	A	Fechamento	600		
04	1	B	Fechamento	300	500	700
05	1	B	Abertura	300	500	700
06	1	A	Fechamento	400	600	
07	1	A	Abertura	400	600	
08	1	B	Fechamento	350	500	700
09	1	B	Abertura	350	500	700
10	2	C	Abertura	400	500	1000
11	2	D	Fechamento	350		
12	2	D	Abertura	300	500	1000
13	2	C	Abertura	350	1000	
14	2	D	Fechamento	400	500	1000

Nas manobras analisadas, não houve nenhum caso de tal coincidência, entretanto, não se descarta essa análise para casos futuros, haja vista a impossibilidade de, nesse momento, realizar todas as possíveis manobras com diferentes topologias do sistema. É possível observar, ainda, a existência de um número elevado de reignições (impulsos) sucessivas durante a manobra. Para as manobras de maior amplitude, verificou-se um número superior a 120 impulsos que ultrapassam a metade do valor de pico de corrente da manobra ($50\% I_{\text{máx}}$), como por exemplo, na manobra de abertura mostrada na Figura 2.9 foram registrados 144 reignições com valor superior a 585 A (50% de 1170).

Os valores das componentes de frequência encontrados estão de acordo àqueles mencionados em trabalhos como os de [3], [12] e [13]; todavia, as amplitudes das correntes medidas são inferiores às mencionadas em tal literatura. Esse fato levou ao questionamento quanto ao aterramento da estrutura onde o TC está instalado no campo, o que causaria uma divisão na corrente e assim somente parte da corrente total estaria sendo obtida.

Ao se desconectar os cabos de aterramento do objeto e da estrutura de apoio, foi realizada uma medição simples de continuidade com um multímetro convencional, cujo resultado foi um valor de resistência elétrica muito baixa, próxima de zero – o que significa que a estrutura está solidamente aterrada, funcionando, assim, como um caminho alternativo para a corrente (divisor de corrente) junto com os cabos de aterramento, efeito ilustrado na Figura 4.20.

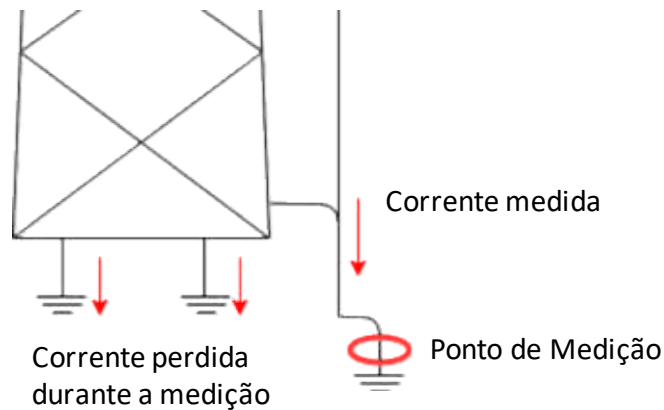


Figura 4.20 - Divisão da corrente durante a medição

O método de medição desenvolvido em laboratório, mostrado no item 3.3, utiliza um único meio de conexão entre os terminais de alta tensão do TC e o potencial nulo (terra); dessa forma, para que haja um resultado confiável, sem a necessidade de maiores correções, espera-se que essa mesma condição seja contemplada em campo (SEs). Uma alternativa para a que isso seja possível é conhecer o comportamento dos caminhos, o que pode ser obtido por medições de impedância terminal ou resposta em frequência, já que os sinais medidos estão em amplas faixas de frequência. Entretanto, devido à dificuldade de se realizar tais medições em campo, principalmente, pela necessidade de desligamento do equipamento e desconexão com a barra, não foi possível concluir a avaliação durante a elaboração do presente trabalho.

Outro ponto importante que representa uma diferença significativa entre os ensaios realizados em laboratório e as medições realizadas em campo é o comprimento do cabo de aterramento. Enquanto o TC ensaiado está posicionado próximo ao potencial terra com conexões curtas, cerca de 0,5 m; o TC instalado em campo, tem a conexão ao terra (cabo de aterramento) com comprimento de cerca de 4,5 m. Soma-se a isso, a impossibilidade de reproduzir o efeito da estrutura sobre a impedância total (entre os terminais de alta tensão e o terra) em laboratório; portanto, é necessário realizar algumas medições em campo para melhor compreensão desse efeito.

4.3. Sobretensões Calculadas

Cada manobra do sistema, principalmente as próximas ao TC em observação, acarreta uma sequência de impulsos de corrente com componentes de alta frequência, como já fora observado anteriormente. O princípio básico em eletricidade, segundo o qual a existência de corrente pressupõe uma diferença de potencial, leva à conclusão de que essa mesma sequência de impulsos de tensão com componentes de frequência similares age sobre o equipamento. A fim de avaliar esses impulsos, optou-se pelo método proposto no item 3.3. em que é mostrado um modo de calcular a sobretensão através da medição de corrente que passa pelo objeto até o ponto de onde é instalado o sensor, passando pelo tubo interno com os cabos secundários até a base do TC, onde está conectado o cabo de aterramento.

As manobras selecionadas para a aplicação o método são as mencionadas no item 4.2, sendo que, para cada manobra, o método para calcular a sobretensão é aplicado sobre o impulso com maior valor positivo e negativo de corrente de cada sequência. No primeiro caso, que parte da manobra apresentada na Figura 4.4, resultando nos valores de corrente, pico máximo e mínimo, e a tensão calculada para as fases A, B e C, como é mostrado nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23, respectivamente.

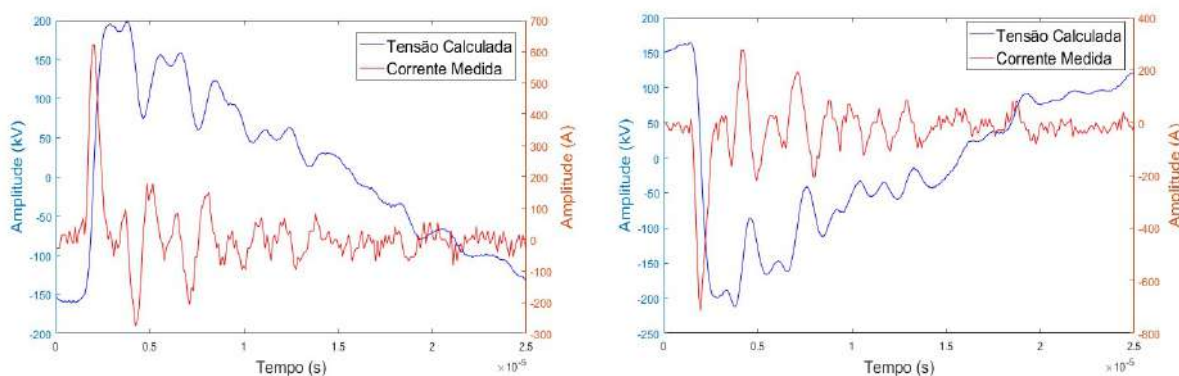


Figura 4.21- Medição 01 - Corrente máxima e mínima medida e tensão calculada Fase A

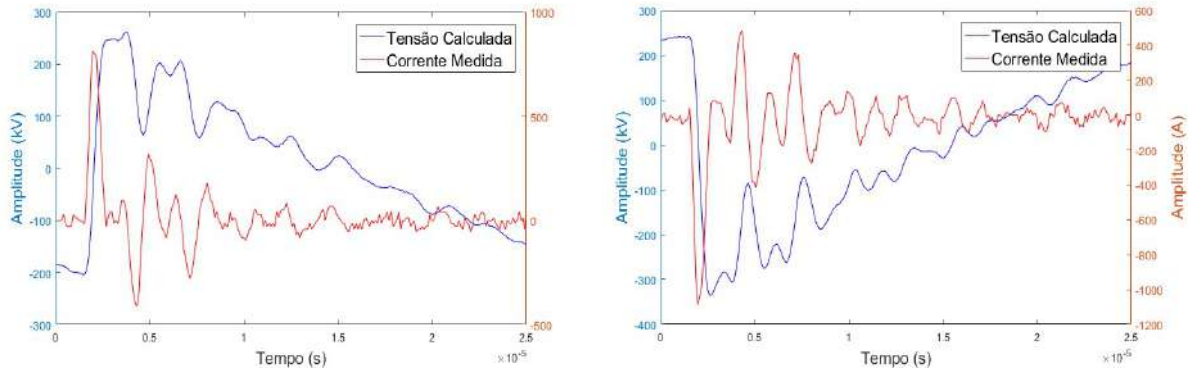


Figura 4.22 - Medição 01 - Corrente máxima e mínima medida e tensão calculada Fase B

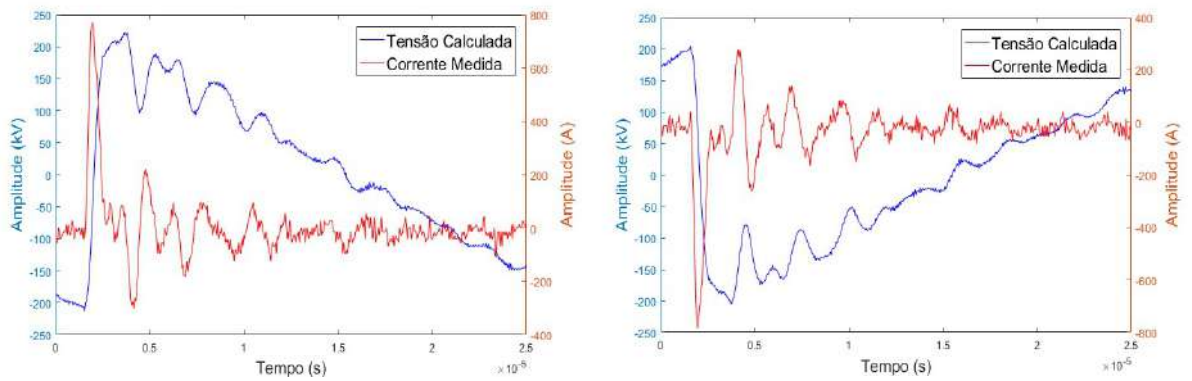


Figura 4.23 - Medição 01 - Corrente máxima e mínima medida e tensão calculada Fase C

Na sequência, são mostrados os valores referentes à manobra da Figura 4.8, a “Medição 02”. As Figuras 4.24, 4.25 e 4.26 referem-se às fases A, B e C, respectivamente.

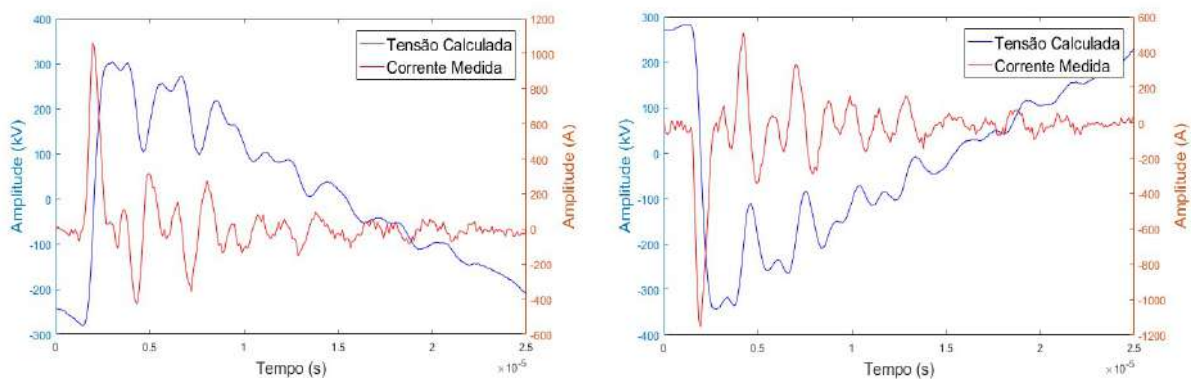


Figura 4.24 - Medição 02 - Corrente máxima e mínima e tensão calculada Fase A

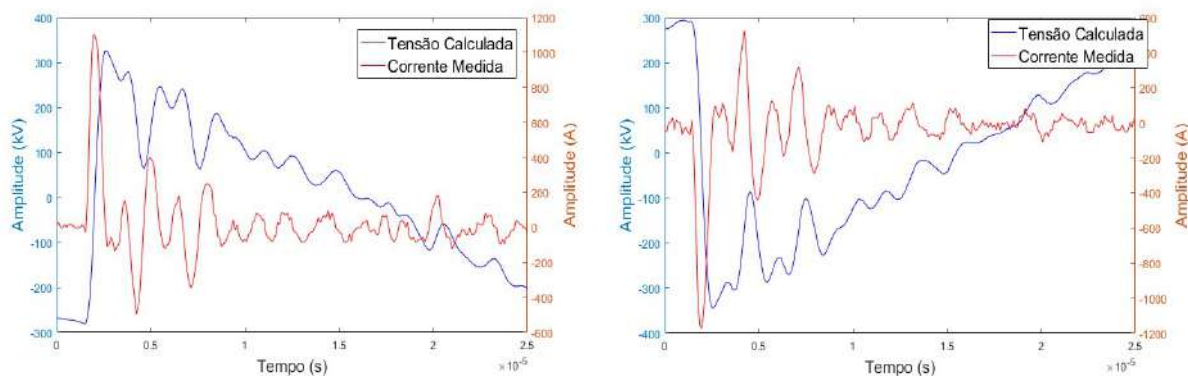


Figura 4.25 - Medição 02 - Corrente máxima e mínima e tensão calculada Fase B

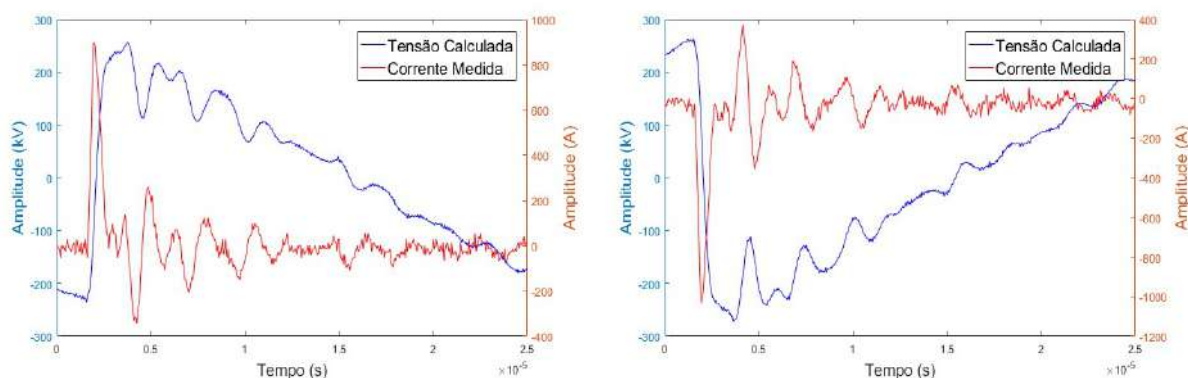


Figura 4.26 - Medição 02 - Corrente máxima e mínima e tensão calculada Fase C

Os demais resultados obtidos são listados, na Tabela 4.3, devido à similaridade entre os formatos de onda, tanto da corrente medida, quanto dos valores de sobretensão.

Tabela 4.3 - Resumo dos valores de sobretensões estimados.

Medição	TC	Chave	Manobra	Fase A (kV)		Fase B (kV)		Fase C (kV)	
				Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
01	1	B	Fechamento	360	-385	465	-565	450	-450
02	1	B	Abertura	600	-650	600	-670	500	-630
03	1	A	Fechamento	100	-140	190	-230	165	-150
04	1	B	Fechamento	280	-435	360	-470	280	-270
05	1	B	Abertura	440	-500	420	-450	350	-350
06	1	A	Fechamento	150	-160	180	-230	175	-145
07	1	A	Abertura	210	-230	180	-240	165	-150
08	1	B	Fechamento	500	-530	480	-650	450	-500
09	1	B	Abertura	700	-660	500	-650	450	-520
10	2	C	Abertura	600	-550	erro	erro	420	-520
11	2	D	Fechamento	80	-80	370	-250	80	-80
12	2	D	Abertura	490	-410	370	-265	400	-420
13	2	C	Abertura	150	-125	120	-115	170	-180
14	2	D	Fechamento	600	-555	450	-430	460	-515

Cabe salientar que a medição parcial da corrente levará a valores também parciais de tensão calculada. Como explicitado anteriormente, uma alteração do valor da amplitude da corrente acarreta o efeito nos valores da Tabela 4.3. A taxa de variação da tensão por μs foi avaliada e é representada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resumo das taxas de variação de tensão

Medição	TC	Chave	Manobra	Fase A (dkV/dt)		Fase B (dkV/dt)		Fase C (dkV/dt)	
				Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
01	1	B	Fechamento	320	-415	500	-785	500	-550
02	1	B	Abertura	600	-770	825	-860	510	-750
03	1	A	Fechamento	160	-200	205	-280	230	-210
04	1	B	Fechamento	215	-435	400	-540	360	-350
05	1	B	Abertura	485	-580	560	-610	410	-450
06	1	A	Fechamento	250	-250	280	-325	255	215
07	1	A	Abertura	300	-350	275	-340	220	-200
08	1	B	Fechamento	620	-700	720	-800	600	-700
09	1	B	Abertura	925	-845	700	-890	695	-750
10	2	C	Abertura	600	-550	erro	erro	460	-600
11	2	D	Fechamento	120	-120	320	-235	140	-140
12	2	D	Abertura	435	-370	425	-330	415	-495
13	2	C	Abertura	370	-370	370	-370	340	-350
14	2	D	Fechamento	570	-625	490	-520	530	-610

Ao avaliar as Tabelas 4.3 e 4.4, verificam-se valores mais elevados de tensão e taxa de crescimento nas manobras de abertura. O maior valor de tensão calculado é de aproximadamente 670 kV, valor próximo de 1,5 p.u., ao utilizar a base de 450 kV (tensão de operação $550 \times \sqrt{2} / \sqrt{3}$), valor inferior aos citados em outras referências, o que é esperado devido ao fato de a medição contemplar somente uma parcela da corrente total.

A Figura 4.27 ilustra a aproximação do sinal de tensão calculado para a fase B da manobra 02 (valor mínimo mostrado na Figura 4.24), e destaca-se o tempo de frente de onda encontrado no sinal de tensão calculado, 0,74 μs .

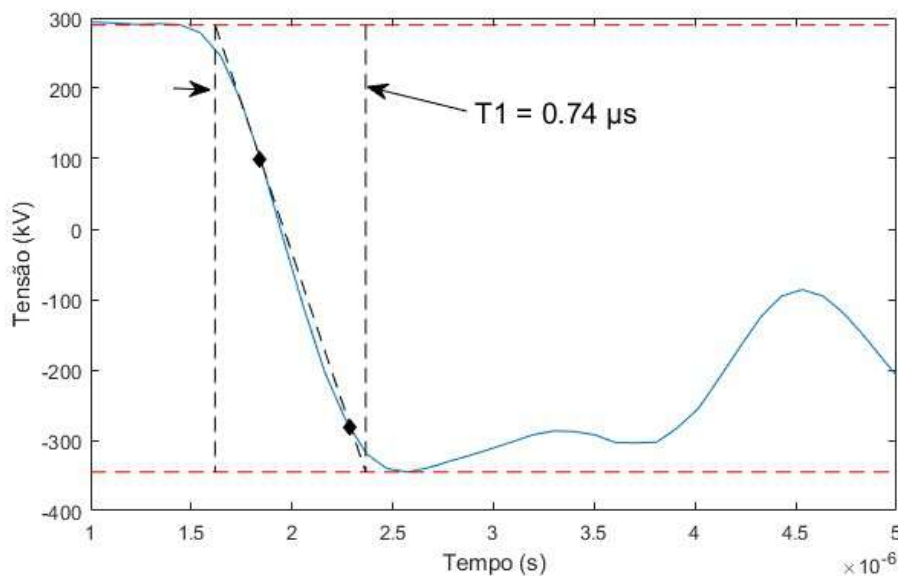


Figura 4.27 - Sinal de tensão calculado da manobra 02 Fase B

Devido à semelhança dos sinais de corrente medidos, valores próximos ao encontrado para esse sinal para o tempo de frente de onda também são verificados nos demais sinais de tensão. O modo utilizado para calcular este tempo de frente de onda é mostrado na norma NBR-IEC 60060-1 [22]. Esse tempo torna-se menor quando comparado a valores padronizados e exigidos por normas de ensaios de alta tensão [22] aplicados a transformadores de corrente [6], que são de 0,84 a 1,56 μ s. Além disso, a maior taxa de variação calculada foi de aproximadamente 900 kV/ μ s, valor inferior ao utilizado em ensaios exigidos por norma de impulsos [22], que para essa classe de tensão é de aproximadamente 1200 kV/ μ s (onda padrão 1,2/50 μ s).

4.4. Simulação

Pode-se dizer que o comportamento dinâmico de um sistema de potência é de alto grau de complexidade, sendo descrito por equações diferenciais de solução analítica praticamente impossível, conforme é afirmado por REIS, J. L. [23]. Dessa forma, a simulação digital tem sido a técnica utilizada para contornar tal complexidade, uma vez que o aumento da capacidade de processamento e a evolução de modelos matemáticos contribuem para melhores resultados.

Tratando-se de transitórios eletromagnéticos, dois modos de solução ficam em destaque: programas no domínio da frequência (*FDTP – Frequency Domain TransientsProgram*) e programas no domínio do tempo (*EMTP – ElectromagneticTransientsProgram*). Nos primeiros, a resposta transitória é calculada no domínio da frequência e a solução no domínio do tempo é realizada com a utilização de ferramentas de transformações inversas, como a transformada rápida de Fourier (FFT); além disso, há limitações como a incapacidade de simular mudanças súbitas em configurações do sistema e a dificuldade na representação de elementos não lineares.

Nos programas *EMTP*, por sua vez, a solução é realizada em cada intervalo de tempo Δt , em geral determinado pelo usuário e baseado no evento transitório que se busca representar; assim, partindo de uma condição inicial, faz-se a análise de tensão e corrente nos nós do sistema. No próximo passo de tempo, os novos valores serão calculados conhecendo os valores de passos anteriores; logo, nesse modo de solução, é possível modelar mudanças súbitas do sistema e também elementos não lineares, conforme afirma [22].

Com a finalidade de se realizar estudos de transitórios eletromagnéticos os programas que utilizam o modo *EMTP* são mais utilizados e difundidos atualmente, dentre os quais podem ser destacados o *ATPDraw/ATP* (AlternativeTransientsProgram) e o *PSCAD/EMTDC* (Manitoba HVDC Reserch Center). O CIGRÉ A2/C4-03 [24] afirma que o *ATP* se tornou a referência para este tipo de simulação para o setor elétrico brasileiro, por motivos históricos e econômicos.

Para o estudo de transitórios de frente rápida, como abordado por [23], com sinais com tempo de frente de onda entre 0,1 e 20 μs com frequência de sinais entre 10 kHz e 3 MHz, a subestação deve ser modelada de forma detalhada, considerando os equipamentos de alta tensão, barramentos e também a linha de transmissão conectadas a SE.

Realiza-se a simulação da manobra de uma chave seccionadora, e são avaliados os sinais de corrente e de tensão transitórias que surgem nos terminais de alta tensão de um TC durante a manobra. Conforme citado nos itens 4.2. e 4.3., valores mais elevados de corrente e tensão são encontrados no TC 01 durante a manobra da chave seccionadora B; logo, essa é a manobra simulada. A linha de transmissão, o barramento,

a chave seccionadora, o disjuntor, o TC, as fontes de tensão representando o sistema e um modelo de arco para representar o arco elétrico entre os polos da chave sendo operada são itens que devem ser considerados e modelados para tal finalidade.

Para o modelo da linha de transmissão/cabos, o *ATPDraw/ATP* permite algumas opções predefinidas de modelos, tais como: parâmetros concentrados, parâmetros distribuídos, Modelo π , Modelo de Bergeron, Modelo de Semlyen, Modelo J. Marti entre outros. Para a simulação, utiliza-se o modelo de parâmetros distribuídos e constantes para esta representação; já para o modelo da subestação, optou-se por utilizar o modelo J. Marti para a modelagem dos barramentos. Esse último modelo busca aproximar a simulação dos efeitos que seriam observados nos componentes em campo e considera a variação dos parâmetros com a frequência, ou seja, as indutâncias e resistências sofrem variações em seus valores com a variação da frequência do sinal a que são submetidos, ponto impactante na modelagem da SE.

As chaves seccionadoras podem ser resumidas em duas posições operacionais: fechada ou aberta. Quando fechada, pode ser representada por uma única capacitância concentrada para o terra representando os isoladores que sustentam a chave e seu comprimento adicionado ao modelo do barramento adjacente. Já na condição operativa aberta, isola completamente dois trechos do barramento. Nesse caso, o modelo é representado como duas capacitâncias para o terra, sendo conectadas aos dois terminais do barramento seccionado. Como no ATP existe a opção de utilizar o modelo “chave controlada por tempo” para o modelo da chave seccionadora, quando essa opera dentro do tempo de simulação, esse modelo é adotado para a simulação e aplicado a todas as chaves seccionadoras. Dessa forma, as chaves seccionadoras da simulação são representadas por duas capacitâncias, tendo alterado, apenas, o parâmetro do tempo de operação do modelo da chave, se houver manobra dentro do tempo de simulação, já que as chaves estarão estáticas.

Os disjuntores, assim como as chaves seccionadoras, possuem duas condições de operação e, conseqüentemente, duas configurações para a simulação, fechado e aberto. Quando fechado, a representação é a mesma utilizada para a chave seccionadora; a diferença se dá quando em posição aberto, pois deve ser modelado como uma capacitância série e duas capacitâncias para o terra conectadas em cada terminal do disjuntor. A capacitância série representa os capacitores de equalização encontrados em

disjuntores de alta tensão e pode ser utilizado, assim como para chaves seccionadoras, o modelo de “chave controlada por tempo” para a manobra do disjuntor durante a simulação, bastando conectar essa chave em paralelo com a capacitância série.

O TC, conforme o item 3.2., é modelado através da medição de sua impedância terminal realizada em laboratório e atribui-se um circuito RLC como modelo final, aplicado em todos os TCs da SE. Embora os TCs instalados em uma SE possam ser de diferentes fabricantes e modelos distintos, verifica-se em [19] pouca variação entre modelos do tipo (“top core”) de diferentes fabricantes.

Para a representação do sistema, utiliza-se uma fonte de tensão trifásica com valores nominais do sistema em que se insere uma impedância série para impedir que haja reflexão das ondas, com o mesmo valor da impedância de surto da linha de transmissão. Já para o modelo de arco elétrico, utiliza-se uma rotina responsável por variar a resistência durante o evento (tempo de duração de um arco elétrico), tal variação é responsável por alterar o valor da tensão entre os polos da chave seccionadora criando, assim, um efeito similar ao encontrado durante uma manobra de abertura ou fechamento. Com o modelo selecionado é simulado um único impulso (ignição) do arco elétrico. No Apêndice A apresentam-se os dados da simulação no *ATPDraw/ATP* (arquivo formato .atp gerado na simulação), incluindo o modelo do arco elétrico. Também são mostrados as configurações do modelo de linha/cabo e os dados dos condutores, adicionados através de *\$includes*, utilizados para simular os trechos da SE no *ATPDraw/ATP*.

A pior condição que pode ocorrer durante uma manobra de uma chave seccionadora, abertura ou fechamento, é o surgimento de valores de picos opostos no momento do arco; ou seja, entre os terminais da chave seccionadora ser aplicada uma tensão de 2 p.u. (no caso desta simulação, aproximadamente -450 kV e 450 kV nos polos da chave seccionadora no momento do arco elétrico). Para isso, utiliza-se uma fonte de tensão para simular o trecho em desenergização e configurado com uma defasagem de 180° em relação às demais fontes utilizadas gerando, desse modo, essa diferença durante a simulação da manobra. Esta fonte busca representar a tensão residual do barramento desenergizado, e assim é retirada no início da simulação (primeiro passo de tempo).

Baseado no modelo de cada componente apresentado nos parágrafos anteriores é modelada toda a SE no software *ATP-Draw/ATP*. Na Figura 4.28, apresenta-se uma aproximação visual do modelo utilizado para a simulação, enfatizando o trecho no qual ocorrerá a manobra.

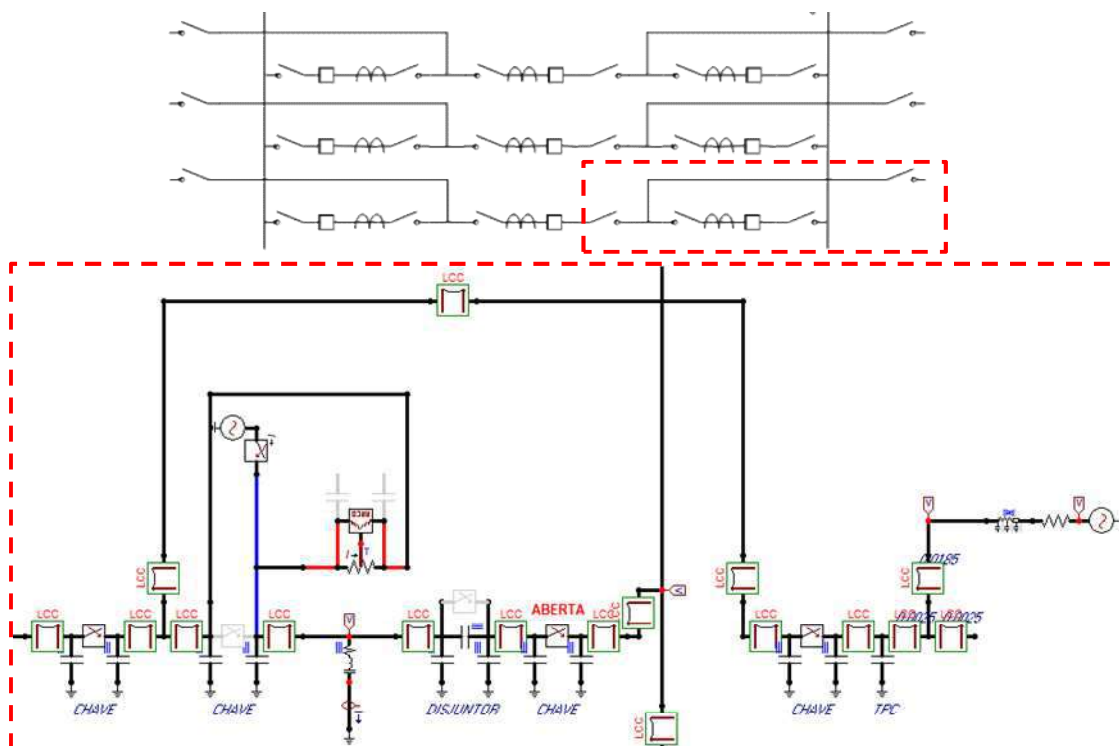


Figura 4.28 – Circuito utilizado para simulação ATP-Draw/ATP

Para os valores das capacitâncias que representam as colunas de isoladores dos disjuntores e chaves seccionadoras são utilizados 0,75 pF e a capacitância série do disjuntor é de 0,6 nF; o passo de tempo da simulação (passo de integração - Δt) utilizado é de 1 ns; o ponto de medição de tensão é colocado no nó onde o modelo do TC está conectado e o ponto de medição da corrente na conexão entre o modelo do TC e o aterramento, similar à medição realizada em campo.

A seguir, são mostrados os resultados da simulação para tensão e corrente, bem como a comparação entre esses resultados e os sinais medidos de corrente no campo e calculados para a tensão.

Na Figura 4.29, mostram-se os sinais de corrente medido e simulado do domínio do tempo.

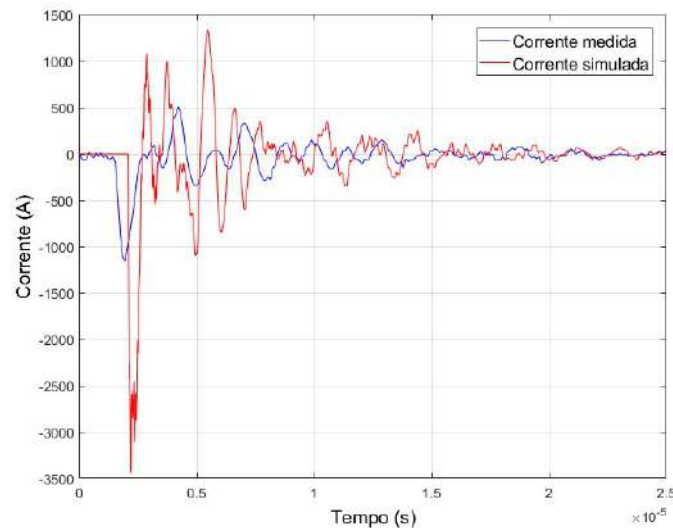


Figura 4.29 – Sinais de corrente medido e simulado

Percebe-se que o valor de pico da corrente simulada, aproximadamente 3000 A, é muito maior que o valor da corrente medida, próximo a 1150 A, resultado, este, que pode ser atribuído a dois fatores: o primeiro é fato de o valor utilizado de tensão na simulação ter sido configurado para a pior condição possível de operação; o segundo é referente aos problemas encontrados durante a medição devido ao estado do aterramento do TC, conforme fora citado e ilustrado na Figura 4.20. Outra diferença relevante encontrada nesses sinais é referente ao tempo de frente de cada sinal; 0,5 μ s para o sinal medido e 0,2 μ s, para o sinal simulado (valores aproximados).

Na Figura 4.30 é mostrada uma comparação no domínio da frequência dos sinais de corrente medido e simulado.

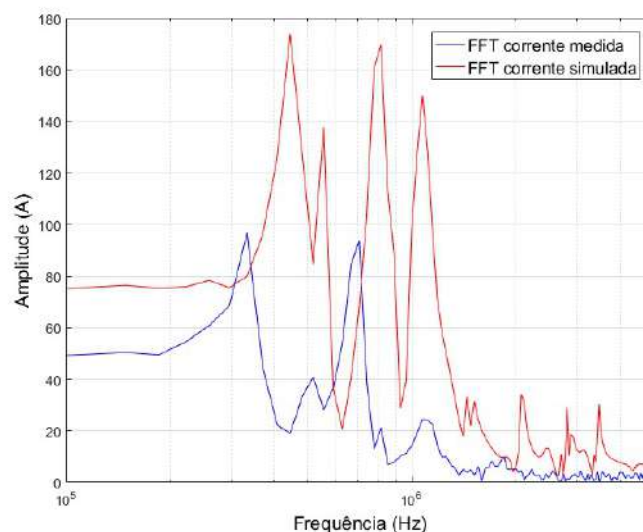


Figura 4.30 – Corrente medida e simulada no domínio da frequência

Embora existam diferenças nas amplitudes no domínio da frequência, devido aos valores das amplitudes no domínio do tempo, os valores das principais componentes de frequência são, relativamente, próximos. Acredita-se que as diferenças podem estar relacionadas com o modelo do TC utilizado, haja vista que fora caracterizado em laboratório em condições diferentes daquelas em que é instalado em campo.

A seguir, na Figura 4.31, assim como foi realizado para os sinais de corrente, apresentam-se os sinais de tensão calculado e simulado no domínio do tempo.

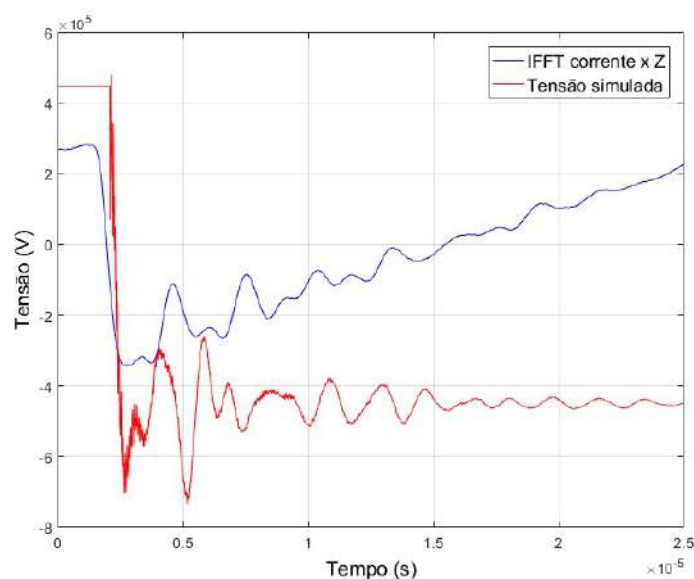


Figura 4.31 – Sinal de tensão calculado e simulado

Como esperado, o sinal de tensão simulado revela um valor superior de amplitude. Pelo método determinado pela NBR-IEC 60060-1, o tempo de frente de onda para o sinal calculado é de aproximadamente $0,8 \mu\text{s}$ e para o sinal simulado de aproximadamente $0,57 \mu\text{s}$. O tempo de oscilação, até a estabilização do sinal, em ambos os casos, é praticamente o mesmo, sendo que, na simulação observa-se uma maior oscilação no início do sinal, próximo ao tempo de $2,5 \mu\text{s}$ de simulação. Tal oscilação não fora verificada no sinal calculado de tensão, devido ao fato de ser característico de oscilações de ordem elevada de frequência (alguns MHz), o que não se verifica no sinal de corrente medido. Esses sinais decompostos no domínio da frequência são apresentados na Figura 4.32, disposta a seguir.

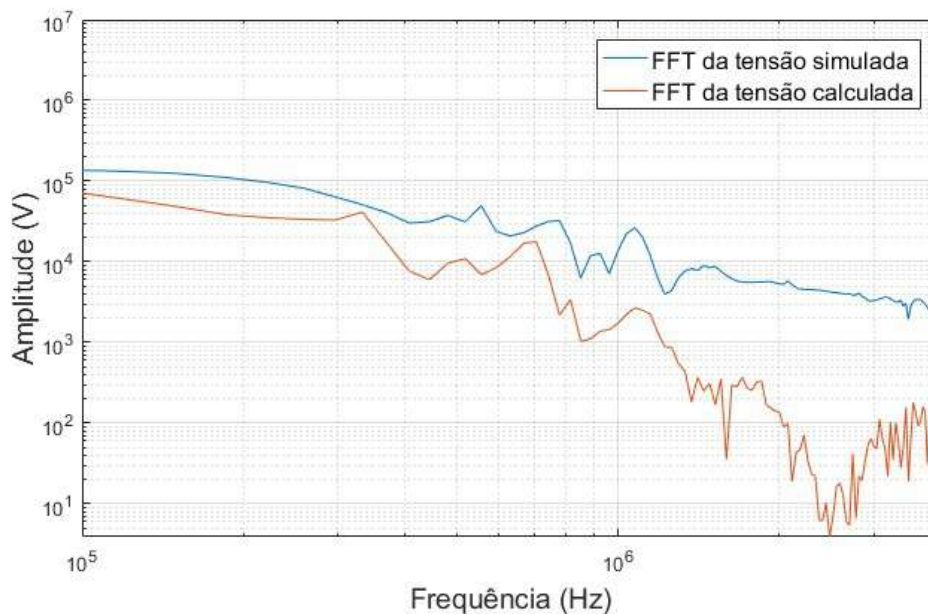


Figura 4.32 – Sinal de tensão calculado e simulado no domínio da frequência

Assim como, na comparação da corrente no domínio da frequência, verificam-se semelhanças entre o sinal de tensão calculado e simulado; uma maior diferença é verificada entre 2 e 3 MHz devido, principalmente, a forma como fora calculada o sinal de tensão, apresentado no item 3.3. Nessa região, encontra-se o ponto de ressonância natural do modelo do TC, ou seja, menor valor para impedância e, conseqüentemente, menor valor para a tensão calculada.

A partir dos resultados da simulação apresentados, pode-se dizer que o modelo do TC demonstra uma boa representação do estado real do equipamento, embora ainda seja necessário aprimorá-lo levando em consideração o efeito da estrutura - podendo ser metálica ou a base de concreto - onde o TC é instalado.

4.5. Resultados

Transitórios rápidos de alta tensão são citados em diversos trabalhos como uma agressão ao isolamento interno de equipamentos de potência, inclusive de TCs, causando a perda da suportabilidade dielétrica, entretanto, até o momento, na literatura técnica, não existe maneira ou método capaz de determinar com exatidão o dano

causado ou como se processa esta perda de suportabilidade. CIGRÉ A2/C4.39 [25] afirma que o completo entendimento do modo como eventos transitórios afetam os sistemas de isolamento ainda é um desafio para a comunidade científica e depende, na maioria dos casos, de testes laboratoriais e ensaios em campo para identificar a existência, ou não, da agressão, como ensaios no óleo isolante, testes de descargas parciais e análise de fator de potência. Sendo assim essa seção apresenta algumas possibilidades, em processo de pesquisa ou já utilizadas, de avaliar esse tipo de solicitações.

4.5.1. Análise no domínio da frequência

Uma das maneiras selecionadas para avaliar as solicitações de alta frequência sofridas pelo equipamento é apresentada pelo grupo de trabalho CIGRÉ A2/C4-03 [24]. O método, denominado como “Fator de Severidade no Domínio da Frequência” (FSDF), busca avaliar a severidade das solicitações impostas ao isolamento sólido, realizando uma comparação entre o domínio da frequência das solicitações de tensão transitórias e as solicitações às quais o equipamento é submetido durante sua fabricação, ensaios de tipo. O mesmo foi desenvolvido e aplicado em transformadores de potência, mas, devido à semelhança no isolamento interno, pode ser aplicado a outros equipamentos de potência que utilizam o sistema papel-óleo.

Para realizar essa comparação, são utilizadas as formas de ondas padronizadas, as mesmas utilizadas para dimensionamento da isolação para a composição de uma envoltória no domínio da frequência. Na figura 4.33, mostram-se as formas de onda no domínio do tempo de ondas padronizadas, impulso atmosférico pleno (com valor de amplitude de 1550 kV e tempos de 1,2/50 μ s) e impulso de manobra (1175 kV com tempos de 100/1000 μ s); e, na Figura 4.34, a sequência de impulsos atmosféricos com corte na cauda (1550 kV e com tempos de corte em 2, 4 e 6 μ s), para a classe de tensão do objeto sob estudo.

Segundo a NBR 6856 [6], o critério de aprovação de um TC submetido aos ensaios de impulsos de tensão é que o objeto seja aprovado, posteriormente, nos ensaios

de rotina de medição de descargas parciais, capacitância e fator de perdas dielétricas, além de não haver descargas disruptivas nos isolamentos interno e externo durante os ensaios. Esses últimos buscam identificar algum defeito incipiente que os impulsos aplicados possam ter causado no isolamento interno e/ou isolamento externo.

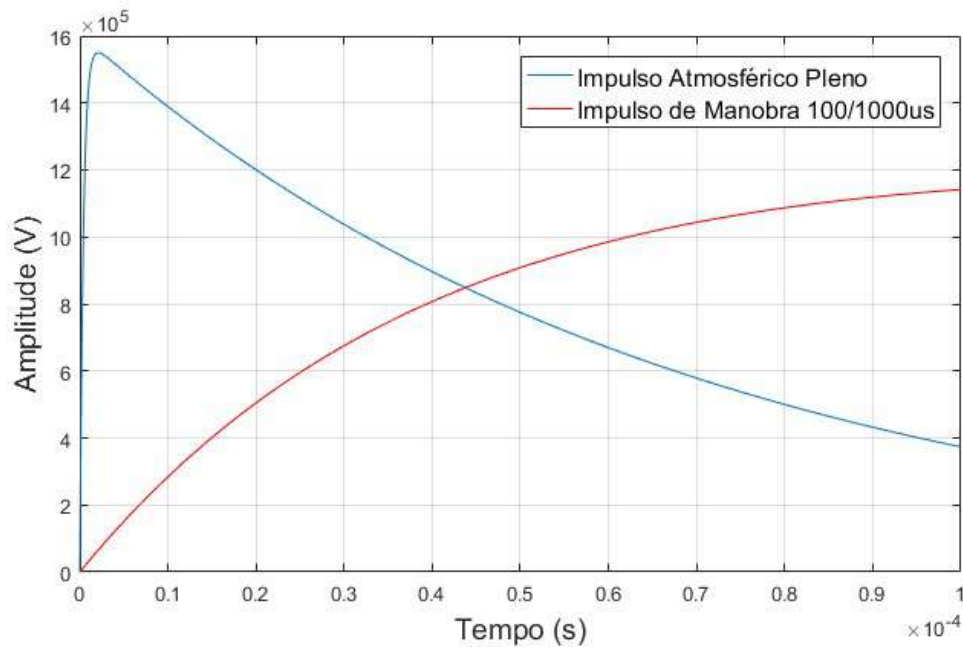


Figura 4.33 - Impulso Atmosférico Pleno de 1550 kV e Manobra de 1175kV

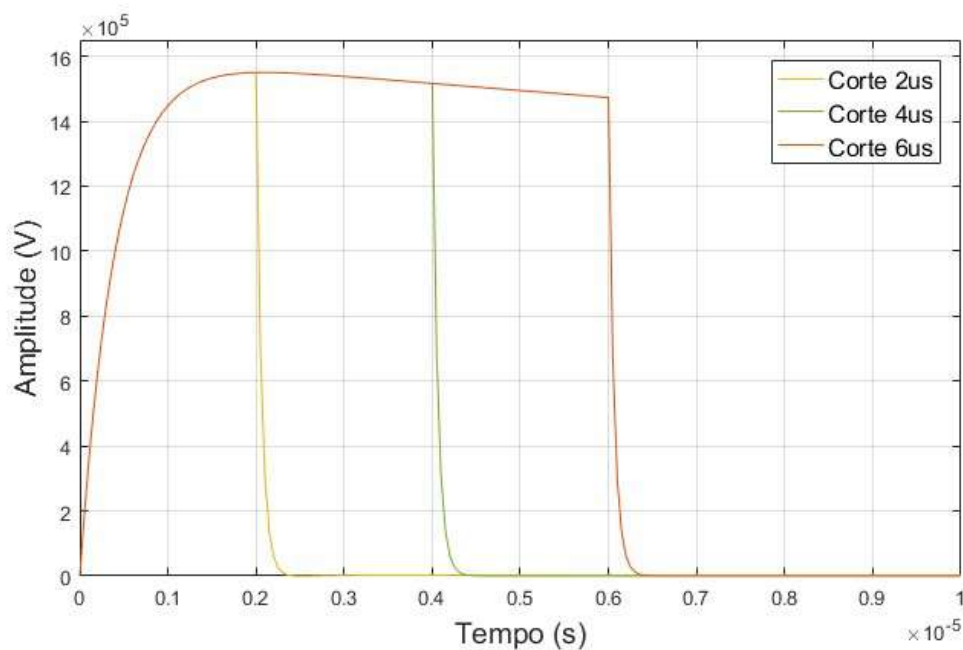


Figura 4.34 - Impulso Atmosférico de 1550 kV com diferentes tempos de corte

Com a densidade espectral dos sinais padronizados pode-se montar a envoltória para avaliar os sinais transitórios, o resultado da envoltória utilizando os sinais apresentados anteriormente é apresentado na Figura 4.35.

Nota-se que os ensaios de impulso atmosférico com corte na cauda causam maior influência em altas frequências e a realização de ensaios com diferentes tempos de corte pode influenciar na formação dessa envoltória, solicitando mais ou menos o isolamento interno para altas frequências. Desse modo, quanto menor o tempo de corte, maior a frequência excitada durante o ensaio.

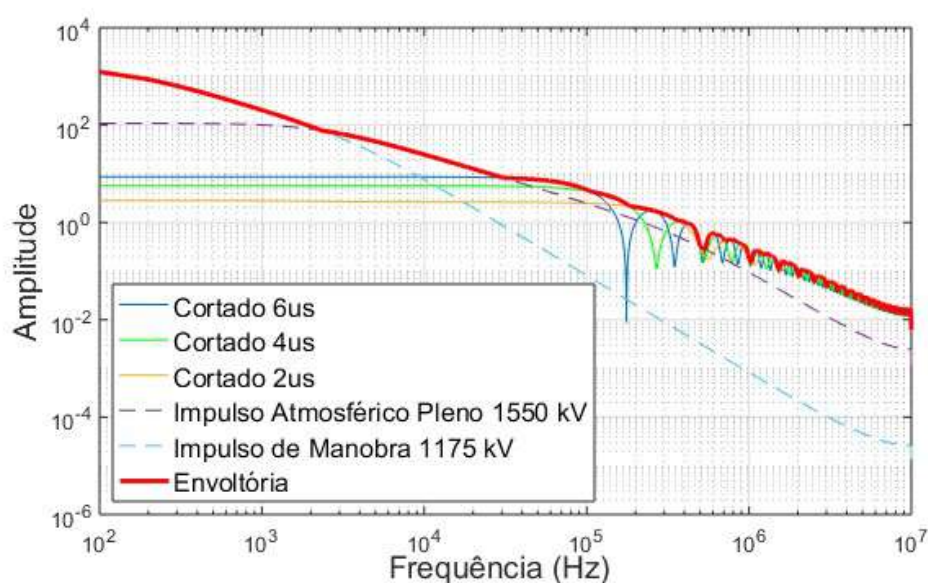


Figura 4.35 - Envoltória utilizando ondas padronizadas

Como pode ser observado na Figura 4.35, o equipamento, quando submetido aos ensaios de impulsos de tensão normalizados, é solicitado em frequências muito superiores à frequência industrial. Esses ensaios buscam observar a suportabilidade do isolamento frente a solicitações transitórias oriundas do sistema, como é citado na NBR 6856 [6].

A seguir, utiliza-se a envoltória da Figura 4.35 a fim de verificar se os eventos medidos e calculados posteriormente são capazes de causar algum tipo de superação. Consoante o critério do FSDF, quando há uma superação, essa pode ser qualificada por um fator: a relação entre o valor da componente no espectro do sinal transitório com o valor na envoltória. Logo, para que haja segurança para o isolamento interno do equipamento, as solicitações transitórias do sistema não podem causar superações, ou seja, o FSDF deve ser inferior a 1.

Abaixo são apresentados alguns resultados da aplicação do FSDF. As Figuras 4.36, 4.37 e 4.38 mostram, respectivamente, os sinais com maior valor de corrente para as fases A, B e C da manobra ilustrada na Figura 4.4.

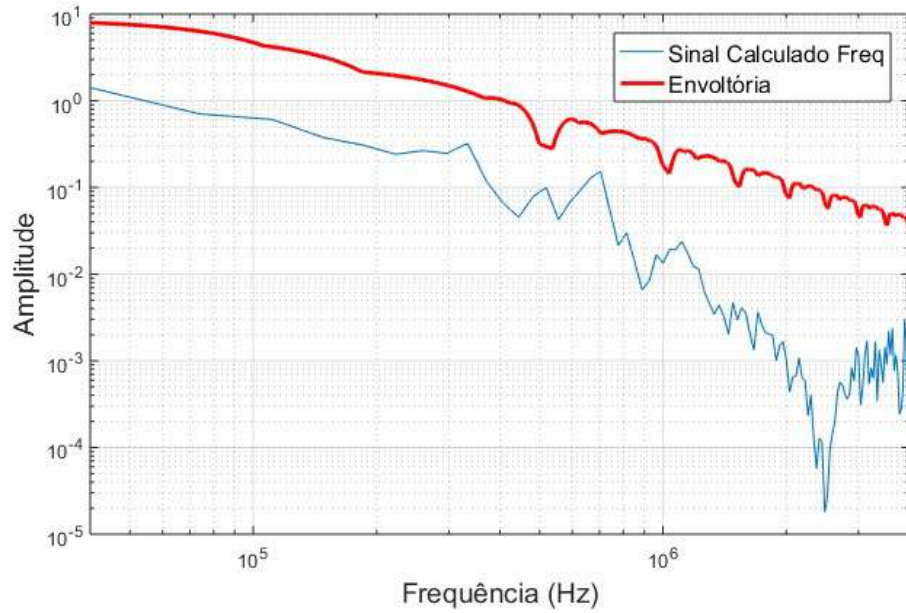


Figura 4.36 – FSDF Fase A da manobra 01

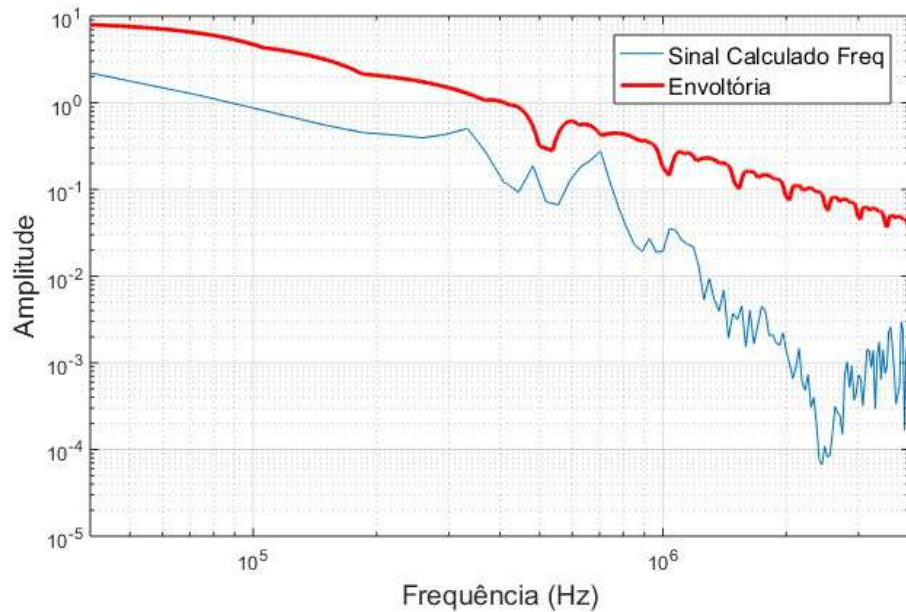


Figura 4.37 – FSDF Fase B da manobra 01

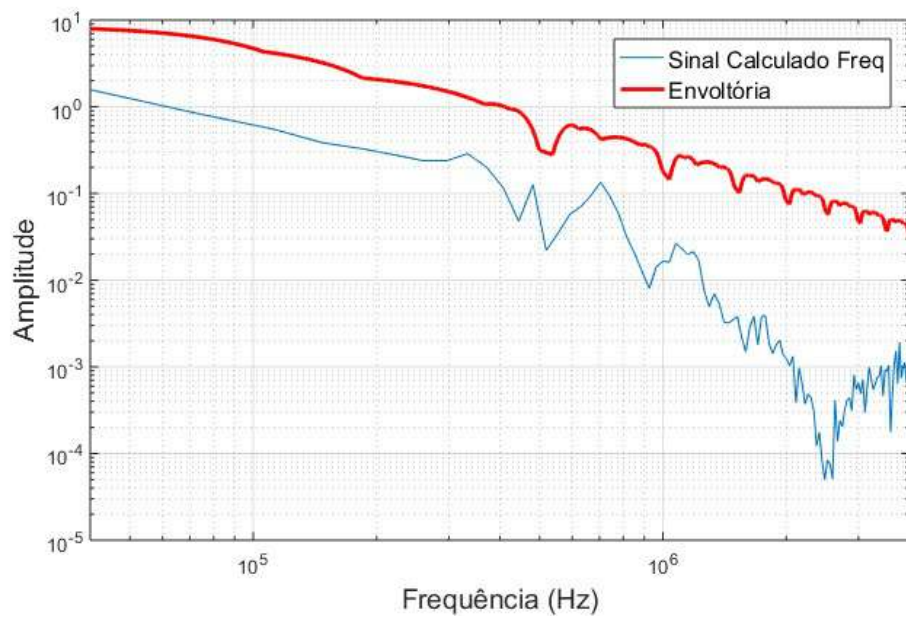


Figura 4.38 – FSDF Fase C da manobra 01

Assim como nas Figuras anteriores, a aplicação do método do FSDF para os maiores sinais da Manobra 02, Figura 4.8, são apresentados nas Figuras 4.39, 4.40 e 4.41, para as fases A, B e C, respectivamente.

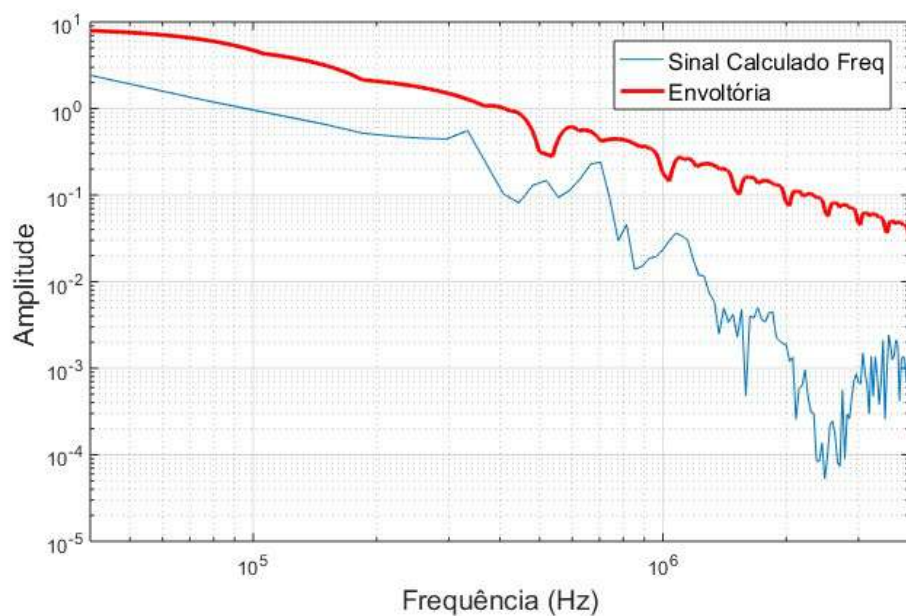


Figura 4.39 – FSDF Fase A da manobra 02

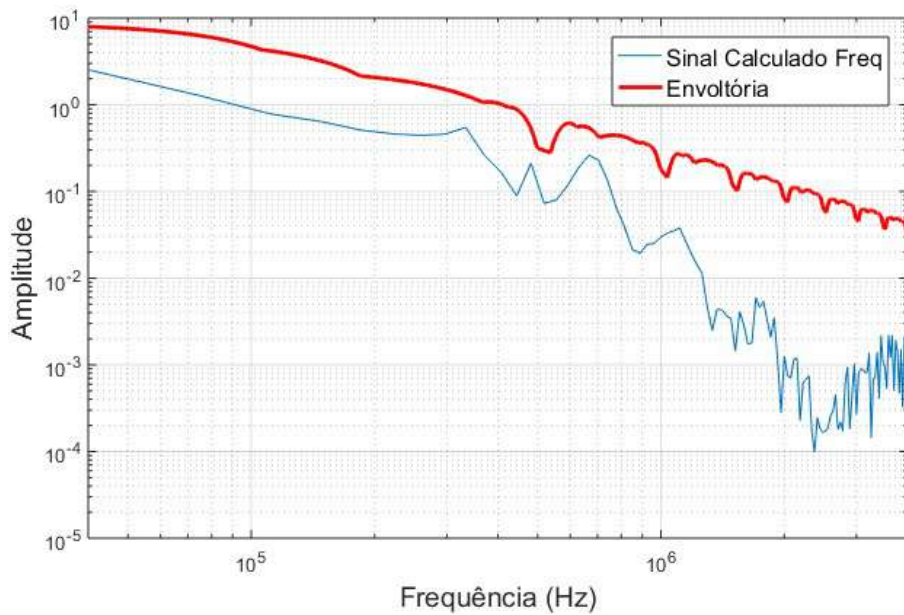


Figura 4.40 – FSDF Fase B da manobra 02

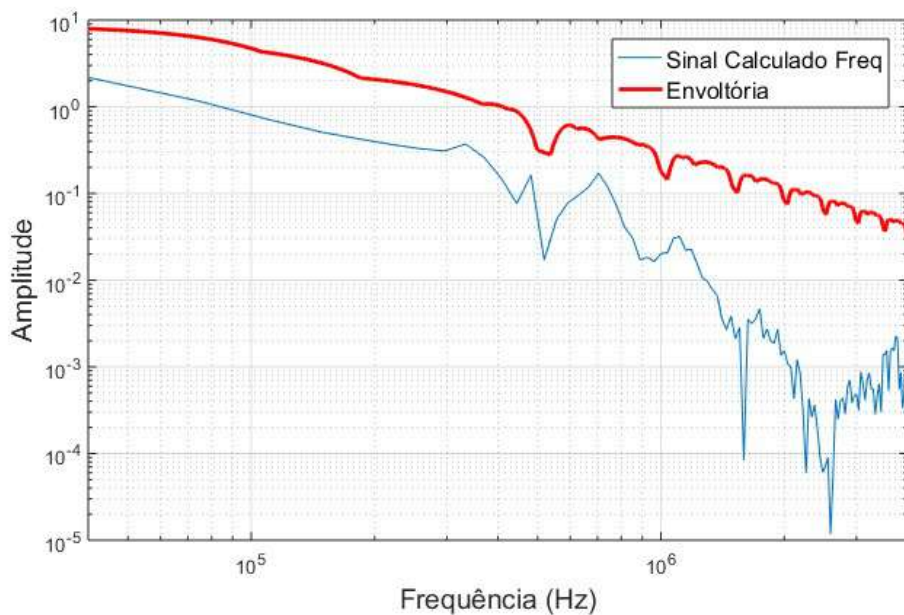


Figura 4.41 – FSDF Fase C da manobra 02

Ao analisar os sinais mostrados, é possível verificar que não existe superação do sinal medido com a envoltória dos sinais padronizados em nenhuma faixa de frequência. Embora essa condição seja prevista, existem regiões nas quais há maior aproximação entre as curvas. Essas regiões podem ser vistas com maior clareza nas Figuras 4.37 e 4.40 com frequências aproximadas de 350, 500 e 700 kHz, justamente as maiores componentes de frequência apresentadas no item 4.2.. A Figura 4.42 mostra uma aproximação visual dessa região, utilizando como base a fase B da manobra 01 (Figura 4.37).

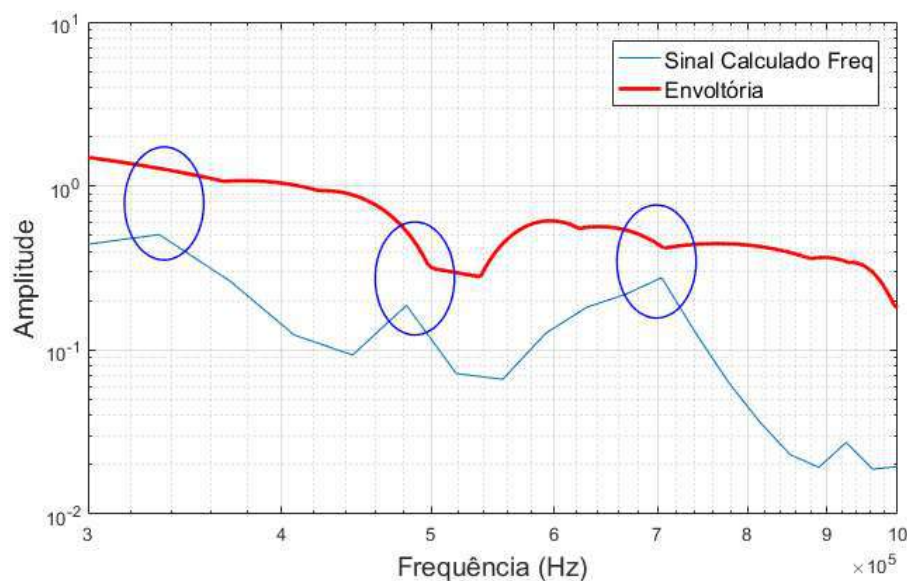


Figura 4.42 - Zoom da região onde existe maior aproximação entre o sinal e a envoltória

Com a Figura 4.43, é possível perceber a proximidade entre o sinal calculado e a envoltória do isolamento; dessa forma, eventos com tais frequências podem ser considerados como solicitações transitórias relevantes para o isolamento interno e devem ser considerados durante as especificações de um equipamento para operar sobre essas condições.

Como já citado anteriormente e apresentado na Figura 4.20, não é possível avaliar a parcela da corrente medida através das medições realizadas em campo até o momento. Sendo assim, optou-se por estimar a que medição contemple 75% ou 50% da corrente total. Essas estimativas são realizadas devido à condição em que a estrutura de sustentação do TC se encontra em campo (solidamente aterrada) e realizadas a fim de avaliar os efeitos do transitório no isolamento interno de forma mais crítica, considerando valores mais elevados e mais próximos de valores encontrados em outras fontes da literatura.

Portanto, ao avaliar o resultado, com os valores de correntes estimados expostos na Figura 4.37, é possível verificar que existe uma superação da envoltória característica do isolamento, como mostrada na Figura 4.43 e com uma aproximação visual na Figura 4.44.

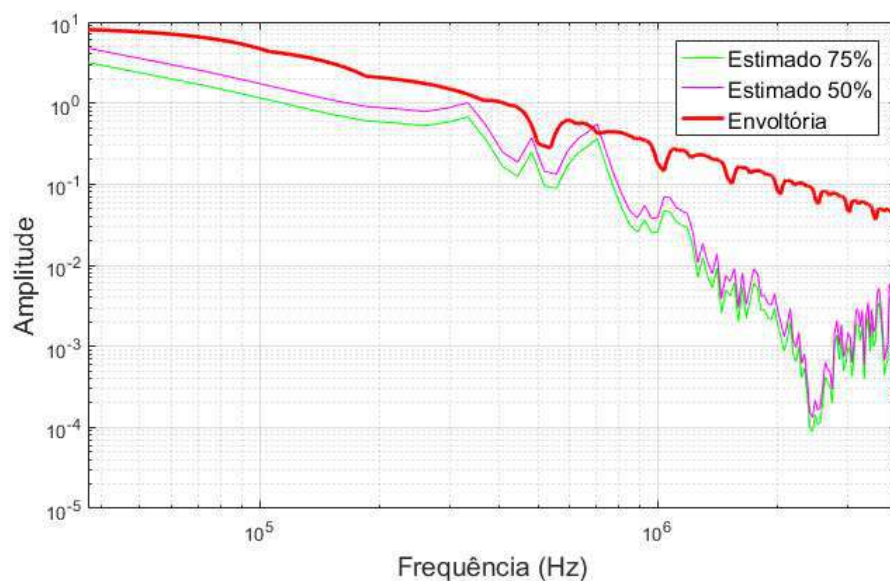


Figura 4.43 - Envoltória com valores estimados de 75% e 50% da corrente medida.

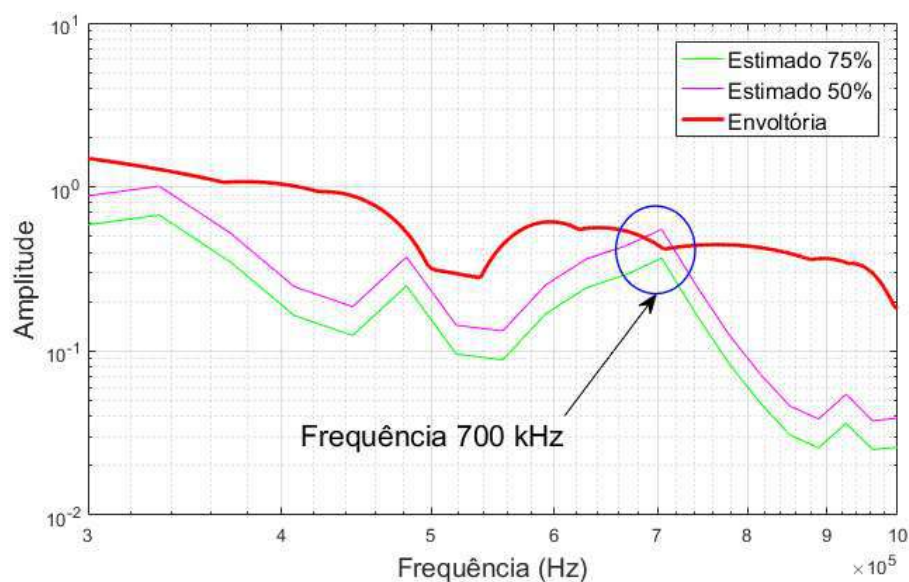


Figura 4.44 - Zoom da região 400 kHz a 900 kHz com valores estimados de 75% e 50% da corrente medida.

Nota-se que, na região de 700 kHz, há superação da envoltória no caso da medição contemplar somente 50% do valor total da corrente (o dobro da corrente original), encontrando nesta região valores para o FSDF de 1,32. O mesmo é observado em algumas outras manobras quando utilizados os critérios de estimativas para os valores de correntes medidas, principalmente as que apresentam maiores valores de amplitude.

Entretanto, cabe ressaltar que a ocorrência de superações na envoltória não significa, necessariamente, que o sinal que originou essa superação irá danificar de forma irreversível o isolamento interno. Porém, essa mesma superação indica que os ensaios realizados pelo fabricante podem não assegurar o bom desempenho do isolamento para esses tipos de solicitações quando nessa faixa de frequência. Além disso, as solicitações podem funcionar como meios de estresses elétricos ao isolamento interno, conforme o capítulo 2 deste trabalho, podendo causar desde pequenos danos ao dielétrico até o surgimento do fenômeno de descargas parciais.

4.5.2. Análise de múltiplos transitórios sucessivos

Outra maneira encontrada na literatura como forma de avaliar o efeito dos sinais transitórios de tensão em equipamentos de alta tensão, é em virtude ao número de solicitações. Ao se tratar de manobras de chaves seccionadoras, um número bastante elevado é observado durante a manobra (reignições do arco elétrico formado entre os polos).

SIMA *et. al.* [26] afirmam que múltiplos impulsos atmosféricos de tensão sobre um isolamento de papel-óleo geram uma deformação molecular, criando picos e vales microscópicos na celulose e tornando a superfície do isolamento mais rugosa. Esse comportamento causa um enfraquecimento do desempenho do isolamento interno de um equipamento de potência. A demonstração foi realizada utilizando uma série de amostras de papel-óleo idênticas, e analisado o efeito de aplicações de impulsos atmosféricos sucessivos sobre estas amostras através de microscopia atômica. Também é mostrado o resultado de ensaios com diferentes tempos entre os impulsos aplicados (60, 80 e 100 segundos entre aplicações de aproximadamente 20 kV). Observa-se, a partir do experimento, que o dano causado ao isolamento é maior quando há menor tempo de intervalo entre impulsos, ou seja, o ensaio que foi realizado com menor tempo entre impulsos (60 segundos) causou o rompimento da amostra com menor número de aplicações.

Outro ponto relevante sobre o número de impulsos sobre o isolamento interno é mostrado na NBR 6856 [6] que inclui um ensaio especial de tipo para TCs com tensão superior a 362 kV. Esse é nomeado de “Múltiplos Impulsos Cortados” (MIC) e é realizado com aplicação de 600 impulsos atmosféricos com corte na cauda, com valor de tensão de 70% do valor de impulso atmosférico pleno e tensão reversa de até 30% deste valor, com 60 segundos de intervalo entre as aplicações. O objetivo de tais aplicações é avaliar o comportamento do isolamento exposto a estresses elétricos de alta frequência que são esperados durante a operação normal, em que esses sinais podem produzir uma circulação de corrente nas blindagens internas do isolamento.

A avaliação do desempenho do TC é baseada na comparação dos seguintes itens: os oscilogramas dos sinais aplicados durante o ensaio de múltiplos impulsos e os resultados dos ensaios de rotina (análise do óleo, descargas parciais, capacitância e fator de perdas do dielétrico) antes e após o ensaio especial (MIC). Um desempenho ruim do isolamento provocará uma evolução nos gases dissolvidos no óleo, assim como alterações nos resultados dos demais ensaios. É importante salientar que, por se tratar de um ensaio de tipo, o equipamento sujeito a esses impulsos não é utilizado em campo posteriormente. TCs que serão instalados em campo, geralmente, não passam por nenhum tipo de ensaio de aplicação de impulso de tensão.

Por fim, o grupo de trabalho do CIGRÉ A2/C4.39 [25] afirma que existe uma correlação entre o número de aplicações de um impulso padronizado de tensão e a tensão de ruptura do isolamento. Nessa referência, percebe-se uma redução da tensão de ruptura, ou seja, uma perda de desempenho do isolamento interno, quando múltiplos impulsos atmosféricos são aplicados a um transformador de potência. Pode-se concluir que esse efeito é similar em equipamentos que possuam os mesmos materiais isolantes que o transformador de potência referido. Além disso, ao se aplicar múltiplos impulsos alternando a polaridade, entre positivos e negativos, a perda de desempenho do isolamento ocorre de maneira mais veloz, ocasionando a ruptura do isolamento com menor número de aplicações.

Assim, ao observar as características dos sinais medidos durante as manobras, é possível notar que durante um único chaveamento pode ocorrer até centenas de impulsos transitórios de tensão com intervalo muito curto entre eles (com duração de até alguns segundos, e intervalo entre impulsos de 5 a 10 ms); todavia, com valores de

amplitude variável e com impulsos alternados, positivos e negativos. Ao comparar essas características com o que fora discutido anteriormente, pode-se afirmar que os impulsos oriundos das manobras de seccionadoras excitam o isolamento interno de forma mais severa do que os ensaios realizados durante o processo de fabricação, podendo causar um dano ao isolamento. O TC pode ser considerado um caso especial, já que, na maioria das instalações, está diretamente conectado com os equipamentos de manobra, sofrendo assim transitórios com maior amplitude são observados em seus terminais de alta tensão.

No que concerne a esse ponto, é importante citar que, quando houver uma manobra de seccionadora, essa é normalmente acompanhada por pelo menos mais uma manobra, visto que, em muitos casos, as manobras são realizadas para isolar um TC para manutenção ou por desligamentos emergenciais, implicando assim em mais sequências de impulsos sucessivos sobre o isolamento interno do equipamento.

4.5.3. Análise do tempo de subida dos sinais transitórios

Um parâmetro relevante sobre o efeito de sinais transitórios sobre o isolamento papel-óleo é apresentado por VANDERMAAR *et. al.* [27], em que se afirma que o comportamento de um isolamento desse tipo apresenta menor suportabilidade dielétrica frente a impulsos de frente muito rápidos (steep front transients, com frente de 10 – 50 ns) quando comparado à rigidez da mesma amostra frente a impulsos atmosféricos (com frente de 1,2 μ s). Nota-se, ainda, que para esses tipos de sinais mais rápidos, equipamentos de potência podem falhar mesmo com transitórios de tensão inferiores ao valor de ensaio de impulso atmosférico. Embora os sinais em SEs isoladas a ar não ocorram com tempos extremamente rápidos como na experiência citada, é imprescindível notar uma tendência de redução da suportabilidade do dielétrico para sinais mais rápidos quando comparados aos impulsos normalizados.

SHARATH & USA [28] afirmam que a tensão de ruptura do óleo isolante é influenciada diretamente pelo tempo de frente do impulso de tensão ao qual é submetido. Os autores oferecem uma comparação entre impulsos padronizados, com

tempos de $1,2/50 \mu\text{s}$ (subida e meia-cauda), e impulsos mais rápidos utilizando tempos de $0,7/36 \mu\text{s}$ (subida e meia-cauda), em que se observa pouca influência do tempo de cauda para a tensão de ruptura, mas uma significativa redução de 12% ao diminuir o tempo de subida de um impulso de tensão. Estudo similar é feito por KRITHIKA & USA [29], nesse, porém, são utilizadas amostras de isolamento papel-óleo como objeto de teste. Resultados similares ao citado anteriormente, em que se afirma que para sinais com menor tempo de frente, menor o valor da tensão de ruptura do isolamento e, consequentemente, pior o desempenho do isolamento para esses tipos de sinais. Em [28], ressalta-se, ainda, a importância de considerar o comportamento dos sistemas de isolamento para formas de onda não-padronizadas nos estudos de coordenação de isolamento, o que atualmente não é realizado.

Embora os sinais medidos em campo não atinjam esse tempo de frente extremamente rápido como citado em [27], os mesmos sinais apresentaram valores bem reduzidos de frente de onda, com tempo próximo de $0,5 \mu\text{s}$ para os sinais de corrente de $0,75 \mu\text{s}$ para os sinais de tensão, em que já verificou-se menores valores de tensão de ruptura por [28]. Desta forma, valores de tensão testados por ensaios padronizados (ex.: impulso atmosférico) podem não garantir a eficiência do isolamento interno frente aos sinais transitórios a que os TCs estão sujeitos durante sua operação normal, conforme os mesmos autores.

5. Conclusão

A priori, este trabalho objetivou a busca de um modo de mensurar as sobretensões de alta frequência às quais os transformadores de corrente estão expostos durante manobras de chaves seccionadoras, assim como apresentar os resultados de medições desses eventos realizadas com o método proposto. Esses objetivos foram abordados nos capítulos 3 e 4. Com os resultados apresentados, principalmente ao final do capítulo 4, pode-se concluir que os fenômenos transitórios de tensão oriundos de manobras em seccionadoras podem agir como agressores severos ao isolamento interno de TCs e a outros equipamentos de alta tensão, causando estresses elétricos durante sua operação normal. Fato que, em conjunto da característica cumulativa desta agressão, torna as manobras de chaves seccionadoras eventos que devam ser contidos em estudos e simulações a fim de garantir maior segurança para operação de um TC e um bom desempenho de seu isolamento interno.

O estudo destes fenômenos transitórios devem ser incluídos, principalmente visando o dimensionamento do isolamento interno dos TCs, na etapa de projeto e cálculo da coordenação de isolamento de uma SE. Atualmente pouca importância é direcionada para este tipo de fenômeno, ainda mais ao se tratar de SEs isoladas a ar, onde fenômenos de alta frequência muitas das vezes não são investigados.

O método proposto no capítulo 3 mostrou-se uma ferramenta inovadora com grande potencial para auxiliar em futuros estudos de eventos transitórios em equipamentos de potência, principalmente, devido à possibilidade de instalação e realização de medições de transitórios sem que sejam necessárias grandes intervenções e desligamentos no sistema, provendo assim um avanço na agilidade do processo e também um grande ganho econômico.

Os resultados obtidos com as medições em campo mostraram valores elevados de sobretensões transitórias, chegando próximo de 1,5 p.u. mesmo conhecendo o fato de estar utilizando somente parte da corrente total para calcular esta tensão. Este valor é bastante significativo ao se tratar de eventos transitórios rápidos no ar cuja magnitude pode torná-los agentes agressores para o isolamento interno de equipamentos de potência com sistema papel-óleo, conforme citado e apresentado referências ao final do

cápítulo 4, e de maneira mais severa ao TC, devido a proximidade da origem destes eventos, a manobra de chaves seccionadoras.

No capítulo 4 foi constatado durante as medições que, em condições topológicas diferentes, a manobra de uma chave pode sofrer grande alteração nos valores dos transitórios gerados, e desta forma é possível sugerir uma sequência de manobra onde esta geração é menor. A SE onde foi realizada as medições para este trabalho já opera desta forma.

Durante a elaboração desse trabalho não foi possível quantificar um dano real ao isolamento interno, uma vez que nenhum dos TCs submetidos aos ensaios de campo apresentou algum tipo de defeito ou foi retirado para realizar ensaios mais precisos em laboratório. Outros ensaios em campo (Análise do óleo isolante e descargas parciais) foram realizados com a finalidade de avaliar o isolamento interno, todavia os resultados não apresentaram anormalidades e/ou indicativos de defeito. Esses TCs ensaiados continuam em operação e sendo observados. Nenhum método de monitoramento foi instalado nestes equipamentos até o término deste trabalho.

Embora, durante este trabalho, a existência de transitórios eletromagnéticos sobre os TCs tenham sido medidos e, com certa restrição, quantificados e ainda estudado modos de como estes eventos podem danificar o isolamento interno, não é possível avaliar com clareza e quantificar este dano com os dados atuais, sendo necessário investigações complementares e até novas etapas de medição a fim de entender de forma mais clara como estes eventos podem contribuir para a redução de suportabilidade de sistemas de isolamentos de equipamentos de potência, e assim impactar diretamente em sua vida útil.

5.1. Trabalhos Futuros

Durante a elaboração deste trabalho, surgiram questionamentos que não foram respondidos em tempo hábil e impedidos devido a algumas limitações operacionais,

como realizar desligamentos no sistema elétrico, mobilização de pessoal para ensaios e até mesmo custo de viagens para medições em campo.

- Um dos fatores que ainda não está claro para o meio científico que pesquisa falhas em TCs é como mensurar o dano ao isolamento interno por uma fonte de sobretensão externa, e até mesmo por outros agentes agressores.
- A necessidade de conhecer melhor o efeito da estrutura em que o TC é instalado, a forma como essa se comporta frente a um evento transitório e a possibilidade de haver uma interação entre essa impedância com o a impedância natural do TC.
- Avaliar diferentes arranjos de circuitos para o modelo do TC, podendo ser diferentes combinações que resultam em respostas similares.
- Implementar o modelo elétrico da estrutura metálica em simulações computacionais.
- Investigar o comportamento, e se existe alguma concentração, de campos elétricos internos para fenômenos rápidos de tensão, principalmente para os impulsos sucessivos oriundos de manobras em chaves seccionadoras.
- Estudar o efeito térmico de múltiplos impulsos de corrente no isolamento interno, principalmente nos pontos de conexão entre os terminais de alta tensão e as camadas externas do isolamento de papel-óleo nos TC do tipo “top core”, que atualmente é realizado através de solda elétrica. Este pode ser um ponto de fragilidade no projeto, já que valores elevados de corrente transitória trafega por esses condutores.
- Avaliar a possibilidade de aplicação do método de medição proposto para outros equipamentos de potência, principalmente transformadores de instrumentos.
- Avaliar a utilização de outros elementos sensores para a medição de transitórios em campo, como por exemplo, bobinas de Rogowski e Shunts indutivos.
- Avaliar a influência de diferentes modelos utilizados para representar a SE e os impactos na simulação do transitório sobre o TC.

6. Bibliografia

- [1] MARTINS, H. J. A., SOUZA, D. S., DELGADO, R. S., MENEZES, R. C., *Medição de transitórios de tensão em transformadores de corrente, classe 550 kV, gerados por manobras de seccionadores, SE Cuiabá-MT*, Relatório Técnico CEPEL, Rio de Janeiro 2017.
- [2] REYES, O., GARCIA-COLON, V. R., LARA, H., ROBLE, E., GUZMÁN, M., ELIZARRARAZ, F., MARTÍNEZ, J. C., “Abnormal Failure Rate on High Voltage Current Transformers Affected by Environmental Conditions”, *IEEE*, 2008.
- [3] FREIRE, A. R. F., da SILVA, P. T., CARVALHO JR., A. V., FILHO, F. A., COSTA, J. M. S. C., “Manobras de Chaves Seccionadoras com Tensão e Solicitações de Alta Frequência nos Transformadores de Corrente”, *Décimo Segundo Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ*, Foz do Iguaçu – PR, 20 a 24 de maio de 2007
- [4] CARVALHO, F. M. S., “Transformadores de Corrente”, In: FRONTIN, S. O., *Equipamentos de Alta Tensão – Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas*, 1 ed, capítulo 8, Brasília, GOYA Editora, 2013.
- [5] FILHO, J. M., *Manual de Equipamentos Elétricos*, 3 ed, Grupo Editorial Nacional - LTC, 2005
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6856: *Transformador de Corrente – Especificações e ensaios*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.
- [7] ABB HIGH VOLTAGE PRODUCTS. *Instrument Transformers – Application Guide*, 3 ed, Ludvika, Suíça, 2009.
- [8] SPRESSOLA, F. E., 2011, *Avaliação do Comportamento Térmico de Transformadores de Corrente de Extra-alta Tensão Isolados a Papel Óleo*. Dissertação de M. Sc., UNIFEI, Itajubá, Minas Gerais, Brasil.
- [9] CIGRÉ SC A3. *Technical Brochure 394 – State of the Art of Instrument Transformers*. CIGRÉ 2009 [ISBN: 978-2-85873-081-0]
- [10] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa N°674/2015*. ANEEL. 2015.
- [11] CIGRÉ WG A3.06. *Technical Brochure 512 - Final Report of the 2004-2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment*. CIGRÉ 2012. (ISBN: 978- 2- 85873- 205-0).
- [12] RASHKES, V. S., ZILES, L. D., “Very High Frequency Overvoltages at Open Air EHV Substations During Disconnect Switch Operations”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.11, N. 3, pp. 1618-1623. Julho. 1996.
- [13] CARSIMAMOVIC, S., GACANOVIC, R., BAJRAMOVIC, Z., VALEDAR, M., LJEVAK, M., & OSMOKROVIC, P. (2006). “Switching Overvoltages In Air-Insulated

Substation (AIS) Due to Disconnecter and Circuit Breakers Switching”. *GIGRÉ C4-301*. CIGRÉ 2006.

[14] BOYLE, J. R., CUMMINGS, H., “The Tennessee Valley Authority’s (TVA’s) Experience and Action Plans with Freestanding Oil-Filled Current Transformers (CT’s)”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol 3, N. 4, pp. 1769-1773. Outubro 1988.

[15] DEL POZO, M. D., ESTEBAN, D. A., ISSOURIBEHRE, P. E., BARBERA, G. A., FUNES, A., LEDESEMA, A., “Field Measurements and Modelling of High Frequency Transients During Disconnect Switch Operations in EHV Substations. Assessment of Their Effects on Current Transformers”. *CIGRÉ A3-207*. CIGRÉ 2010.

[16] HAUSCHILD, W., LEMKE, E., *High-Voltage and Measuring Techniques*. 1 ed. Editora Springer. 2014.

[17] HAEFELY HIPOTRONICS. Damped Capacitive Impulse Divider. Disponível em: https://hubbellcdn.com/brochure/HAEFELY_%20LL_CR_151207_BROCHURE.pdf Acesso em: 28 Jun 2018.

[18] YU, Y., ZANJI, W., CHONG, S., “A Circuit Model in a Wide Frequency Range for Power Transformer and Analysis of Its Characteristics” *IEEE*, China, 2009.

[19] SOUZA, D. S., DELGADO, R. S., SANTOS, L. E., *Caracterização de Transformador de Corrente para Medições de Sobreensões Transitórias a Partir da Corrente de Terra*, Relatório Técnico CEPEL, Rio de Janeiro 2018.

[20] AZEVEDO, R. M., RODRIGUES, M. G., CERQUEIRA, W., “Um Método Prático para Representação de Transformadores de Potência Baseado em Medições de Resposta em Frequência”. *Décimo Quinto Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ*, Foz do Iguaçu – PR, 19 a 23 de maio de 2013.

[21] VIOLIN, A., D’AJUZ, A., LACORTE, M., “Subestações de Alta Tensão”, In: FRONTIN, S. O., *Equipamentos de Alta Tensão – Prospeção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas*, 1 ed, capítulo 2, Brasília, GOYA Editora, 2013.

[22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR-IEC 60060-1: Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão. Parte 1: Definições gerais e requisitos de ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.

[23] REIS, J. L., 2013, *Coordenação de Isolamento para Surtos de Frente Rápida Utilizando o Método da Densidade Espectral de Energia*. Dissertação de M. Sc., UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

[24] CIGRÉ JWG A2/C4-03. *Technical Brochure 012 – Interação entre Transformadores e o Sistema Elétrico com Foco nos Transitórios Eletromagnéticos de Alta Frequência*. CIGRÉ-Brasil 2011.

[25] CIGRÉ JWG A2/C4.39. *Technical Brochure 577A – Electrical Transient Interaction Between Transformers and the Power System. Part 1 - Expertise*. CIGRÉ 2014. (ISBN : 978-2-85873272-2)

[26] SIMA, W., SUN, P., YANG, Q., YUAN, T., LU, C., YANG, M., “Study on the Accumulative Effect of Repeated Lightning Impulses on Insulation Characteristics of

Transformer Oil Impregnated Paper”. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.21, N. 4, pp. 1933-1941. Agosto. 2014.

[27] VANDERMAAR, A. J., WANG, M., NEILSON, J. B., SRIVASTAVA, K. D., “The Electral Breakdown Characteristics of Oil-Paper Insulation Under Steep Front Impulse Voltage”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, N. 4, pp. 1926-1935. Outubro. 1994.

[28] SHARATH, B., USA, S., “Prediction of Impulse Voltage-time Characteristics of Air and Oil Insulation for Different Wavefronts”. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.16, N. 6, pp. 1693-1697. Dezembro. 2009

[29] KRITHIKA, G., USA, S., “Volt-Time Characteristics of OIL Under Nom-Standard Impulses”, *IEEE 1st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems*. CATCON 2013, pp. 281-285. 2013

APÊNDICE A

```

C dT>< Tmax >< Xopt >< Copt ><Epsiln>
1.E-9 5.E-5 1.E-12
500 1 1 1 1 0 0 1 0

/MODELS
MODELS
INPUT
M0001A {v(X0009A)}
M0001B {v(X0009B)}
M0001C {v(X0009C)}
M0002A {v(X0010A)}
M0002B {v(X0010B)}
M0002C {v(X0010C)}
OUTPUT
RARCOA
RARCOB
RARCO
MODEL RARCO_FECHA

comment *****
*
* Function: Calcula a Resistencia do Arco para as trs fases
* Inputs : Tensão nos terminais do arco
* Output : Rarco
*
***** endcomment

INPUT V1[1..3] -- Tensão no terminal 1 do arco [V]
      V2[1..3] -- Tensão no terminal 2 do arco [V]

DATA P0 -- Valor de potencia base do arco [W]
     T0arco -- constante do arco [s]
     Beta -- expoente de P:=P0*G**Beta [adim]
     Alfa -- expoente de Tarco:=Tarco0*G**Alfa [adim]
     TiniA -- inicio da operação da chave - fase A [s]
     TiniB -- inicio da operação da chave - fase B [s]
     TiniC -- inicio da operação da chave - fase C [s]
     Toper -- tempo de operação da chave - fase A [s]
     Visol -- nivel de isolamento posição aberta [V]

VAR Varco[1..3], Vchave[1..3] -- tensão no arco [V]
    Parc -- potência no arco - auxiliar [W]
    Iarc -- auxiliar [A]
    RA2 -- auxiliar [Ohms]
    RA[1..3] -- resistencia do arco [Ohms]
    G -- condutancia [Siemens]
    Ga -- auxiliar [Siemens]
    Tarco -- cte de tempo do arco [s]
    Vsup[1..3] -- tensão suportavel entre contatos [V]
    Tini[1..3] -- inicio da operação de cada fase [s]
    Arco[1..3] -- indica a ocorrencia do arco

```

```

OUTPUT  RA[1..3]

INIT
RA[1..3]:= 5E12
Arco[1..3] := OFF
    Tini[1..3] :=[TiniA TiniB TiniC]
    histdef(Varco[1..3]):=V1[1..3] - V2[1..3]
Vsup[1..3] :=0.0
Iarc:=0.0
ENDINIT

EXEC
for i:=1 to 3 do
    Vchave[i]:=V1[i] - V2[i]
    LAPLACE(Varco[i]/Vchave[i]):=(1|S0)/(1|S0+0.0000001|S1)
if t>=Tini[i] then
    -----
if t<=(Tini[i]+Toper) then
    Vsup[i]:=Visol-Visol*(t-Tini[i])/Toper {min:0.0,max:Visol}
    Iarc:=Varco[i]/RA[i]
    -----
if Abs(Varco[i])>=Vsup[i] then
    Arco[i]:= ON
else
if Abs(Iarc)<0.001 then
    RA[i]:=5E12
    Arco[i]:= OFF
endif
endif
    -----
if Arco[i] then
    G:=1/RA[i]
    Tarco:=T0arco*(G**Alfa)
    Ga:=( (Iarc**2)/(P0*(G**Beta))-G)*(1-1/exp(timestep/Tarco))
    RA2:=1/ABS(G+Ga)
    RA[i]:=RA2 {min:0.001,max:5E12}
endif
    -----
else
    RA[i]:=5E12
endif
endif
endfor
ENDEXEC

ENDMODEL
USE RARCO_FECHA AS ARCO
INPUT
V1[1]:= M0001A
V1[2]:= M0001B
V1[3]:= M0001C
V2[1]:= M0002A

```

```

V2[2]:= M0002B
V2[3]:= M0002C
DATA
  P0:=      4.E7
  T0arco:=   1.5E-6
  Beta:=     0.68
  Alfa:=     0.17
  TiniA:=    1.E-5
  TiniB:=    5.E-5
  TiniC:=    9.E-5
  Toper:=    1.5
  Visol:=    8.9E5
OUTPUT
  RARCOA:=RA[1]
  RARCOB:=RA[2]
  RARCOC:=RA[3]
ENDUSE
RECORD
  ARCO.RA[1] AS RA
  ARCO.RA[2] AS RB
  ARCO.RA[3] AS RC
  ARCO.Vsup[1] AS VsupA
  ARCO.Vsup[2] AS VsupB
  ARCO.Vsup[3] AS VsupC
  ARCO.Varco[1] AS VarcoA
  ARCO.Varco[2] AS VarcoB
  ARCO.Varco[3] AS VarcoC
ENDMODELS
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C
3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
X0003A      .005      0
X0003B      .005      0
X0003C      .005      0
X0005A      7.5E-5      0
X0005B      7.5E-5      0
X0005C      7.5E-5      0
X0004A      7.5E-5      0
X0004B      7.5E-5      0
X0004C      7.5E-5      0
X0007A      7.5E-5      0
X0007B      7.5E-5      0
X0007C      7.5E-5      0
X0010A      7.5E-5      0
X0010B      7.5E-5      0
X0010C      7.5E-5      0
X0009A      7.5E-5      0
X0009B      7.5E-5      0
X0009C      7.5E-5      0
TCA  TC_4A      2.1 .0037 .0011      0

```

TCB	TC_4B	2.1 .0037 .0011	0
TCC	TC_4C	2.1 .0037 .0011	0
X0012AX0011A		.0006	0
X0012BX0011B		.0006	0
X0012CX0011C		.0006	0
X0011A		7.5E-5	0
X0011B		7.5E-5	0
X0011C		7.5E-5	0
X0012A		7.5E-5	0
X0012B		7.5E-5	0
X0012C		7.5E-5	0
X0013AX0014A		.0006	0
X0013BX0014B		.0006	0
X0013CX0014C		.0006	0
X0015A		7.5E-5	0
X0015B		7.5E-5	0
X0015C		7.5E-5	0
X0016A		7.5E-5	0
X0016B		7.5E-5	0
X0016C		7.5E-5	0
X0014A		7.5E-5	0
X0014B		7.5E-5	0
X0014C		7.5E-5	0
X0013A		7.5E-5	0
X0013B		7.5E-5	0
X0013C		7.5E-5	0
X0018A		7.5E-5	0
X0018B		7.5E-5	0
X0018C		7.5E-5	0
X0017A		7.5E-5	0
X0017B		7.5E-5	0
X0017C		7.5E-5	0
X0019A		7.5E-5	0
X0019B		7.5E-5	0
X0019C		7.5E-5	0
X0020A		7.5E-5	0
X0020B		7.5E-5	0
X0020C		7.5E-5	0
X0038A		2.1 .0037 .0011	0
X0038B		2.1 .0037 .0011	0
X0038C		2.1 .0037 .0011	0
X0022AX0023A		.0006	0
X0022BX0023B		.0006	0
X0022CX0023C		.0006	0
X0023A		7.5E-5	0
X0023B		7.5E-5	0
X0023C		7.5E-5	0
X0022A		7.5E-5	0
X0022B		7.5E-5	0
X0022C		7.5E-5	0
X0027A		7.5E-5	0
X0027B		7.5E-5	0
X0027C		7.5E-5	0

X0026A		7.5E-5		0
X0026B		7.5E-5		0
X0026C		7.5E-5		0
X0030A		.005		0
X0030B		.005		0
X0030C		.005		0
X0037A	2.1	.0037	.0011	0
X0037B	2.1	.0037	.0011	0
X0037C	2.1	.0037	.0011	0
X0006A		7.5E-5		0
X0006B		7.5E-5		0
X0006C		7.5E-5		0
-1VCONDAX0031A	133.33	3.E8	100. 1 0	0
-2VCONDBX0031B	133.33	3.E8	100. 1 0	0
-3VCONDCX0031C				0
-1X0033AX0043A	133.33	3.E8	100. 1 0	0
-2X0033BX0043B	133.33	3.E8	100. 1 0	0
-3X0033CX0043C				0
X0046A	2.1	.0037	.0011	0
X0046B	2.1	.0037	.0011	0
X0046C	2.1	.0037	.0011	0
X0025A		7.5E-5		0
X0025B		7.5E-5		0
X0025C		7.5E-5		0
X0024A		7.5E-5		0
X0024B		7.5E-5		0
X0024C		7.5E-5		0
X0034AX0033A	133.33			0
X0034BX0033B	133.33			0
X0034CX0033C	133.33			0
X0031AFONTEA	133.33			0
X0031BFONTEB	133.33			0
X0031CFONTEC	133.33			0
91X0010AX0009ATACS	RARCOA			1
X0010AX0009ANAME	PHASOR 5.E12			
91X0010BX0009BTACS	RARCOB			1
X0010BX0009BNAME	PHASOR 5.E12			
91X0010CX0009CTACS	RARCOC			1
X0010CX0009CNAME	PHASOR 5.E12			
\$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\ALTO_L1.lib, X0044A, X0044B, X0044C, X0042A, X0042B \$\$				
, X0042C				
\$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L2.lib, X0001A, X0001B, X0001C, X0002A, X0002B \$\$				
, X0002C				
\$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L3.lib, X0003A, X0003B, X0003C, X0001A, X0001B \$\$				
, X0001C				
\$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L4.lib, X0005A, X0005B, X0005C, X0003A, X0003B \$\$				
, X0003C				
\$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\DESC__L5.lib, X0039A, X0039B, X0039C, X0040A, X0040B \$\$				
, X0040C				
\$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\DESC__L6.lib, X0001A, X0001B, X0001C, VCONDA, VCONDB \$\$				
, VCONDC				
\$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\SUBID_L7.lib, X0047A, X0047B, X0047C, BARRAA, BARRAB \$\$				
, BARRAC				

```

$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L8.lib, X0008A, X0008B, X0008C, X0009A, X0009B $$
, X0009C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L9.lib, X0010A, X0010B, X0010C, TCA###, TCB### $$
, TCC###
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L10.lib, TCA###, TCB###, TCC###, X0011A, X0011B
$$
, X0011C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L11.lib, X0015A, X0015B, X0015C, X0048A, X0048B
$$
, X0048C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L12.lib, X0039A, X0039B, X0039C, X0004A, X0004B
$$
, X0004C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L13.lib, X0046A, X0046B, X0046C, X0006A, X0006B
$$
, X0006C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L14.lib, X0013A, X0013B, X0013C, X0046A, X0046B
$$
, X0046C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L15.lib, X0037A, X0037B, X0037C, X0014A, X0014B
$$
, X0014C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\DESC__L16.lib, X0029A, X0029B, X0029C, X0043A, X0043B
$$
, X0043C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L17.lib, X0018A, X0018B, X0018C, X0037A, X0037B
$$
, X0037C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L18.lib, X0021A, X0021B, X0021C, X0017A, X0017B
$$
, X0017C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L19.lib, X0038A, X0038B, X0038C, X0020A, X0020B
$$
, X0020C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L20.lib, X0019A, X0019B, X0019C, X0021A, X0021B
$$
, X0021C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L21.lib, X0007A, X0007B, X0007C, X0008A, X0008B
$$
, X0008C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L22.lib, X0028A, X0028B, X0028C, X0029A, X0029B
$$
, X0029C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L23.lib, X0030A, X0030B, X0030C, X0026A, X0026B
$$
, X0026C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L24.lib, X0027A, X0027B, X0027C, X0045A, X0045B
$$
, X0045C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\DESC__L25.lib, X0045A, X0045B, X0045C, X0044A, X0044B
$$
, X0044C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L26.lib, X0012A, X0012B, X0012C, X0016A, X0016B
$$
, X0016C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\ALTO_L27.lib, X0041A, X0041B, X0041C, X0040A, X0040B $$
, X0040C

```

```

$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BARRA_3.lib, X0032A, X0032B, X0032C, BARRAA, BARRAB $$
, BARRAC
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\SUBID_L28.lib, X0048A, X0048B, X0048C, BARRBA, BARRBB
$$
, BARRBC
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L29.lib, X0029A, X0029B, X0029C, X0030A, X0030B
$$
, X0030C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L30.lib, X0047A, X0047B, X0047C, X0024A, X0024B
$$
, X0024C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\DESC__L31.lib, X0021A, X0021B, X0021C, X0042A, X0042B
$$
, X0042C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BARRA_3.lib, X0035A, X0035B, X0035C, BARRBA, BARRBB $$
, BARRBC
C ALTO_
C SUBIDA_3
C BAIXO_
C DESC_MAIOR_3F
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\DESC__L32.lib, X0008A, X0008B, X0008C, X0041A, X0041B
$$
, X0041C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L33.lib, X0025A, X0025B, X0025C, X0023A, X0023B
$$
, X0023C
$INCLUDE, C:\ATP57\Atp\BAIXO_L34.lib, X0022A, X0022B, X0022C, X0038A, X0038B
$$
, X0038C
/SWITCH
C < n 1>< n 2><Tclose><Top/Tde><Ie><Vf/CLOP >< type >
X0004AX0005A -1. 1.E3 0
X0004BX0005B -1. 1.E3 0
X0004CX0005C -1. 1.E3 0
X0006AX0007A -1. 1.E3 0
X0006BX0007B -1. 1.E3 0
X0006CX0007C -1. 1.E3 0
X0014AX0013A -1. 1.E3 0
X0014BX0013B -1. 1.E3 0
X0014CX0013C -1. 1.E3 0
X0017AX0018A -1. 1.E3 0
X0017BX0018B -1. 1.E3 0
X0017CX0018C -1. 1.E3 0
X0016AX0015A 1.E3 -1. 0
X0016BX0015B 1.E3 -1. 0
X0016CX0015C 1.E3 -1. 0
X0023AX0022A -1. 1.E3 0
X0023BX0022B -1. 1.E3 0
X0023CX0022C -1. 1.E3 0
X0024AX0025A -1. 1.E3 0
X0024BX0025B -1. 1.E3 0
X0024CX0025C -1. 1.E3 0
X0026AX0027A -1. 1.E3 0
X0026BX0027B -1. 1.E3 0

```

```

X0026CX0027C      -1.      1.E3      0
X0036AX0010A      -1.      1.      1
X0036BX0010B      -1.      1.      1
X0036CX0010C      -1.      1.      1
X0020AX0019A      -1.      1.E3      0
X0020BX0019B      -1.      1.E3      0
X0020CX0019C      -1.      1.E3      0
TC_4A              MEASURING      1
TC_4B              MEASURING      1
TC_4C              MEASURING      1
/SOURCE
C < n 1><><Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP
>
14X0034A 449073.12      60.      -1.      100.
14X0034B 449073.12      60.      -120.      -1.      100.
14X0034C 449073.12      60.      -240.      -1.      100.
14FONTEA 449073.12      60.      -1.      100.
14FONTEB 449073.12      60.      -120.      -1.      100.
14FONTEC 449073.12      60.      -240.      -1.      100.
14X0036A 449073.12      60.      180.      -1.      100.
14X0036B 449073.12      60.      60.      -1.      100.
14X0036C 449073.12      60.      -60.      -1.      100.
/OUTPUT
BARRBABARRBBBARRBCBARRAABARRABBARRACVCONDAVCONDBVCONDCFONTEAFONTEBFONTECTCA
BLANK MODELS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

Valores para o modelo do arco elétrico.

MODEL: RARCO_FECHA		
Attributes		
DATA	UNIT	VALUE
T0arco		1.5E-6
Beta		0.68
Alfa		0.17
TiniA		1E-5
TiniB		5E-5
TiniC		9E-5
Toper		1.5
Visol		890000

Figura A.1 –Parâmetros((variáveis) do modelo do arco no ATPDraw/ATP

Configuração dos trechos de linha/cabo

Model Data Nodes

System type
Name: ☒ Template

Overhead Line ☐ Transposed
☒ Auto bundling
☒ Skin effect
☐ Segmented ground
☐ Real transf. matrix

#Ph: 3

Units
☒ Metric
☐ English

Standard data
Rho [ohm*m] 1000
Freq. init [Hz] 0.01
Length [km] 1
☐ Set length in icon

Model Type
☐ Bergeron
☐ PI
☒ JMarti
☐ Semlyen
☐ Noda

Data
Decades 20 Points/Dec 10
Freq. matrix [Hz] 0 Freq. SS [Hz] 60
☒ Use default fitting

Figura A.2 – Configuração do modelo de linha

Line/Cable Data: DESC_

Model	Data	Nodes								
	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	1	1.397	2.196	0.0338	-8.5	17.75	17.75	45.7	0	2
2	2	1.397	2.196	0.0338	0	17.75	17.75	45.7	0	2
3	3	1.397	2.196	0.0338	8.5	17.75	17.75	45.7	0	2

Figura A.3 – Configuração dos dados dos condutores referente ao trecho DESC_

Line/Cable Data: BAIXO

Model	Data	Nodes								
#	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	1	1.397	2.196	0.0338	-8.5	8.5	8.5	45.7	0	2
2	2	1.397	2.196	0.0338	0	8.5	8.5	45.7	0	2
3	3	1.397	2.196	0.0338	8.5	8.5	8.5	45.7	0	2

Figura A.4 – Configuração dos dados dos condutores referente ao trecho BAIXO

Line/Cable Data: SUBID

Model	Data		Nodes							
	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	1	1.397	2.196	0.0338	-8.5	12.75	12.75	45.7	0	2
2	2	1.397	2.196	0.0338	0	12.75	12.75	45.7	0	2
3	3	1.397	2.196	0.0338	8.5	12.75	12.75	45.7	0	2

Figura A.5 – Configuração dos dados dos condutores referente ao trecho SUBID

Line/Cable Data: ALTO

Model Data Nodes										
	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	1	0.37	1.4805	0.0747	-8.5	27	27	45.7	45	4
2	2	0.37	1.4805	0.0747	0	27	27	45.7	45	4
3	3	0.37	1.4805	0.0747	8.5	27	27	45.7	45	4

Figura A.6 – Configuração dos dados dos condutores referente ao trecho ALTO